

AI and 6G Into the Metaverse: Fundamentals, Challenges and Future Research Trends

M. Zawish et al., "AI and 6G Into the Metaverse: Fundamentals, Challenges and Future Research Trends," in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 5, pp. 730-778, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3349465. keywords: {6G mobile communication;Surveys;Wireless

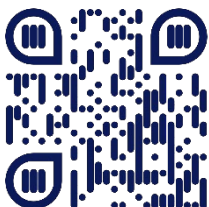
Статья опубликована: 29 января 2024 г.

Относится к специальному выпуску Software Engineering and Data Science II

Тема статьи:
Искусственный интеллект и 6G в метавселенной- основы, вызовы и будущие тенденции исследований



МАТРЕШКА
РЕНЕССАНС



Сигнальный перевод подготовлен экспертом рабочей группы:
Куприяновский В.П. v.kupriyanovsky@rut.digital 2023 г.



Рабочая группа по сквозным цифровым технологиям
Совета по финансово-промышленной и инвестиционной политике
Торгово-промышленной палаты Российской Федерации

При поддержке:

FMENGINEERING

NEW REALITY

immersive technologies

Абстракт:

С тех пор, как Facebook был переименован в Meta, усилилось много внимания, дебатов и исследований о том, что такое Метавселенная, как она работает и возможные способы ее использования. Ожидается, что Метавселенная станет континуумом быстро развивающихся технологий, сценариев использования, возможностей и опыта, которые составят ее для следующей эволюции Интернета. Несколько исследователей уже изучили литературу по искусственному интеллекту (ИИ) и беспроводным коммуникациям при реализации Метавселенной. Однако в связи с быстрым появлением и непрерывной эволюцией технологий существует необходимость во всестороннем и глубоком исследовании роли ИИ, 6G и их связи в реализации иммерсивного опыта Метавселенной. Поэтому в этом обзоре мы сначала познакомим вас с предысторией и текущим прогрессом в области дополненной реальности (AR), виртуальной реальности (VR), смешанной реальности (MR) и пространственных вычислений, а затем технических аспектов искусственного интеллекта и 6G. Затем мы исследуем роль ИИ в Метавселенной, рассматривая современное состояние в области глубокого обучения, компьютерного зрения и периферийного ИИ, чтобы извлечь требования 6G в Метавселенной. Далее мы исследуем перспективные услуги 5G/6G на пути к Метавселенной, а затем определяем роль ИИ в сетях 6G и сети 6G для ИИ для поддержки приложений Метавселенной, а также потребность в устойчивости в Метавселенной. Наконец, мы перечисляем существующие и потенциальные приложения, сценарии использования и проекты, чтобы подчеркнуть важность прогресса в Метавселенной. Кроме того, для того, чтобы предоставить исследователям потенциальные направления исследований, мы подчеркиваем проблемы, пробелы в исследованиях и уроки, извлеченные из обзора литературы по вышеупомянутым технологиям.



РАЗДЕЛ I.

Знакомство

В 2021 году Метавселенная начала влиять на реальный мир благодаря: i) образу жизни во время пандемии и ii) объявлениям Meta, Amazon, Apple, Netflix и Google (MAANG) о выпуске функций и проектов, связанных с Метавселенной, для своих пользователей. С тех пор Метавселенная привлекла к себе внимание как со стороны академических кругов, так и со стороны промышленности. На данный момент Метавселенную можно рассматривать как пул пространств расширенной реальности (XR)¹, в которых люди и их цифровые двойники взаимодействуют в полностью иммерсивной манере [1], [2], [3], [4]. Согласно недавнему опросу², большинство экспертов в области технологий считают, что к 2040 году Метавселенная станет более совершенной и бесшовной в своей работе, чтобы люди во всем мире могли в полной мере использовать ее возможности полного погружения как неотъемлемую часть своей повседневной жизни. По сути, ожидается, что Метавселенная объединит все основные аспекты киберпространства или всемирной паутины, такие как 5G/6G, облачные и периферийные вычисления, социальные сети, онлайн-игры, дополненная реальность (AR), виртуальная реальность (VR), криптовалюты, а также платформы и приложения искусственного интеллекта (AI)/машинного обучения (ML)/глубокого обучения (DL), чтобы пользователи могли взаимодействовать виртуально [1], [5], [6], [7], [8].

Некоторые из приложений Метавселенной на ранних стадиях, а именно Roblox,³ VRChat,⁴ Zepeto⁵ или Second Life⁶, позволяют пользователям жить в «разных» или смоделированных жизнях, например, заводить друзей и общаться с новыми аватарами. Эти платформы включили AR, VR и MR в качестве нескольких элементов Метавселенной. Технология виртуальной реальности заменяет реальный мир вокруг пользователей компьютерной цифровой сценой с использованием различного программного обеспечения и коммуникационных устройств, таких как шлем виртуальной реальности (HMD). В то время как в дополненной реальности виртуальный мир органично связан с реальным, чтобы создавать новые интерактивные впечатления. Наконец, MR представляет собой комбинацию AR и VR и лежащих в их основе технологий. Стоит также отметить, что популярность этих технологий привела к повсеместной доступности AR и VR-оборудования по разумным ценам при постоянном улучшении качества обслуживания (QoE) для их пользователей [9].

Тем не менее, для достижения вычислительной мощности и скорости связи, которые требуются сервисам виртуальной реальности для обеспечения плавного и захватывающего опыта, большинство шлемов виртуальной реальности по-прежнему требуют, чтобы пользователи были привязаны к ПК или игровой консоли. Единственным устройством, которое освободилось от этого ограничения, является Oculus Quest 2 от Meta. *7 В течение следующих нескольких лет будет внесен ряд улучшений в визуальный контент и неограниченное взаимодействие с мобильными устройствами, поскольку процессоры станут быстрее, а технологии беспроводной связи станут более быстрыми.* В частности, с появлением 5G произойдет распространение устройств, подключенных к сети, что окажет глубокое влияние на рост Метавселенной [10]. Технология 5G обеспечивает связь и обмен информацией в режиме реального времени между всеми подключенными устройствами благодаря низкой задержке. Очевидно, что 5G предлагает более высокую скорость, чем 4G, но, что самое важное, он предлагает множество других преимуществ, которые выходят за рамки одной только скорости [11]. В частности, разработчики метавселенной смогут извлечь выгоду из низкой задержки 5G, создавая приложения, которые могут передавать контент на 360° практически в режиме реального времени.

Метавселенная также будет способствовать распространению тенденции интеллектуальных систем, ориентированных на человека и данные. Эта тенденция накладывает ряд ограничений на существующие системы связи 5G, делая их менее эффективными и ненадежными. Например, учитывая требования к задержке 0,1 мс для тактильных приложений Метавселенной, таких как телепортация или телеоперации, 5G может обеспечить задержку радиointерфейса только <1 мс, что становится незначительным для таких приложений [12], [13], [14], [15]. Более того, по данным Cisco [16], за последние пять лет трафик мобильной передачи данных вырос в 17 раз и, как ожидается, продолжит расти. В частности, по состоянию на 2022 год трафик 5G составит 12% от общего мобильного трафика в мире. Сети 5G были спроектированы таким образом, чтобы иметь возможность охватывать большие области спектра, такие как миллиметровые волны (до 300 ГГц), и, как следствие, могут обрабатывать большие объемы беспроводного трафика [17], [18], [19], [20].

Поскольку Метавселенная принесет несколько приложений, которые могут потребовать скорости передачи данных выше, чем Тбит/с, что вряд ли произойдет с системами миллиметрового диапазона, такими как голографическое телеприсутствие (НТ), тактильная сенсорная связь, интерфейс мозг-компьютер (BCI) и XR [21], [22], [23]. В результате исследователи обратились к изучению терагерцового (ТГц) диапазона частот (0,1–10 ТГц) для достижения целей скорости передачи данных в Тбит/с. Ожидается, что система связи 6G обеспечит скорость передачи данных 1 Тбит/с, работая с полосой пропускания 3 ТГц, для поддержки приложений с интенсивным использованием данных, таких как онлайн-игры, потоковая передача видео высокой четкости в реальном времени, передача голографического контента и взаимодействие с аватарами в режиме реального времени [24], [25], [26], [27]. 6G также обеспечит повсеместное покрытие и сверхнизкую задержку (менее 1 мс), а также поддержку мобильности со скоростью около 100 км/ч за счет интеграции сетей космос-воздух-земля-море [28], [29], [30].

Тем не менее, приложения Метавселенной, такие как виртуальное образование и обучение, точная навигация и локализация, иммерсивные игры и приложения для удаленного здравоохранения, будут поддерживаться искусственным интеллектом и 6G, что сделает Метавселенную более успешной. В частности, современные технологии компьютерного зрения могут быть использованы для создания анимированных 3D-моделей людей или реалистичных анимированных лиц и даже для создания голограмм [31], [32], [33]. Однако ключевая проблема в использовании 3D-контента для сервисов Метавселенной заключается в масштабируемости существующей инфраструктуры. Таким образом, рост Метавселенной делает крайне важной разработку ключевых инструментов и инфраструктуры, позволяющих разработчикам Метавселенной создавать лучшие и более масштабируемые 3D/AR/VR-опыты, независимо от платформ или целей. В принципе, исследователям необходимо сделать скачок от парадигмы контролируемого обучения ИИ и прибегнуть к диверсифицированным стратегиям обучения, таким как обучение с подкреплением и самоконтролируемое обучение, чтобы масштабироваться в среде Метавселенной. Более того, возможности периферийных вычислений сетей 6G могут быть объединены с искусственным интеллектом для обеспечения периферийного интеллекта, тем самым уменьшая сетевые задержки и проблемы конфиденциальности для улучшения качества обслуживания в метавселенной [34]. *Руководствуясь существующими технологиями и прогнозируемыми проблемами, мы изучаем современное состояние ИИ и 6G в контексте Метавселенной, чтобы ответить на следующий вопрос: как обеспечить лучший и устойчивый опыт работы в Метавселенной, используя продолжающийся прогресс в области искусственного интеллекта, 6G и их взаимосвязи?* В следующих подразделах мы рассмотрим соответствующие опросы и опишем вклад и структуру этого опроса.

А. Связанные опросы

В этом подразделе мы рассматриваем современные исследования, проведенные по нескольким технологиям в контексте Метавселенной. В последнее время проводится множество опросов и научных исследований с целью изучения потенциальной технологии, ее реализации, применения и будущих направлений исследований [1], [2], [3], [4], [6], [10], [30], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42]. Например, Yang et al., [35] исследуют интегрированную роль ИИ и блокчейна для сред Метавселенной. В частности, авторы в [35] предполагают, что Метавселенная — это 3D-платформа виртуальной реальности, которая охватывает все аспекты социальной и экономической деятельности и позволяет каждому участвовать в этой деятельности в безопасной и свободной среде, которая преодолевает ограничения нашего реального мира за счет использования технологий искусственного интеллекта и блокчейна. Аналогичным образом, [2] и [43] исследуют проблемы безопасности и конфиденциальности для пользователей Метавселенной и предлагают потенциальные направления для предоставления безопасных услуг пользователям Метавселенной. С другой стороны, исследователи в работах [3], [36], [37] исследуют роль ИИ в Метавселенной. В частности, [3] исследует существующее состояние ИИ, компьютерного зрения и глубокого обучения в контексте Метавселенной, в то время как [36] и [37] исследуют роль периферийного интеллекта и периферийного ИИ на базе 6G для Метавселенной соответственно. Напротив, авторы в работах [1], [30], [39], [40] тщательно изучают архитектуры и технологии беспроводной связи в поддержку Метавселенной. Например, в [30] рассматриваются достижения в области сверхнадежной связи с низкой задержкой (uRLLC), цифровых двойников и SAGSIN для обеспечения повсеместного интеллекта в Метавселенной, в то время как [40] и [39] представлен обзор мобильных периферийных вычислений (MEC) и Всеобъемлющего Интернета (IoE) для метавселенной. В отличие от предыдущих исследований, авторы в [2], [3], [4], [41], [42] предоставляют обзор социальной, экономической, технологической и цифровой ценности в приложениях Метавселенной. В таблице 2 мы сравниваем и сопоставляем вышеописанное состояние техники с этой статьей с точки зрения различных аспектов Метавселенной.

В. Методология данного обследования

Для обеспечения полноты и актуальности исследуемой литературы наша методология охватывала обширные временные рамки, начиная с января 1995 года по декабрь 2022 года. Подробности представлены в таблице 3. Мы тщательно искали статьи в авторитетных базах данных, включая IEEE Xplore, Scopus, Science Direct и Google Scholar. Отобранные статьи состояли из материалов раннего доступа и опубликованных рецензируемых исследований на технических конференциях и в журналах. Наши процедуры отбора были разработаны таким образом, чтобы сосредоточиться на основных элементах каждой работы, имеющих отношение к темам наших исследований. Мы оценили значимость литературы путем тщательного изучения ее аннотации, введения и заключения. Такой подход позволил нам сохранить высокий стандарт качества и актуальности в отобранной литературе.

ТАБЛИЦА 3 Методология отбора работ

Searching Index	Content and Evaluation
Search Time-period	From: January 1995, To: December 2022
Article Database	IEEE Xplore, Scopus, Science Direct, and Google Scholar.
Articles Type	Early Access and Published Peer-reviewed Technical Conferences and Journals.
Screening Procedures	Each paper's relevance to the research topic is determined by its abstract, introduction, and conclusion.
Search Strings	"6G-powered Edge AI", "XR for Metaverse", "IoT/IoE in Metaverse", "mobile edge computing for Metaverse", "URLLC for VR/XR", "human-centric Metaverse", "user interactions and implementations", "SAGSIN for VR/XR", "blockchain for VR/XR", "digital twin", "social value in AR/VR/XR", "sustainability in AR/VR/XR", etc.

Несмотря на то, что наши поисковые строки соответствовали темам нашей статьи, охватывая ключевые слова, связанные с Метавселенной, искусственным интеллектом, 6G и связанными с ними технологиями, мы позаботились о том, чтобы отобранные работы давали целостное представление об этих предметах. Наша методология охватывает широкий спектр релевантных ключевых слов, включая такие как «Edge AI на базе 6G», «XR для метавселенной», «IoT/IoE в метавселенной», «мобильные периферийные вычисления для метавселенной», «URLLC для VR/XR», «человекоцентричная метавселенная», «взаимодействие с пользователем и реализация», «SAGSIN для VR/XR», «блокчейн для VR/XR», «цифровой двойник», «социальная ценность в AR/VR/XR», «устойчивость в AR/VR/XR», среди прочих. Эти поисковые строки способствовали включению всеобъемлющей и современной литературы, которая соответствует различным аспектам Метавселенной, как обсуждалось в нашем обзорном документе.

С. Вклад и структура данного опроса

Из приведенного выше обсуждения ясно, что некоторые из существующих опросов были сосредоточены на очень узких перспективах искусственного интеллекта, 6G и соответствующих технологий, в то время как другие исследовали роль Метавселенной с точки зрения социальной, экономической и цифровой ценности. В отличие от них, в этом обзоре мы приводим следующие ключевые вклады:

- Мы описываем базовые компоненты Метавселенной, то есть VR, MR, AR и пространственные вычисления. Основы вышеупомянутых технологий представлены для того, чтобы дать читателям представление о технических аспектах и современном состоянии, что приведет к созданию полностью иммерсивной Метавселенной.
- Мы представляем обширный обзор современного состояния ИИ и исследуем роль ИИ в реализации Метавселенной с целью извлечения требований к связи для 6G в Метавселенной. По сути, мы определяем роль ИИ в многоуровневой архитектуре Метавселенной, за которой следуют современные приложения компьютерного зрения, парадигмы обучения и периферийный ИИ для Метавселенной.
- Мы объясняем роль 5G/6G в реализации Метавселенной, сначала отвечая на следующие ключевые вопросы: i) нужен ли 5G/6G час? и ii) *какие услуги 5G/6G может принести в Метавселенную?* Далее мы рассмотрим современное состояние иммерсивных возможностей и голографического телеприсутствия по беспроводной сети, рассматривая исключительно роль 5G-NR, URLLC, mmWave, MEC, THzComms и их взаимодействие.

- Мы также учитываем интегрированную роль искусственного интеллекта и 6G в реализации Метавселенной. В принципе, мы изучаем потенциал ИИ для сетей 6G и сетей 6G для ИИ в поддержку Метавселенной. Затем мы исследуем устойчивость Метавселенной в контексте вышеупомянутых технологий, а затем потенциальные приложения, сценарии использования и текущие проекты. Наконец, мы представляем проблемы и будущие направления исследований, а также уроки, извлеченные из этого опроса.

Остальная часть статьи организована следующим образом. Раздел II включает в себя предысторию и технические аспекты всех соответствующих технологий, включая искусственный интеллект, 6G, VR, MR, AR и пространственные вычисления. В разделе III представлена роль ИИ в Метавселенной, а в разделе IV — роль 5G/6G в Метавселенной. В разделе V подчеркивается интегрированная роль искусственного интеллекта и 6G в контексте Метавселенной, а в разделе VI — перспективы устойчивого развития Метавселенной. Приложения и сценарии использования рассматриваются в Разделе VII, за которыми следует описание проектов в Разделе VIII. Проблемы и будущие направления исследований изложены в Разделе IX, а в Разделе X представлены уроки, извлеченные из этого опроса. Наконец, Раздел XI завершает обзор. На рисунке 2 представлена полная иллюстративная структура нашей статьи.

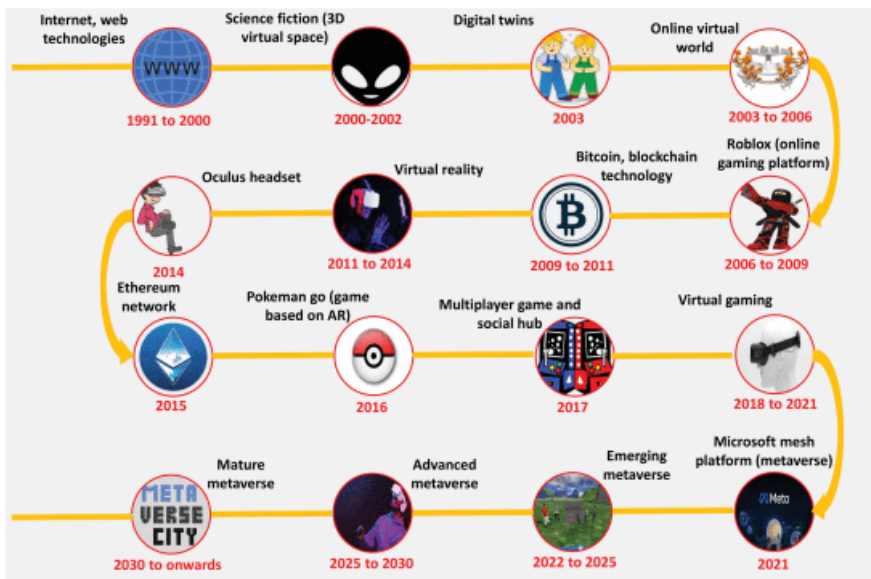


РИСУНОК 1.

Эмпирическое исследование интернет-вторжения в метавселенную представлено в книге «Революция временной шкалы в метавселенной».

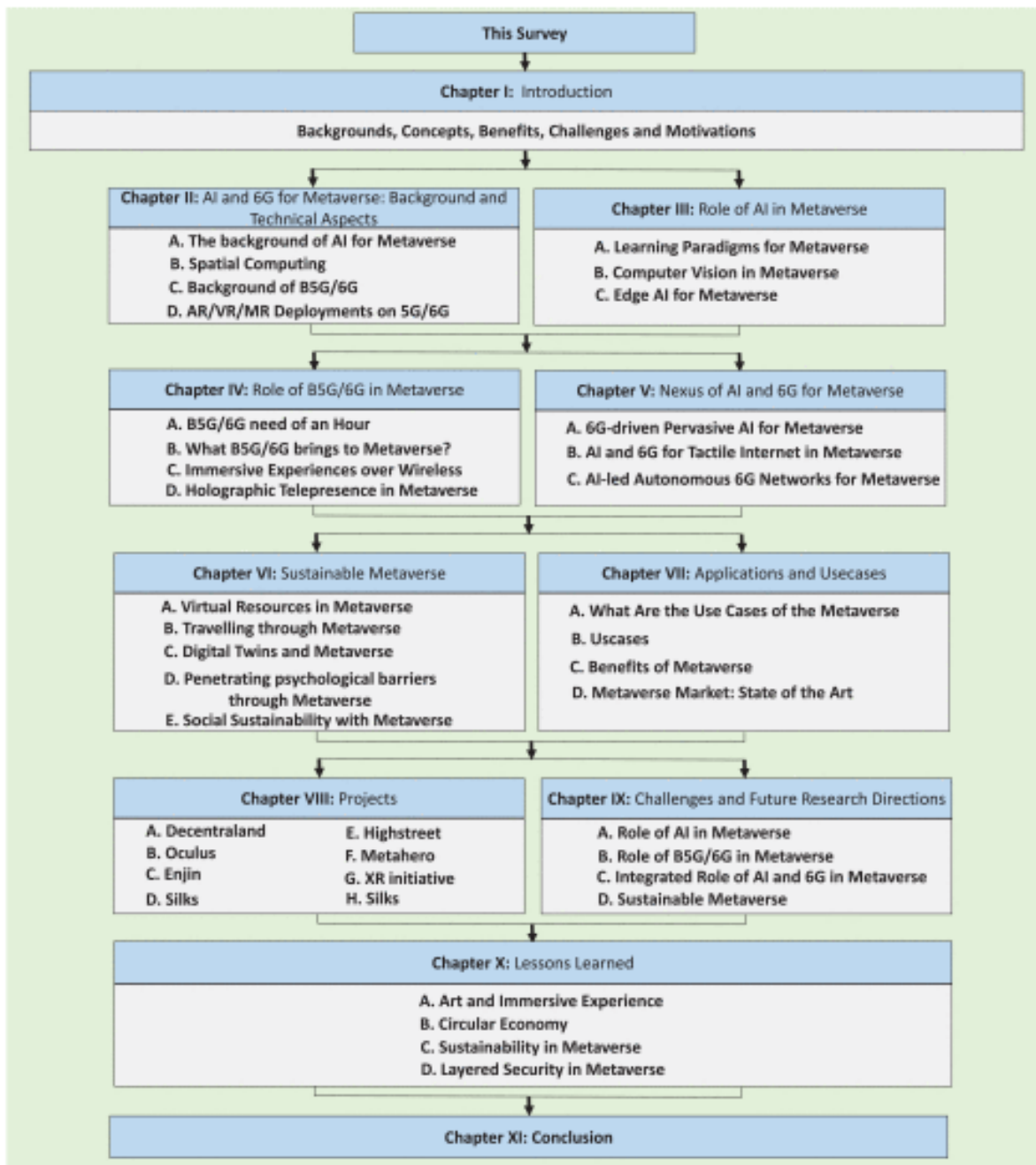


РИСУНОК 2.

Структура данного опроса.

РАЗДЕЛ II.

Искусственный интеллект и 6G для метавселенной: предыстория и технические аспекты

В этом разделе статьи будет подробно рассмотрена предыстория метавселенной с точки зрения технического анализа. Термин «Метавселенная» представляет собой комбинацию префикса «мета» (означающего «за пределами») и суффикса «стих» (сокращение от «вселенная»). В результате, оно относится к вселенной, находящейся за пределами физического мира. Эта «вселенная за пределами» отсылает к компьютерной среде, а не к метафизическим или мистическим представлениям о предметах за пределами физической реальности [44]. Метавселенные — это полностью иммерсивные трехмерные цифровые среды, в отличие от киберпространства, которое относится ко всем онлайн-пространствам. В этом разделе мы даем критическую оценку ИИ и Метавселенной, а также некоторые существенные предпосылки для понимания перспектив Метавселенной 6G [45]. В этом всестороннем обзоре будут рассмотрены основные алгоритмы, терминология, а также текущее и будущее применение продукта. Мы вкратце познакомимся с искусственным интеллектом, который создал сложный черный ящик для высокоуровневых задач, таких как

обнаружение и классификация. Затем роль Метавселенной проводится для изучения того, что Метавселенная требует от ключевых заинтересованных сторон ИИ для более надежных коммуникаций [46].

A. Определение метавселенной на основе искусственного интеллекта и 6G

Метавселенная — это передовая цифровая сфера, которая включает в себя искусственный интеллект и технологию 6G, чтобы предоставить пользователям очень реалистичный, персонализированный и интерактивный опыт. Общая среда с высоким уровнем погружения создается путем объединения искусственного интеллекта со сверхбыстрой беспроводной связью с низкой задержкой для создания динамичных виртуальных сред. Метавселенная позволяет пользователям участвовать в таких мероприятиях, как покупки, игры и общение. Она также позволяет пользователям исследовать виртуальные вселенные, создавать виртуальные объекты и настраивать свои аватары. Метавселенная революционизирует то, как люди взаимодействуют с технологиями, и является будущим виртуального взаимодействия. Прогнозируется, что в ближайшие годы это окажет огромное влияние на экономику. Метавселенная также готова произвести революцию в том, как мы работаем, позволяя людям работать удаленно и сотрудничать более эффективно. Ожидается, что это также создаст новые возможности для людей зарабатывать на жизнь, а также позволит бизнесу охватить более широкую аудиторию.

B. Предыстория ИИ для метавселенной

В этом разделе рассказывается о предыстории метавселенной. Метавселенная включает в себя множество технологий, таких как 3D-анимация, VR, AR, пространственные вычисления, блокчейн и многие другие горячие технологии [49], [50]. Это следующее технологическое будущее с социально-экономической точки зрения. Многие предприятия уже выделили значительные ресурсы на инициативы Метавселенной, чтобы предоставить миру новые цифровые услуги и первыми создать ландшафты метавселенной. Почему мы говорим, что метавселенная сейчас является самой горячей технологической и социально-экономической темой? Возьмем, к примеру, Facebook, который изменил свое название на Meta с Facebook, демонстрируя, что метавселенная станет следующей крупной мейнстримной технологией для отраслей. Будущее Интернета в метавселенной — это масштабная, устойчивая, динамичная платформа для общения, торговли, передачи данных и развлечения людей в режиме реального времени. До сих пор много усилий было приложено к Web1 и Web2 [51]. Web1 был ориентирован на просмотр простых онлайн-страниц, в то время как Web2 объяснял, как подключаться к социальным платформам в контролируемых экосистемах. В метавселенной NFT займут место цифрового владения в открытой, децентрализованной среде [52]. Это позволит людям связываться с остальным миром в цифровом формате и создать здоровую экономику, в которой люди смогут выполнять любую работу, которую можно выполнить в физическом мире. Об интернете и его будущем сказано много, но важно различать метавселенную и Web3. Web3 — это применение передовых цифровых сервисов, но вместо того, чтобы контролироваться крупными технологическими корпорациями, как в Web2, эти сервисы будут создаваться и управляться сообществом, возвращаясь к духу Web1, когда ценность Интернета создавалась пользователями на границе сети, преимущественно в прямом режиме. Виртуальные миры, массовая масштабируемость, постоянство, синхронистичность, функциональная экономика, открытость и децентрализация, функциональная совместимость и т. д. — все это должно быть включено в платформу Метавселенной [46]. Метавселенная начинает делать искусственный интеллект (ИИ) более повсеместным в реальности, что будет поддерживать многочисленные технологические

уровни метавселенной, такие как пространственные вычисления, строительные леса художников и новые появляющиеся типы повествования. Мы видели, что ИИ развивается на сопоставимом уровне, например, в трансформаторах; Трансформеры — это нейронные сети, которые позволяют машинам взаимодействовать с естественным языком, и на графике ниже показано экспоненциальное расширение трансформеров глубокого обучения [53], [54]. На рисунке 3 мы покажем, как Рост трансформаторов глубокого наклона с 2018 по 2021 год.

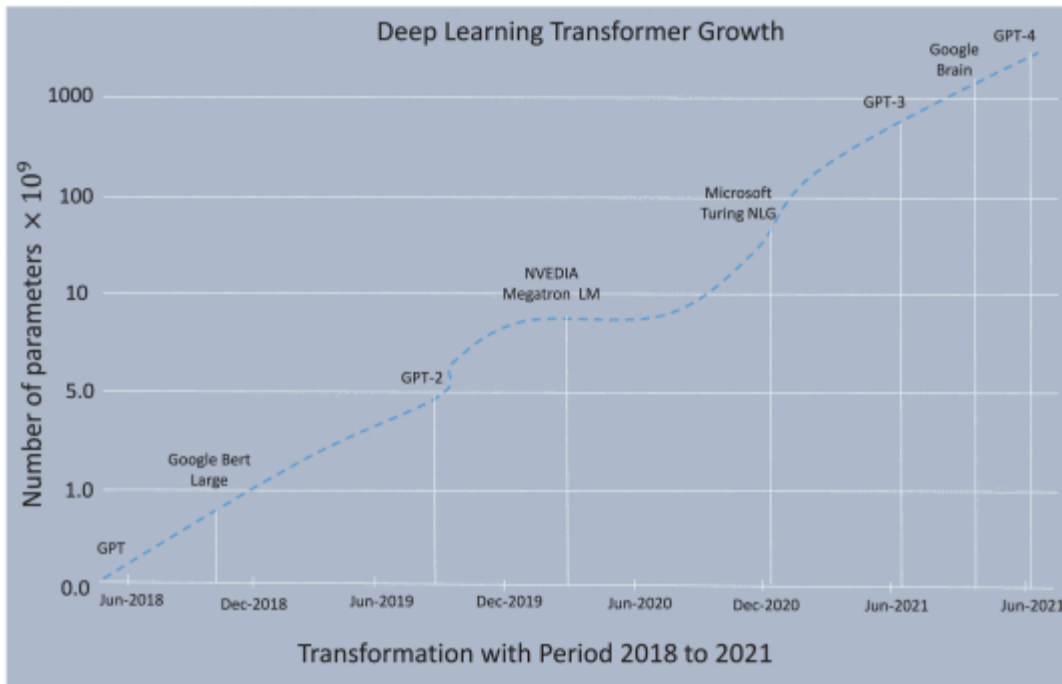


РИСУНОК 3.

Рост трансформеров глубокого обучения с 2018 по 2021 год.

Идея метавселенной в последние годы переживает всплеск популярности, появившись сразу после появления Интернета. На рисунке 1 показаны ключевые вехи эволюции метавселенной, начиная с эпохального развития Интернета в 1991 году и заканчивая созданием первого виртуального мира Second Life в 2003 году. Совсем недавно крупные технологические компании приступили к реализации заметных инициатив в области метавселенной, что ознаменовало значительные успехи в этой развивающейся цифровой сфере. Рассмотрим следующие трансформаторы: генеративный предварительно обученный трансформатор (GPT) обрабатывал 110 миллионов параметров; новейший трансформер Google Brain обрабатывал более 1 триллиона параметров. В GPT-4, скорее всего, будет гораздо больше. Это говорит о том, что объем DNN-сетей будет продолжать расти и в будущем. С развитием нейронных сетей ИИ уже добился больших успехов в распознавании голоса в Alexa, системе автономного вождения Tesla, распознавании изображений Google и нескольких алгоритмах, которые вызывают реакцию из социальных сетей и дипфейков; однако все эти приложения являются лишь базовыми по сравнению с будущими приложениями ИИ [53], [55]. Метавселенная не в будущем; Это трансформация от бытия к становлению.

Метавселенная — это место, где пересекаются физический и цифровой миры; он содержит общую виртуальную среду, очки дополненной реальности, головные уборы и гарнитуры виртуальной реальности Oculus. Доступ к ним можно получить через Интернет с помощью

смартфонов и браслетов. Люди будут играть, учиться, творить, делать покупки и общаться с друзьями в виртуальном онлайн-мире. Сегодня Метавселенная зарождается как метафизика, или, как мы могли бы сказать, трансформация Вселенной. За последние два года мы увидели, что с эпидемией ковида цифровые технологии быстро меняют свои волны, и так было и в прошлом. В 1980-х годах наблюдался рост компьютеров, в 1990-х годах — Интернет, в 2000-х годах — мобильный Интернет, в 2010-х годах — AI/ML/DL/Data Analytics [56], а в 2020-х годах — настоящий AI/Trans-AI/Meta-AI. Метавселенная, поперечная или омниверс может стать следующей волной. Волны сейчас сливаются, например, Интернет на ПК, Интернет на мобильных устройствах и AI/ML на мобильном Интернете. Метавселенная потребует интернета, мобильных устройств и НАСТОЯЩЕГО ИИ. Метавселенная содержит смоделированные AR, VR, MR [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], 3D-Всемирную паутину и другие формы цифровых двойников, включая цифровых людей в качестве интеллектуальных аватаров. Метавселенная будет функционировать как цифровая среда в реальном времени, содержащая все возможные сущности, события, действия и взаимодействия. В настоящее время триллионы долларов инвестируются в проекты Метавселенной, такие как цифровая реальность, управляемая искусственным интеллектом, чтобы предложить цифровую инфраструктуру, которая может вместить все социальные сети, электронную коммерцию и олигополию больших технологий [64]. Мы рискуем создать Метавселенную, подобную Матрице, состоящую из оцифрованных людей и сверхразумных агентов, в виде виртуального мира, в котором молодые люди смогут превзойти бессмысленную реальность реального мира, в котором они живут. Метавселенная — это виртуальная реальность, которая объединяет все основные аспекты киберпространства или всемирной паутины, такие как облачные и периферийные вычисления, социальные сети, онлайн-игры, дополненная реальность (AR), виртуальная реальность (VR) [57], [58], криптовалюты [65] и платформы AI/ML/DL [56] и приложения, чтобы позволить пользователям взаимодействовать виртуально. Все, что мы так или иначе используем, например, видеоконференции, игры, электронная почта, смешанная реальность, электронная коммерция, социальные сети и прямые трансляции Netflix/YT, является частью Метавселенной. Для многих ММОГ-геймеров Метавселенная, определяемая как Интернет, наполненный смешанными, виртуальными и дополненными мирами, более реальна, чем любая физическая реальность. Он так же реален, как и его технологические решения, которые включают социальные сети, игры в виртуальном мире, расширенную реальность, симуляцию и моделирование, взаимодействие человека и компьютера, цифрового двойника, машинное обучение и рассуждение, аналитику данных, компьютерное зрение, периферийные и облачные вычисления, а также мобильные сети, все из которых основаны на настоящей технологии метавселенной искусственного интеллекта. Используя машинное обучение и глубокое обучение, мы продемонстрировали детальное участие метавселенной в технологиях 6G на рисунке 4.

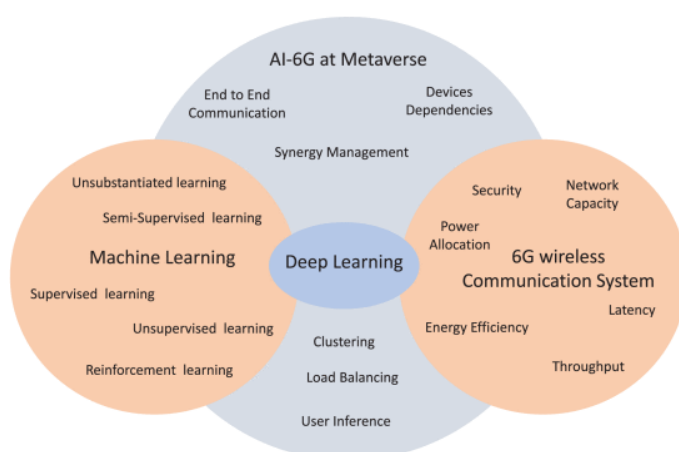


РИСУНОК 4.

В. Пространственные вычисления

Пространственные вычисления — это оцифровка деятельности машин, людей и объектов, а также мест, в которых они происходят, для облегчения и улучшения действий и взаимодействий. Пространственные вычисления — это бесшовная интеграция трех технологий: дополненной реальности (AR), виртуальной реальности (VR) и смешанной реальности (MR) в трехмерном мире [66], [67]. Эта технология может произвести революцию в том, как промышленные организации оптимизируют операции для сотрудников первой линии на заводах, в рабочих зонах и в логистике. Технология пространственных вычислений аналогична содружеству физического и цифрового миров. Это означает, что почти все люди больше не взаимодействуют с компьютерами так, как это должен делать беспристрастный наблюдатель; И наоборот, они решают столкнуться с тем, каково это на самом деле быть в цифровом пространстве, ассоциировавшись с элементами, которые находятся только в нем. В отличие от традиционных вычислений, которые являются преимущественно двухмерными, пространственные вычисления позволяют пользователям мыслить нестандартно и общаться с гаджетами сверху экрана. Бесчисленные устройства для пространственных вычислений уже представлены на рынке. Вот несколько примеров: VR-гарнитуры, AR-очки и гибридное оборудование — все это примеры передовых технологий [68]. В то время как VR-гарнитуры позволяют посетителям исследовать себя как часть виртуальной вселенной, AR-очки позволяют людям глубже погрузиться в цифровое пространство, а Hybrid Gear сочетает в себе технологии VR, AR и MR. Поскольку пользователь может полностью интегрировать свои чувства, эта программа позволяет ему наслаждаться кинематографическим опытом. В прошлом геймеры использовали гарнитуры виртуальной реальности для взаимодействия с предметами и аватарами видеоигр. В последнее время их применение расширилось и теперь включает в себя дополнительные приложения, такие как обучение и моделирование. Очки дополненной реальности — это гаджеты, которые проецируют данные и визуальные эффекты и особенно полезны на промышленных рабочих местах. Google Glass и Microsoft HoloLens — это две специальные очки дополненной реальности, представленные на рынке прямо сейчас. Мультисенсорная маска FellReal является отличным примером такой технологии. В то время как такие товары все еще находятся в разработке, крупные технологические корпорации, такие как Samsung, Google, Apple и Microsoft, инвестируют в стартапы для создания передовых гибридных инструментов и оборудования. Показывая, как физический мир будет преобразован в цифровой мир благодаря развитию метавселенной, мы демонстрируем на рисунке 5, как такие технологии, как вспомогательные технологии, будут играть значительную роль. Главным преимуществом пространственных вычислений является возможность взаимодействия с цифровыми объектами. Она предоставляет дополнительные привилегии, о которых мы могли только мечтать зоны лет назад, но которые теперь являются «пространственной» реальностью [69].



РИСУНОК 5.

Метавселенная относится к преобразованию физической реальности в цифровую сферу, поэтому она может представлять собой смесь физической реальности и цифровой реальности, такой как AR, VR и MR.

1) Виртуальная реальность (VR)

Виртуальная реальность определяется как компьютерные технологии для создания пространства, которое можно исследовать на 360° (VR). В отличие от традиционных технологий, виртуальная реальность (VR) погружает пользователя в виртуальный мир, чтобы дать интерактивный опыт [70]. Было выявлено, что виртуальная реальность обладает наиболее заметными характеристиками полностью синтетических перспектив. Коммерческая виртуальная реальность устраняет реальное зрение и предоставляет видео каждому глазу, обеспечивая глубину обзора [71]. Это виртуальная среда, в которую пользователь полностью погружен и взаимодействует с реальными предметами с помощью интерактивных техник через Интернет. Эта технология дополнена отслеживанием головы и тела, чтобы связать виртуальную среду с пользователем. Кроме того, виртуальная реальность описывается как «самый дальний от реальности край горизонта реальности-виртуальности» [72]. В среде виртуальной реальности пользователи могут создавать свой собственный контент, например, картины виртуальной реальности, чтобы посвятить все свое внимание виртуальным мирам, которые отличаются от реальной среды [73]. Взаимодействие с виртуальными объектами в виртуальном пространстве может помочь в обнаружении специальных возможностей для пользователей, таких как изменение формы сцены и добавление новых задач. Таким образом, сотрудничество между несколькими пользователями в виртуальном пространстве может происходить в режиме реального времени, что согласуется с четко определенными требованиями к виртуальным средам, включая ощущение местоположения, времени и доступности, жесты, текстовые и голосовые сообщения, а также обмен информацией [74]. Кроме того, виртуальная реальность расширяет демократизацию и позволяет большему количеству людей участвовать в цифровизации. Например, Google Tilt Brush5 позволяет клиентам создавать уникальные произведения искусства с помощью очков виртуальной реальности. Связь между новыми и классическими технологиями искусства не является односторонней; Вместо этого они могут жить в гармонии. Рассматривая Метавселенную, пользователи должны находиться в своих собственных общих пространствах, взаимодействуя с физическим аналогом, таким как AR и MR. Целью Метавселенной является

создание нескольких общих пространств, в которых можно осуществлять параллельную деятельность между существующими объектами, аватарами и их отношениями, например, взаимодействие между объектами, между объектами и аватарами. Для представления событий виртуальных пространств все пользователи, участвующие в виртуальной среде, должны синхронизироваться [75]. Однако синхронизация динамических событий в большом масштабе представляет собой большую проблему, поскольку неограниченное количество пользователей может одновременно работать с виртуальными объектами и взаимодействовать друг с другом без разумной задержки, что может нанести ущерб пользователям. Виртуальная реальность в Метавселенной кажется более продвинутой технологией, которая может быть развернута для различных целей, таких как классные комнаты, чтобы помочь преподавать предмет или тему, позволяя учащимся «испытать» знания.

2) Дополненная реальность (AR)

Цифровые визуальные элементы, музыка или другие сенсорные стимулы используются в дополненной реальности (AR) для улучшения физического мира. Коммерческие приложения и компании, занимающиеся мобильными вычислениями, используют его. Дополненная реальность (AR) выходит за рамки виртуальных миров и улучшает наше физическое окружение с помощью различных возможностей. Звук, изображения, вкус и осязание являются возможными входными каналами восприятия для виртуальных элементов, генерируемых компьютером [76], [77], [78]. Цифровые топпинги проецируются поверх нашей физической среды с помощью первого поколения системных фреймворков дополненной реальности. Участие пользователей в работе с цифровыми объектами до сих пор широко изучалось в дополненной реальности. Стоит отметить, что цифровые сущности накладываются поверх физического окружения пользователя, позволяя пользователям выполнять множество действий одновременно, аналогично VR. Взаимодействие с такими цифровыми сущностями в AR затруднено и предназначено для того, чтобы соединить людей между физическим миром и Метавселенной [78]. Большинство научно-фантастических фильмов используют городские и пригородные концепции для представления интуитивно понятных пользовательских интерфейсов дополненной реальности [57]. Например, Voodoo Dolls предложила технику свободной руки, в которой пользователь может выбирать и работать с виртуальным контентом с помощью сжимающих движений. Позже Гомер предложил метод [79], который обеспечивает лучевой кастинг из виртуальной руки пользователя, отображает выбор предметов и, наконец, обманывается. Кроме того, дополненная реальность будет играть важную роль в нашей повседневной жизни, например, в играх, аннотировании направлений в новых регионах и определении местоположения объектов на основе окружения пользователя [80]. В результате мы можем ожидать, что AR в Метавселенной интегрирует городскую среду, а цифровые сущности будут появляться видимыми и осязаемыми способами поверх различных физических вещей в мегаполисах. Можно сделать вывод, что AR облегчит коммуникацию между физическим и виртуальным мирами в Метавселенной. Однако отображение виртуальных объектов относительно их соответствующего положения в реальной среде требует значительных усилий для простых действий, таких как обнаружение и отслеживание [81], [82], [83]. Будучи первым исследовательским прототипом дополненной реальности на открытом воздухе, Traveling Machine считается новаторским. В прототип включен головной дисплей, содержащий навигационную информацию по карте, и устройство GPS. С помощью указателя и сенсорной поверхности пользователи взаимодействуют с картами дополненной реальности [84]. Однако недавняя гарнитура дополненной реальности продемонстрировала большие достижения, особенно в области мобильности. Гарнитуры дополненной реальности могут получать видео и слуховую обратную связь, но другие чувства остаются незадействованными, включая обоняние и тактильные ощущения [85]. Интересно, что AR-гарнитуры — не единственный способ просмотра контента Метавселенной. AR-патчи,

а также цифровые объекты из Метавселенной могут поставляться с помощью различных устройств, включая, помимо прочего, AR-гарнитуры [57], [58], портативные планшетные устройства [86], оверхед-проекторы [87] и настольные [88], пико-проекторы [89] и так далее. Дело в том, что с точки зрения переключения внимания пользователя и занятия его рук AR-гарнитуры имеют преимущество перед другими тактиками. Лучший аспект этой техники заключается в том, что пользователи должны переключать свое внимание с физической среды на цифровые материалы на других видах гаджетов дополненной реальности. AR-гарнитуры также позволяют пользователям визуализировать [69], [90], и руки пользователя не будут обременены материальными предметами, функционирующими как элементы обработки. Эти преимущества делают гарнитуры дополненной реальности более захватывающими в метавселенную с помощью линз дополненной реальности. Дополненная реальность продолжает развиваться и распространяться в широком спектре приложений.

3) Смешанная реальность (MR)

Среда смешанной реальности (MR) — это среда, в которой физические и цифровые элементы сосуществуют и взаимодействуют в режиме реального времени в физическом и виртуальном мире. Иными словами, можно сказать, что MR — это гибрид AR и VR технологий [91], и далее мы рассмотрим роль MR в Метавселенной. Формального определения MR не существует, но крайне важно иметь название, описывающее альтернативную реальность, существующую между двумя полюсами AR и VR. Читая предыдущую литературу, мы наткнулись на несколько описаний MR, включая «традиционное» понятие MR в континууме [91], MR как общий термин для AR [92], MR как тип связи [93], MR как комбинацию AR и VR [94], MR как синхронизацию сред [88] и «увеличенную» версию AR [95]. MR — это комбинация AR и VR, которая позволяет пользователям взаимодействовать с виртуальными элементами в физической среде, согласно научному сообществу. В настоящее время мобильная дополненная реальность является самым популярным сервисом смешанной реальности в социальных сетях. События смешанной реальности создаются с помощью AR-фильтров в Instagram. Microsoft Windows Mixed Reality объединяет все пользовательские интерфейсы для создания голографических изображений людей, 3D-моделей и их реального окружения. Для сравнения, как видно из существующих приложений [85], дополненная реальность обычно отображает информацию, наложенную на физические местоположения, без учета совместимости. Из-за массивных вышеупомянутых характеристик MR она считается более мощной версией AR с коллективными связями с физическими пространственными объектами, взаимодействием с пользователем и виртуальными сущностями [85], [96], [97], [98]. Люди, компьютеры и окружающая среда могут взаимодействовать со смешанной реальностью естественно и захватывающе. Мир компьютерного зрения, графики, технологий отображения, методов ввода данных и облачных вычислений кардинально изменился. Прорыв в области сенсорной и вычислительной мощности приводит к новому компьютерному восприятию окружающей среды, основанному на инновационных модальностях ввода. Положение тела человека в физическом мире, объекты, поверхности и границы, освещение и звук окружающей среды, классификация объектов и географическое положение — все это может быть зафиксировано с помощью входных данных окружающей среды.

D. Предыстория 5G/6G

Чтобы в полной мере использовать Метавселенную, мы должны иметь бесперебойную мобильность на открытом воздухе, обеспечиваемую сотовыми сетями, такими как сети 5G и 6G. С появлением технологии 6G 5G был исключен, но он все еще разворачивается, чтобы заменить устаревший стандарт 4G [99]. Как показано в таблице 5 ниже, мы изложили различные способы, с помощью которых вспомогательные технологии играют ключевую роль в переходе от 1G к 6G. Сети 6G разрабатываются и, по прогнозам, будут более быстрыми, с

увеличенной пропускной способностью и меньшей задержкой [100]. Можно увидеть, что сети 6G будут охватывать широкий спектр возможностей, а также актуальные мобильные приложения, такие как VR/AR, AI и IoT. Кроме того, ожидается, что операторы мобильной связи будут использовать гибкие распределенные подходы для 6G, включая лицензирование местного спектра, распределение полосы пропускания и совместное использование возможностей подключения. Мобильные периферийные вычисления, связь с короткими пакетами и технология блокчейн будут ответственны за все это. Поскольку данные свидетельствуют о том, что новые беспроводные технологии выпускаются регулярно каждые десять лет, можно ожидать, что к 2030 году их будет использоваться 6. В будущем в 6G будет запущено больше дизайнов и протоколов. Пользователи будут продолжать использовать больше IoT, мобильных устройств, а также использовать большие объемы данных с возрастающей скоростью по мере развития 6G, что указывает на то, что, по прогнозам, появятся более теоретические аспекты 6G [30], [38].

ТАБЛИЦА 4 Определение метавселенной на основе искусственного интеллекта и 6G из различных обзорных работ

Reference	Years	Definition	Applications
[37]	2023	A variety of artificial intelligence techniques are used for the metaverse, including traditional machine learning algorithms and emerging deep learning architectures, as well as supervised, unsupervised, and reinforcement learning strategies.	✓
[35]	2022	A preliminary look at the metaverse economy, a discussion of how blockchains and artificial intelligence can be integrated, and a review of current research in the field are presented.	×
[4]	2021	The Metaverse is a virtual space for creators and artists to reshape our virtual and physical environments.	✓
[47]	2021	The metaverse technology framework outlines the challenges and opportunities for research based on the ultimate stages of the metaverse.	×
[36]	2022	Author examines the security and privacy threats in the metaverse from seven perspectives and discusses how to address them.	×
[48]	2022	This article examines the concept of the metaverse and proposes that it is a super virtual reality (VR) ecosystem in comparison with other VR technologies	×

ТАБЛИЦА 5 Роль ключевых технологий от pre-4G до 6G

Generations	Pre 4G	4G	5G	6G
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> Improve voice clarity The network uses the analog signal (1G) Consume less battery power Data and voice signals are digitally encrypted Fixed and variable data rates Asymmetric data rates (3G) 	<ul style="list-style-type: none"> High speed Tight network security High usability: anytime, anywhere and any with technology Support for multimedia services low transmission cost Low cost per bit 	<ul style="list-style-type: none"> Greater speed in the transmissions A lower latency Greater capacity of remote execution A greater number of connected devices Possibility of implementing virtual networks Your PCs can be controlled by handsets 	<ul style="list-style-type: none"> AI-assisted intelligent connectivity Depth connection The term "holographic connection" refers to the use of AR/VR to provide continuous coverage anywhere A ubiquitous connection that spans space, air, ground, and sea By removing time, space and workflow barriers, 6G will transform the health-care industry
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> Poor voice quality Large phone size Poor battery life Complex data, such as videos, could not be handled by the system Different handsets are required Too little bandwidth Consumption of energy is high Spectrum license cost High expenses of 3G phones 3G compatible handset Connection time 	<ul style="list-style-type: none"> The battery uses is more Hard to implement Need complicated hardware It required the use of 4G technology It is still costly to build a next-generation network The network has more problems has security issues 	<ul style="list-style-type: none"> Old devices are unable to handle 5G, so they must be replaced by new ones A costly process Developing infrastructure requires a high price tag There is yet to be a resolution to the privacy and security issues 	<ul style="list-style-type: none"> Multi-connection architecture and cell-less architecture are used in 6G. In a cell-less deployment, UEs are not connected to a single cell, but to the RAN. Network architecture needs to be redesigned As part of its communication, 6G uses visible light frequencies; therefore, its drawbacks could be considered to be those of 6G wireless technology It is challenging to design communication protocol stacks for network and terminal types of equipment
Applications	<ul style="list-style-type: none"> Voice calling SMS 	<ul style="list-style-type: none"> HD movies Video conferences Telephony IoT, Wearable, Smart manufacturing Edge computing, Smart farming, AI 	<ul style="list-style-type: none"> Assistive Technology Immersive AR/VR, Advanced AI Autonomous vehicles, Decentralized business A greater number of connected devices 4G has a high data rate (Tbps) and a short latency (sub-ms). 	<ul style="list-style-type: none"> AI-assisted intelligent connectivity Depth connection The term "holographic connection" refers to the use of AR/VR to provide continuous coverage anywhere A ubiquitous connection that spans space, air, ground, and sea By removing time, space and workflow barriers, 6G will transform the health-care industry
Application				
Types	<ul style="list-style-type: none"> Text messages, Picture messages and MMS Wireless voice telephony, Mobile Internet access, Fixed wireless Internet access, Video calls, Mobile TV 	<ul style="list-style-type: none"> Amended mobile web access, IP telephony, Gaming Services Video conferences High definition mobile TV, Video conferencing, 3D television 	<ul style="list-style-type: none"> eMBB eURLLC mMTC 	<ul style="list-style-type: none"> MBBLLC mURLLC HCS MPS
Application Types	<ul style="list-style-type: none"> Text messages, Picture messages and MMS Wireless voice telephony, Mobile Internet access, Fixed wireless Internet access, Video calls, Mobile TV 	<ul style="list-style-type: none"> Amended mobile web access, IP telephony, Gaming Services Video conferences High definition mobile TV, Video conferencing, 3D television 	<ul style="list-style-type: none"> eMBB eURLLC mMTC 	<ul style="list-style-type: none"> MBBLLC mURLLC HCS MPS
Device Types	<ul style="list-style-type: none"> FDMA TDMA CDMA W-CDMA GSM, EDGE, UMTS, DECT WiMax, CDMA 2000 	<ul style="list-style-type: none"> ADVANCED LTE, WirelessMAN-Advanced, IEEE 802.16m, Three-GPP Long Term Evolutions WiMAX (IEEE 802.16e) for mobile devices China's TD-LTE network The UMB (formerly the EV-DO Rev. C) Flash-OFDM 	<ul style="list-style-type: none"> Smartphones Sensors Drones 	<ul style="list-style-type: none"> MBBLLC Sensors and DLT devices CRAS XR and BCI equipment Smart implants
Rate Requirements	2.4 Kbps to 2 Mbps	33.88 Mbps	40 to 1100 Mbps	Up to 1 Tbps
Rate End-to-End Delay Requirement	20 to 100 ms	10 ms	5 ms	< 1 ms
Rate Processing Delay	100-1000 ns	20-30 ns	100 ns	10 ns
Architecture	Wide Area Network	Hybrid Network	<ul style="list-style-type: none"> Denser sub 6 GHz small cells with umbrella macro base stations < 100 m tiny and dense mmWave cells 	<ul style="list-style-type: none"> High-frequency cell-free smart surfaces powered by mmWave tiny cells that can be accessed by mobile and fixed devices

1) Эволюция 5G

Несмотря на то, что 6G приходит на смену 5G [101], тем не менее, технологии 5G все еще необходимы. Отрасли беспроводной связи по-прежнему полагаются на 4G для потребительского использования, и 5G пытается заменить устаревшую технологию, хотя и постепенно, при этом большинство развертываний происходит в густонаселенных регионах. В 2009 году был представлен стандарт 4G/LTE [102], который изменил правила игры для мобильных устройств, увеличив скорость передачи данных и позволив пользователям смотреть фильмы в формате HD, играть в онлайн-игры и обмениваться огромными объемами данных со скоростью до 33 Мбит/с. 5G [101] превосходит 4G за счет использования микроволновой и миллиметровой технологии для увеличения скорости примерно до 900 Мбит/с и более. Более высокая скорость и пропускная способность сравнимы с коммерческими провайдерами широкополосного доступа, предлагая больше возможностей для использования, чем потоковое мультимедиа. Интернет вещей и периферийные вычисления будут иметь возможности зондирования в режиме реального времени, что означает, что они будут получать данные мгновенно, используя облако. В здравоохранении, например, в сфере медицинских услуг, для постановки диагноза и лечения требуются мгновенные знания от пациентов, что может быть достигнуто только с помощью более быстрых вычислений; Поэтому 5G находит применение в розничной торговле и промышленности. Список практически бесконечен, но мы не увидим весь потенциал 5G до тех пор, пока передовая технология не будет внедрена во всем мире.

2) 6G и Всеобъемлющий Интернет

Как уже упоминалось, 6G [100] все еще находится в разработке, и еще слишком рано иметь точную информацию о его технологии или функциональности. Мы ожидаем, что телекоммуникационная отрасль будет использовать динамичные, децентрализованные маркетинговые стратегии с лицензированием/совместным использованием локального спектра и совместного использования инфраструктуры в 5G. 6G полностью интегрирован с интернет-системами, которые обеспечивают быструю связь между пользователями, гаджетами, автомобилями и окружающей средой [103]. В результате можно оценить, когда мы перейдем от Интернета вещей (IoT) к Интернету всего (IoET), что теоретически может обеспечить 6G. Существующие волокна могут обеспечить скорость до 1 Гбит/с; Тем не менее, исследователи считают, что сеть 6G может обеспечить работу в тысячи раз быстрее, чем оптические волокна. Федеральная комиссия по связи (FCC) открыла двери для скоростей 6G в 2019 году, что позволило компаниям экспериментировать с терагерцовыми волнами в диапазоне от 95 ГГц до 3 ТГц. 5G, с другой стороны, использует низкочастотный диапазон от 24 ГГц до 40 ГГц, такой как миллиметровые волны и микроволновая технология. Несмотря на то, что терагерцовые волны могут увеличить скорость 6G до 1 Тбит/с, на них будут распространяться те же ограничения, что и на 5G. Используя N-полярные транзисторы из нитрида галлия с высокой подвижностью электронов (HEMT), исследователи из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре создали устройство для ускорения процесса разработки 6G. Эти HEMT имеют переход между двумя материалами с различными запрещенными зонами, которые работают как канал вместо обычной легированной области, как в МОП-транзисторах, что позволяет устройству работать на значительно более высоких частотах (от 140 до 230 ТГц), как того требует 6G [104]. Со временем появляются новые достижения в области 6G. В прошлом году исследователи из Наньянского технологического университета в Сингапуре и Университета Осаки в Японии создали устройство для терагерцовых волн, которое может быть использовано для 6G [105]. В этом году инженеры разработали продукты миллиметрового диапазона для G-диапазонов, которые функционируют в терагерцовых волнах. Есть несколько инструментов, которые могут помочь

6G стать реальностью и выйти за рамки исследовательской фазы. Возможно, потребуется время, когда 6G получит все большее распространение в приложениях реального времени, чтобы постепенно развернуть 5G.

Е. Развертывание AR/VR/MR в сетях 5G/6G

Несмотря на то, что технология AR/VR существует уже несколько лет, ее масштабное внедрение зависит от технологии 5G/6G и периферийных вычислений. Для того, чтобы реализовать эти сценарии использования, 5G/6G должны обеспечивать сверхнизкую задержку и высокую пропускную способность. Благодаря частным решениям 5G/6G многие промышленные и корпоративные клиенты могут выполнять критически важные процессы с возможностями, необходимыми для этого. В то время как общедоступные сети 5G/6G не обеспечивают достаточного покрытия, не обеспечивают требуемого уровня или считаются ненадежными, частные сети 5G/6G предоставляют возможности, необходимые для критически важных приложений.

Метавселенная обладает огромным потенциалом, когда речь идет о защите пространства AR/VR/MR в будущем. Он призван позволить своим пользователям построить полнофункциональный виртуальный мир, управляемый сводом правил, без привлечения разработчиков платформы или риска подвергнуться их рискам. Второе преимущество ВС заключается в том, что он позволяет применять защиту авторских прав к контенту в том виде, в котором пользователь может его записывать. Наконец, ВС может повысить популярность VR за счет слияния рынка криптовалют с VR, что приведет к увеличению прибыльности за счет слияния. Есть несколько аспектов AR/VR/MR, которые могут выиграть от использования 6G, которые описаны ниже.

- С появлением сетей 6G стало возможным общаться в терагерцовом диапазоне в субмиллиметровом диапазоне с чрезвычайно низкой задержкой. В рамках 6G виртуализированные сервисные наборы упрощают голографическую связь через физические границы и расширяют возможности управления. В результате 3D-изображения можно просматривать в режиме реального времени (XR) в сочетании с автономным вождением и т. д.
- Для обеспечения безопасности данных в приложениях AR/VR важно обеспечить надежную децентрализацию между несколькими узлами, чтобы обеспечить массовый обмен данными.
- Быстрое отображение и обработка изображений и видео, необходимых для ресурсов AR/VR, требует, чтобы данные хранились и обменивались через локальный центральный сервер из-за ограничений по объему памяти и требуемой обработке.
- Поскольку AR/VR-ориентированные приложения AR [92], [94], [95] потребляют большое количество данных и пропускной способности; центральный сервер может быть перегружен из-за множества асинхронных коммуникаций между устройствами AR/VR.
- Для военных и боевых приложений, использующих устройства AR/VR, блокчейн повышает кибербезопасность за счет обмена конфиденциальными данными, правоохранительных органов и общественной безопасности.
- Создав определяемую пользователем торговую площадку для хранения и загрузки AR-контента, Metaverse может помочь в коммерциализации AR-устройств.

- Помимо помощи пользователям и разработчикам в загрузке и выгрузке контента, коммуникация также может способствовать разработке новых приложений и созданию торговых площадок и витрин для устройств AR/VR/MR, чтобы сделать их более коммерчески жизнеспособными.

Краткий обзор недавних работ, включающих AR/VR/MR [92], [94], [95] в сети 5G/6G, можно найти в таблице 6. Масштабное внедрение AR и VR еще не стало мейнстримом. 5G и периферийные вычисления теперь могут решить некоторые из этих проблем. В разделе VII мы рассмотрим конкретные сценарии использования и реальные приложения.

ТАБЛИЦА 6 Современные технологии AR/VR/MR в различных отраслях промышленности, предусмотренные технологиями 5G и 6G

Reference	Year	Aims and Objectives	Contribution	Limitation	Enabling Parameters
[106]	2019	IoT and AR/VR are being used in modern industries to demonstrate how they can survive	Analyze the benefits and challenges of integrating AR with blockchain	A hypothetical scenario is considered rather than a reality scenario	5G based AR/VR/MR
[107]	2020	Observing how VR, AR, and AI have been integrated to benefit companies and industries. To see how blockchain can be integrated with mobile devices and AR/VR	The system has the potential to eliminate the need for third parties. The efficiency of VR combined with blockchain technology and augmented reality	There are limited use cases in the scenario	5G based AR/VR/MR
[108]	2020	An observation of blockchain's convergence with 5G and 6G networks for the development of wearable, distributed and smart applications	Practical overview and solution of AR/VR	AR is not taken into account	5G based AR/VR/MR
[109]	2020	5G network problems caused by AI	Economy for 5G networks at a high level	Does not address existing problems with 5G networks	5G/6G enabled AR/VR/MR
[110]	2020	Demonstration of authentication and key protocols for 5G and 6G networks	The organic integration of edge AI and machine enabled by 6G	AI and 5G problems are not discussed	5G/6G enabled AR/VR/MR
[111]	2020	A metaverse system based on 6G edge intelligence was investigated	Identifying key enablers, such as interactive experience technologies, avatars, and digital twins and their potential benefits for wireless systems and mobile services	Threats to security are not discussed	5G/6G enabled AR/VR/MR
[38]	2022	A metaverse vision towards enabling 6G wireless development is presented		Edge node computing power distribution is imbalanced.	5G/6G enabled AR/VR/MR
[1]	2022			Wireless systems that self-configure only	6G enabled AR/VR/MR

РАЗДЕЛ III.

Роль ИИ в метавселенной

В этом разделе мы представляем пирамиду искусственного интеллекта для технологии метавселенной, а затем методы, связанные с различными парадигмами обучения, компьютерным зрением и периферийным искусственным интеллектом. Этот подраздел также служит основой для обсуждения устойчивой метавселенной в разделе VI. После смены названия Facebook на Meta омоложение сферы Метавселенной стало предметом разговоров в исследовательском сообществе. Еще одной причиной повышенного интереса к Метавселенной является ее влияние на социально-экономические и технологические аспекты, такие как объединение 3D-анимации, виртуальной реальности, блокчейна, невзаимозаменяемых токенов, цифровой экономики и многих других. Невзаимозаменяемые токены (NFT) вызвали большой ажиотаж, который объяснил роль блокчейна в контексте Метавселенной, однако этот раздел в основном будет посвящен роли искусственного интеллекта в указанной технологии. Недавно всплыла статья, в которой объяснялась концепция Метавселенной в контексте цепочки создания стоимости. В статье Метавселенная обобщается как (Интернет, основанный на деятельности в реальном времени) и предлагается абстрактная многоуровневая архитектура для нее. Мы используем семиуровневую архитектуру Метавселенной в качестве ориентира для объяснения роли ИИ, как показано на рисунке 7. Мы кратко объясним области и определим эквивалентную роль ИИ в многоуровневой схеме, чтобы понять разнообразие и достижения, которые ИИ приносит в область Метавселенной. Этот корреспондент уже был выполнен Дэвидом Перейрой,⁹ но в этом исследовании более подробно рассматривается использование ИИ на каждом уровне. Мы объясняем каждый из соответствующих слоев в подходе «снизу вверх».

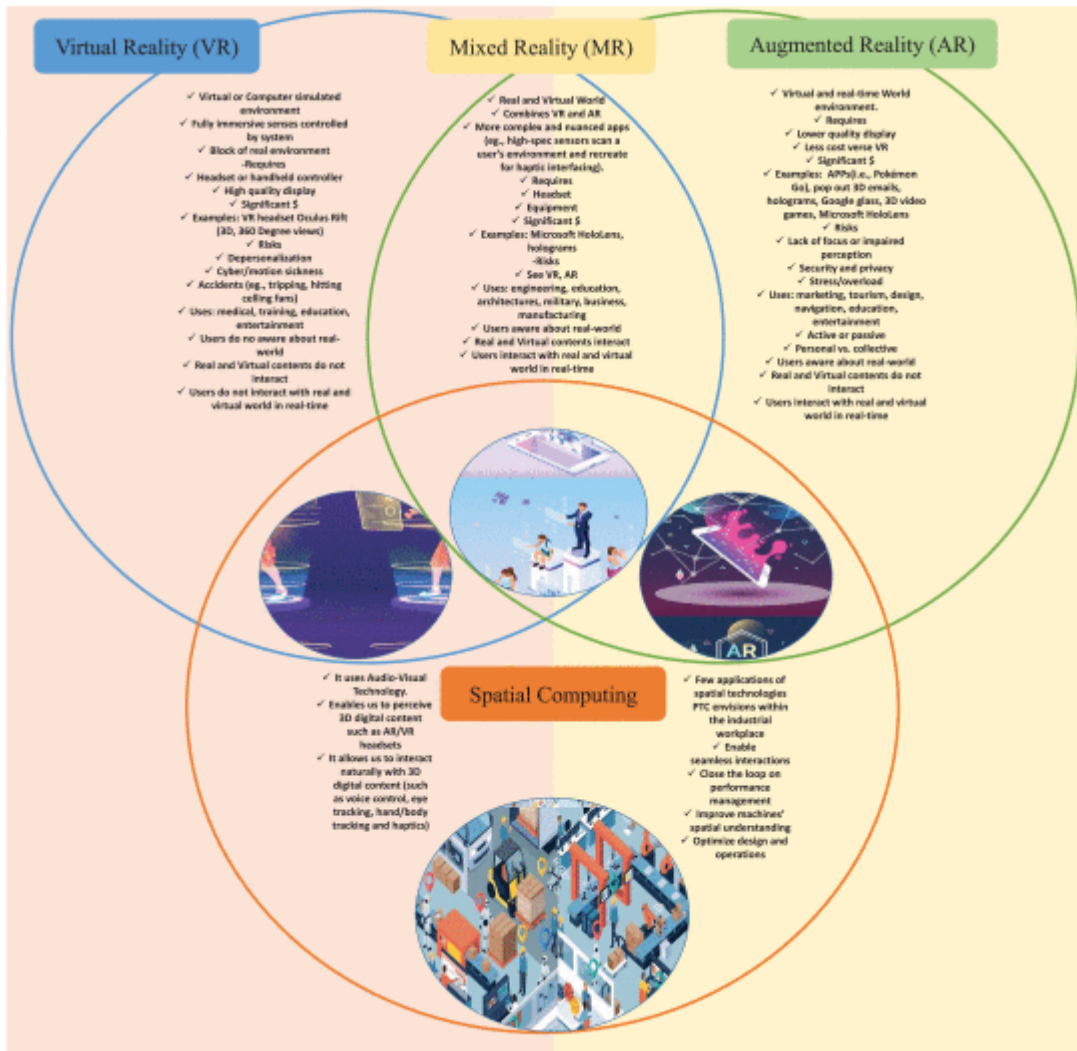


РИСУНОК 6.

Виртуальная реальность (VR), дополненная реальность (AR) и смешанная реальность (MR) подробно изучены.

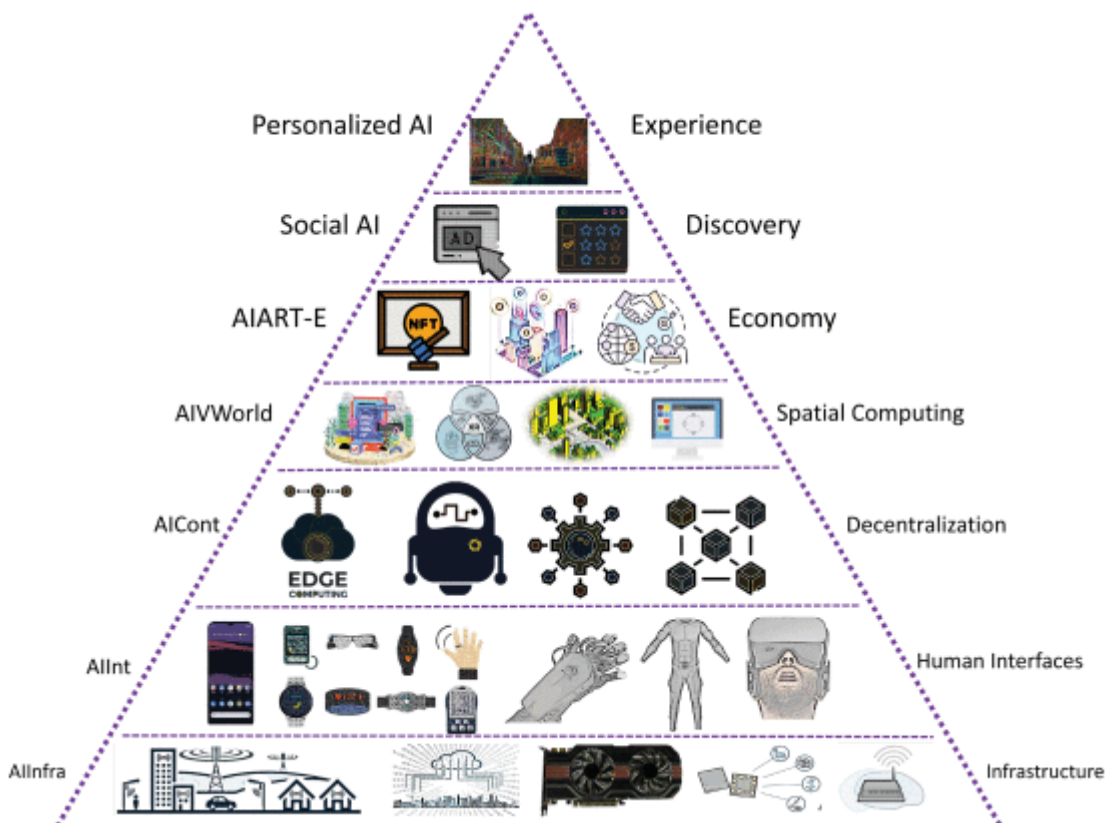


РИСУНОК 7.

Многоуровневая архитектура метавселенной Джона Радоффа. Надписи с правой стороны являются исходными слоями, определенными в разделе «Создание метавселенной», в то время как надписи с левой стороны демонстрируют эквивалентное сопоставление в контексте ИИ.

Allnфра: Очевидно, что с ростом популярности большое количество пользователей предпочтет использовать услуги, связанные с Метавселенной. В связи с этим инфраструктура должна быть способна вместить устройства связи массового машинного типа (mMTC) наряду с поддержкой выполнения моделей на основе искусственного интеллекта. Кроме того, следует отметить, что инфраструктура является основой для сервисов, предлагаемых на многоуровневых уровнях, поэтому также необходима поддержка временного хранения данных или поддержка подключения к облаку. Например, сети 5G/6G уже позволяют поддерживать устройства и операции ИИ. Аналогичным образом, микроэлектромеханические устройства (MEM) позволяют носимым устройствам выполнять автоматическое считывание и сбор данных, а графические процессоры (GPU) позволяют устройству выполнять более быстрые вычисления. В настоящее время существует множество решений plug-n-play, позволяющих сделать устройства с предыдущими версиями совместимыми с новыми. Интерфейсы прикладных программ (API) и программные пакеты позволяют пассивному оборудованию работать как активное. В некоторых случаях для получения желаемых результатов требуется только программное обеспечение. Таким образом, ИИ-устройства на основе ИИ относятся как к аппаратному, так и к программному обеспечению соответственно. Вместе устройства на основе искусственного интеллекта обеспечивают необходимую инфраструктуру для выполнения операций на уровне принятия решений и позволяют сервисам Метавселенной работать бесперебойно, отсюда и название «инфраструктура на основе искусственного интеллекта» (Allnфра). Allnt: Сервисы Метавселенной в значительной степени зависят от пользовательского опыта, и, чтобы сделать его удовлетворительным, разработка пользовательского интерфейса является первым шагом. Несмотря на то, что дизайн интерактивных и интуитивно понятных пользовательских интерфейсов помогает улучшить социальное взаимодействие, он может стать препятствием для некоторых пользователей, включая людей с ограниченными возможностями, интровертов и людей с особыми потребностями. Чтобы сделать интерфейс доступным в целом, можно широко использовать методы искусственного интеллекта (Allnt). Например, использование подходов компьютерного зрения для слабовидящих пользователей или генерация автоматизированного голоса из текста для слабовидящих, разработка социальных аватаров для дружественного взаимодействия в виртуальном мире, интерфейс мозг-компьютер для пользователей с особыми нарушениями и т.д. Методы, основанные на искусственном интеллекте, могут быть использованы не только для обеспечения пользовательского опыта с точки зрения дизайна интерфейсов для некоторых пользователей, но также могут быть использованы для улучшения доступности и взаимодействия с интерфейсами в целом. По мере того, как пользователи взаимодействуют с устройствами в Allnфра через интерфейс, Allnt становится их основным впечатлением. Пользователи, особенно в Метавселенной, не хотели бы быть разочарованными плохо или сложно спроектированными интерфейсами. По мере того, как количество приложений в Метавселенной будет увеличиваться, они будут стремиться к времени пользователей, и Allnt будет одной из причин для того, чтобы либо входить, либо выходить из приложения. Недавний опрос, проведенный Localytics¹⁰, показывает, что 71% пользователей уходят в течение 3 месяцев, если интерфейс не удобен для пользователя и не соответствует их ожиданиям.

AICont: Децентрализация была в значительной степени достигнута с помощью смарт-контрактов и методов, основанных на блокчейне, однако Metaverse делает акцент на

демократизации наряду с децентрализацией. Децентрализация позволяет пользователям и создателям легко защищать права собственности и обмениваться правами и активами в цифровом пространстве; Тем не менее, он не гарантирует отказ от посредничества со стороны корпораций, финансовых учреждений и инвесторов. Возьмем, к примеру, дело Adidas NFT, которое было прекращено в декабре 2021 года с ограничением покупок до 2 человек. NFT были распроданы менее чем за 1 секунду, потому что один пользователь приобрел 330 из них за одну транзакцию. Это было достигнуто путем модификации смарт-контрактов, что доказывает, что демократизация не может быть достигнута только с помощью обычных контрактов. Демократизация означает равные возможности для всех пользователей, тем самым отнимая власть у крупных корпораций. В связи с этим ИИ можно использовать для обнаружения модификаций и аномалий, связанных со смарт-контрактами, отсюда и название смарт-контрактов на основе ИИ (AICont). Кроме того, AICont может использовать информацию, полученную от Allnt и инфраструктуры, для обнаружения недемократических действий для предотвращения такого рода инцидентов в транзакциях блокчейна. AIVWorld: Создание виртуальных сред имеет жизненно важное значение в Метавселенной, и сделать ее правдоподобно реалистичной — одна из исследовательских задач, которую необходимо решить. Примерами цифровых миров являются Omniverse11 и Spatial IO от NVIDIA. 12 Эти платформы предоставляют набор компонентов для моделирования объектов реального мира и создания уникальных цифровых миров довольно впечатляющим образом. Использование ИИ широко используется при создании этого набора компонентов, поскольку процесс должен быть автономным, реалистичным и визуально приятным (AIVWorld). Эти виртуальные миры могут быть использованы для различных приложений, таких как создание огромных миров, создание симуляционных сред для роботов и автономных транспортных средств, моделирование голосовых команд в цифровом мире и так далее. Искусственный интеллект будет отвечать не только за создание реалистичных цифровых миров, но и за автоматизацию тестирования в рамках Метавселенной. Некоторые моментальные снимки из виртуальной среды пространственного ввода-вывода показаны на рисунке 8. 13 См.



РИСУНОК 8.

Искусственный интеллект в дизайне аватаров и среды для метавселенной: Изображение предоставлено: <https://spatial.io/>.

AIART-Э: Невзаимозаменяемые токены (NFT) зарекомендовали себя как ступенька в Метавселенной с экономической точки зрения. Это расширение прав и возможностей как художников, так и нехудожников. Художники могут использовать платформу, чтобы расширить свой кругозор и привлечь внимание, в то время как нехудожники могут использовать ее для приобретения новых навыков или добавления разнообразия в свое портфолио. Для тех, кто не является художником, ИИ также может быть использован для создания уникальных произведений искусства. Учитывая расширение использования ИИ среди непрограммистов (благодаря GPT-3 и подобным моделям), пользователи смогут генерировать свои собственные NFT. Достижения в области обработки естественного языка (NLP) позволили ИИ создавать произведения искусства для экономического обогащения (AIART-E) в цифровом пространстве. Уникальные истории могут быть сгенерированы с помощью таких моделей, как GPT-3 [112], [113], в то время как реалистичное уникальное искусство может быть сгенерировано из одной строки текста с помощью DALL-E [114], [115] и GauGAN2 [116]. Существуют также платформы, управляемые сообществами, управляемые автономными художниками, которые создают алгоритмы для создания произведений искусства. Одной из таких платформ, управляемых сообществом, является Botto. 14 Некоторые творения от Botto, GauGAN2 и DALL-E показаны на рисунке 9. 15 [114], [116] Использование AIART-E обеспечивает экономическую устойчивость за счет создания экосистемы экономики замкнутого цикла.



РИСУНОК 9.

Изображения, сгенерированные с помощью Botto, GauGAN2 и DALL-E.

Социальный ИИ: Основная мотивация Метавселенной заключается в создании интерактивной среды, которая улучшает работу с социальной сетью. Тем не менее, в современных социальных сетях существует много злоупотреблений, ненависти и серьезных опасений с точки зрения безопасности и инклюзивности для детей и меньшинств. Такие ограничения могут способствовать ослаблению цифровой персонализации и самопознания, за которые выступает Метавселенная. Использование искусственного интеллекта может быть использовано для улучшения опыта работы с социальными сетями (социальный ИИ). Эти методы можно использовать для наблюдения за машинным обучением, уделять больше внимания объяснимому искусственному интеллекту, который может избежать предвзятости, вычислять релевантность контента в отношении групп меньшинств, принадлежащих к разным

этническим группам, культуре, географии и языку, а также обнаруживать ненависть и оскорбительные высказывания.

Персонализированный ИИ: Последний слой в пирамиде Метавселенной — гиперперсонализация с точки зрения опыта. С точки зрения использования ИИ, первые уровни используют методы для достижения целей, которые в конечном итоге способствуют повышению производительности пользователя. Тем не менее, улучшение опыта было применено в общей манере. На этом уровне цель состоит в том, чтобы предоставить пользователю персонализированный опыт, характерный для каждого пользователя в Метавселенной. Например, скорректировать игровые модели с учетом эмоций или психического благополучия пользователей или применить персонализацию с учетом инвалидности пользователей. Персонализированный ИИ можно исследовать различными способами для различных приложений, таких как образование, здравоохранение, игры, социализация, спорт и другие, используя аналитику в режиме реального времени.

А. Парадигмы обучения для метавселенной

На протяжении многих лет приложения в Метавселенной, такие как робототехника, воплощение, виртуальная реальность, дополненная реальность, цифровой рендеринг и многое другое, добились значительного прогресса благодаря методам контролируемого обучения [117]. Тем не менее, стратегия контролируемого обучения, как правило, делает задачу приложения Метавселенной зависимой, поскольку она в значительной степени основана на контроле со стороны человека. Несмотря на то, что были предложены разнообразные стратегии обучения, такие как обучение с подкреплением [118], самоконтролируемое обучение [26] и другие, чтобы сделать задачу приложения Метавселенной независимой, она все еще находится в стадии разработки. Исследовательская группа Meta AI изучает парадигму самоконтроля, особенно в области текста и речи, чтобы добиться прогресса в сетях обучения, не зависящих от задач. Недавно Meta AI Research выпустила модель data2vec, которая представлена как унифицированное решение для задач обработки речи, зрения и естественного языка с использованием нескольких модальностей [119]. В настоящее время Meta AI работает над более унифицированными моделями, которые могли бы использовать несколько модальностей, помогая читать по губам и понимать семантику речи, чтобы совершать скачки прогресса в цифровой реальности. В то время как Meta изучает парадигму самоконтроля, ее конкурент Google DeepMind придерживается контролируемого обучения и использует огромные объемы данных из VRChat для обучения цифрового агента тому, как взаимодействовать с людьми в упрощенной среде. Только в 2018 году было сгенерировано 16 миллионов часов данных виртуальной реальности. Google DeepMind использовал 20 000 часов данных VRChat для обучения цифрового агента изучению языка земли при взаимодействии с людьми. Исследование показало, что цифровой агент становится любознательным и автономным при такой стратегии обучения. Согласно экспериментам, DeepMind предположил, что это может проложить путь к пониманию того, как Метавселенная может быть оснащена жизнью, подобной интеллекту.

В. Компьютерное зрение для метавселенной

В области компьютерного зрения метавселенная добилась наибольшего прогресса, поскольку исследователи могут воспроизводить человекоподобные аватары или голографические изображения близких в цифровом мире. Уильям Шетнер, сыгравший капитана Джеймса Т. Кирка из звездолета «Энтерпрайз» в винтажном телесериале «Звездный путь», является одним из самых любимых актеров. Стартап StoryFile17, занимающийся искусственным интеллектом, получил несколько часов отснятого материала Уильяма Шетнера, отвечая на вопросы с помощью объемных камер. Отснятый материал был снят с помощью зеленого экрана, чтобы

изображение Уильяма Шетнера можно было легко сегментировать, и использовалась запатентованная модель *Conversa*, чтобы связать ответы с заданными вопросами. В настоящее время стартап создал реалистичного видеобота вышеупомянутого актера. Несмотря на то, что стартап использовал зеленый экран, существует множество методов семантической сегментации, основанных на глубоком обучении, которые не нуждаются в зеленом экране, чтобы сегментировать человека даже в сложной сцене, такие как FCN [120], UPerNet [121], BiSeNet [122], FPN [123], SFNet [124], SegFormer [125], FaPN [126], CondNet [127] и Lawin [128].

В разработке находится еще много проектов, которые можно рассматривать как технологический скачок в сторону Метавселенной. Например, компании работают над голограммой людей, переживших Холокост. Это инновационная среда для сохранения историй из прошлого с помощью искусственного интеллекта. 18 Социально дистанцированный Санта-Клаус¹⁹ и аватары близких. Недавно Microsoft зарегистрировала патент на систему искусственного интеллекта, которая может помочь человеку взаимодействовать с умершим близким человеком через свою цифровую 3D-версию. Точно так же *Replika AI*²⁰ также пытается решить проблему психического благополучия и одиночества с помощью цифрового аватара. Помимо людей, исследователи также пытаются создать цифровую систему для животных. Исследователи из *Ubisoft China* предложили метод рендеринга анимации по ключевым кадрам, т.е. *ZooBuilder* [130] для животных, используя метод *OpenPose* [131] для извлечения 2D-координат суставов и 2D-3D оценку позы человека [132] для отслеживания временных отношений между соединенными суставами. С появлением Метавселенной многие интернет-инструменты теперь используют методы компьютерного зрения для создания анимированных 3D-моделей людей или реалистичных анимированных лиц, некоторые из них включают *Kinetix*, *21*, *Mixamo*²² и *StyleGAN2* [133].

Одной из разработок, характерных для интеграции компьютерного зрения и Метавселенной, является проектирование и разработка 3D-пространств и виртуальных миров. 3D-пространства в Метавселенной относятся к процессу рендеринга и моделирования для создания виртуальной среды. 3D-пространства, в которых пользователи могут взаимодействовать с виртуальными объектами и друг с другом в 3D-среде как в статичной, так и в иммерсивной манере. Разработчики и дизайнеры использовали инструменты не только для создания среды, но и для обеспечения поддержки Метавселенной. К таким инструментам относятся, помимо прочего, *Decentraland*, *Open Metaverse Interoperability Group (OMIG)*, *Blender*, *WebXR Device API*, *Webaverse*, *XREngine*, *JanusWeb* и *HyperCube*. 3D-пространства имеют множество применений, включая социальное взаимодействие, обучение, образование и игры. Пример 3D-пространств и виртуальных миров показан на рисунке 7.

Исследователи также пытаются найти оптимизированный способ создания 3D-пространств в Метавселенной. Например, Ло и Цай [134] предложили использовать архитектуру виртуальной реальности (VRAM) для улучшения человеческого познания, используя когнитивную теорию мультимедийного обучения. Их экспериментальное исследование показало, что процесс обучения с использованием VRAM значительно быстрее по сравнению с существующими исследованиями. Гао и Ян [135] использовали другой подход, используя алгоритм обнаружения столкновений и взаимопроникновения объектов и человеческого тела в виртуальном слове для оптимизации размещения зданий и их взаимодействия. Авторы предположили, что реалистичность предлагаемой ими работы превосходит существующие методы. *Zhao et al.* [136] предложили структуру, которая выделяет визуальные элементы, чтобы не только стимулировать визуальное исследование и строительство в Метавселенной, но и улучшить ее реализм с точки зрения пользователя. Они предложили методы и приемы в три этапа для улучшения графического контента и визуального построения конвейера в Метавселенной. Метод также предоставляет подробную информацию об анимации на основе

физики и геометрическом моделировании для проектирования и разработки 3D-пространств. Wang et al. [137] также предложили концепцию для создания 3D-пространств в Метавселенной с использованием макроперспективы и теорий взаимодействия человека и компьютера для улучшения пользовательского опыта. В этом исследовании технический фреймворк и его производительность сравнивались с существующими аналогами, чтобы оценить эффективность пользовательского опыта в Метавселенной. Поскольку Метавселенная в настоящее время внедряется технологическими гигантами и находится в процессе интеграции с повседневной жизнью людей, разрабатываются более сложные методы, инструменты и фреймворки для улучшения 3D-пространств в Метавселенной, а также улучшения пользовательского опыта для взаимодействия с элементами, разработанными в 3D-пространствах, соответственно.

С. Генерация объектов в метавселенной

Несмотря на то, что метавселенная — это широкое понятие, для многих это общение и деятельность в цифровом пространстве. Представьте, если это цифровое пространство — пустое пространство, кто захочет взаимодействовать и общаться в нем? Концепция генерации объектов имеет решающее значение для среды в Метавселенной, поскольку она создает основу для взаимодействия и зависания пользователей в этом цифровом пространстве. Метавселенная нуждается в 3D-объектах и активах как с точки зрения разнообразия, так и с точки зрения количества. Например, для конкретной встречи, созерцания, игры или работы Метавселенная требует создания самых разнообразных сред, зданий и объектов. Кроме того, дизайн вышеупомянутых сущностей также требует настройки, чтобы отличаться и усиливать иммерсивный опыт. Однако создание таких 3D-ассетов и объектов отнимает много времени и средств у разработчиков, 3D-дизайнеров и художников. Кроме того, им приходится прикладывать немало усилий, чтобы добавить вариации в плане текстур и геометрии, чтобы воспринимать его как качественный. Это будет непрерывный процесс для Метавселенной, поскольку это контентоемкая платформа, поэтому разработчикам, 3D-дизайнерам и художникам придется изнурять себя, иначе для создания такого контента потребуется армия, похожая на рабочую силу.

Технологии генеративного искусственного интеллекта могут помочь не только в решении вышеупомянутой проблемы, но и сопровождать художников и 3D-дизайнеров для повышения их производительности. На протяжении многих лет исследователи продвигались в разработке генеративных моделей, которые могли бы использовать существующее распределение данных, включая лица, объекты и текст. Генеративные модели также можно назвать преобразователями распределения, поскольку они используют априорное распределение для выборки и преобразования модальности в целевое распределение. Пример рабочего процесса для создания граней определен следующим образом:

- Используйте многомерное нормальное распределение для выборки случайных векторов.
- Обучите дискриминаторную сеть распознавать настоящие и поддельные лица.
- Обучите сеть генератора преобразовывать предыдущее нормальное распределение в распределение изображений, представляющих 2D-изображения (грани).
- Введите полученные изображения из сети генератора в дискриминатор для проверки того, генерирует ли сеть генератора настоящие или поддельные лица.

- Если дискриминаторная сеть идентифицирует входные данные как поддельные, повторите шаг обучения до тех пор, пока входные данные не будут идентифицированы как настоящие.

Чтобы описанные выше шаги работали правильно, требуется много данных из целевого дистрибутива, вычислительная платформа (GPU) для обучения и много времени на обучение соответственно. Несмотря на то, что существуют некоторые ограничения, диффузионные и генеративно-сопоставительные сети (GAN) показали исключительную способность генерировать данные. Недавно StyleGAN [133] был предложен для приложений преобразования изображений в изображения. В недавнем исследовании StyleGAN использовался для создания высококачественных человеческих лиц без получения дополнительных данных о лицах [138]. Это также один из примеров того, как трансферное обучение может помочь в использовании существующей предварительно обученной сети для использования в персонализированных приложениях.

Объекты и виртуальные сущности теперь также могут быть сгенерированы с помощью текстового описания, благодаря недавним Dall-E_2 [115] и Google Imagen [139]. Это удивительно и весьма полезно для среды Метавселенной, поскольку использует естественный язык для создания изображений, что является естественным способом взаимодействия между людьми и описания любого объекта. Кроме того, это также может помочь в создании разнообразного и персонализированного контента, специфичного для каждого пользователя, в то время как пользователь взаимодействует с естественным языком.

Вышеупомянутые методы позволяют создавать 2D-изображения с текстовым описанием, но для Метавселенной этого недостаточно, так как пользователь будет взаимодействовать с объектами и воспринимать их в 3D-среде. Поэтому генерация объектов должна выполняться и в 3D. В связи с этим недавний прорыв был достигнут NVIDIA с помощью метода Instance Neural Radiance Fields (Instant NERF) [140], который использует некоторые 2D-изображения с разных ракурсов камеры и генерирует 3D-сцену. После генерации рендеринг объекта в 3D может быть выполнен мгновенно с учетом движения камеры и просмотра. Благодаря такому прогрессу в генеративных сетях создатели контента и 3D-дизайнеры смогут довольно легко создавать 3D-объекты в Метавселенной, особенно для виртуальных вселенных или игр, где окружающая среда требует определенного уровня реализма.

D. Edge AI для метавселенной

Использование периферийного ИИ будет иметь решающее значение для реализации Метавселенной, поскольку он сильно зависит от низкой задержки и высокой пропускной способности для удовлетворения потребностей пользователей. Сети пятого поколения (5G) удовлетворяют требованиям к пользовательскому опыту в некотором расширении, т. е. максимальная скорость передачи данных 10 Гбит/с и задержка менее 10 миллисекунд, но, согласно оценкам и прогнозам, задержка должна быть ниже, а пиковая скорость передачи данных должна быть выше, чтобы поддерживать пользовательский опыт в Метавселенной. Благодаря использованию методов искусственного интеллекта в сочетании с периферийными вычислениями закладывается основа для разработки новых критически важных приложений [141]. Для достижения uRLLC было предложено несколько методов глубокого обучения, мягких вычислений и машинного обучения, будь то обнаружение активных пользователей [142], распределение ресурсов [143], проблемы планирования [144] и проблемы управления питанием [21] соответственно. В последнее время искусственный интеллект также используется для прогнозирования мобильности, оценки трафика, прогнозирования каналов и управления спектром для обслуживания uRLLC. Например, SCGNet [145] и MCNet [146] были введены для повышения эффективности использования спектра при точной демодуляции сигнала приемника. В [147] была введена комбинация CNN

и LSTM для прогнозирования информации о состоянии канала для повышения надежности в практических системах 5G. В исследовании [148] были предложены 3D-сверточные сети для прогнозирования сотового трафика с использованием долгосрочных и краткосрочных пространственных закономерностей из данных о трафике. Таким образом, методы Edge AI очень важны для достижения низкой задержки с высокой пропускной способностью, которая действует как система поддержки для высококлассных интегрированных сервисов в Метавселенной.

Е. 6G: Требование к метавселенной на основе искусственного интеллекта

Сервисы, связанные с Метавселенной, предоставляемые искусственным интеллектом, требуют, чтобы инфраструктура была масштабируемой, сервисы были молниеносными, требующими низкой задержки, надежности за счет стабильного соединения и безопасности. Несмотря на то, что нынешнее поколение систем связи, таких как LTE и 5G, обеспечивает некоторую основу для реализации Метавселенной, до ее масштабного внедрения еще далеко из-за вышеупомянутых характеристик. Поскольку метавселенная должна поддерживать, по крайней мере, тысячи, если не миллионы удаленных устройств, которым необходимо обрабатывать и передавать огромные объемы данных, задержка будет основной проблемой для текущей сетевой среды, поскольку она считается узким местом для адаптации широкого спектра приложений [149]. Некоторые приложения тактильного и пространственного ИИ требуют задержки менее 1 мс при скорости передачи данных более 1 Мбит/с [142]. Система связи пятого поколения в некоторой степени смягчает эту проблему, но по мере роста Метавселенной, что, как предполагается, произойдет, определенно потребуется стабильная и быстрая мобильная связь нового поколения [150].

Как обсуждалось в предыдущих подразделах, большие языковые модели будут играть ключевую роль в понимании пользовательских предпочтений и создании настраиваемых и уникальных сред. В связи с этим для обучения таких моделей требуются вычислительные мощности и стабильное соединение [151]. Однако исследователи показали, что нынешняя итерация сетевой среды не подходит для обучения больших языковых моделей, скорее она лучше работает с мелкими, и одной из причин такого сбоя является отсутствие стабильного соединения [152]. Поэтому, чтобы реализовать метавселенную в полной мере, коммуникационная сеть должна играть эффективную роль наряду с методами искусственного интеллекта.

Мы проанализировали несколько исследований [150], [153], [154], [155], [156] для сбора требований относительно задержек и пропускной способности по отношению к каждому слою пирамиды Метавселенной, показанной на 7, и сообщили цифры на 7. Требование собирается в отношении задержки, среднего времени вывода (AIT), среднего времени вывода с улучшенным пользовательским интерфейсом (AIT-EUE), скорости передачи данных (TBR) и скорости передачи данных со сжатием (TBR-C) соответственно. AIT-EUE относится к методам улучшения данных для улучшения пользовательского опыта, например, шумоподавление изображений, сверхразрешение изображений и многое другое. AIT-EUE в основном зависит от разрешения изображения (при условии, что Метавселенная в основном занимается технологиями обработки изображений). Связь со временем вывода проста: чем выше разрешение, тем выше время вывода. Заявленные значения являются средними, а также гипотетическими, поскольку Метавселенная и 6G не реализуются в большей степени. Для AICONT мы рассмотрели среднюю скорость транзакций криптовалют, которые являются самыми быстрыми, такими как Algorand и EOS. Значения средней скорости транзакций для криптовалют и связанная с ними информация получены с помощью Statista23 и Algorand Blog24, а информация об NFT — с помощью Chainalysis. 25 Требование предполагает,

что нынешняя итерация системы связи (5G) не сможет удовлетворить большинство требований, таким образом, реализация Метавселенной тесно связана с появлением системы связи шестого поколения, которая обещает иметь меньшие задержки, задержки и, соответственно, более высокую скорость передачи.

РАЗДЕЛ IV.

Роль 5G/6G в метавселенной

В этом разделе описывается важность услуг 5G/6G для Метавселенной в разделах IV-A и IV-B, за которыми следует всесторонний обзор современных технологий беспроводной связи для иммерсивного опыта в разделах IV-C и IV-D.

А. Нужен ли 5G/6G час?

Ожидается, что Метавселенная будет основана на крупномасштабных технологиях беспроводных сотовых сетей с целью телевычислений, удаленной работы, телепортации, телеуправления, телеприсутствия, взаимодействия с аватарами и мобильности данных. Интерактивный и иммерсивный опыт внутри Метавселенной потребует очень высокой скорости передачи данных и низкой задержки при передаче контента с высоким разрешением. Сети 5G могут обеспечивать скорость передачи данных до <10 ГБ, используя спектр миллиметровых волн (30-300 ГГц) [17]. Эта частота и скорость передачи данных по-прежнему успешно удовлетворяют требования к пропускной способности восходящего и нисходящего каналов связи для нескольких мультимедийных приложений, начиная от потокового вещания в реальном времени и заканчивая подключенными и автономными транспортными средствами. Тем не менее, Метавселенная, вероятно, соединит широкий спектр таких услуг, потенциально включающих голографическую коммуникацию и тактильные ощущения в реальном времени, что потребует миллисекундной задержки от движения до фотона. Следовательно, требования к пропускной способности и пропускной способности для предоставления таких услуг составят 10^3 в несколько раз больше по сравнению с существующими сотовыми системами на базе 5G [20]. Таким образом, сети 5G и pre-5G не будут поддерживать Метавселенную по следующим ключевым причинам:

1. *Распространение устройств:* Ожидается, что метавселенная значительно ускорит рост мобильных и других устройств IoT. Таким образом, плотность соединений сетей 5G и pre-5G не сможет вместить растущее количество устройств.
2. *Мультисенсорная коммуникация:* Судя по всему, Метавселенная принесет иммерсивные сервисы с мультисенсорными коммуникациями, которые создадут строгие проблемы для существующих классов 5G QoS и QoE. Таким образом, беспроводные системы 5G и до 5G не смогут обеспечить бесперебойную работу нескольких иммерсивных сервисов, таких как параллельное взаимодействие с аватаром или телеоперации.
3. *Сложные и сверхмассивные возможности подключения:* Предполагается, что метавселенная будет построена на множестве гетерогенных устройств, распределенных в высокодинамичной, сложной и сверхмассивной сети. При таком сценарии существующий каталог услуг 5G и pre-5G не будет надежным решением, поскольку эти сервисы часто предназначены для статических и предопределенных задач оптимизации.
4. *Децентрализованные сервисы:* Децентрализованный интеллект станет краеугольным камнем в гетерогенных многомашинных, многотехнологических, многопользовательских средах, многофункциональных приложениях и устройствах, управляемых метавселенной. Хотя архитектура 5G может поддерживать сервисы искусственного интеллекта на

децентрализованной границе сети, периферийный интеллект, необходимый для Метавселенной, выходит за рамки первоначальных целей текущих сетей 5G. Скорость передачи, предлагаемая 5G, не может гарантировать устойчивый периферийный ИИ, потому что модели ИИ должны быть тонкими и очень динамичными при обслуживании на периферии или других устройствах в Метавселенной.

Сети, существовавшие до появления 5G, успешно поддерживали развертывание дополненной реальности в приложениях розничной торговли, образовательных сервисах, на игровой арене и в Google Maps [157]. Устройства виртуальной и дополненной реальности, такие как Google Glass,²⁶ Toshiba dynaEdge,²⁷ Microsoft hololens 2,²⁸ и т. д., и мобильные приложения, такие как IKEA Place,²⁹ Pokemon Go,³⁰ и т. д., получили широкую выгоду от сетей до 5G. Эти приложения и устройства были не только самодостаточными, но и использовали доступ в Интернет с помощью методов доступа до 5G. Исследования показывают, что пользователи VR/AR получили достаточный опыт использования сетей 4G LTE [158]. Однако таких сетей недостаточно, чтобы оправдать ожидания пользователей Метавселенной. Метавселенная принесет мультимедиа следующего поколения, такое как тактильная обратная связь в реальном времени, расширенный динамический диапазон (HDR) и стереоскопические видеоформаты. Расчетная скорость передачи данных, необходимая для рендеринга стереоскопического видео HDR 360° с разрешением 8K и частотой 90 кадров в секунду (FPS), составляет 200 Мбит/с [157]. Кроме того, голографические аватары будут отображаться как физическое присутствие удаленных пользователей в Метавселенной. Визуализация голографических аватаров будет наблюдаться в ситуациях, когда врач должен будет проводить удаленные операции, инженер — устранять неполадки на удаленном заводе, а фермер — ухаживать за травой и животными в отдаленных географических точках. Помимо типичных графических свойств (например, разрешения, глубины, текстуры или цвета), голограммы будут организованы в различных положениях, чтобы обеспечить согласованность углов, кадров и наклонов относительно аватара. Если аватар визуализируется в виде плиток размером 4 x 4 дюйма, то для аватара размером 6 x 20 дюймов потребуется скорость передачи 4,32 Тбит/с [159]. Согласно анализу коммуникационного аспекта медицинских услуг, проведенному Third Generation Partnership Project (3GPP), удаленная хирургия на основе дополненной реальности может работать с задержкой E2E примерно <1 мс и скоростью передачи 12 Гбит/с, учитывая 10-битный поток HDR с разрешением 4K и частотой 120 кадров в секунду [160]. Предполагается, что метавселенная будет иметь дело с более длительными дистанционными операциями, операциями и другими клиническими испытаниями. Чтобы предложить иммерсивный опыт в Метавселенной, помимо высоких скоростей передачи данных, потребуется дополнительная синхронизация, чтобы обеспечить бесперебойную передачу мультисенсорного контента и пользовательского опыта. Такие требования выходят за рамки предложений систем до B5G/6G, и сети доступа, не поддерживающие 3GPP, включая Wi-Fi, будут непрактичными из-за тестов производительности и проблем с передачей, возникающих из-за мобильности [161]. Таким образом, B5G/6G играет свою роль в признании требований, упомянутых выше. В следующем разделе мы рассмотрим технологии, предлагаемые B5G/6G.

В. Что B5G/6G привносит в метавселенную?

Поскольку метавселенная задумана как следующий рубеж в мультимедиа после VR/AR, она будет включать в себя мультисенсорные сетевые сервисы, такие как тактильная и голографическая связь. В скором времени пользователи подорвут QoE, обеспечиваемое VR/AR, и потребуют новых реалистичных мультимедийных впечатлений, в отличие от сегодняшних недостаточно реальных VR/AR. Приложения метавселенной, включающие взаимодействие аватаров с помощью новых способов коммуникации, таких как аватар-аватар (A2A), аватар-человек (A2H) и человек-аватар (H2A), будут управлять большей частью

интернет-трафика к 2030 году [162]. Таким образом, услуги, предоставляемые 5G/6G, играют решающую роль в реализации реалистичного опыта в Метавселенной.

1) Услуги 5G на пути к метавселенной

Сети 5G предлагают три основные категории услуг, перечисленных Международным союзом электросвязи (МСЭ)31: uRLLC, mMTC и eMBB для удовлетворения требований чрезвычайно низкой задержки, передачи огромного количества контента и больших вычислительных ресурсов. Для трафика eMBB требуется уровень скорости передачи гигабит/с. В то же время uRLLC ожидает высокую надежность 99,999% со сверхнизкой задержкой 0,25 ~ 0,30 мс на пакет, а mMTC требует высокой плотности подключения со значительной энергоэффективностью. Тем не менее, uRLLC может обеспечить скорость передачи данных только до 10 Мбит/с, что может подойти для нескольких приложений VR/AR. Напротив, eMBB может подходить для обеспечения сверхвысокой пропускной способности, чтобы удовлетворить требования пользователей Метавселенной, получающих доступ к мультисенсорному контенту, начиная от телеопераций и голоконференций и телехирургии с разрешением 3D 4K. 32 Кроме того, он может предложить пользователям минимальную гарантированную скорость доставки 100 Мбит/с. Таким образом, eMBB может сыграть решающую роль в игровой и развлекательной парадигме Метавселенной, предоставляя мобильным пользователям нисходящий канал связи 100–200 Мбит/с с пиковым порогом 250 Мбит/с и задержкой <100 мс [163].

Эволюцию VR-технологий можно увидеть на рисунке 10. От базовой потоковой передачи видео в виртуальной реальности до взаимосвязанной виртуальной реальности и полностью беспроводной взаимосвязанной виртуальной реальности можно увидеть ряд этапов [20]. Однако, в отличие от обычной потоковой передачи видео, беспроводная потоковая передача в Метавселенной может потребовать передачи огромного всенаправленного визуального контента с задержкой <20 мс. Успех такого иммерсивного виртуального опыта очень надежен благодаря плавному механизму передачи визуального контента сверхвысокого разрешения, а также очень тонкой тактильной обратной связи в нисходящих сетях. Как обсуждалось в разделе IV-A, очевидно, что для поддержки иммерсивных виртуальных приложений необходимо полагаться на беспроводные технологии 5G. Таким образом, технология mmWave продвинулась в направлении стандартизации 3GPP в беспроводных системах 5G [19]. В то же время исследователи также изучили потенциал мобильных сетей миллиметрового диапазона в реализации требований к беспроводной пропускной способности приложений виртуальной реальности. Согласно [20], mmWave способен успешно обеспечивать высокую скорость передачи данных с низкой задержкой для нескольких VR-приложений. Аналогичным образом, услуга mMTC может поддерживать плотную мобильную связь до 1 миллиона устройств на квадратный километр, что примерно в 10 раз больше, чем в сетях 4G LTE. В исследовании, проведенном Европейской обсерваторией 5G33, представлены данные, полученные в ходе 180 испытаний по оценке пропускной способности 5G в густонаселенной городской зоне Финляндии. Сервис mMTC смог обеспечить реалистичную скорость передачи данных от 700 Мбит/с до 1 Гбит/с при разумной плотности пользователей. Исходя из общего анализа, сервис 5G оснастил устройства пользователей средней скоростью передачи данных 1–4,5 Гбит/с с задержкой <5 мс [164].

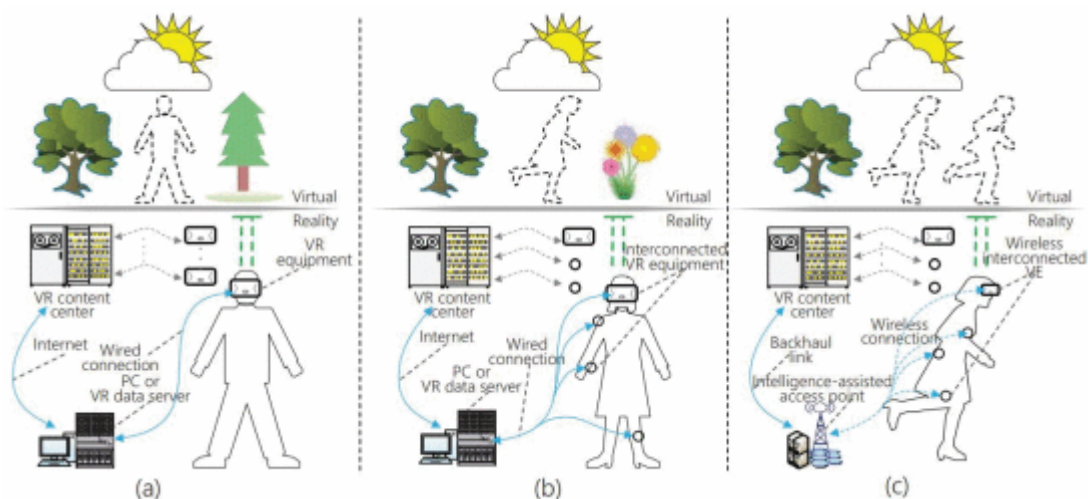


РИСУНОК 10.

Оценка опыта виртуальной реальности: а) виртуальная реальность через проводное подключение, б) виртуальная реальность через взаимосвязанную сеть и в) виртуальная реальность через полностью беспроводное подключение [20].

Поскольку для некоторых приложений Метавселенной потребуется скорость передачи данных в диапазоне от 100 Мбит/с до нескольких Гбит/с с надежностью 99% и задержкой <5 мс, сети 5G могут эффективно выполнять эти требования. Кроме того, пользователи Метавселенной будут использовать разнообразные функции мобильных систем, начиная от возможностей отображения и обнаружения и заканчивая вычислительными ресурсами, близкими к пользователю [61]. Кроме того, недавние инновации в технологиях зрения и отслеживания, такие как глубина, разрешение 360° и точность, поддержали идею взаимодействия пользователя с окружающей средой. Эти возможности не ограничиваются смартфонами; Многие устройства, такие как фитнес-часы, смарт-телевизоры, игровые консоли и автономные транспортные средства, также обладают этими функциями. Эти устройства могут использовать услуги 5G с однозначной задержкой, высокой пропускной способностью (т.е. 10-кратной > 4G), надежностью сети и плотным покрытием сети (т.е. >10-100x) [165]. В 2021 году смартфоны 5G вступили в фазу коммерциализации и, как ожидалось, распространятся на мировом рынке в течение следующих нескольких лет [166]. Рост числа этих устройств с беспроводным подключением, безусловно, ляжет в основу нескольких иммерсивных услуг, таких как телеклассы, телехирургия и дистанционные операции. Тем не менее, для предоставления таких услуг с достаточным качеством обслуживания требуется очень высокая скорость передачи данных в диапазоне от 1 Гбит/с до 1 Тбит/с, которая может поддерживаться сотовой связью B5G и базовыми сетями передачи [167].

2) Сервисы 6G на пути к метавселенной

Предполагается, что сети 6G обеспечат повсеместный интеллект с большой вычислительной мощностью и высокой точностью беспроводной передачи данных по воздуху, космосу и морю, как показано на рисунке 12. Сервисы 6G были определены в терминах взаимодействия физического и кибермира в реальном времени с тонким акцентом на взаимодействие между физическим, цифровым и биологическим (человекоцентричным) мирами [168], [169]. Иммерсивное слияние киберпространства и физического пространства, вероятно, приведет к появлению новых платформ в виде воплощенного Интернета, предоставляющего приложения Метавселенной на основе 6G и другие киберфизические системы (CPS). 6G значительно улучшит пользовательский опыт в Метавселенной, поскольку его услуги в первую очередь ориентированы на человека, а не на данные. Следовательно, пользователи Метавселенной и связанные с ними процессы, пользовательское оборудование и сеть будут целостно интегрированы, чтобы обеспечить множество иммерсивных приложений.

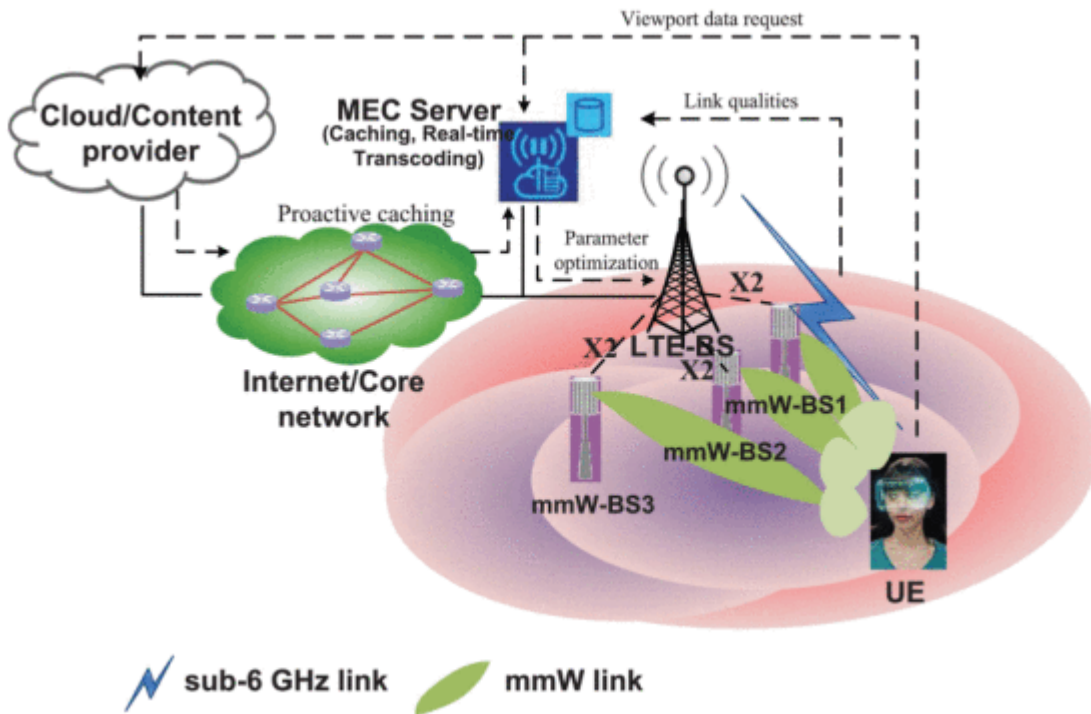


РИСУНОК 11.

Передача панорамного видеопотока виртуальной реальности (PVRV) с использованием миллиметрового диапазона и канала ниже 6 ГГц на платформе MEC [179].

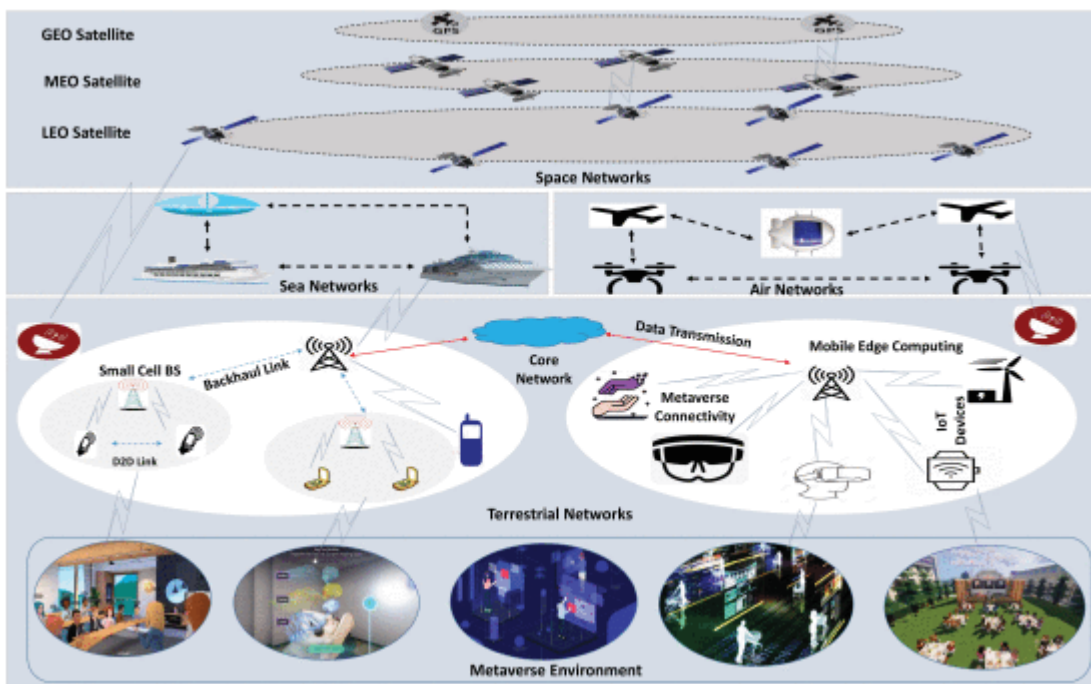


РИСУНОК 12.

Иллюстрация масштабного SAGSIN в Реализации Метавселенной.

Кроме того, сети 6G расширят возможности периферийного интеллекта с помощью машинного/глубокого обучения на устройстве и распределенного ИИ, которые преобразуют «связь с интеллектом» не только для человекоцентричных, но и для машиноцентричных приложений [170]. В Метавселенной 6G обеспечит нейронную и тактильную сенсорную связь со встроенным голографическим подкреплением [38]. 6G также удовлетворит требование Всеобъемлющего Интернета, предлагая сетевое управление и виртуализированные сервисы, которые будут мотивировать массивные множественные точки доступа формировать распределенную (бессотную) систему с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO) [171]. В отличие от систем 5G, 6G поддерживает терагерцовые частотные диапазоны и

обеспечивает скорость передачи данных 1 Тбит/с с задержкой E2E 0,1 мс [172]. Он также поддерживает чрезвычайно надежные услуги связи с низкой задержкой (eRLLC) с уровнем надежности 99,99999999%. В принципе, пользователи Метавселенной могут достичь высокого качества обслуживания, используя следующие услуги 6G: поддержка многомерных голограмм, сверхмассивные скорости передачи данных для поддержки мультимедиа HDR 360° с разрешением 4K/8K, чрезвычайно низкая задержка и высокая точность для тактильных ощущений, необходимых в 3D-печати, телеприсутствии, иммерсивных многопользовательских играх и отзывчивых цифровых двойниках в Индустрии 5.0. Кроме того, эти услуги 6G будут опираться на искусственный интеллект, такой как федеративное обучение, отдельные вычисления и распределенное глубокое обучение с подкреплением для снижения перегрузки сети и улучшения качества обслуживания пользователя [25].

Подводя итог, можно сказать, что 6G превзойдет предыдущие поколения, катализируя беспроводную революцию от «подключения» к «подключению с помощью интеллекта» со следующими ключевыми новыми услугами и утилитами:

- *Высокая скорость передачи данных:* Сценарии использования ультрамобильной широкополосной связи (uMBB) будут использовать значительно более высокие скорости передачи данных по сравнению с услугами 5G eMBB.
- *Плотное подключение:* Сценарий сверхмассивной связи машинного типа (uMTC) расширит возможности сценариев использования, в которых одновременно потребуются относительно большее и огромное количество соединений в определенном пространстве по сравнению с теми, которые предоставляются в сервисах 5G-mMTC.
- *Высокая надежность и точность:* Услуги сверхвысокоточной связи (uHPC) требуют очень высокой степени точности, надежности и точного позиционирования, что делает их подходящими для критически важных приложений, в отличие от услуг 5G-URLLC. Эти услуги гарантируют, что строгие гарантии уровня обслуживания могут применяться независимо друг от друга или частично друг от друга.
- *Связь воздух-земля:* Службы, находящиеся в расширенном трехмерном покрытии (e3DC), смогут использовать космическую внеземную спутниковую связь, используя наземные наземные сети подвижной связи. Сфера космических сетей включает в себя беспилотные летательные аппараты, высотные платформенные станции и воздушные сети, обеспечивающие многомерное покрытие по всему земному шару.
- *Коммуникация и вычисления:* Распространение новых интеллектуальных устройств вызовет потребность в автономной и распределенной вычислительной инфраструктуре для облегчения ключевых технологий, таких как отдельные вычисления и федеративное обучение [170]. 6G будет способствовать вычислительно-ориентированной связи, которая обеспечит необходимое качество обслуживания (QoS) за счет компромисса между коммуникационными ресурсами и достижением достаточной вычислительной точности.
- *Контекстно-ориентированные коммуникации:* Контекст сети 6G, такой как сетевая архитектура и пропускная способность, будет определять предоставление услуг 6G uMBB пользователям. Это принесет значительную пользу приложениям Метавселенной, поскольку физический контекст, такой как местоположение пользователя, мобильность и социальные связи, будет очень динамичным, что в конечном итоге позволит использовать гибкое и адаптивное предоставление услуг сетей 6G.

- *Связь, управляемая событиями*: сети 6G обеспечат упорядоченное предоставление услуг uHPC на основе определенных характеристик чрезвычайных ситуаций или стихийных бедствий. Высокодинамичные пространственно-временные атрибуты пользователей и устройств, сетевого трафика и инфраструктуры будут играть ключевую роль в распределении ресурсов в сценариях приложений 6G-uHPC.

Помимо вышеперечисленных сервисов и сценариев их использования, 6G также может предложить гибрид этих услуг для удовлетворения экстремального спроса на новые показатели производительности в Метавселенной, которые вряд ли будут достигнуты сетями 5G и до 5G. Например, приложение может использовать комбинацию uMBB и uHPC при условии одновременного выполнения требований обоих сервисов. Аналогичным образом, uMTC и uHPC могут быть объединены для определенного приложения, если потребности обеих служб могут быть удовлетворены одновременно [103].

С. Иммерсивные возможности по беспроводной сети

Иммерсивный опыт облегчается с помощью виртуальных миров, где пользователи испытывают полностью иммерсивную среду, создавая таким образом метамир, который проецирует сценарии реального мира. Современные VR-приложения встроены в динамическую потоковую платформу, которая автоматически адаптирует битрейт XR-контента в соответствии с пропускной способностью сети и геолокацией пользователя [173]. Несмотря на то, что наследие 5G по-прежнему способно обеспечивать элементарную поддержку XR, масштабирование внедрения XR-устройств и приложений в беспроводных сетях требует новых исследовательских и инженерных направлений. В последнее время 5G и другие технологии продвинулись еще дальше в повышении производительности XR, внедряя различные разнородные улучшения не только в сущности, специфичные для XR, но и в улучшения, связанные с сервисами. Напротив, в недавнем исследовании Meng et al. [174] был разработан прототип для улучшения иммерсивного опыта в метавселенной за счет минимизации коммуникационной нагрузки при обеспечении точной синхронизации между физическим миром и его цифровыми моделями. В таблице 8 приведено несколько исследований, в которых изучалась роль современных технологий B5G/6G для иммерсивного опыта.

ТАБЛИЦА 7 Задержки и требования к пропускной способности для каждого слоя пирамиды метавселенной

Layer	Delay (ms)	AIT (ms)	AIT-EUE (ms)	TBR	TBR-C
AIINFRA	1.167	2.86	-	-	-
AIINT	3.5	3500	5800	1062 Gbps	530 Mbps
AICONT	500	4500	-	500 Kbps	500 Kbps
AIVWORLD	3.5	8000	19300	63.70 Gbps	210 Mbps
AIART-E	3.5	10000	24400	10.62 Gbps	35 Mbps
SocialAI	1.167	1.25 (Text) / 2000 (Image)	1.37 (Text) / 3400 (Image)	500 Kbps	128 Kbps
PersonalizedAI	150	19200	48800	238.89 Gbps	796 Mbps

ТАБЛИЦА 8 Обобщение роли современных технологий B5G/6G в контексте метавселенной

Authors & Year	Reference	B5G/6G Services	Application scenario
Mourtzis <i>et al.</i> , 2017	[195]	HMDs, mobile edge, and cloud computing	AR-based tele-maintenance using a cloud-based and serviced oriented system
Cheng <i>et al.</i> , 2018	[196]	eMBB, mMTC, URLLC, and IIoT	AR/VR and digital twin based industrial manufacturing
Erol <i>et al.</i> , 2018	[197]	edge caching, edge mining, computational offloading	AR/VR access pattern in virtual tourism
Ren <i>et al.</i> , 2020	[198]	D2D communication, cloud computing, on-device computing, and computational offloading	Edge-assisted multi-user cooperative environment for mobile web AR applications
Pengsuo <i>et al.</i> , 2020	[24]	digital twins, THz links, and metasurface reflectors	Improving transmission links for potential data-intensive applications in Metaverse
Zhou <i>et al.</i> , 2021	[199]	MEC, 5G antennas, computational handoff, RNI, and gNB/ng-eNB	Improving QoE for MAR based gaming such as collaborative assembly of a virtual object
Liu <i>et al.</i> , 2021	[189]	MEC, THz network, RIS, and federated learning	Empowering immersive VR experiences using prediction, rendering, and transmission of 360° content
Fantacci <i>et al.</i> , 2021	[27]	HRLLC, THz channels, SNC, and edge computing	Improving QoS for edge-assisted VR experiences by minimizing the E2E transmission delay
Ng <i>et al.</i> , 2021	[200]	edge intelligence, unified resource allocation, and VSPs	Improving QoS in educational applications of Metaverse by optimizing resource allocation on users' demands
Ren <i>et al.</i> , 2022	[201]	edge node localisation, service migration, load balancing, distributed edge AI	Orchestration of distributed edge services for location-based mobile AR systems
Zhang <i>et al.</i> , 2022	[202]	edge caching, computational offloading, decentralised computing	Scaling object recognition services for seamless mobile AR experiences
Ghoshal <i>et al.</i> , 2022	[18]	mmWave, cloud computing, splink data offloading	Realising cloud-based multi-user AR experiences with 5G mmWave
Van <i>et al.</i> , 2022	[203]	MEC, URLLC, digital twins, and edge caching	Improving QoE of digital twins in Metaverse by jointly optimising the computing, communication, and storage resources
Bhattacharyu <i>et al.</i> , 2022	[5]	TI, URLLC, H2M control, blockchain, xAI, and decentralised computing	Improving quality and precision of tele-surgeries for patients, virtual hospitals, and doctors in Metaverse
Kang <i>et al.</i> , 2022	[204]	MEC, federated learning, IIoT, blockchain, and Aol	Empowering immersive Metaverse experiences through user-defined privacy-preserving incentive schemes
Meng <i>et al.</i> , 2023	[174]	sampling, communication, prediction, and hardware prototyping	Empowering immersive Metaverse experiences through synchronization between the physical world and its digital models

mmWave для беспроводной виртуальной реальности: С этой целью 3GPP участвует в мероприятиях по стандартизации связи миллиметровых волн в системах B5G/6G [170]. В то же время ученые также изучают потенциал мобильных сетей миллиметрового диапазона для поддержки беспроводной потоковой передачи VR с высокой пропускной способностью [22]. Использование миллиметровой связи обеспечивает высокую скорость передачи и низкую задержку, что обеспечивает бесперебойную поддержку беспроводных приложений виртуальной реальности. Кроме того, обилие беспроводной полосы пропускания может еще больше смягчить дефицит скоростей передачи данных через миллиметровые волны. Исследователи обычно рассматривают беспроводные технологии миллиметрового диапазона 60 ГГц, поскольку это единственная стандартизированная беспроводная технология миллиметрового диапазона, которая была идентифицирована до сих пор на основе стандарта IEEE 802.11ad [175]. Например, авторы в работе [176] исследуют потенциал беспроводного канала 60 ГГц для одновременной обработки крупномасштабной доставки мультимедийного контента на распределенных платформах виртуальной реальности.

MEC для беспроводной виртуальной реальности: Еще одна сложность в поддержке VR-приложений заключается в том, что видео также должны перераспределять пиксели из сферы просмотра в 2D-область просмотра, чтобы отличать их форму контента от традиционных видео. Процесс рендеринга включает в себя сложные операции множественного сложения матриц и требует чрезвычайно больших вычислительных ресурсов. Следовательно, энергопотребление видео виртуальной реальности значительно выше, чем у других форм видео [177]. В результате это создаст большие проблемы для повсеместного применения беспроводной виртуальной реальности, поскольку непрерывный рендеринг вьюпортов приведет к разрядке батареи и, в конечном итоге, сократит срок службы батареи. Для решения этой проблемы в качестве многообещающих решений для поддержки беспроводной виртуальной реальности появились различные сценарии MEC и кэширования [167]. Развертывание парадигм MEC и кэширования на границе мобильной сети позволяет выполнять некоторые вычислительные задачи с помощью внутрисетевых вычислительных мощностей. Кроме того, некоторые популярные VR-контент и вычислительные выходные данные могут быть кэшированы, чтобы уменьшить количество повторяющихся вычислений и передачи. Например, в статье [178] параллельно представлена теоретическая архитектура гибридной мобильной вычислительной системы, сочетающей в себе вычислительные возможности облачных серверов, MEC-серверов и конечных устройств наряду с возможностями кэширования MEC-серверов. Аналогично, согласно [171], VR-задачи могут быть разделены на несколько подкомпонентов, причем часть подкомпонента может быть кэширована с помощью механизма кэширования мобильного устройства.

mmWave соответствует требованиям MEC по эффективности передачи данных в беспроводной виртуальной реальности: Кроме того, несколько исследований показали, что введение поля зрения в видео 360° снизит требования к полосе пропускания до 80% по сравнению с предоставлением видео 360°, следовательно, снизит общую необходимую скорость передачи данных [180], [181]. Например, авторы в работе [182] анализируют компромисс между однородными и гетерогенными полями зрения для модели доставки мобильной виртуальной реальности на основе MEC в отношении задач вычислений и кэширования. Кроме того, было предложено несколько методов, использующих преимущества поля зрения пользователей, например, введение прогнозирования поля зрения [183] и разделение различных типов кадров VR и их многоадресная рассылка [184]. Исходя из вышеприведенного обсуждения, очевидно, что можно разработать больше схем, если связь в миллиметровом диапазоне будет объединена с механизмами FOV на основе MEC. Например, Liu et al. используют миллиметровые волны и канал с частотой ниже 6 ГГц для передачи панорамного видеопотока виртуальной реальности (PVRV) путем кодирования окна просмотра и рендеринга резервных тайлов в соответствии с различными уровнями качества [179], как показано на рисунке 11. Аналогичным образом, Gupta et al. представляют многослойную схему потоковой передачи, в которой базовый уровень кодируется и передается через Wi-Fi [185]. В отличие от этого, через точку доступа mmWave передается несколько слоев усиления. Таким образом, слияние схем миллиметрового диапазона волн и FOV на основе MEC может снизить требования к полосе пропускания при одновременном уменьшении задержки передачи по сравнению с видео 360°.

Иммерсивная точность с терагерцовой связью: Метавселенная будет использовать видео 360° и приложения MAR для обеспечения иммерсивности, а также приложения на основе искусственного интеллекта с повсеместной интеграцией. Благодаря этому будет осуществляться обмен огромными объемами данных; Следовательно, спрос на спектр полосы частот будет быстро расти. Существующая технология миллиметрового диапазона не может удовлетворить этот спрос. Следовательно, переключение на терагерцовый и субтерагерцовый диапазоны было бы обязательным. ТГц коммуникации способны обеспечить сверхвысокую пропускную способность и низкую задержку за счет поддержки приложений с интенсивным использованием данных, таких как VR/XR через беспроводные персональные сети [27]. В нескольких исследованиях были использованы уникальные преимущества терагерцового диапазона, которые могут быть реализованы с помощью 6G для иммерсивного опыта. В исследовании Du et al. авторы рассмотрели проблему предоставления высококачественного иммерсивного VR-видеосервиса [186]. В частности, авторы используют терагерцовый канал с интеграцией MEC для оптимизации иммерсивного VR-рендеринга, управления питанием и разгрузки выпортов при соблюдении ограничений QoE. Аналогичным образом, Chen et al. [187] исследовали иммерсивное приложение с участием пользователей виртуальной реальности, передающих изображения 360° на внутренний сервер. Они сформулировали задачу максимизации вероятности успешной передачи данных пользователями за счет оптимизации передачи изображения по нисходящему каналу связи и вращения окружающих изображений. Предложенная ими задача оптимизации включает в себя подход трансферного обучения, состоящий из машин с жидкими состояниями для повышения скорости сходимости за счет переноса обученной передачи в новую. Несмотря на многообещающее качество обслуживания (QoS), обеспечиваемое терагерцовой системой связи, она по-прежнему имеет значительные потери на распространение и поглощение молекул воды из-за высокой частоты передачи [188]. По этой причине терагерцовый диапазон остается эффективным для предоставления услуг внутри помещений. Например, Liu et al. предлагают стратегию, основанную на глубоком обучении с подкреплением (DRL), для эффективного поддержания долгосрочного QoE в терагерцовых иммерсивных системах [189]. В частности, авторы изучили совместное использование терагерцового и радиочастотного диапазонов для создания сети

виртуальной реальности в помещении с целью улучшения передачи по нисходящей линии. Для достижения поставленной цели авторы используют текущие и исторические точки зрения пользователей VR, полученные из реальных наборов данных VR, для обучения модели стробированных рекуррентных единиц (GRU) для прогнозирования динамических точек зрения пользователей VR. В таблице 8 приведено несколько исследований, в которых изучались терагерцовые каналы для иммерсивного опыта.

D. Голографическое телеприсутствие в метавселенной

Пользователи метавселенной смогут видеть высококачественные трехмерные цифровые изображения людей с голограммами и без шлемов виртуальной реальности. Будущие сети (например, B5G/6G) смогут поддерживать чрезвычайно низкие задержки и сверхвысокие скорости передачи данных с высокой надежностью, чтобы подкрепить голографическую связь, которая позволит пользователям Метавселенной полностью погрузиться в общение без гаджетов [22]. Например, сеть 6G с задержкой 0,1 мс, поддерживаемая сверхвысокой пропускной способностью Тбит/с, может быть использована для НТ [190]. Для того, чтобы оценить приложения НТ, между пользователями должны быть бесшовные и качественные соединения, что требует чрезвычайно низкой скорости передачи данных и огромной низкой задержки. На требуемую скорость передачи данных влияет ряд факторов, таких как метод, используемый для построения голограммы, тип дисплея и количество изображений, которые необходимо синхронизировать. Например, для типичной голограммы, основанной на методах облака точек, требуется 0,5–2 Гбит/с, в то время как для голограммы большого размера может потребоваться до нескольких Тбит/с [191]. Передача таких голограмм может быть подкреплена использованием методов сжатия данных, но даже в этом случае голограммы, вероятно, потребуют огромной пропускной способности. Таким образом, задержка и надежность становятся двумя важнейшими ключевыми показателями эффективности (KPI) для НТ. В рамках Метавселенной НТ сможет запустить ряд коммуникаций человеческого типа, включая телехирургию, иммерсивное образование, дистанционные операции и Интернет навыков (IoS) [192]. Из-за высокой чувствительности НТ к задержкам эти приложения предъявляют строгие требования к задержке приема-передачи. Таким образом, важно, чтобы канал связи для этих приложений был сверхнадежным, чтобы избежать потери пакетов, которые могут привести к катастрофическим событиям. Чтобы преодолеть это, мобильные сети B5G/6G рассматривают URLLC в качестве одного из новых сценариев применения для поддержки вышеуказанных приложений [193]. Ожидается, что с помощью 5G New Radio сети радиодоступа (RAN) могут достигать задержки в 1 мс с вероятностью потери пакетов 10^{-5} – 10^{-7} . Это включает передачу по восходящему каналу связи 0,5 мс и передачу по нисходящему каналу связи 0,5 мс [194]. Кроме того, 6G может предоставить URLLC скорость передачи данных 1 Тбит/с и задержку E2E 0,1 мс, используя терагерцовые частотные диапазоны для поддержки НТ в метавселенной.

РАЗДЕЛ V.

Связь искусственного интеллекта и 6G для метавселенной

В этом разделе описывается взаимодействие B5G/6G и искусственного интеллекта в Метавселенной. В разделе V-A мы обсудим роль 6G в реализации всепроникающих и повсеместных сервисов ИИ, которые обсуждаются в разделе III для сред метавселенной. В разделе V-B объясняется роль ИИ в создании автономных сетевых инфраструктур 6G для Метавселенной, а в разделе V-C — совместная роль ИИ и 6G для тактильных и иммерсивных впечатлений.

А. Всепроникающий ИИ на основе 6G для метавселенной

Предполагается, что метавселенная продлит жизнь людей, позволяя им беспрепятственно жить, работать и играть в течение неограниченного времени. Это может быть реализовано только в том случае, если Метавселенная будет иметь прочную связь с «повсеместной связью с интеллектом», то есть 5G/6G, ИИ и интегрированной сетью космос-воздух-земля-море (SAGSIN), как показано на рисунке 12. По сути, 6G будет поддерживать всепроникающий интеллект, уменьшая потенциальную задержку виртуального опыта, и позволит разработчикам разрабатывать лучший виртуальный опыт в Метавселенной, где миллионы одновременных пользователей могут делить друг с другом захватывающее 3D-пространство. В таких случаях местонахождение отправителя и получателя может быть удаленным; Таким образом, задача состоит в том, чтобы поддерживать плотные соединения (например, 10^7 чел./км²), где несколько пользователей могут параллельно передавать и получать видеоконтент 360° или человекоподобные голограммы в реальном времени [28], [30]. Такая высокая точность данных потребует сверхвысокой пропускной способности с гетерогенным оборудованием для размещения служб ИИ, обсуждаемых в разделе III, что потребует чрезвычайно низкой задержки связи для передачи параметров модели или выполнения логических выводов ИИ.

С момента развертывания 5G первым набором перспективных технологий наряду с архитектурной оценкой стали полярные коды, массивные MIMO, миллиметровые волны и МЕС. Эти уникальные сервисы 5G смогли поддержать приложения AR/VR, обеспечив повсеместную связь. Пользователи AR/VR использовали сервис 5G-eMBB для достижения задержки <100 мс с пропускной способностью 100–200 Мбит/с [29]. Далее было проведено несколько экспериментов по оценке производительности 5G в реалистичных мобильных средах. Например, консорциум 5G-PPP (The 5G Infrastructure Public Private Partnership, 2018)³⁴ сообщил о скорости передачи данных около 3 Гбит/с с задержкой 2 мс на своей установке в Бари-Матера в Италии.³⁵ Данный эксперимент проводился с использованием комбинации услуг 5G с технологией LTE.³⁶ В другом эксперименте представлены данные примерно 180 испытаний и исследований, проведенных Европейской обсерваторией 5G. В этом сценарии испытания проводились в течение нескольких недель в городских районах Финляндии, то есть, возможно, с разумной плотностью пользователей, и результаты показывают, что наиболее реалистичная скорость передачи данных была примерно в диапазоне от 700 Мбит/с до 1 Гбит/с. Согласно окончательным результатам эксперимента, устройства пользователей реализовали среднюю скорость передачи данных от 1 до 4,5 Гбит/с с задержкой менее 5 мс. Широко признано, что приложения AR/VR требуют задержки менее 5 мс, со средней пропускной способностью от 100 Мбит/с до нескольких Гбит/с и надежностью не менее 99%, что означает, что производительность 5G достаточна для удовлетворения этих потребностей [11].

Предполагается, что метавселенная будет доступна из любого места в любое время; Таким образом, предполагается, что сети 5G не смогут обеспечить покрытие в некоторых частях земного шара, таких как отдаленные районы, океаны, горы, густые леса и воздушное пространство. Этот недостаток 5G может быть преодолен с помощью 6G, который, как ожидается, обеспечит повсеместное глобальное покрытие, как показано на рисунке 12. В рамках систем 6G сбор, транспортировка и использование данных будут происходить в режиме реального времени и в любом месте в любой момент времени, что станет катализатором иммерсивных приложений и услуг для Метавселенной. 6G будет уделять особое внимание повсеместному искусственному интеллекту, привнося общий искусственный интеллект в каждый аспект Метавселенной с помощью гипергибкой архитектуры. Кроме того, сеть 6G будет хорошо подходить для нескольких приложений Метавселенной, связанных с

глубоким обучением, потому что она может генерировать большой объем данных и выполнять вычисления и хранение на границе сети [34]. Таким образом, сети 6G могут не только размещать персонализированные сервисы ИИ, но и удовлетворять потребности в плотном подключении пользователей с низкой задержкой и высокой надежностью. Например, тематическое исследование, проведенное Adeogun et al., включает в себя концепцию, включающую беспроводную изохронную среду реального времени (WIRT) малого радиуса действия для системы связи 6G. Авторы разработали подсеть WIRT in-X с задержкой передачи данных в обе стороны менее 0,1 мс с вероятностью сбоя $<10^{-6}$ [220]. Спектр в несколько ГГц для повышения доступности пространственных сервисов считается частью сценария с высокой плотностью IoT с количеством устройств до двух устройств на каждый м². Основываясь на их результатах, можно заметить, что время цикла в 10 раз меньше, чем целевая задержка, достигаемая с помощью радиотехнологии 5G, т. е. $<0,1$ мс [220]. Таким образом, услуги Метавселенной, включающие новые способы связи, такие как A2A, A2H и H2A, могут использовать большие преимущества 6G. На рисунке 13 мы представляем четкую таксономию современных технологий для беспроводных сетей 5G/6G.

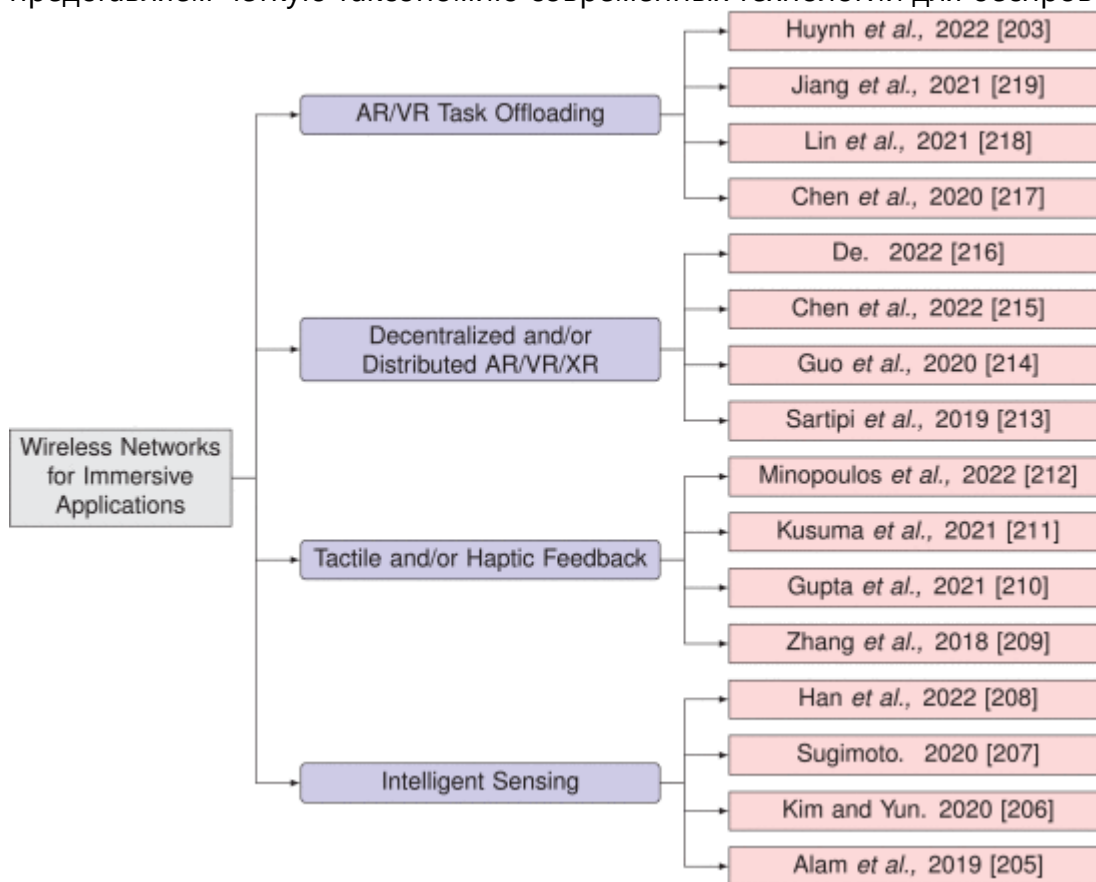


РИСУНОК 13.

Таксономия для классификации литературы по иммерсивным приложениям AR/VR с поддержкой 5G/6G.

В. Автономные сети 6G на основе искусственного интеллекта для метавселенной

Успех Метавселенной будет в значительной степени зависеть от бесшовной и устойчивой интеграции физического пространства в виртуальное 3D-пространство. Современные технологии (например, XR, искусственный интеллект и 6G) могут внести свой вклад во взаимосвязанную Метавселенную, обеспечивая совместимую когерентность между Метавселенной и физическим миром (например, физические объекты в реальном мире совместимы с виртуальными объектами в Метавселенной) [1]. В связи с этим незначительный разрыв между Метавселенной и физическим миром может вызвать лишь простое беспокойство у пользователей; однако по мере того, как распространенность и полезность Метавселенной увеличивается, такой разрыв в погружении может оказать долгосрочное

влияние на жизненно важные приложения Метавселенной. Таким образом, коммуникационная система для Метавселенной должна быть способна обеспечить бесперебойную и чрезвычайно надежную работу для обычных пользователей.

1) Сети Self-X

Исходя из вышеупомянутых требований к Метавселенной в разделе IV-A, для сетей 6G критически важно иметь возможность интеллектуальной и автономной настройки, чтобы соответствовать различным требованиям к производительности, таким как зондирование полного покрытия, сверхнизкая задержка и сверхвысокая надежность, а также постоянная безопасность [221]. В настоящее время существует сложность динамической адаптации к постоянным изменениям в потребностях пользователей и сетевых средах, которые изменяют операционные парадигмы современных сетей, которые в основном полагаются на алгоритмы, основанные на правилах, в качестве своего ядра. Еще одним ограничением является неспособность эффективно накапливать QoE сетевых операций, что, в свою очередь, препятствует постоянному улучшению возможностей сети [222]. Другими словами, в настоящее время сети не могут самостоятельно развиваться в соответствии с существующими операционными процедурами. Таким образом, всякий раз, когда возникает необходимость что-то обновить или улучшить, требуется большой человеческий опыт и усилия. По мере того, как сети 6G становятся все более географическими и сложными, ручное вмешательство неприемлемо и ненадежно для работы сетей в таком масштабе. Поэтому, чтобы преодолеть это препятствие, Европейский институт телекоммуникационных стандартов (ETSI) недавно инициировал создание двух групп, а именно: управления услугами с нулевым касанием (ZSM)³⁷ и экспериментального сетевого интеллекта (ENI)³⁸, сосредоточившись на использовании машинного обучения и глубокого обучения для управления и оркестровки ресурсов сети полностью автоматизированным способом. Ключевая задача ZSM и ENI состоит в том, чтобы добавить компонент «интеллекта» в каждый блок будущих сетей с целью реализации интеллектуальных и самоэволюционных способностей в сетях 6G и далее [223].

2) Искусственный интеллект для сетей

Создание Метавселенной в исключительных случаях поставит новые задачи для сетей 6G, которые потребуют поддержки со стороны ИИ, в частности, глубокого обучения с подкреплением и глубокого федеративного обучения, как показано на рисунке 14. В традиционном понимании Метавселенная не похожа на цифрового двойника, который представляет собой виртуальное представление, служащее эквивалентом физического объекта [161]. По сути, Метавселенная предложит возможности для создания сценариев, которые отличаются от реальности и позволят запускать их в удобное время и по своим правилам, требуя динамической поддержки со стороны связи 6G и искусственного интеллекта. Таким образом, несколько исследователей уже изучили использование ИИ для поддержки сетей 6G в сложных условиях. Например, голландский механизм двойного аукциона и DRL были объединены в [224] для повышения эффективности транзакций в Метавселенной. Способность принимать разумные решения на основе RL является ключевым фактором для развития сетей 6G для Метавселенной, особенно с жесткими требованиями к QoS. Сервисы метавселенной могут извлечь выгоду из методов оптимизации RL, если они хорошо спроектированы, поскольку они обеспечивают способность к самовосстановлению, самооптимизации и самоорганизации для сетей 6G. Например, Tariq et al. предлагают подход на основе DRL для упреждающего управления ресурсами и интеллектуального предоставления услуг в сетях 6G для приложения цифрового двойника [14]. Однако такой подход может страдать от значительного недостатка в производительности моделей ИИ. В частности, для высокораспределенного приложения Метавселенной, где пользователи должны непрерывно взаимодействовать только с целью обучения модели ИИ без доступа к данным другого пользователя из-за строгих ограничений безопасности, как показано на рисунке 14. Чтобы

сохранить производительность таких моделей ИИ, недавно Kang et al. предложили архитектуру для децентрализованного приложения Метавселенной, основанного на федеративном обучении, интегрированном с блокчейном [204]. Исходя из их архитектуры, локальная модель ИИ может быть оптимизирована за счет горизонтального взаимодействия нескольких конечных узлов (периферийных устройств), которые в конечном итоге сохраняют производительность моделей ИИ с течением времени. Таким образом, использование искусственного интеллекта для оптимизации сетевой архитектуры и повышения производительности сетей 6G является многообещающим средством улучшения опыта Метавселенной. На рисунке 15 мы представляем четкую таксономию современного состояния иммерсивных приложений на основе ИИ по беспроводной сети.

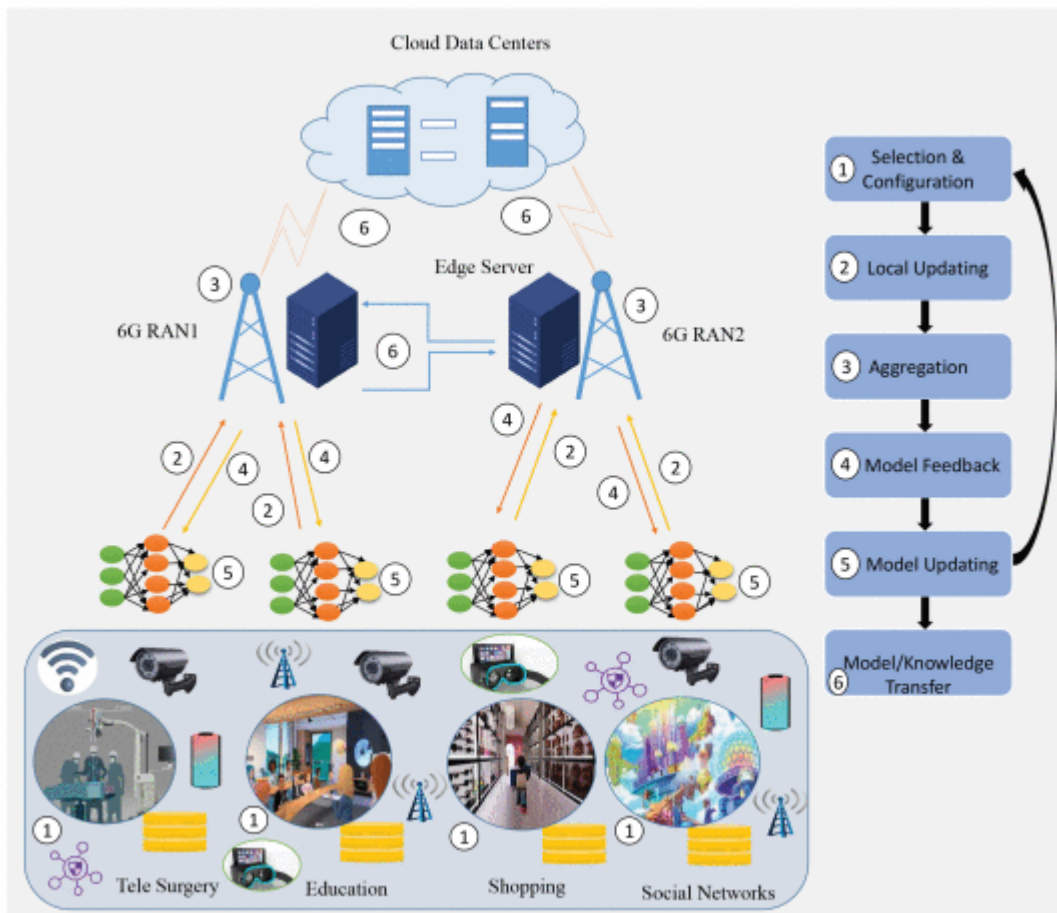


РИСУНОК 14.

Архитектура FL и распределенная процедура обучения в Метавселенной.

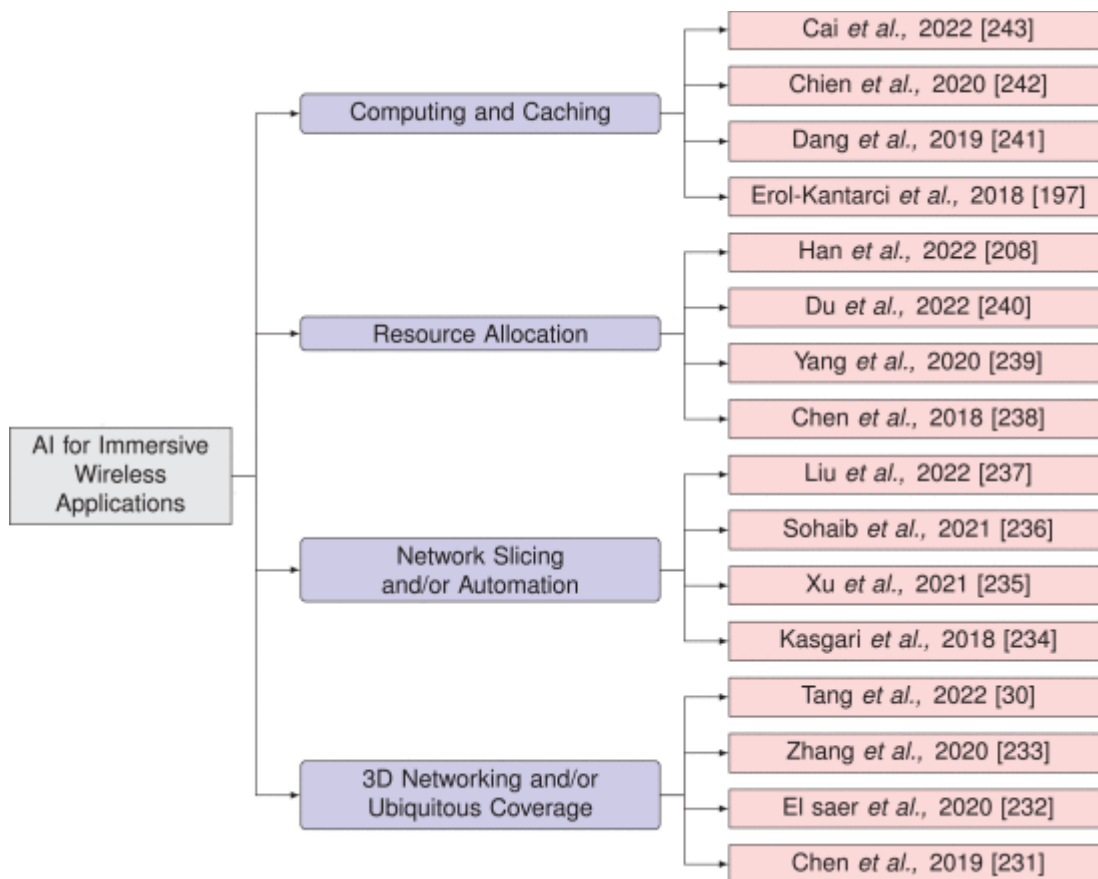


РИСУНОК 15.

Таксономия для классификации литературы по иммерсивным беспроводным технологиям на базе ИИ.

С. Искусственный интеллект и 6G для тактильного интернета в метавселенной

В Метавселенной тактильный Интернет будет доминировать в тактильной коммуникации для критически важных виртуальных сервисов с сенсорным управлением и управлением в режиме реального времени, способствуя своевременной доставке информации для интеллектуальных и взаимосвязанных метавселенных. Ожидается, что ТИ будет лежать в основе взаимодействия между человеком и человеком с машиной таким образом, что продолжительность времени между действиями и обратной связью должна быть намного меньше, чем время реакции в физическом мире [12]. По этой причине необходимо, чтобы ТИ имел задержку в 1 мс из-за природы тактильных сигналов и того, как люди их воспринимают. Тем не менее, существует предел задержки, которую могут поддерживать сети до 5G, который составляет примерно 25 мс [13]. Таким образом, ожидается, что сети 5G/6G превзойдут предыдущие поколения с точки зрения производительности, предоставляя устойчивую инфраструктуру, которая в конечном итоге реализует ТИ для иммерсивных услуг. 5G может помочь в реализации ТИ для Метавселенной, решая ключевые коммуникационные и вычислительные проблемы, используя следующие 3 важные технологии: периферийные вычисления, виртуализация сетевых функций (NFV) и программно-определяемые сети (SDN) [225]. Эти технологии можно комбинировать для создания сложных решений для сетевой архитектуры. Например, исследователи в [226], [227] изучают, как SDN может быть эффективно использован для сетей 5G на основе периферийных вычислений. В другом исследовании Aijaz et al. [15] авторы исследуют, как периферийные вычисления, SDN и NFV могут быть использованы для создания новой, устойчивой и универсальной архитектуры 5G для реализации приложений ТИ. По сути, их подход мотивирован концепцией виртуализации NFV, которая может динамически создавать экземпляры сквозной сети 5G в соответствии с требованиями пользовательских приложений. Таким образом, можно наблюдать, что приближение вычислительных возможностей к пользовательскому оборудованию и использование SDN для

централизованного управления им (т.е. ограничение промежуточных узлов) может способствовать снижению задержек за счет периферийных вычислений и SDN [227], [228].

Также важно подчеркнуть, что TI не должна ограничиваться контекстом 5G, как обсуждалось выше в отношении тактильного интернета и 5G, а должна занимать более широкую позицию. В настоящее время ведется много исследований, направленных на достижение TI по сравнению с другими технологиями (например, беспроводная связь с технологией суб-ГГц, беспроводная локальная сеть (WLAN) и беспроводная сеть body area (WBAN), а также комбинации технологий, аналогичных этим). Несмотря на то, что 5G может использовать приложения URLLC в целом, как упоминалось в разделе IV-A, его проектные цели не были адаптированы к конкретным функциям и требованиям TI. В ответ на недостатки 5G как промышленности, так и научные круги проявили большой интерес к системам 6G следующего поколения, которые, как ожидается, будут поддерживать различные иммерсивные приложения от мультисенсорной коммуникации до XR [229]. Кроме того, TI предоставляет огромное количество возможностей для использования ИИ, в частности, глубокого обучения, чтобы отделить восприятие людей от огромных задержек передачи, которые обычно наблюдаются в глобальных сетях (WAN) [230]. Искусственный интеллект, безусловно, может сыграть ключевую роль в выполнении требований к задержке в 1 мс при использовании этих сетей. Несмотря на то, что коммуникационные технологии могут решить проблему сквозной задержки, их эффективность не может выходить за пределы 150 км из-за их зависимости от скорости света. Таким образом, прогнозы на основе глубокого обучения могут быть широко использованы для достижения задержки в 1 мс, исключив ограничение в 150 км для этих сетевых технологий [194].

РАЗДЕЛ VI.

Сценарии использования метавселенной в отношении устойчивости и конфиденциальности

В этом разделе описываются вопросы устойчивого развития в Метавселенной в отношении виртуальных ресурсов, виртуальных путешествий, цифровых двойников, психологических барьеров и социальной устойчивости соответственно. Вопрос устойчивого развития находится в центре внимания при обсуждении бизнес-стратегий, связанных с изменением климата. Организации неизбежно не думают об устойчивом и эффективном способе ведения бизнеса, чтобы оказать положительное влияние на изменение климата. Несмотря на то, что концепция устойчивого развития не нова, она нуждается в развитии с учетом инноваций, меняющегося времени и, соответственно, стиля работы.

С объявлением о Метавселенной также были подняты опасения по поводу выбросов углерода и потребления энергии, поскольку коммерция Метавселенной основана исключительно на криптовалютах. Тем не менее, в нескольких исследованиях было подчеркнуто, что Метавселенная обладает потенциалом для сокращения выбросов углерода за счет виртуальных взаимодействий, замены физических товаров цифровыми и цифровых двойников соответственно. Кроме того, было также высказано предположение, что метавселенная с помощью иммерсивного опыта может помочь преодолеть поведенческие препятствия, связанные с изменением климата.

В большинстве исследований устойчивое развитие используется в контексте окружающей среды, однако устойчивость также должна рассматриваться с социальной точки зрения. Метавселенная может помочь в повышении социальной устойчивости, обеспечивая равенство, инклюзивность и доступность. Ответственность за разработку стратегий и использование Метавселенной для улучшения как экологической, так и социальной устойчивости лежит на предприятиях и всех вовлеченных сторонниках соответственно. В этом разделе кратко обсуждается взаимосвязь между устойчивым развитием и метавселенной с

использованием цифровых двойников и Индустрии 5.0. Темы, рассматриваемые в этом подразделе, обобщены на рисунке 16.

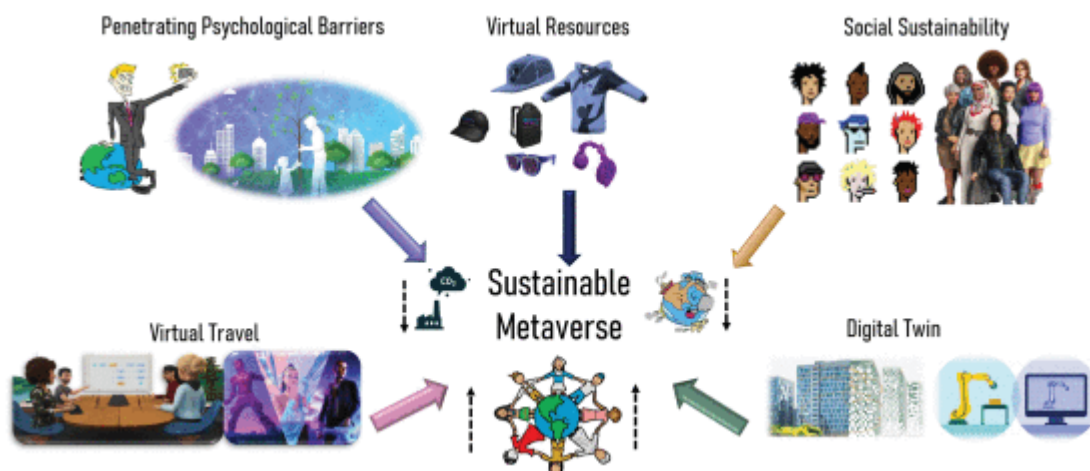


РИСУНОК 16.

Обобщение устойчивой метавселенной.

А. Виртуальные ресурсы в метавселенной

Основное предположение и интуиция устойчивого развития Метавселенной заключается в том, что она может использовать виртуальные и цифровые альтернативы в качестве замены реального опыта и физических товаров. Предполагается, что виртуальный опыт и цифровые продукты будут углеродозаменяемыми и менее ресурсоемкими по сравнению с аналогами. Уже была замечена смена парадигмы с точки зрения распределения бюджетных средств со стороны потребителей, что свидетельствует о значительном влиянии на устойчивое развитие. Например, торговля джинсовой тканью во всем мире потребляет 4,7 миллиарда м³ воды при выбросе 16,0 метрических тонн эквивалента углекислого газа (MTCO₂e) [244]. Если потребители выберут цифровую джинсовую ткань для своих аватаров вместо того, чтобы покупать физический, это может сэкономить значительное количество воды и выбросов углекислого газа. Согласно исследованию EY Future Consumer Index39, 21% потребителей Метавселенной намерены покупать цифровые товары для своих аватаров в будущем, а не инвестировать в физические предметы. В исследовании [244] было высказано предположение, что переход на виртуальную джинсовую ткань с физической может снизить выбросы CO₂ на 10%, что эквивалентно годовому потреблению воды и годовым выбросам около 350 тыс. двигателей внутреннего сгорания автомобилей в Америке [245], [246]. Учитывая, что цифровая трансформация одного продукта может существенно повлиять на эффективность использования ресурсов и выбросов углерода, можно предположить, что Метавселенная является потенциальным кандидатом на достижение требуемой экологической устойчивости.

В. Путешествие по Метавселенной

Во всем мире на авиаперевозки приходится 2,5% выбросов CO₂, но из-за пандемии COVID19 года этот показатель сократился вдвое [247]. Одним из самых ранних применений Метавселенной было проведение виртуальной встречи с реалистичным опытом виртуальной реальности. Недавно были организованы виртуальные концерты (концерты на основе Метавселенной), которые посетили тысячи людей в виртуальном мире [248], что указывает на то, что как деловые, так и развлекательные поездки могут быть в определенной степени заменены Метавселенной. Кроме того, благодаря такому иммерсивному опыту компании и предприятия могут продвигать культуру работы из дома, чтобы сократить выбросы CO₂. Несмотря на то, что физическое сотрудничество и личное присутствие важны, а воссоздание живой встречи в Метавселенной не будет таким же реальным, как в физическом мире, мы предполагаем, что Метавселенная здесь не для того, чтобы полностью заменить ее. Скорее,

его можно рассматривать как эффективный инструмент для снижения сложности и стоимости дискреционных поездок при сохранении экологической устойчивости.

С. Цифровые двойники и метавселенная

Цифровые двойники являются побочным продуктом новых технологий, таких как искусственный интеллект, Интернет вещей, дополненная и виртуальная реальность. С помощью данных, генерируемых спутниками, цифровой двойник может преобразовывать реальный мир в виртуальные представления, тем самым способствуя устойчивому развитию в отношении людей, производственных активов, цепочек поставок и так далее. Цифровые двойники и метавселенная действительно дополняют друг друга специфическими характеристиками. Например, цифровые двойники могут имитировать взаимодействие информационных систем, оборудования и инструментов компании в цифровом мире с участниками/аватарами, созданными с помощью технологии метавселенной. Представьте себе виртуальный тренинг, участники которого из стран третьего мира. Все участники, присоединившиеся виртуально, не имеют доступа к представлениям сложных систем, но с помощью цифровых двойников виртуальные участники могут не только взаимодействовать, но и повышать ценность обучения. Короче говоря, технология цифровых двойников может расширить возможности метавселенной, как было предложено в [249].

Некоторыми исследованиями установлено, что цифровой двойник является одной из основ для развития промышленной метавселенной [249], [250]. Кроме того, сеть Global Lighthouse (GLN) выпустила недавний технический документ [251], в котором также подчеркивается важность цифровых двойников для достижения устойчивости отраслей, производства и производственных предприятий соответственно. В настоящее время существует множество оптимизированных приложений, использующих цифровые двойники для повышения экологической устойчивости. Например, Европейское космическое агентство работает над системой, которая может представлять собой цифрового двойника Земли для изучения деятельности человека и ее влияния на климат. Затем имитационная модель будет использоваться для разработки политики, обеспечивающей повышение экологической устойчивости. Аналогичным образом, использование цифровых двойников для цепочки поставок и производства может улучшить оптимизацию логистики, прослеживаемости, энергии, процессов и материальных ресурсов. Другим примером является компания LG Electronics, Республика Корея, которая использовала цифровой двойник для моделирования сборочной линии и выполнила его интеграцию с производством в режиме реального времени, чтобы повысить качество продукции на 70%, повысить производительность на 17% и снизить энергопотребление на 30% соответственно. Аналогичный пример можно найти у китайской компании Procter and Gamble, которая улучшила складские операции за счет использования цифрового двойника. Интеграция привела к снижению затрат на логистику на 15%, сокращению складских запасов на 30% и улучшению сроков доставки, которые в настоящее время составляют 99,99% [252].

Многие отрасли промышленности уже начали адаптировать цифровые двойники, чтобы сократить использование энергии и лома, которые напрямую способствуют экологической устойчивости [253]. Цифровые двойники также широко используются для медицинских записей, моделирования данных с носимых датчиков и прогнозирования здоровья человека в отношении загрязнения и качества воздуха [254]. Тем не менее, цифровые двойники достигли наилучшей экологической устойчивости в области эксплуатации зданий, что может помочь в улучшении использования пространства на 25%, производительность труда человека увеличена на 20%, техническое обслуживание и эксплуатационная эффективность были улучшены на 35%, и, наконец, выбросы углерода для здания могут быть сокращены примерно

на 50% соответственно [255], [256], [257]. В недавних интервью Майкл Янсен, генеральный директор Cityzenith (которая занимается созданием умных и устойчивых городов по всему миру), утверждал, что городские цифровые двойники и реальная метавселенная являются синонимами, и поэтому метавселенная поможет в мультисистемном моделировании и визуализации зданий и окружающей среды в цифровом пространстве.

D. Социальная устойчивость с помощью метавселенной

Большинство проблем устойчивого развития сосредоточены на экологическом аспекте, однако Метавселенная обращается к неустойчивым социальным аспектам физического мира и объединяет социальные права, такие как разнообразие, доступность и справедливость в своей экосистеме. То же самое недавно подчеркнула директор по разнообразию Максин Уильямс в своем заявлении: «Разные люди должны не просто участвовать в Метавселенной в качестве потребителей; Они должны быть его архитекторами и строителями». 40 Недавно в отчете Bloomberg [258] также была освещена эта проблема, касающаяся NFT CryptoPunk, заявив, что цены на цифровые аватары варьируются в зависимости от цвета кожи, пола и расы соответственно. Такие компании, как OvalEdge41, определили проблему как неосознанную предвзятость, которая очень похожа на те, что связаны с моделями ИИ. Компания предлагает использовать метрики и комплексный набор целевых целей для дата-сайентиста, чтобы уменьшить предвзятость и повысить доступность в Web3. Кроме того, заинтересованным сторонам, организациям гражданского общества, научным кругам, инвесторам, регулирующим органам и предприятиям необходимо сотрудничать в этом вопросе, чтобы сделать Метавселенную более демократичной, а не только децентрализованной.

E. Устойчивая коммуникация и возможность установления соединений

Коммуникационная система пятого поколения была создана с большим ажиотажем и амбициями, чтобы обеспечить пользователям повсеместную связь. На недавнем Всемирном мобильном конгрессе (MWC) вице-президент VMware по распределенным периферийным устройствам заявил, что «5G — это еще один телефон в руках, который ничем не отличается от LTE и 4G. Коммуникационная система шестого поколения призвана вернуть фокус на человечность и устойчивое развитие». 42 Дискуссии о 6G всегда начинаются в соответствии с человеческим, экономическим и общественным развитием. Кроме того, 6G делает больший акцент на демократизации, а не на децентрализации, что является одной из основных проблем Метавселенной и ее устойчивости к устойчивости. Система шестого поколения также разрабатывается для достижения целей устойчивого развития за счет повышения эффективности использования ресурсов, снижения энергопотребления и, соответственно, снижения энергопотребления. Одной из движущих сил развития 6G стала пандемия COVID-19, которая заставила исследователей и людей осознать, что нужно уделять больше внимания экономическим и социальным потребностям широкополосной сети, а не искать красивую презентацию устройств и лучшую производительность. 6G и метавселенная хорошо подходят для устойчивого развития благодаря своим характеристикам демократизации и удержания человека в курсе событий, а также преодоления временных и пространственных барьеров для общения нескольких человек.

F. Безопасность и конфиденциальность метавселенной

Метавселенная — это просто цифровое воплощение реального мира. Тем не менее, Метавселенная собирает от пользователя информацию, реальную для физического мира, такую как черты лица, движения глаз, движения рук, данные кредитной карты, адрес, имя и так далее. Сбор такой информации вызывает опасения по поводу безопасности и конфиденциальности и может подвергнуть риску пользователя Метавселенной. Эксперты

предполагают, что Метавселенная станет главной мишенью для злоумышленников и хакеров для мошеннических процессов. Кроме того, Метавселенная также уязвима для распространения ненавистнических высказываний и ложной информации. Недавний опрос Sprout43, проведенный среди 300 маркетологов, показывает, что 64% из них обеспокоены безопасностью и конфиденциальностью данных, касающихся Метавселенной.

Некоторые из недавних исследований также выявили вопросы безопасности, конфиденциальности и этики, связанные с Метавселенной. Пьетро и Креши [259] выделили несколько проблем безопасности и конфиденциальности, связанных с Метавселенной, а также их логические последствия. В исследовании также представлено несколько направлений исследований для решения проблем безопасности и конфиденциальности, связанных с техническими и нетехническими парадигмами реализации Метавселенной. Чжао и др. [260] также обратили внимание на проблемы безопасности в экосистеме Метавселенной. Тем не менее, исследование разделило проблемы конфиденциальности и безопасности на четыре категории: товары, сценарии, коммуникации и информация о пользователях. Под товарами в их исследовании подразумеваются произведения искусства, здания, костюмы, внешность, индивидуальное моделирование персонажей и персонализированная одежда. Сценарий связан с религиозными, культурными и платформенными аспектами. Коммуникация отражает аспекты взаимопонимания, взаимного доверия, сотрудничества, обмена, социальности и интерактивности. Наконец, категория пользователей включает в себя объединение данных, полученных от нескольких датчиков, и сбор информации. Информация может быть социальной, биометрической, физической или физиологической соответственно. Гупта и др. [261] выделили вопросы конфиденциальности и безопасности в Метавселенной в контексте поставщиков услуг, заинтересованных сторон, технологий и платформ. Кроме того, в исследовании также представлены идеи по решению проблем безопасности и конфиденциальности за счет использования архитектуры нулевого доверия и ее интеграции с системой метавселенной. Хуан и др. [262] в своей работе исследовали расширяемость, построение реального мира, иммерсивное взаимодействие и характеристики социализации Метавселенной. Обсуждая экономические аспекты вышеупомянутых характеристик, в исследовании также подчеркиваются риски конфиденциальности и безопасности, включая небезопасный дизайн, неправильную аутентификацию, инъекции данных, фишинг, несанкционированный доступ, подслушивание и проблемы утечки личной информации. Исследование также вызвало опасения, связанные с человечеством и обществом в контексте Метавселенной. Wang et al. [263] представили систематический обзор литературы об исследованиях, проведенных для решения проблем конфиденциальности и безопасности в метавселенной. Кроме того, исследование связывает аспекты безопасности и конфиденциальности с гетерогенностью, устойчивостью, гиперпространственно-временной и иммерсивным реализмом, которые являются основными характеристиками, связанными с Метавселенной. В исследовании также рассматриваются потенциальные направления исследований, которые могут быть полезны для решения проблем безопасности. Ниже приведены некоторые из основных проблем безопасности, этики и конфиденциальности в Метавселенной.

1) Этические проблемы

Одна из основных этических проблем в Метавселенной связана с собственностью и цифровыми правами на активы и творения, созданные в цифровой среде. Другие этические проблемы включают доступность и инклюзивность людей из разных слоев общества, чтобы они могли участвовать в Метавселенной на равных правах. Одной из проблем, связанных с инклюзивностью, является кибербуллинг и виртуальные домогательства, которые необходимо решать в экосистеме Метавселенной. Наконец, справедливость и предвзятость алгоритмов в отношении методов и платформ, используемых для создания цифрового пространства в

Метавселенной, должны нести ответственность за предотвращение любой дискриминации пользователей.

2) Виртуальная кража

Подобно экономической системе и приложениям в реальном мире, виртуальный мир также уязвим для хакеров и воров, которые стремятся нацелиться на такие активы, как виртуальная валюта, редкие виртуальные предметы и виртуальная недвижимость, в Метавселенной. Злоумышленники могут использовать уязвимости системы для совершения виртуальной кражи. Таким образом, обеспечение безопасности виртуальных активов должно быть решено в Метавселенной до ее реализации.

3) Социальная инженерия

В реальном мире тактика, направленная на то, чтобы убедить человека раскрыть свою конфиденциальную информацию, называется социальной инженерией. Та же тактика может быть убедительно использована с помощью убедительных взаимодействий и дизайна аватаров. Такая тактика хакеров может быть использована для того, чтобы заставить пользователя раскрыть свою личность, финансовую или личную информацию, что может привести к любой форме убытков.

4) Атаки вредоносного ПО

В цифровом мире хакеры или злоумышленники могут передавать ссылки на вредоносное программное обеспечение и вирусы, что может поставить под угрозу не только их цифровой след, но и информацию в физическом мире. Кроме того, переход по ссылкам в виртуальном мире при взаимодействии с цифровыми объектами является достаточно распространенным и убедительным по сравнению с его физическим аналогом.

5) Утечка данных

Проблема утечки данных является одной из самых заметных в физическом мире, поэтому Метавселенная будет неявно уязвима для такой атаки, что сделает ее эпицентром для злоумышленников и хакеров. Хакеры, пытающиеся получить доступ к вашим личным фотографиям и информации через виртуальную платформу, должны быть устранены до крупномасштабной реализации Метавселенной.

6) Децентрализация

Одним из основных моментов Метавселенной является то, что экосистема децентрализована, что предполагает, что никакой центральный орган не отвечает за контроль и регулирование виртуальной среды. Это позволяет пользователям с высокой степенью автономии и свободы. Тем не менее, те же характеристики могут быть использованы и для причинения вреда пользователям, поскольку отсутствует подотчетность или надзор за создаваемым, публикуемым или распространяемым контентом.

РАЗДЕЛ VII.

Приложения и сценарии использования метавселенной в целом

А. Каковы варианты использования метавселенной

1) Метавселенная и физическая воля: как они взаимодействуют

Чтобы понять различные варианты использования Метавселенной, нужно сначала узнать, что это такое. Пользователи могут взаимодействовать с различными пространствами в качестве своего цифрового аватара в Метавселенной, захватывающем виртуальном 3D-мире. Пользователи метавселенной могут перемещаться по разным районам в качестве своих

цифровых аватаров, как и в реальном мире. Пользователи также могут создавать, делиться или обмениваться опытом и активами с помощью Метавселенной [54]. Недавно по всему миру ходили слухи о пресловутой Метавселенной, и люди проявляют большой интерес к ее вариантам использования. Многие компании, такие как Facebook, заметили, что на мероприятии Facebook Connect в конце октября 2021 года компания представила Meta в качестве бренда своей материнской компании. Гигант социальных сетей Biggie недавно также запустил инструменты метавселенной для разработчиков. Он состоит из трех компонентов, включая гарнитуру, платформу присутствия и набор инструментов искусственного интеллекта для разработчиков. Взаимодействие VR/AR-объектов с пользователями может быть запрограммировано. Точно так же Microsoft инвестировала в метавселенную, чтобы создать среду, способствующую сотрудничеству с Microsoft Mesh. Почти все крупные технологические компании присоединились к Метавселенной, удвоив спрос на варианты использования Метавселенной.

В. Примеры использования

Имея базовое представление о Метавселенной и о том, почему она набирает популярность, вы, должно быть, с нетерпением ждете возможности открыть для себя варианты ее использования. Поскольку Метавселенная — это передовая технология, многие люди задаются вопросом: «Каковы преимущества Метавселенной?». Каким образом вы будете использовать Метавселенную в своих интересах? Какую роль будет играть цифровая реальность в реальном мире? От проверки личности до платежей, мир вокруг нас становится все более и более цифровым [264]. В свою очередь, цифровой мир, такой как Метавселенная, позволяет частным лицам и предприятиям изменить то, как они рассматривают и используют технологии. Ниже приведено несколько примеров того, как можно использовать Метавселенную [1], [265].

1) Раскрытие маркетинговых перспектив

Возможным вариантом использования Метавселенной может стать возможность открытия новых маркетинговых возможностей [36]. Люди могут взаимодействовать с цифровыми аватарами, чтобы делать многие вещи в виртуальном мире. Кроме того, люди участвуют в социальных, развлекательных и обучающих мероприятиях Метавселенной. Маркетологи могут воспользоваться эксклюзивными маркетинговыми возможностями в разных виртуальных мирах Метавселенной. Маркетологи уже воспользовались возможностями для бизнеса в Метавселенной. Например, Anzu, которая использует рекламу для отслеживания просмотров в реальном времени в игровых средах на мобильных и консольных платформах. Также в этот список входят такие бренды, как Paramount и WarnerMedia. В Метавселенной реклама напоминает реальную жизнь, и она переплетается с игровым процессом, где рекламу можно найти в нужных местах. Например, реклама на билбордах или персонажи, одетые в брендовую одежду, предлагают многообещающую узнаваемость бренда. Игры в метавселенной доказали, как метавселенная может открыть новые маркетинговые перспективы [266].

2) Сценарии использования блокчейна

Блокчейн-приложения могут предоставить передовые технологии в качестве наиболее известного варианта использования в Метавселенной [6]. Децентрализация Метавселенной за счет внедрения крупномасштабной Метавселенной в различных отраслях является мощной основой для крупномасштабной Метавселенной. Блокчейны позволяют разрабатывать децентрализованные приложения и NFT, питают криптовалюты и функционируют как распределенный реестр для записи одноранговых транзакций. Технология блокчейн предлагает несколько преимуществ для привлечения торговых площадок NFT, способствуя появлению новых и реалистичных возможностей [267]. Пользователи могут общаться с другими пользователями и делиться более интерактивными метавселенными на торговых

площадках NFT. Пользователи могут взаимодействовать с NFT для принятия обоснованных решений о покупке через Метавселенную. Кейсы применения блокчейна метавселенной включают продвижение новых NFT или развитие общей виртуальной области. Тренд на игры на основе блокчейна привлек большую популярность. Игроки в NFT или блокчейн-играх могут получать различные внутриигровые коллекционные предметы для обмена с другими игроками или на внешних торговых площадках. Метавселенная может обеспечить онлайн-игры на основе блокчейна [42].

3) Виртуальный туризм

Виртуальный туризм — еще один многообещающий вариант использования Метавселенной [268], [269]. Развитие передовых технологий привело к тому, что можно наслаждаться путешествием, физически не доезжая до места назначения. Есть большая разница между знакомством с такими направлениями лично и просмотром их на видео. Метавселенная может быть использована для создания иммерсивных цифровых сред с помощью виртуальной реальности (VR) [59], [60] и дополненной реальности (AR) [61], [62], [63]. Вы можете будоражить воображение своей аудитории, объединяя иммерсивную цифровую реальность с реальным контентом. В результате люди могут ощущать свое окружение как физически присутствующее. Возможность широкого внедрения и признания VR-туризма является возможным основным вариантом использования. На платформах потокового видео, таких как YouTube и другие сервисы хостинга контента, появляется все больше видеоконтента в формате 360°. Серьезным недостатком использования Метавселенной для виртуального туризма является ее ограниченная свобода, как вы можете заметить на примере вариантов использования. Туристические направления не являются достаточно гибкими, чтобы позволить людям передвигаться, поскольку их можно просматривать только в записи.

4) Веб-коммуникация в режиме реального времени

Метавселенная также может облегчить общение в режиме реального времени в веб-интерфейсе, основываясь на поиске вариантов использования блокчейна в [51]. Инициатива по коммуникации в реальном времени для мобильных приложений и веб-браузеров известна как веб-коммуникация в реальном времени. Одним из самых интригующих приложений является Метавселенная для преобразования традиционной аудио- и визуальной коммуникации. Вы можете передавать информацию между клиентами через веб-связь в режиме реального времени, не требуя промежуточного сервера. Благодаря одноранговой коммуникации в Метавселенной [270] может стать возможным прямое общение между браузерами. В дополнение к предоставлению платформы для разработки новых стандартов веб-коммуникаций, технология Метавселенной предлагает интригующий вариант применения. Веб-коммуникация в реальном времени также может быть объединена с многочисленными медиапотоками, что важно для построения виртуальных миров.

5) Виртуальный офис и учебные пространства

Удаленная работа выросла в результате глобальной пандемии. Пандемия вынудила профессионалов из разных секторов звонить по Skype, Microsoft Teams и встречаться в Zoom. Удаленные специалисты могли виртуально общаться с этими инструментами [271]. Метавселенные предлагают множество возможностей для развития виртуальных офисных пространств или учебных сред [272], [273]. Совместная работа или обучение в Метавселенной возможны, если вы чувствуете, что находитесь в одной комнате. Virtuworx, например, создала виртуальные офисные пространства, используя сценарии использования Метавселенной. Благодаря гибриду виртуальной и смешанной реальности компания предлагает осмысленную и продуктивную рабочую среду. Члены команды могут получить доступ к различным функциям, таким как мероприятия, офисы, конференции,

виртуальные тренинги и торговые выставки, используя полностью настраиваемое решение. Преимущества метавселенной можно найти и в сфере образования. Minecraft и Second Life были использованы для улучшения обучения студентов в университетах. Студенты, изучающие архитектуру и медицину, также могут извлечь выгоду из VR-симуляций в Метавселенной.

6) Симуляции в здравоохранении на основе искусственного интеллекта

Медицинские симуляции на основе искусственного интеллекта представляют собой преобразующую парадигму в медицинском обучении и образовании в Метавселенной. В этом контексте искусственный интеллект служит катализатором для революции в обучении медицинских работников, оттачивающих свои навыки в реалистичных виртуальных средах [274], [275]. Эти симуляции используют возможности искусственного интеллекта для создания иммерсивных и динамичных сценариев, воспроизводящих широкий спектр медицинских ситуаций с точностью и детализацией. Одним из ключевых преимуществ симуляций в здравоохранении на основе искусственного интеллекта является их способность обеспечить безопасную и контролируемую среду для практикующих врачей для практики и совершенствования своих навыков. В симуляциях здравоохранения в Метавселенной используются диагностические инструменты на основе искусственного интеллекта для обучения медицинских работников. Смоделированные сценарии на основе искусственного интеллекта воспроизводят реальные медицинские ситуации для иммерсивного и эффективного обучения. Благодаря низкой задержке и высокой надежности 6G медицинские работники могут проводить удаленные консультации в Метавселенной, предоставляя медицинские услуги и экспертизу по всему миру.

7) Умные города и городское планирование

В Метавселенной алгоритмы искусственного интеллекта анализируют данные с умных датчиков, встроенных в города, для оптимизации транспортных потоков, энергопотребления и коммунальных услуг [84]. Это способствует эффективному городскому планированию и управлению ресурсами. Сети 6G обеспечивают бесперебойную связь для Интернета вещей (IoT), позволяя множеству датчиков и устройств взаимодействовать и обмениваться данными для приложений умного города.

С. Преодоление психологических барьеров с помощью метавселенной

Многие исследования показали, что экологическая устойчивость и изменение климата тесно взаимосвязаны. Компании и отрасли промышленности могут иметь возможность замедлить выбросы углекислого газа, однако массы или широкая общественность могут нести равную ответственность за использование предметов, которые не являются экологически чистыми. Несмотря на то, что в прошлые годы было зафиксировано около двух миллиардов постов в социальных сетях, посвященных климатическим условиям, недавнее исследование показало, что широкая общественность основывает свое представление об изменении климата на нормальной погоде, поэтому их восприятие носит довольно краткосрочный характер, т.е. эффект, который начал проявляться в течение 2-8 лет [276]. Использование Метавселенной для предоставления иммерсивного опыта и моделирования изменения климата может задействовать сознание широкой общественности, чтобы стимулировать действия по использованию экологически чистых продуктов, следовательно, уменьшая углеродный след. Взаимосвязь виртуальной реальности и психологии изменения климата была рассмотрена в недавнем исследовании Маровица [277], чтобы побудить широкую общественность к выбору проэкологических действий, соответственно.

D. Преимущества метавселенной

Не менее важно знать преимущества Метавселенной после понимания вариантов ее использования. На различных примерах того, как может быть использована Метавселенная, можно получить представление о ее потенциальных преимуществах [3], [270]. По мере развития технологий он отвечал на многие неопределенности, например, кто мог подумать, что люди могут совершать видеозвонки на большие расстояния для обмена данными за считанные секунды. Если кто-то задавался вопросом о преимуществах Метавселенной в прошлом, возможно, вы не нашли много ответов, но на данный момент они кажутся очевидными для всех. Тем не менее, виртуальные пространства и цифровые средства коммуникации используются миллионами людей по всему миру для удаленного общения. Помимо добавления реальных возможностей в виртуальные миры, Метавселенная имеет несколько преимуществ для цифрового мира. Вот несколько ключевых преимуществ технологии Метавселенной.

1) Инновации в здравоохранении

Чтобы понять, как секторы здравоохранения вписываются в Метавселенную, нам нужно изучить их многообещающие преимущества. Например, Метавселенная предоставляет пациентам уникальную возможность взаимодействовать с медицинскими работниками независимо от их географического положения [275]. Медицинские работники могут взаимодействовать с пациентами в виртуальных мирах в режиме реального времени через Метавселенную. Кроме того, студенты-медики могут участвовать в увлекательном и всестороннем обучении с помощью симуляции виртуальной реальности в метавселенной [274].

2) Метавселенная и новые захватывающие игры

Метавселенная будет играть решающую роль в игровых приложениях благодаря моделям «играй, чтобы заработать», которые позволяют разработчикам, издателям и пользователям получать экономические выгоды от игрового опыта [266], [278]. На различных онлайн-площадках геймеры могут, например, создавать и торговать внутриигровыми активами. Таким образом, преимущества децентрализации, присущие блокчейну, в сочетании с метавселенной могут произвести революцию в играх.

3) Совершенно новая экономика

Одним из самых известных предположений о Метавселенной является возможность созидательной экономики. Торговля активами в разных пространствах стала возможной благодаря Метавселенной [279], [280]. На другой платформе в Метавселенной вы можете продать NFT, созданный вами в игре Метавселенной. Большой экономический рост можно отнести к DeFi, NFT и блокчейн-играм.

4) Воздействие на окружающую среду

Метавселенная облегчает создание виртуальных рабочих мест и офисов, предоставляя ощутимую возможность сократить воздействие физического офиса на окружающую среду [281]. Снижение спроса на разрастающиеся здания приводит к снижению энергопотребления, поскольку виртуальное пространство процветает благодаря цифровой инфраструктуре, минуя необходимость в обширных физических структурах в традиционных офисных условиях. Метавселенная — это не только царство виртуального опыта, но и потенциальный катализатор экологической осведомленности. Образовательные инициативы в виртуальных пространствах, такие как симуляции и интерактивный контент, способны информировать и вдохновлять пользователей на принятие экологически сознательного поведения и образа жизни [282]. По мере развития метавселенной она выступает в качестве

альтернативы физическим мероприятиям и конференциям, сводя к минимуму воздействие на окружающую среду, связанное со строительством и обслуживанием крупных площадок. Виртуальные встречи предлагают более экологичное решение, соответствующее глобальному переходу к более устойчивым методам работы перед лицом экологических проблем. По сути, метавселенная обещает создать цифровую экосистему, которая будет не только инновационной и захватывающей, но и экологически ответственной. Используя потенциал виртуальных пространств, мы имеем возможность создать более устойчивое и экологически сознательное будущее.

Е. Рынок метавселенной: современное состояние

Не задумываясь о состоянии текущей Метавселенной, многие люди заинтригованы вопросом: «Является ли Метавселенная следующим Интернетом?». Сколько проектов сейчас разрабатывается? Привлекает ли Метавселенная внимание крупных имен? Возьмем, к примеру, Facebook. Можно ли ожидать, что другие технологические гиганты обратят на это внимание? Метавселенную должно создавать множество организаций, создателей и разработчиков, независимо от того, кто ей владеет. Принятие метавселенной также будет в основном определяться ее названиями. Это одни из ведущих компаний, которые начали разрабатывать Метавселенную [283].

1) Фейсбук

Многие технические энтузиасты расценили объявление Facebook о создании Метавселенной как пиар-ход. Очень важно подумать о том, как такой технологический гигант, как Facebook, может помочь создать более многообещающий рынок для Метавселенной. Кроме того, у Facebook есть почти все ресурсы для развития Метавселенной, от инфраструктуры до человеческого взаимодействия и открытий [284]. Гигант онлайн-сетей имеет массивный рекламный движок, гарнитуры Oculus и растущую экономику творчества.

2) Эпические игры

Еpic Games, известная студия по производству игр, борется за высокие позиции в будущем Метавселенной. Соучредитель Epic Games Тим Суини несколько лет назад изложил видение Метавселенной, и теперь у фирмы есть подходящая платформа для ее процветания. Epic Games потенциально может увеличить рост Метавселенной благодаря финансированию в размере 1 миллиарда долларов от Sony в будущем [285].

3) Икрософт

Усилия Microsoft по развитию Метавселенной нельзя игнорировать ни при каких обстоятельствах. Участие таких компаний, как Microsoft, развеивает опасения по поводу будущего Метавселенной. Microsoft строит Microsoft Mesh, бизнес-ориентированную метавселенную [286]. Пользователи смогут беспрепятственно подключаться к продуктам Microsoft через цифровую среду. Используя Microsoft Mesh, пользователи могут использовать Windows, Teams и другие службы через виртуальную реальность.

4) Decentraland

Decentraland — пример устойчивости рынка Метавселенной. Метавселенная — один из первых новаторских продуктов, в котором прямо упоминается Метавселенная. Пользователи могут торговать виртуальной недвижимостью и создавать NFT на Decentraland, разработанном в 2017 году. На недавнем аукционе в Decentraland была выставлена виртуальная недвижимость стоимостью более 2 миллионов [287], [288]. Это означает, что Decentraland, вероятно, станет одним из ведущих имен в Метавселенной будущего. Также включены

микросервисы и технологии блокчейна, а также периферийные вычисления и агенты искусственного интеллекта.

РАЗДЕЛ VIII.

Проекты

Взаимосвязанная сеть виртуальных 3D-миров — это один из способов определения концепции Метавселенной. С помощью гарнитуры виртуальной реальности пользователи попадают в эти миры, перемещаясь по Метавселенной с помощью движений глаз, элементов управления обратной связью и голосовых инструкций. Пользователь погружается в головной убор, создавая явление, называемое присутствием, которое достигается путем имитации подлинного физического опыта присутствия. Но прежде чем Метавселенная получит широкое и повсеместное распространение, необходимо устранить препятствия. Виртуальный аспект этой среды является существенным препятствием. Хотя VR-гарнитура часто требуется для входа в Метавселенную, это не единственная необходимость. Ожидается, что индустрия Метавселенной преодолет эти проблемы, поскольку наблюдается огромный рост продаж гарнитур, поддерживающих концепции Метавселенной.

В последние годы во вселенную Метавселенной входит много игроков. Несколько значительных текущих проектов Метавселенной показаны в таблице 9.

ТАБЛИЦА 9 Текущие проекты метавселенной

Project Title	Project sub-title	Project Length	Project URL
Decentraland	Virtual advertisement for content, goods and services	2015 - ongoing	https://decentraland.org/
Oculus (Meta Quest)	Meta's Metaverse platform - VR equipment, experiences and games	2014 - ongoing	https://store.facebook.com/quest/
Enjin	NFTs for everyone	2009 - ongoing	https://enjin.io/
Silks	Horse racing and bidding in Metaverse through NFTs	Upcoming (2022 - 2023)	https://silks.io
University of Miami - XR initiative	Multiple XR and Metaverse based projects	2018 - ongoing	https://xr.miami.edu/projects/index.html
MirageXR	Learn through holograms	2021- ongoing	https://wekit-ecs.com/team
Highstreet	Metaverse shopping and product showcases	2021 - ongoing	https://www.highstreet.market/
Metahero	3D scanning of humans to create their own NFT avatars for Metaverse	2021 - ongoing	https://metahero.io/

A. Decentraland

Decentraland — это децентрализованная метавселенная на основе блокчейна. Decentraland специализируется на создании, экспонировании и продаже реальных и NFT-активов. Decentraland управляется децентрализованной автономной организацией (DAO), которая владеет необходимыми смарт-контрактами, на основе которых работает Decentraland. Пользователи могут голосовать, используя систему DAO, чтобы влиять на различные аспекты Метавселенной. Активы можно купить с помощью нескольких валют, таких как polygon и ethereum, в то время как земельные участки в Метавселенной можно приобрести только за ethereum.

Крупные бренды, такие как Samsung, Atari и Adidas, купили участки земли в Decentraland и установили витрины со своей продукцией. Различные бренды в Decentraland проводят живые мероприятия и иммерсивные мероприятия. Например, Samsung недавно провела прямую трансляцию презентации своего Galaxy S22 в Decentraland.

B. Oculus

Oculus — это онлайн-платформа, на которой хранятся впечатления и игры, доступные через платформу VR-гарнитур Meta (Quest). Хотя это не отдельная метавселенная, она предоставляет множество фонов и игр, которые можно испытать через гарнитуру. Значение Oculus заключается в том, что он служит основой для будущей запланированной экспансии Meta в

концепции Метавселенной. Следовательно, очень важно внимательно следить за развитием событий в Oculus, даже несмотря на то, что это еще не Метавселенная.

C. Enjin

Enjin — это маркетплейс и платформа, которые занимаются созданием NFT для метавселенных. Enjin предоставляет комплекты средств разработки программного обеспечения (SDK), которые поддерживают эти действия. Enjin работает с двумя разными типами валют - токеном Enjin и монетой Enjin. Кроме того, они обеспечивают поддержку интеграции для интеграции торговли созданными NFT в ваши приложения Метавселенной. Примерами метавселенных, работающих на платформе Enjin, являются AlterVerse, MotoBloq и Dvision Network. Enjin также активно финансирует проекты Метавселенной, и такие проекты могут подать заявку на финансирование через свой веб-сайт.

D. Silks

Silks, игровая платформа для Метавселенной, имитирует индустрию чистокровных скачек в реальной жизни с использованием Метавселенной с поддержкой блокчейна. Игровая экономика «играй, чтобы заработать» лежит в основе метавселенной Silks, позволяя людям владеть скаковыми лошадьми и конными фермами, зарабатывая токены с помощью умелых игр и вклада в экосистему Silks. Пользователи смогут покупать, собирать, обменивать и взаимодействовать с цифровыми активами, которые отражают настоящих чистокровных скаковых лошадей. Пользователи также смогут покупать, строить и обслуживать конные фермы, другую недвижимость и интерактивные цифровые активы. Проект находится в стадии разработки и, как ожидается, будет полностью функционировать к 2023 году.

E. XR initiative

XR initiative — это инициатива Университета Майами, направленная на изучение вариантов использования XR и VR и их совместимости. XR initiative имеет большое значение, поскольку она сосредоточена на неигровых областях, таких как образование и здравоохранение. Хотя XR initiative не является полноценной Метавселенной сама по себе, различные проекты дают возможность взглянуть на полезность и варианты использования Метавселенной в будущем. Проекты, являющиеся частью этой инициативы, включают в себя обучение анестезии для медсестер и технологическое обучение для людей, страдающих расстройствами аутистического спектра.

F. MirageXR

MirageXR позволяет преподавателям и разработчикам создавать уникальные голографические обучающие программы, повышая эффективность рабочего места, позволяя анализировать данные для оценки производительности и помогая промышленным организациям экономить деньги на расходах на обучение. Ядром приложения является обучение с использованием технологий, которое помогает пользователям выйти за рамки простого запоминания и понимания содержания учебных упражнений, фактически выполняя действие самостоятельно.

Возможности разработки и анализа производительности проекта позволяют разработчикам курсов дополненной реальности обновлять задания, быстро оценивать вовлеченность и помогать учащимся анализировать свои действия, записывая практические занятия для улучшения практики.

В последнее время, с развитием искусственного интеллекта, начинают появляться большие языковые модели, новые коммуникационные технологии, стартапы и проекты,

ориентированные не только на систему замкнутого цикла зеленой экономики, но и на здравоохранение, сетевое взаимодействие, создание сообществ, недвижимость и транспорт. Ниже приведены некоторые из проектов, которые помогают оказывать влияние на общество с помощью Метавселенной.

1) VRealty

Это проект недвижимости на основе метавселенной, который позволяет покупателю демонстрировать свою недвижимость с помощью виртуальных туров, в то время как покупатели могут взаимодействовать с недвижимостью и предметами в цифровом мире, чтобы получить захватывающий опыт, прежде чем принять решение об инвестировании в недвижимость. Технология экономит время ожидания на просмотр недвижимости, а также помогает покупателям экономить на транспортных расходах.

2) MetaMed

Проект вращается вокруг предоставления услуг в области медицины и здравоохранения в экосистеме Метавселенной. Проект предоставляет приложения, связанные со здравоохранением, виртуальные клиники и услуги телемедицины, особенно услуги телерадиологии. Данная технология объединяет специалистов для своей работы по всему региону и обеспечивает круглосуточное обслуживание с высочайшим качеством. Кроме того, они предоставляют медицинские и консультационные услуги в цифровом пространстве.

3) MetaDrive

Этот проект ориентирован на цифровую трансформацию автономного вождения. Проект использует искусственный интеллект, в частности, использование обучения с подкреплением (RL) для картографирования различных сценариев дорожного движения, дорожных карт и сцен для моделирования в цифровом мире. Симуляция включает в себя изображения от первого лица, семантические карты, RGB-изображения, лидар с другими сенсорными входами и точную физическую симуляцию. Среда может быть использована для тестирования эффективности работы беспилотных автомобилей или уточнения характеристик автономных транспортных средств для конкретной среды и местности.

4) MetaSports

Этот проект помогает спортивным индустриям различными способами, такими как обучение, симуляции, цифровые турниры, организация спортивных мероприятий и так далее в экосистеме Метавселенной. Игроки могут погрузиться в тренировку, в то время как болельщики в режиме реального времени взаимодействуют со спортивными состязаниями, которые разыгрываются в реальном мире.

5) Лаборатория метавселенной Verizon

Verizon изучает парадигму метавселенной, используя искусственный интеллект и технологию 5G для улучшения пользовательского опыта в цифровой сфере. Проект предоставляет разработчикам Метавселенной прочную платформу для разработки решений в области здравоохранения, моды, недвижимости и развлечений, совместимых с высокоскоростными сетями.

6) Метавселенная Veyond

Veyond Metaverse является лидером в области технологий здравоохранения, когда речь идет о расширенной реальности (XR). Veyond Metaverse был включен в список лучших развивающихся стартапов для Metaverse. Платформа использует возможности VR, AR и XR для

обучения и взаимодействия пользователей и студентов в отношении хирургических инструментов, сценариев операций и медицинских услуг соответственно.

7) Edverse

Edverse — это, по сути, образовательная метавселенная, которая предоставляет услуги встреч выпускников, виртуальных классов и занятий с использованием технологии блокчейн, такой как Elysium и Polygon. Образовательная библиотека трансформируется в активы в виде NFT, которые стимулируют не только стейкхолдеров, но и студентов за счет заработка токенов.

G. Highstreet

Метавселенная с акцентом на бизнес. Для доступа к рынку можно использовать веб-браузеры. Метавселенная обещает возможности для взаимодействия с известными людьми, которые представят свои бренды на главной улице. В метавселенной Highstreet доступно личное взаимодействие. На главной улице находится уникальный криптовалютный зал, где клиенты могут обменивать цифровую валюту в условиях виртуальной реальности. Каждый товар, продаваемый на Highstreet, отображается покупателю как в цифровом, так и в физическом виде, подключенном с помощью токена продукта. Помимо возможности носить пару обуви, которую пользователь покупает в реальном мире, они также могут быть добавлены в гардероб своего аватара в Метавселенной.

X. Metahero

Проект Metahero использует смарт-контракты NFT и технологии 3D-сканирования для разработки уникальных мета-аватаров и мета-объектов. Фундаментальной технологией Metahero является 3D-сканирование, которое исследует физические объекты, чтобы собрать информацию об их внешнем виде и изобразить их в цифровом виде. Wolf Studio и Metahero заключили партнерское соглашение в области 3D-сканирования. Концепция Metahero заключается в том, чтобы сканировать тело пользователя с помощью 3D-сканирующих машин, а затем создавать реалистичные NFT. Эти NFT будут использоваться в качестве аватаров пользователей внутри Метавселенной. Проект находится в стадии разработки, где пользователи могут подписаться на получение уведомлений о наличии сканера рядом с их местоположением.

РАЗДЕЛ IX.

Извлеченные уроки

Основываясь на систематическом обзоре и учебной информации, представленной в предыдущих разделах, практические уроки и рекомендации следующие:

1) Искусство и иммерсивный опыт

В области ИИ зафиксирован непрерывный прогресс, будь то в форме самоконтролируемого обучения, объяснимого ИИ, генеративно-состязательных сетей, вариационных автоэнкодеров, трансформеров или моделей на большом языке [113], [114], [116]. Все вышеупомянутые методы были использованы в том или ином качестве, чтобы сделать визуализацию изображений/кадров более качественной и уникальной. В последнее время модели большого языка, такие как Dall-E2 [115], взяли Интернет штурмом благодаря созданию реалистичных изображений с помощью понимания языка. Это поможет не только в создании искрометного искусства, но и в уникальном визуальном опыте для пользователей.

2) Экономика замкнутого цикла

Простыми словами, экономика замкнутого цикла заключается в производстве отходов и оборотных материалах и продуктах с целью сохранения природы. Несмотря на то, что многие компании перешли на экологически чистые продукты, их влияние несущественно. Мы обсудили, как путешествия снижают выбросы CO₂. Только в 2017 году объем конгрессно-выставочной индустрии оценивался в 2,5 триллиона долларов, что требует значительных поездок. Метавселенная может помочь сократить авиаперелеты, сделав выставочную и конференционную индустрию цифровой/виртуальной, что не только поможет в достижении целей устойчивого развития, но и поможет в экономии средств для обеих сторон, следовательно, более циклический подход [289]. Точно так же можно разработать игру, которая может мотивировать потребителей не использовать пластиковые предметы и использовать переработанные продукты для чеканки доли монеты (подход майнинга).

3) Устойчивое развитие в метавселенной

Исследователи и сотрудники отрасли предположили, что метавселенная может помочь в повышении общей устойчивости [290]. Это может быть мотивацией для пользователей сделать выбор в пользу цифровой одежды, виртуальных концертов, виртуальных встреч и так далее. При правильном использовании достижение устойчивости с помощью Метавселенной было бы неизбежным. Тем не менее, он может быть использован в противном случае, чтобы нарушить цели устойчивого развития, поэтому необходимо создать и обеспечить соблюдение правил, руководящих принципов и законов, чтобы сделать Метавселенную спасителем. Кроме того, использование цифровых двойников уже доказало свою эффективность на пути к устойчивому развитию. Кроме того, Метавселенной также необходимо работать над социальной устойчивостью, чтобы виртуальная система могла достичь демократизации, а не только двигаться в сторону децентрализации.

4) Многоуровневая безопасность в метавселенной

Метавселенная, без сомнения, меняет правила игры, но с увеличением числа пользователей она также станет кошмаром для сотрудников службы безопасности. По оценкам, количество киберпреступлений увеличится многократно по мере того, как Метавселенная движется к коммерциализации. Например, успешная деловая сделка может обернуться катастрофой, если аватар (человек) выдает себя за кого-то другого. Таким образом, многоуровневая безопасность будет иметь важное значение для защиты данных, а также методов искусственного интеллекта в Метавселенной. Новые технологии, такие как федеративное обучение, частный искусственный интеллект и блокчейн, наряду с методами шифрования и сохранения конфиденциальности, будут использоваться для поддержания безопасности в экосистеме метавселенной [291], [292].

5) Беспроводная интерактивность в метавселенной

Предыдущие поколения беспроводных систем связи были сосредоточены в основном на улучшении связи. Тем не менее, будущие поколения мобильных наземных систем будут сочетать связь с виртуальным и физическим пространством, а также с повсеместным интеллектом. Существует потенциал для того, чтобы беспроводная интерактивность, ставшая возможной благодаря будущим коммуникационным технологиям, сыграла важную роль в установлении связей между киберпространством и физическим пространством, а также между людьми. Терагерцовая связь будет особенно полезна для связи со сверхвысокой скоростью передачи данных на коротких расстояниях, которые имеют абсолютно нулевую частоту ошибок, а также высокую скорость передачи данных [24], [26], [27]. Более того, в ближайшем будущем искусственный интеллект окажет огромное влияние на будущее беспроводной связи на базе 6G, став как нативным, так и повсеместным, что позволит всем компонентам 6G быть

интеллектуальными и удобными для пользователя. По мере роста Метавселенной в 6G также, вероятно, будет доминировать увеличение интерактивности, что станет одной из ее ключевых основ [293]. Интерактивность на основе 6G предоставит пользователям Метавселенной мультисенсорный опыт, который является захватывающим и тактильным, тем самым обогащая их повседневную жизнь и повышая качество жизни.

6) Разнообразные требования к сервисам в метавселенной

Вполне возможно, что мобильные сети не будут использоваться в полной мере из-за разнообразных, а иногда и противоречивых требований различных сервисов и приложений Метавселенной. В таких случаях сети 6G позволяют разделить сеть на несколько виртуальных и автономных логических сетей при совместном использовании одной и той же физической инфраструктуры [193], [294]. Таким образом, каждый сегмент сети можно настроить для эффективного обслуживания приложения Метавселенной, заботясь об энергоэффективности, задержке, плотном подключении, мобильности и пропускной способности. Ключевой особенностью сетей 6G будет динамическое предоставление сетевых срезов [190]. Вместо того, чтобы классифицировать приложения Метавселенной на eMBB, mMTC и URLLC, как в традиционных сетях, сети 6G смогут предоставлять динамические типы услуг в зависимости от сетевого трафика и требований пользователей.

7) Самодостаточная инфраструктура в метавселенной

Существующие коммуникационные и вычислительные инфраструктуры ограничены с точки зрения масштабирования сервисов и приложений в соответствии с динамическими требованиями. Например, Facebook space (социальная сеть на основе виртуальной реальности) может вместить не более трех человек для общения в предоставляемой среде. Метавселенная принесет множество важных вариантов использования, для которых это неэффективно, включая виртуальные классы, голоконференции и мероприятия, а также виртуальный туризм [3], [295], [296], [297]. С появлением децентрализованного интеллекта, периферийных вычислений с множественным доступом, микросервисов и методов обучения с подкреплением луч оптимизма просвечивает на пути к таким иммерсивным приложениям [10], [34], [40], [198]. Среда метавселенной, поддерживаемая сетями 6G, будет более отзывчивой за счет автоматизации беспроводных сетей с помощью передовых методов глубокого обучения. В частности, 6G в сочетании с невероятными возможностями обучения с подкреплением может по-настоящему трансформировать существующую инфраструктуру и сделать ее пригодной для среды Метавселенной. Более того, внедрение ИИ в качестве встроенной функции сети позволит 6G стать сетью первого поколения, способствующей широкомасштабному развертыванию самооптимизирующихся и автоматизированных сетей [21], [298]. В результате последних достижений в вышеупомянутых технологиях, практиках и методах, будущие беспроводные сети смогут сосуществовать в соответствии со своим состоянием и достигать поставленных перед ними целей.

РАЗДЕЛ X.

Проблемы и направления исследований на будущее

В этом разделе обсуждаются и перечисляются прогнозируемые проблемы и будущие тенденции исследований, касающиеся роли ИИ, 5G/6G и их взаимодействия в Метавселенной.

A. Роль ИИ в метавселенной

В этом подразделе освещаются прогнозируемые проблемы и будущие направления, касающиеся роли ИИ в Метавселенной.

1) Интеграция с новыми технологиями

По росту Метавселенной очевидно, что все больше и больше пользователей будут изучать и адаптироваться к вышеупомянутой технологии. Чтобы справиться с масштабируемостью, Метавселенная должна интегрироваться с новыми технологиями, такими как 5G/6G, Индустрия 5.0, Интернет воздушных и наземных транспортных средств и так далее. Последствия или проблемы, которые могут возникнуть в результате такой интеграции, еще предстоит увидеть, но мы можем предположить, что неоднородность, управление полосой пропускания, энергоэффективность и безопасность будут лишь некоторыми из них.

2) Уникальный иммерсивный опыт

Метавселенная известна реалистичным и захватывающим опытом в цифровом мире. Однако по мере насыщения рынка пользователи будут требовать уникальных аспектов, таких как новые цифровые ландшафты, больше интерактивных пространств, опыт, основанный на реальности, и отображение эмоций в реальном времени в цифровом мире. Немногие из вышеупомянутых проблем могут быть решены с помощью больших языковых моделей и методов, таких как Dall-E, но эти модели и методы не являются общедоступными. Кроме того, использование этих моделей не может быть выполнено портативными устройствами, поэтому остро стоит задача разработки платформ, которые могли бы предоставлять взаимные услуги и решения.

3) Демократизация

Из обзора основополагающих работ было выявлено, что Метавселенная на данный момент далека от демократизации. С ростом и разнообразием пользователей Метавселенной придется сделать выбор в пользу демократизации, чтобы сохранить устойчивость. Исследователи предложили использовать смарт-контракты на основе искусственного интеллекта для обнаружения аномалий, но этого еще предстоит достичь, и результаты еще предстоит реализовать. Искусственный интеллект сам по себе подвержен предубеждениям, поэтому люди, участвующие в процессе, должны быть интегрированы для того, чтобы сделать процесс демократизации свободным от предвзятости.

4) Защита интеллектуальной собственности

Метавселенная в основном была введена как продолжение нашей реальности. Это расширение поднимает бизнес-проблемы, существующие в реальном мире, такие как защита бренда, проблемы с авторскими правами, кража интеллектуальной собственности и многое другое. Из-за нахождения в цифровом пространстве подделка в Метавселенной была бы намного проще, а воспроизводимость товарных знаков в виде виртуальных изображений или NFT была бы намного дешевле. Вызовы для этой категории связаны не только с искусственным интеллектом, но и с правоохранительными органами и интеллектуальными ведомствами. Кроме того, необходимо разработать методы борьбы с анонимностью в Метавселенной, поскольку это больше всего мешает владельцам контента и брендов обеспечить соблюдение своих прав на интеллектуальную собственность.

В. Роль 5G/6G в метавселенной

В этом подразделе освещаются прогнозируемые проблемы и будущие направления, касающиеся роли 5G/6G в Метавселенной.

1) Огромная, высокодинамичная и сложная метавселенная

Нет никаких сомнений в том, что Метавселенная будет построена на основе высокодинамичных, чрезвычайно плотных и исключительно сложных мобильных сетей. Эти сети будут состоять из сверхкрупномасштабного и по своей сути разнородного оборудования.

Тем не менее, в архитектуре современных беспроводных сетей есть много фиксированных особенностей, и, таким образом, задачи оптимизации определяются для решения конкретных задач и услуг, которые были идентифицированы и определены заранее [299], [300]. Следовательно, существующий процесс ручной оптимизации и настройки сетей не подходит для Метавселенной. Кроме того, первоначальные классы услуг 5G будут конкурировать с новыми иммерсивными опытами, такими как XR-игры, телеоперации и голографический телесенсор, которые скоро станут доступны в контексте Метавселенной [301]. Таким образом, будущие мобильные сети должны одновременно обеспечивать высокую скорость передачи, высокую надежность и низкую задержку, чтобы эффективно предоставлять вышеупомянутые услуги Метавселенной.

2) Автоматическое управление метавселенной

Будущие беспроводные сети для Метавселенной не будут полагаться на ручное вмешательство, чтобы избежать каких-либо крошечных возможностей. Таким образом, ZTM будет играть полезную роль, контролируя, отслеживая и конфигурируя задачи для массивных сетей, чтобы достичь полностью независимой автоматизации с обратной связью, уменьшая любые возможности вмешательства человека [221]. В современных беспроводных сетях ZTM был включен для конкретных сценариев использования 5G/6G [223]. Тем не менее, Метавселенная выявит различные требования, связанные с разнородными пользовательскими приложениями. Следовательно, требуется универсальная стратегия ZTM, отвечающая требованиям нескольких вертикалей в Метавселенной.

3) Космическое-воздушное-наземно-морское покрытие для Метавселенной

Интегрированная коммуникационная сеть космос-воздух-земля-море расширит возможности Метавселенной в двух направлениях:

- Наземные сети обеспечат повсеместный беспроводной доступ пользователям из любого места в любое время [302].
- Наземные сети будут поддерживать пользователей Метавселенной, чтобы они могли свободно перемещаться между интегрированными сетями космос-воздух-земля-море для непрерывного иммерсивного опыта [30], [303].

Тем не менее, очень частая точность важных данных между космосом-воздухом-землей-морем может вызвать значительные задержки, требующие огромной полосы пропускания и чрезмерных транспортных ресурсов [172]. Таким образом, становится обязательным изучение новых архитектур SAGSIN и платформ моделирования для поддержки разнообразных и обширных сервисов и приложений Метавселенной. Кроме того, надежность существующих архитектур SAGSIN может быть скомпрометирована из-за высокой мобильности спутников, что в конечном итоге может привести к сбоям в работе приложений Метавселенной. Следовательно, для будущих сервисов Метавселенной необходимы новые метрики оценки надежности, как это было предложено исследователями в [304]. На рисунке 17 показаны некоторые требования к бесшовному мета-погружению и индикаторы для оценки производительности сервисов.

Meta-Immersion			
Experience Factors	Feeling of Presence	Feeling of Interaction	Feeling of Pleasure
Service Indicators	Resolution Frame Rate Refresh Rate Jitter Motion Blur	Tracking Sensor Buffer Time Operation Delay Response Time Postural Stability	Cybersickness Sensory Mismatch Nausea Scale Six Degrees of Freedom Number of Motion Axes
Relationship			
Technical Indicators	Downlink Data Rate	Uplink Tracking Bit Error Rate	Virtual Experience
Minimum Requirement	2160×1200@90fps: 20–38Mbps 2560×1440@60fps: 22–42Mbps	10^{-5}	-

РИСУНОК 17.

Некоторые KPI и требования для оценки иммерсивности в среду Метавселенной [304].

4) Тактильная обратная связь в метавселенной

В разделах IV-D и V-C обсуждалось, что некоторые приложения Метавселенной, такие как роботизированная хирургия, взаимодействие между аватарами, телеоперации и телеприсутствие, должны полагаться на каждый крошечный бит тактильной информации, возникающей в результате взаимодействия между физической и метасредой, чтобы нормально функционировать. Несмотря на то, что IEEE ввел стандарт для тактильного Интернета (IEEE P1918.1) для нормализации такой деятельности, тем не менее, требования тактильной обратной связи заключаются в сверхнизкой задержке, например, в миллисекундах [225]. Ожидается, что существующие сценарии использования 5G-URLLC будут соответствовать этим требованиям. Несмотря на это, тактильный Интернет создает ряд потенциальных исследовательских проблем, которые еще предстоит полностью решить, особенно в контексте Метавселенной. Например, для сценариев использования Метавселенной могут быть предложены эффективная маршрутизация и протоколы MAC для доставки тактильной информации [305]. Кроме того, интеллектуальное и адаптивное управление сетевым трафиком может быть изучено для доставки мультисенсорной аудиовизуальной тактильной информации по беспроводным сетям. Наконец, вычислительные возможности могут быть ускорены для иммерсивных сервисов за счет применения методов сжатия в качестве профессиональных процессоров для тактильной информации.

С. Интегрированная роль ИИ и 6G в метавселенной

В этом подразделе освещаются прогнозируемые проблемы и будущие направления, касающиеся интегрированной роли ИИ и 6G в Метавселенной.

1) Периферийный ИИ с поддержкой 6G в метавселенной

Ожидается, что Метавселенная приведет к полному переходу ИИ из облака на границу сети, что позволит достичь интеллектуального интеллекта на устройстве для сервисов Метавселенной. Периферийный ИИ, безусловно, может принести пользу Метавселенной в достижении отклика с низкой задержкой, обеспечивая при этом конфиденциальность пользовательских данных [38], [203], [293]. Однако разгрузка сервисов Метавселенной создаст серьезные проблемы для существующих беспроводных сетей. Например, пользователи

Метавселенной, проживающие в отдаленных регионах с плохим подключением к Интернету, могут столкнуться с отключением из-за высокой задержки. Для критически важных приложений такая задержка может привести к худшим последствиям. Следовательно, современные системы связи могут использовать услуги 6G-uMBB для поддержки приложений Метавселенной на конечных устройствах [306]. Пограничное кэширование также может быть использовано для дальнейшего сокращения задержки передачи. Кроме того, метавселенная позволит собирать огромное количество гетерогенных данных (из-за разнообразия пользователей/сервисов), поэтому периферийные устройства могут использовать федеративное обучение для локального обучения модели, не нарушая никаких законов о конфиденциальности, как показано на рисунке 14.

2) Автоматизация сети на основе искусственного интеллекта для метавселенной

В Метавселенной, состоящей из разнородных пользователей и сервисов, автоматизация сети будет иметь ключевое значение для обеспечения бесперебойного QoE для пользователей. Искусственный интеллект должен играть жизненно важную роль в обеспечении возможностей самоадаптации в сетях 6G. В последнее время фреймворки на основе искусственного интеллекта широко используются для расширения возможностей автоматизации в сетях 6G, позволяя им самостоятельно распределять, самостоятельно настраивать и самооптимизировать сетевое оборудование и ресурсы [222]. Однако, как и предполагалось в Метавселенной, этим способностям могут помешать следующие проблемы при использовании ИИ:

- Отсутствие помеченных обучающих данных для обновления модели ИИ с учетом меняющегося контекста
- Сложность базовых моделей глубокого обучения, которые должны быть перенесены на устройства с ограниченными ресурсами
- Ограничение доступности оборудования для поддержки новых и появляющихся интеллектуальных сервисов для Метавселенной

Для решения вышеупомянутых проблем возможными направлениями исследований могут стать адаптация методов обучения самоконтролю для обучения моделей ИИ и распределение моделей ИИ в континууме конечных границ облака для снижения вычислительной нагрузки на конечные/периферийные устройства.

3) Энергоэффективный искусственный интеллект и 6G для метавселенной

Энергоэффективность останется одним из ключевых KPI для разработчиков метавселенной при предложении решений на основе искусственного интеллекта и 6G. Исходя из интегрированной роли ИИ и 6G, как обсуждалось в разделе V, можно сказать, что оба будут широко использоваться для предоставления иммерсивных услуг в Метавселенной, одновременно решая проблему плотности и мобильности пользователей. Однако для того, чтобы соответствовать требованиям Метавселенной к повсеместному интеллекту из любого места и в любое время, сети 6G потребуют обильных ресурсов и их обслуживания [257]. В то время как некоторые из ресурсов могут быть сильно использованы, другие, скорее всего, останутся избыточными или неиспользуемыми большую часть времени, следовательно, потребляя эквивалентную энергию. Чтобы решить эту проблему, сетевые ресурсы должны быть либо адаптивными, либо спроектированными специально в соответствии с энергетическими потребностями определенного приложения Метавселенной [221], [223]. Более того, поскольку большая часть интеллекта будет размещена локально, она будет

потреблять относительно больше энергии, чем облачная аналитика, и в конечном итоге приведет к тому, что батареи будут разряжаться быстрее. В таких случаях конечные устройства должны быть способны собирать энергию из окружающей среды, чтобы оставаться самодостаточными [307]. Кроме того, современные модели ИИ требуют значительных затрат энергии для своего выполнения из-за своей высокой параметризации. Таким образом, потенциальное направление исследований может заключаться в том, чтобы либо удалить избыточные параметры из моделей ИИ, торгуя точностью, либо адаптивно выгрузить модели на периферию или в облако на основе прерывистой энергии, доступной на устройствах.

D. На пути к устойчивой метавселенной

В этом подразделе освещаются прогнозируемые проблемы и будущие направления, связанные с устойчивой Метавселенной.

1) Изменение климата

Несмотря на то, что Метавселенная обладает потенциалом для сокращения выбросов углекислого газа, в значительной степени за счет виртуального взаимодействия и цифрового присутствия, она также может нанести вред окружающей среде при неправильном использовании. Например, с появлением Метавселенной возникнет необходимость в расширении центров обработки данных, поэтому компаниям, внедряющим Метавселенную, придется перейти на гипермасштабируемые центры обработки данных для удовлетворения потребностей в энергии. Кроме того, большая часть электронной коммерции, связанной с Метавселенной, осуществляется с помощью NFT и процессов на основе блокчейна, что является энергоемким процессом. Метавселенной необходимо будет перейти к proof-of-stake, когда речь идет о транзакциях, поскольку они менее энергоемкие. Кроме того, ИИ можно использовать для оптимизации повышения эффективности, в то время как транзакции Proof-of-Stake выполняются для дальнейшего снижения энергопотребления.

2) Цифровое неравенство

Исследования показали, что определенная часть общества имеет лучший доступ к технологиям, поэтому внедрение новых технологий на рынке способствует однородности, а не разнообразию. Например, statista сообщила, что на Западную Европу и Северную Америку приходится почти 90 процентов продаж VR-телевизоров. Совсем недавно PR Newswire предположил, что Северная Америка станет эпицентром роста метавселенной в ближайшие четыре года. 46 Для того, чтобы Метавселенная соответствовала целям устойчивого развития, ей необходимо двигаться вперед к справедливому распределению технологий, тем самым снижая цифровой разрыв в цифровом мире.

3) Обида и раскол

В настоящее время Метавселенная считается продолжением нашей реальности или цифровым пространством, которое не зависит от текущего психического состояния. Однако постоянное воздействие и чрезмерное использование Метавселенной может привести к социальным последствиям, таким как создание параллельной реальности, которая влияет на психическое состояние и благополучие человека. Для того, чтобы сделать Метавселенную устойчивой, она должна пройти управление и аудит, чтобы психическое состояние человека не было перегружено и, соответственно, восприятие человеком цифрового мира, то есть Метавселенной, должно быть отделено от ее физического состояния.

4) Безопасность и конфиденциальность

Метавселенная собирает не только двумерные данные из Интернета, но и трехмерные данные об окружающей среде, утечка которых может иметь серьезные последствия в

физическом мире. Кроме того, Метавселенная позволяет пользователям создавать свои множественные личности, что может многократно повысить проблему безопасности и конфиденциальности. Использование искусственного интеллекта и блокчейна не только для управления личностями, идентификационными данными, но и для управления, владения данными, аутентификации и транзакций.

РАЗДЕЛ XI.

Заключение

В этом обзорном документе представлен всесторонний обзор роли искусственного интеллекта и 6G в реализации иммерсивного опыта Метавселенной. В частности, мы исследовали несколько базовых технологий искусственного интеллекта и 6G, таких как достижения в области компьютерного зрения, парадигмы обучения и технологии беспроводной связи в контексте Метавселенной. Кроме того, мы исследуем совместную роль технологий искусственного интеллекта и 6G в получении повсеместного интеллекта, тактильной обратной связи и возможностей самооптимизации для нескольких сервисов Метавселенной, начиная от голографического телеприсутствия и заканчивая удаленными операциями. Затем мы выделим устойчивый аспект сервисов Метавселенной, за которым последуют приложения, сценарии использования и текущие проекты. Наконец, мы освещаем многочисленные открытые вопросы, будущие направления и извлеченные уроки для потенциальных исследователей и разработчиков приложений и сервисов Метавселенной.

References

1.

L. U. Khan, Z. Han, D. Niyato, E. Hossain and C. S. Hong, "Metaverse for wireless systems: Vision enablers architecture and future directions", *arXiv:2207.00413*, 2022.

Show in Context [Google Scholar](#)

2.

H. Ning et al., "A survey on metaverse: The state-of-the-art technologies applications and challenges", *arXiv:2111.09673*, 2021.

Show in Context [Google Scholar](#)

3.

L.-H. Lee et al., "All one needs to know about metaverse: A complete survey on technological singularity virtual ecosystem and research agenda", *arXiv:2110.05352*, 2021.

Show in Context [Google Scholar](#)

4.

L.-H. Lee et al., "When creators meet the metaverse: A survey on computational arts", *arXiv:2111.13486*, 2021.

Show in Context [Google Scholar](#)

5.

P. Bhattacharya, M. S. Obaidat, D. Savaliya, S. Sanghavi, S. Tanwar and B. Sadaun, "Metaverse assisted telesurgery in healthcare 5.0: An interplay of blockchain and explainable AI", *Proc. Int. Conf. Comput. Inf. Telecommun. Syst. (CITS)*, pp. 1-5, 2022.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

6.

T. R. Gadekallu et al., "Blockchain for the metaverse: A review", *arXiv:2203.09738*, 2022.

Show in Context [Google Scholar](#)

7.

L. Cao, "Decentralized AI: Edge intelligence and smart blockchain metaverse Web3 and DeSci", *IEEE Intell. Syst.*, vol. 37, no. 3, pp. 6-19, May/Jun. 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

8.

I. A. Ilyina, E. A. Eltikova, K. A. Uvarova and S. D. Chelysheva, "Metaverse-death to offline communication or empowerment of interaction?", *Proc. Commun. Strategies Digit. Soc. Seminar (ComSDS)*, pp. 117-119, 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

9.

N. Vretos et al., "Exploiting sensing devices availability in AR/VR deployments to foster engagement", *Virtual Real.*, vol. 23, no. 4, pp. 399-410, 2019.

Show in Context CrossRef Google Scholar

10.

W. Y. B. Lim et al., "Realizing the metaverse with edge intelligence: A match made in heaven", *arXiv:2201.01634*, 2022.

Show in Context Google Scholar

11.

M. T. Vega et al., "Immersive interconnected virtual and augmented reality: A 5G and IoT perspective", *J. Netw. Syst. Manage.*, vol. 28, no. 4, pp. 796-826, 2020.

Show in Context CrossRef Google Scholar

12.

M. Al Ja'afreh, H. Adharni and A. El Saddik, "Experimental QoS optimization for haptic communication over tactile Internet", *Proc. IEEE Int. Symp. Haptic Audio Vis. Environ. Games (HAVE)*, pp. 1-6, 2018.

Show in Context View Article

Google Scholar

13.

K. Polachan, J. Pal, C. Singh and T. V. Prabhakar, "Assessing quality of control in tactile cyber-physical systems", *IEEE Trans. Netw. Service Manag.*, vol. 19, no. 4, pp. 5348-5365, Dec. 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

14.

M. Tariq, F. Naeem and H. V. Poor, "Toward experience-driven traffic management and orchestration in digital-twin-enabled 6G networks", *arXiv:2201.04259*, 2022.

Show in Context Google Scholar

15.

A. Aijaz, M. Dohler, A. H. Aghvami, V. Friderikos and M. Frodigh, "Realizing the tactile Internet: Haptic communications over next generation 5G cellular networks", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 2, pp. 82-89, Apr. 2017.

Show in Context View Article

Google Scholar

16.

T. Barnett, S. Jain, U. Andra and T. Khurana, "Cisco visual networking index (VNI) complete forecast update 2017-2022", *Proc. Americas/EMEAR Cisco Knowl. Netw. (CKN) Present.*, pp. 1-30, 2018.

Show in Context Google Scholar

17.

N. Ana-Maria, M. Alexandru and P. E. Cristian, "Study of millimeter waves in 5G", *Proc. IEEE Int. Black Sea Conf. Commun. Netw. (BlackSeaCom)*, pp. 1-4, 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

18.

M. Ghoshal et al., "Can 5G mmWave support multi-user AR?", *Proc. Int. Conf. Passive Act. Netw. Meas.*, pp. 180-196, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

19.

W. Roh et al., "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 106-113, Feb. 2014.

Show in Context View Article

Google Scholar

20.

P. Lin, Q. Song, F. R. Yu, D. Wang, A. Jamalipour and L. Guo, "Wireless virtual reality in beyond 5G systems with the Internet of intelligence", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 2, pp. 70-77, Apr. 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

21.

B. Gu, X. Zhang, Z. Lin and M. Alazab, "Deep multiagent reinforcement-learning-based resource allocation for Internet of controllable things", *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 5, pp. 3066-3074, Mar. 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

22.

M. Maier, A. Ebrahimzadeh, A. Beniiche and S. Rostami, "The art of 6G (TAO 6G): How to wire society 5.0", *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 14, no. 2, pp. A101-A112, 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

23.

D. M. Hilty et al., "A review of telepresence virtual reality and augmented reality applied to clinical care", *J. Technol. Behav. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 178-205, 2020.

Show in Context CrossRef Google Scholar

24.

M. Pengnoo, M. T. Barros, L. Wuttisittikulij, B. Butler, A. Davy and S. Balasubramaniam, "Digital twin for metasurface reflector management in 6G terahertz communications", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 114580-114596, 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

25.

M. Adhikari and A. Hazra, "6G-enabled ultra-reliable low-latency communication in edge networks", *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 67-74, Mar. 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

26.

X. Liu et al., "Self-supervised learning: Generative or contrastive", *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 35, no. 1, pp. 857-876, Jan. 2023.

Show in Context View Article

Google Scholar

27.

R. Fantacci and B. Picano, "Edge-based virtual reality over 6G terahertz channels", *IEEE Netw.*, vol. 35, no. 5, pp. 28-33, Sep./Oct. 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

28.

U. K. Chude-Okonkwo, B. S. Paul and A. A. Vasilakos, "Enabling precision medicine via contemporary and future communication technologies: A survey", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 21210-21240, 2023.

Show in Context View Article

Google Scholar

29.

K. Chakrabarti, "Deep learning based offloading for mobile augmented reality application in 6G", *Comput. Electr. Eng.*, vol. 95, Oct. 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

30.

F. Tang, X. Chen, M. Zhao and N. Kato, "The roadmap of communication and networking in 6G for the metaverse", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 30, no. 4, pp. 72-81, Aug. 2023.

Show in Context View Article

Google Scholar

31.

A. Aggarwal, M. Mittal and G. Battineni, "Generative adversarial network: An overview of theory and applications", *Int. J. Inf. Manage. Data Insights*, vol. 1, no. 1, 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

32.

X. Huang, J. Twycross and F. Wild, "A process for the semiautomated generation of life-sized interactive 3D character models for holographic projection", *Proc. Int. Conf. 3D Immersion (IC3D)*, pp. 1-8, 2019.

Show in Context View Article

Google Scholar

33.

Z. Li et al., "Animated 3D human avatars from a single image with GAN-based texture inference", *Comput. Graph.*, vol. 95, pp. 81-91, Apr. 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

34.

L. Lovén et al., "EdgeAI: A vision for distributed edge-native artificial intelligence in future 6G networks", *Proc. 1st 6G Wireless Summit*, pp. 1-2, 2019.

Show in Context Google Scholar

35.

Q. Yang, Y. Zhao, H. Huang, Z. Xiong, J. Kang and Z. Zheng, "Fusing blockchain and AI with metaverse: A survey", *IEEE Open J. Comput. Soc.*, vol. 3, pp. 122-136, 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

36.

Y. Wang et al., "A survey on metaverse: Fundamentals security and privacy", *arXiv:2203.02662*, 2022.

Show in Context Google Scholar

37.

T. Huynh-The, Q.-V. Pham, X.-Q. Pham, T. T. Nguyen, Z. Han and D.-S. Kim, "Artificial intelligence for the metaverse: A survey", *arXiv:2202.10336*, 2022.

Show in Context Google Scholar

38.

L. Chang et al., "6G-enabled edge AI for metaverse: Challenges methods and future research directions", *arXiv:2204.06192*, 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

39.

S. K. Jagatheesaperumal, K. Ahmad, A. Al-Fuqaha and J. Qadir, "Advancing education through extended reality and Internet of everything enabled metaverses: Applications challenges and open issues", *arXiv:2207.01512*, 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

40.

S. Dhelim, T. Kechadi, L. Chen, N. Aung, H. Ning and L. Atzori, "Edge-enabled metaverse: The convergence of metaverse and mobile edge computing", *arXiv:2205.02764*, 2022.

Show in Context Google Scholar

41.

S.-M. Park and Y.-G. Kim, "A metaverse: Taxonomy components applications and open challenges", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 4209-4251, 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

42.

M. A. I. Mozumder, M. M. Sheeraz, A. Athar, S. Aich and H.-C. Kim, "Overview: Technology roadmap of the future trend of metaverse based on IoT blockchain AI technique and medical domain metaverse activity", *Proc. 24th Int. Conf. Adv. Commun. Technol. (ICACT)*, pp. 256-261, 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

43.

M. Choi, A. Azzaoui, S. K. Singh, M. M. Salim, S. R. Jeremiah and J. H. Park, "The future of metaverse: Security issues requirements and solutions", *Human-Centric Comput. Inf. Sci.*, vol. 12, pp. 1-15, Dec. 2022.

Show in Context Google Scholar

44.

How coinbase thinks about the metaverse, 2021, [online] Available: <https://blog.coinbase.com/how-coinbase-thinks-about-the-metaverse-16d8070f4841>.

Show in Context Google Scholar

45.

J. Huang, P. Sun and W. Zhang, "Analysis of the future prospects for the metaverse", *Proc. 7th Int. Conf. Financ. Innov. Econ. Develop. (ICFIED)*, pp. 1899-1904, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

46.

D. Pereira, *How AI will shape the metaverse*, 2021, [online] Available: <https://towardsdatascience.com/how-ai-will-shape-the-metaverse-4ea7ae20c99>.

Show in Context CrossRef Google Scholar

47.

H. Ning et al., "A survey on the metaverse: The state-of-the-art technologies applications and challenges", *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 16, pp. 14671-14688, Aug. 2023.

View Article

Google Scholar

48.

R. Zhao, Y. Zhang, Y. Zhu, R. Lan and Z. Hua, "Metaverse: Security and privacy concerns", *arXiv:2203.03854*, 2022.

CrossRef Google Scholar

49.

K. MacCallum and D. Parsons, "Teacher perspectives on mobile augmented reality: The potential of metaverse for learning", *Proc. World Conf. Mobile Contextual Learn.*, pp. 21-28, 2019.

Show in Context [Google Scholar](#)

50.

M. Sparkes, *What is a Metaverse*, New York, NY, USA:McKinsey Co, 2021.

Show in Context [Google Scholar](#)

51.

N. Kshetri, "Web 3.0 and the metaverse shaping organizations' brand and product strategies", *IT Prof.*, vol. 24, no. 2, pp. 11-15, Mar./Apr. 2022.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

52.

K. Valaskova, V. Machova and E. Lewis, "Virtual marketplace dynamics data spatial analytics and customer engagement tools in a real-time interoperable decentralized metaverse", *Linguist. Philosoph. Invest.*, vol. 21, pp. 105-120, May 2022.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

53.

J. Radoff, *The metaverse and artificial intelligence*, 2021, [online] Available:

<https://medium.com/building-the-metaverse/themetaverse-and-artificial-intelligence-ai-577343895411>.

Show in Context [Google Scholar](#)

54.

J. Radoff, *The metaverse value-chain*, 2021, [online] Available: <https://medium.com/building-the-metaverse/the-metaverse-valuechain-afcf9e09e3a7>.

Show in Context [Google Scholar](#)

55.

J. Radof, *9 Megatrends shaping the metaverse*, 2021, [online] Available:

<https://medium.com/building-the-metaverse/9-megatrends-shaping-the-metaverse-93b91c159375>.

Show in Context [Google Scholar](#)

56.

K. Aggarwal et al., "Has the future started? The current growth of artificial intelligence machine learning and deep learning", *Iraqi J. Comput. Sci. Math.*, vol. 3, no. 1, pp. 115-123, 2022.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

57.

L. Lik-Hang and H. Pan, "Interaction methods for smart glasses", *ACM Comput. Surveys*, vol. 1, pp. 1, Jul. 2017.

Show in Context [Google Scholar](#)

58.

L. H. Lee, K. Y. Lam, Y. P. Yau, T. Braud and P. Hui, "HIBEY: Hide the keyboard in augmented reality", *Proc. IEEE Int. Conf. Pervasive Comput. Commun. (PerCom)*, pp. 1-10, 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

59.

X.-Y. Huang, M.-S. Tsai and C.-C. Huang, "3D virtual-reality interaction system", *Proc. IEEE Int. Conf. Consum. Electron.- Taiwan (ICCE-TW)*, pp. 1-2, 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

60.

E. D'Antonio, J. Taborri, E. Palermo, S. Rossi and F. Patane, "A markerless system for gait analysis based on OpenPose library", *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. (I2MTC)*, pp. 1-6, 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

61.

R. Bajireanu et al., "Mobile human shape superimposition: An initial approach using OpenPose", *Int. J. Comput.*, vol. 4, pp. 1-8, Jan. 2019.

Show in Context Google Scholar

62.

C. Nuzzi, S. Ghidini, R. Pagani, S. Pasinetti, G. Coffetti and G. Sansoni, "Hands-free: A robot augmented reality teleoperation system", *Proc. 17th Int. Conf. Ubiquitous Robots (UR)*, pp. 617-624, 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

63.

X. Wang, Y. Wang, Y. Shi, W. Zhang and Q. Zheng, "AvatarMeeting: An augmented reality remote interaction system with personalized avatars", *Proc. 28th ACM Int. Conf. Multimedia*, pp. 4533-4535, 2020.

Show in Context CrossRef Google Scholar

64.

V. Ponnusamy, A. Vasuki, J. C. Clement and P. Eswaran, "AI-driven information and communication technologies services and applications for next-generation healthcare system" in *Smart Systems for Industrial Applications*, Hoboken, NJ, USA:Wiley, pp. 1-32, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

65.

A. Phillip, J. S. K. Chan and S. Peiris, "A new look at cryptocurrencies", *Econ. Lett.*, vol. 163, pp. 6-9, Feb. 2018.

Show in Context CrossRef Google Scholar

66.

What is spatial computing? A short definition of spatial computing, 2023, [online] Available: <https://www.techslang.com/definition/what-is-spatial-computing/>.

Show in Context Google Scholar

67.

Spatial computing, Jun. 2023, [online] Available: <https://www.ptc.com/en/industry-insights/spatialcomputing>.

Show in Context CrossRef Google Scholar

68.

S. Shekhar, S. K. Feiner and W. G. Aref, "Spatial computing", *Commun. ACM*, vol. 59, no. 1, pp. 72-81, 2015.

Show in Context CrossRef Google Scholar

69.

T. Zhang, Y.-T. Li and J. P. Wachs, "The effect of embodied interaction in visual-spatial navigation", *ACM Trans. Interactive Intell. Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 1-36, 2016.

Show in Context CrossRef Google Scholar

70.

J. Bardi, What is virtual reality? [Definition and examples], 2020, [online] Available: <https://www.marxentlabs.com/what-is-virtualreality/>.

Show in Context Google Scholar

71.

J. W. Kelly, L. A. Cherep, A. F. Lim, T. Doty and S. B. Gilber, "Who are virtual reality headset owners? A survey and comparison of headset owners and non-owners", *Proc. IEEE Virtual Reality 3D User Interfaces (VR)*, pp. 687-694, 2021.

Show in Context View Article

72.

P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi and F. Kishino, "Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum", *Proc. Telemanipulator Telepresence Technol.*, pp. 282-292, 1995.

Show in Context CrossRef Google Scholar

73.

M. Speicher, B. D. Hall and M. Nebeling, "What is mixed reality?", *Proc. CHI Conf. Human Factors Comput. Syst.*, pp. 1-15, 2019.

Show in Context CrossRef Google Scholar

74.

M. Zyda, *Networked Virtual Environments: Design and Implementation*, Reading, MA, USA:Addison-Wesley, 1999.

Show in Context Google Scholar

75.

H. Liu, M. Bowman and F. Chang, "Survey of state melding in virtual worlds", *ACM Comput. Surveys*, vol. 44, no. 4, pp. 1-25, 2012.

Show in Context CrossRef Google Scholar

76.

T. Narumi, S. Nishizaka, T. Kajinami, T. Tanikawa and M. Hirose, "Augmented reality flavors: Gustatory display based on edible marker and cross-modal interaction", *Proc. SIGCHI Conf. Human Factors Comput. Syst.*, pp. 93-102, 2011.

Show in Context CrossRef Google Scholar

77.

D. Schmalstieg and T. Hollerer, *Augmented Reality: Principles and Practice*, Boston, MA, USA:Addison-Wesley Prof, 2016.

Show in Context Google Scholar

78.

E. Kruijff, J. J. LaViola and I. Poupyrev, *3D User Interfaces: Theory and Practice*, Boston, MA, USA:Addison-Wesley, 2004.

Show in Context Google Scholar

79.

J. S. Pierce and R. Pausch, "Comparing voodoo dolls and HOMER: Exploring the importance of feedback in virtual environments", *Proc. SIGCHI Conf. Human Factors Comput. Syst.*, pp. 105-112, 2002.

Show in Context CrossRef Google Scholar

80.

L.-H. Lee, T. Braud, S. Hosio and P. Hui, "Towards augmented reality driven human-city interaction: Current research on mobile headsets and future challenges", *ACM Comput. Surveys*, vol. 54, no. 8, pp. 1-38, 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

81.

T. Langlotz, S. Mooslechner, S. Zollmann, C. Degendorfer, G. Reitmayr and D. Schmalstieg, "Sketching up the world: In situ authoring for mobile augmented reality", *Pers. Ubiquitous Comput.*, vol. 16, no. 6, pp. 623-630, 2012.

Show in Context CrossRef Google Scholar

82.

T. Langlotz, C. Degendorfer, A. Mulloni, G. Schall, G. Reitmayr and D. Schmalstieg, "Robust detection and tracking of annotations for outdoor augmented reality browsing", *Comput. Graph.*, vol. 35, no. 4, pp. 831-840, 2011.

Show in Context CrossRef Google Scholar

83.

B. MacIntyre, E. M. Coelho and S. J. Julier, "Estimating and adapting to registration errors in augmented reality systems", *Proc. IEEE Virtual Real.*, pp. 73-80, 2002.

Show in Context View Article

Google Scholar

84.

S. Feiner, B. MacIntyre, T. Höllerer and A. Webster, "A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment", *Pers. Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 208-217, 1997.

Show in Context CrossRef Google Scholar

85.

L.-H. Lee and P. Hui, "Interaction methods for smart glasses: A survey", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28712-28732, 2018.

Show in Context View Article

Google Scholar

86.

P. Wacker, A. Wagner, S. Voelker and J. Borchers, "Heatmaps shadows bubbles rays: Comparing mid-air pen position visualizations in handheld AR", *Proc. CHI Conf. Human Factors Comput. Syst.*, pp. 1-11, 2020.

Show in Context CrossRef Google Scholar

87.

C. Xie, Y. Kameda, K. Suzuki and I. Kitahara, "Large scale interactive ar display based on a projector-camera system", *Proc. Symp. Spatial User Interact.*, pp. 179, 2016.

Show in Context CrossRef Google Scholar

88.

J. S. Roo, R. Gervais, J. Frey and M. Hachet, "Inner garden: Connecting inner states to a mixed reality sandbox for mindfulness", *Proc. CHI Conf. Human Factors Comput. Syst.*, pp. 1459-1470, 2017.

Show in Context CrossRef Google Scholar

89.

J. Hartmann, Y.-T. Yeh and D. Vogel, "Aar: Augmenting a wearable augmented reality display with an actuated head-mounted projector", *Proc. 33rd Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol.*, pp. 445-458, 2020.

Show in Context CrossRef Google Scholar

90.

I. Chaturvedi, F. H. Bijarbooneh, T. Braud and P. Hui, "Peripheral vision: A new killer app for smart glasses", *Proc. 24th Int. Conf. Intell. User Interfaces*, pp. 625-636, 2019.

Show in Context CrossRef Google Scholar

91.

P. Milgram and F. Kishino, "A taxonomy of mixed reality visual displays", *IEICE Trans. Inf. Syst.*, vol. 77, no. 12, pp. 1321-1329, 1994.

Show in Context Google Scholar

92.

P. Lopes, S. You, A. Ion and P. Baudisch, "Adding force feedback to mixed reality experiences and games using electrical muscle stimulation", *Proc. CHI Conf. Human Factors Comput. Syst.*, pp. 1-13, 2018.

Show in Context CrossRef Google Scholar

93.

D. Reilly, A. Echenique, A. Wu, A. Tang and W. K. Edwards, "Mapping out work in a mixed reality project room", *Proc. 33rd Annu. ACM Conf. Human Factors Comput. Syst.*, pp. 887-896, 2015.

Show in Context CrossRef Google Scholar

94.

M. Ohta, S. Nagano, H. Niwa and K. Yamashita, "Mixed-reality store on the other side of a tablet", *Proc. ISMAR*, pp. 192-193, 2015.

Show in Context [Google Scholar](#)

95.

Y.-T. Yue, Y.-L. Yang, G. Ren and W. Wang, "SceneCtrl: Mixed reality enhancement via efficient scene editing", *Proc. 30th Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol.*, pp. 427-436, 2017.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

96.

L.-H. Lee, T. Braud, S. Hosio and P. Hui, "Towards augmented reality-driven human-city interaction: Current research and future challenges", *arXiv:2007.09207*, 2020.

Show in Context [Google Scholar](#)

97.

L. Malinverni, J. Maya, M.-M. Schaper and N. Pares, "The world-assupport: Embodied exploration understanding and meaning-making of the augmented world", *Proc. CHI Conf. Human Factors Comput. Syst.*, pp. 5132-5144, 2017.

Show in Context [Google Scholar](#)

98.

A. L. Gardony, R. W. Lindeman and T. T. Brunyé, "Eye-tracking for human-centered mixed reality: Promises and challenges", *Proc. Opt. Archit. Displays Sens. Augmented Virtual Mixed Reality (AR VR MR)*, pp. 230-247, 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

99.

U. Gustavsson et al., "Implementation challenges and opportunities in beyond-5G and 6G communication", *IEEE J. Microw.*, vol. 1, no. 1, pp. 86-100, Jan. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

100.

M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan and M. Zorzi, "Toward 6G networks: Use cases and technologies", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 55-61, Mar. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

101.

S. K. Rao and R. Prasad, "Impact of 5G technologies on industry 4.0", *Wireless Pers. Commun.*, vol. 100, no. 1, pp. 145-159, 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

102.

S. Glisic and J.-P. Makela, "Advanced wireless networks: 4G technologies", *Proc. IEEE 9th Int. Symp. Spread Spectr. Techn. Appl.*, pp. 442-446, 2006.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

103.

W. Saad, M. Bennis and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications trends technologies and open research problems", *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, Ma/Jun. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

104.

P. Shrestha et al., "High linearity and high gain performance of N-polar GaN MIS-HEMT at 30 GHz", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 41, no. 5, pp. 681-684, May 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

105.

A. Boxall and T. Lacoma, What is 6G how fast will it be and when is it coming?, 2021, [online] Available: <https://www.digitaltrends.com/mobile/what-is-6G/>.

Show in Context Google Scholar

106.

T. M. Fernandez-Carames and P. Fraga-Lamas, "A review on the application of blockchain to the next generation of cybersecure industry 4.0 smart factories", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 45201-45218, 2019.

View Article

Google Scholar

107.

A. Cannavo and F. Lamberti, "How blockchain virtual reality and augmented reality are converging and why", *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 5, pp. 6-13, Sep. 2021.

View Article

Google Scholar

108.

A. M. French, M. Risius and J. P. Shim, "The interaction of virtual reality blockchain and 5G new radio: Disrupting business and society", *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, vol. 46, no. 1, pp. 25, 2020.

CrossRef Google Scholar

109.

D. C. Nguyen, P. N. Pathirana, M. Ding and A. Seneviratne, "Blockchain for 5G and beyond networks: A state of the art survey", *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 166, Sep. 2020.

CrossRef Google Scholar

110.

A. El Azzaoui, S. K. Singh, Y. Pan and J. H. Park, "Block5GIntell: Blockchain for AI-enabled 5G networks", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 145918-145935, 2020.

View Article

Google Scholar

111.

Z. Haddad, M. M. Fouda, M. Mahmoud and M. Abdallah, "Blockchain-based authentication for 5G networks", *Proc. IEEE Int. Conf. Inform. IoT Enabling Technol. (ICIoT)*, pp. 189-194, 2020.

View Article

Google Scholar

112.

L. Floridi and M. Chiriatti, "GPT-3: Its nature scope limits and consequences", *Minds Mach.*, vol. 30, pp. 681-694, Nov. 2020.

Show in Context CrossRef Google Scholar

113.

T. Brown et al., "Language models are few-shot learners" in *Advances in Neural Information Processing Systems*, Red Hook, NY, USA:Curran Assoc, vol. 33, pp. 1877-1901, 2020, [online]

Available:

https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2020/file/1457c0d6bfcb4967418bfb8ac142f64a-Paper.pdf.

Show in Context Google Scholar

114.

A. Radford et al., "Learning transferable visual models from natural language supervision", *Proc. 38th Int. Conf. Mach. Learn. (ICML)*, pp. 8748-8763, 2021, [online] Available:

<https://proceedings.mlr.press/v139/radford21a>.

Show in Context Google Scholar

115.

A. Ramesh et al., "Zero-shot text-to-image generation", *Proc. 38th Int. Conf. Mach. Learn. (ICML)*, pp. 8821-8831, 2021, [online] Available: <https://proceedings.mlr.press/v139/ramesh21a.html>.

Show in Context [Google Scholar](#)

116.

T. Park, M.-Y. Liu, T.-C. Wang and J.-Y. Zhu, "GauGAN: Semantic image synthesis with spatially adaptive normalization", *Proc. ACM SIGGRAPH Real-Time Live*, pp. 1, 2019.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

117.

C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, New York, NY, USA:Springer-Verlag, 2016.

Show in Context [Google Scholar](#)

118.

V. Francois-Lavet, P. Henderson, I. Riashat, M. G. Bellemare and J. Pineau, *An Introduction to Deep Reinforcement Learning*, Boston, MA, USA:Now Found. Trends, 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

119.

A. Baeovski, W.-N. Hsu, Q. Xu, A. Babu, J. Gu and M. Auli, "Data2vec: A general framework for self-supervised learning in speech vision and language", *arXiv:2202.03555*, 2022.

Show in Context [Google Scholar](#)

120.

J. Long, E. Shelhamer and T. Darrell, "Fully convolutional networks for semantic segmentation", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 4, pp. 640-651, Apr. 2017.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

121.

T. Xiao, Y. Liu, B. Zhou, Y. Jiang and J. Sun, "Unified perceptual parsing for scene understanding", *Proc. Eur. Conf. Comput. Vis.*, pp. 432-448, 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

122.

C. Yu, J. Wang, C. Peng, C. Gao, G. Yu and N. Sang, "BiSeNet: Bilateral segmentation network for real-time semantic segmentation", *Proc. Eur. Conf. Comput. Vis.*, pp. 334-349, 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

123.

A. Kirillov, R. Girshick, K. He and P. Dollar, "Panoptic feature pyramid networks", *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, pp. 6399-6408, 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

124.

X. Li et al., "Semantic flow for fast and accurate scene parsing", *Proc. Eur. Conf. Comput. Vis.*, pp. 775-793, 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

125.

E. Xie, W. Wang, Z. Yu, A. Anandkumar, J. M. Alvarez and P. Luo, "SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers", *Proc. 35th Conf. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS)*, pp. 1-14, 2021.

Show in Context [Google Scholar](#)

126.

S. Huang, Z. Lu, R. Cheng and C. He, "FaPN: Feature aligned pyramid network for dense image prediction", *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV)*, pp. 864-873, 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

127.

C. Yu, Y. Shao, C. Gao and N. Sang, "CondNet: Conditional classifier for scene segmentation", *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 28, pp. 758-762, 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

128.

H. Yan, C. Zhang and M. Wu, "Lawin transformer: Improving semantic segmentation transformer with multi-scale representations via large window attention", *arXiv:2201.01615*, 2022.

Show in Context Google Scholar

129.

Creating a conversational chat bot of a specific person, Dec. 2020.

Show in Context Google Scholar

130.

A. S. Fangbemi, Y. F. Lu, M. Y. Xu, X. W. Luo, A. Rolland and C. Raissi, "ZooBuilder: 2D and 3D pose estimation for quadrupeds using synthetic data", *Proc. ACM SIGGRAPH Eurographics Symp. Comput. Animation*, vol. 39, pp. 1-2, 2020.

Show in Context Google Scholar

131.

Z. Cao, G. Hidalgo, T. Simon, S.-E. Wei and Y. Sheikh, "OpenPose: Realtime multiperson 2D pose estimation using part affinity fields", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 43, pp. 172-186, Jan. 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

132.

M. R. I. Hossain and J. J. Little, "Exploiting temporal information for 3D human pose estimation", *Proc. Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV)*, pp. 69-86, 2018.

Show in Context CrossRef Google Scholar

133.

T. Karras, S. Laine, M. Aittala, J. Hellsten and J. Lehtinen, "Analyzing and improving the image quality of StyleGAN", *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, pp. 8110-8119, 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

134.

S.-C. Lo and H.-H. Tsai, "Design of 3D virtual reality in the metaverse for environmental conservation education based on cognitive theory", *Sensors*, vol. 22, no. 21, pp. 8329, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

135.

T. Gao and Y. Yang, "The design of virtual reality systems for metaverse scenarios", *Proc. Int. Conf. Cyber Security Intell. Anal.*, pp. 11-20, 2023.

Show in Context CrossRef Google Scholar

136.

Y. Zhao et al., "Metaverse: Perspectives from graphics interactions and visualization", *Vis. Inform.*, vol. 6, no. 1, pp. 56-67, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

137.

Y. Wang, K. L. Siau and L. Wang, "Metaverse and human-computer interaction: A technology framework for 3D virtual worlds", *Proc. Int. Conf. Human-Comput. Interact.*, pp. 213-221, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

138.

R. Gal, O. Patashnik, H. Maron, A. H. Bermano, G. Chechik and D. Cohen-Or, "StyleGAN-NADA: CLIP-guided domain adaptation of image generators", *ACM Trans. Graph.*, vol. 41, no. 4, pp. 1-13, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

139.

C. Saharia et al., "Photorealistic text-to-image diffusion models with deep language understanding" in *Advances in Neural Information Processing Systems*, Red Hook, NY, USA:Curran Assoc, 2022, [online] Available: <https://openreview.net/forum?id=08Yk-n5I2AI>.

Show in Context [Google Scholar](#)

140.

T. Müller, A. Evans, C. Schied and A. Keller, "Instant neural graphics primitives with a multiresolution hash encoding", *ACM Trans. Graph.*, vol. 41, no. 4, pp. 102, 2022, [online] Available: <https://doi.org/10.1145/3528223.3530127>.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

141.

C. She et al., "A tutorial on ultrareliable and low-latency communications in 6G: Integrating domain knowledge into deep learning", *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 3, pp. 204-246, Mar. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

142.

K. Dev, S. A. Khowaja, P. K. Sharma, B. S. Chowdhry, S. Tanwar and G. Fortino, "DDI: A novel architecture for joint active user detection and IoT device identification in grant-free NOMA systems of 6G and beyond networks", *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 4, pp. 2906-2917, Feb. 2022.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

143.

C. She et al., "Deep learning for ultra-reliable and low-latency communication in 6G networks", *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 5, pp. 219-225, Sep./Oct. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

144.

M. Alsenwi, N. H. Tran, M. Bennis, S. R. Pandey, A. K. Bairagi and C. S. A. Hong, "Intelligence resource slicing for eMBB and uRLLC coexistence in 5G and beyond: A deep reinforcement learning based approach", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 7, pp. 4585-4600, Jul. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

145.

G. B. Tunze, T. Huynh-The, J.-M. Lee and D.-S. Kim, "Sparsely connected CNN for efficient automatic modulation recognition", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 12, pp. 15557-15568, Dec. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

146.

T. Huynh-The, C.-H. Hua, Q.-V. Pham and D.-S. Kim, "MCNet: An efficient CNN architecture for robust automation modulation classification", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 4, pp. 811-815, Apr. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

147.

C. Luo, J. Ji, Q. Wang, X. Chen and P. Li, "Channel state information prediction for 5G wireless communications: A deep learning approach", *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 227-236, Jan.-Mar. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

148.

S. Guo, Y. Lin, S. Li, Z. Chen and H. Wang, "Deep spatial-temporal 3D convolutional neural networks for traffic data forecasting", *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 10, pp. 3913-3926, Oct. 2019.

Show in Context View Article

Google Scholar

149.

X. Wang, Y. Han, V. C. M. Leung, D. Niyato, X. Yan and X. Chen, "Convergence of edge computing and deep learning: A comprehensive survey", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 2, pp. 869-904, 2nd Quart. 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

150.

S. A. Khowaja et al., "IIFNet: A fusion-based intelligent service for noisy preamble detection in 6G", *IEEE Netw.*, vol. 36, no. 3, pp. 48-54, May/Jun. 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

151.

S. A. Khowaja, K. Dev, P. Khuwaja and P. Bellavista, "Toward energy-efficient distributed federated learning for 6G networks", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 6, pp. 34-40, Dec. 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

152.

Z. Li et al., "TeraPipe: Token-level pipeline parallelism for training large-scale language models", *Proc. Mach. Learn. Res.*, vol. 139, pp. 6543-6552, 2021.

Show in Context Google Scholar

153.

S. A. Khowaja, A. G. Prabono, F. Setiawan, B. N. Yahya and S.-L. Lee, "Contextual activity based healthcare Internet of Things services and people (HIoTSP): An architectural framework for healthcare monitoring using wearable sensors", *Comput. Netw.*, vol. 145, pp. 190-206, Nov. 2018.

Show in Context CrossRef Google Scholar

154.

P. Khuwaja, S. A. Khowaja and K. Dev, "Adversarial learning networks for FinTech applications using heterogeneous data sources", *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 3, pp. 2194-2201, Feb. 2023.

Show in Context View Article

Google Scholar

155.

D. G. Morin, P. Perez and A. G. Armada, "Toward the distributed implementation of immersive augmented reality architectures on 5G networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 60, no. 2, pp. 46-52, Feb. 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

156.

F. Hu, Y. Deng, W. Saad, M. Bennis and A. H. Aghvami, "Cellularconnected wireless virtual reality: Requirements challenges and solutions", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 5, pp. 105-111, May 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

157.

Y. Siriwardhana, P. Porambage, M. Liyanage and M. Ylianttila, "A survey on mobile augmented reality with 5G mobile edge computing: Architectures applications and technical aspects", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 23, no. 2, pp. 1160-1192, 2nd Quart. 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

158.

S. Sukhmani, M. Sadeghi, M. Erol-Kantarci and A. El Saddik, "Edge caching and computing in 5G for mobile AR/VR and tactile Internet", *IEEE MultiMedia*, vol. 26, no. 1, pp. 21-30, Jan.– Mar. 2019.

Show in Context View Article

Google Scholar

159.

R. Li, "Network 2030: Market drivers and prospects", *Proc. 1st Int. Telecommun. Union Workshop Netw.*, pp. 1-21, 2018.

Show in Context Google Scholar

160.

D. Gotsch, X. Zhang, T. Merritt and R. Vertegaal, "TeleHuman2: A cylindrical light field teleconferencing system for life-size 3D human telepresence", *Proc. CHI*, vol. 18, pp. 552, 2018.

Show in Context CrossRef Google Scholar

161.

B. Yang, Z. Yu, J. Lan, R. Zhang, J. Zhou and W. Hong, "Digital beamforming-based massive MIMO transceiver for 5G millimeterwave communications", *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 66, no. 7, pp. 3403-3418, Jul. 2018.

Show in Context View Article

Google Scholar

162.

A. Yastrebova, R. Kirichek, Y. Koucheryavy, A. Borodin and A. Koucheryavy, "Future networks 2030: Architecture & requirements", *Proc. 10th Int. Congr. Ultra Modern Telecommun. Control Syst. Workshops (ICUMT)*, pp. 1-8, 2018.

Show in Context View Article

Google Scholar

163.

M. Erel-Özçevik and B. Canberk, "Road to 5G reduced-latency: A software defined handover model for eMBB services", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 8, pp. 8133-8144, Aug. 2019.

Show in Context View Article

Google Scholar

164.

M. Zhang et al., "Will TCP work in mmWave 5G cellular networks?", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 1, pp. 65-71, Jan. 2019.

Show in Context View Article

Google Scholar

165.

D. Milovanovic, Z. Bojkovic, M. Indoonundon and T. P. Fowdur, "5G low-latency communication in virtual reality services: Performance requirements and promising solutions", *WSEAS Trans. Commun.*, vol. 20, pp. 77-81, Jul. 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

166.

W. Chen, J. Montojo, J. Lee, M. Shafi and Y. Kim, "The standardization of 5G-advanced in 3GPP", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 60, no. 11, pp. 98-104, Nov. 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

167.

C. Yeh, G. Do Jo, Y.-J. Ko and H. K. Chung, "Perspectives on 6G wireless communications", *ICT Exp.*, vol. 9, no. 1, pp. 82-91, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

168.

H. Viswanathan and P. E. Mogensen, "Communications in the 6G era", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57063-57074, 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

169.

5G evolution and 6G (version 3.0), Tokyo, Japan, 2021.

Show in Context Google Scholar

170.

Z. Zhang et al., "6G wireless networks: Vision requirements architecture and key technologies", *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 28-41, Sep. 2019.

Show in Context View Article

Google Scholar

171.

X. Yang et al., "Communication-constrained mobile edge computing systems for wireless virtual reality: Scheduling and tradeoff", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 16665-16677, 2018.

Show in Context View Article

Google Scholar

172.

C. Chaccour, M. N. Soorki, W. Saad, M. Bennis, P. Popovski and M. Debbah, "Seven defining features of terahertz (THz) wireless systems: A fellowship of communication and sensing", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 2, pp. 967-993, 2nd Quart. 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

173.

V. Petrov, M. Gapeyenko, S. Paris, A. Marcano and K. I. Pedersen, "Extended reality (XR) over 5G and 5G-advanced new radio: Standardization applications and trends", *arXiv:2203.02242*, 2022.

Show in Context Google Scholar

174.

Z. Meng, C. She, G. Zhao and D. De Martini, "Sampling communication and prediction co-design for synchronizing the realworld device and digital model in metaverse", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 41, no. 1, pp. 288-300, Jan. 2023.

Show in Context View Article

Google Scholar

175.

J. Kim, S.-C. Kwon and G. Choi, "Performance of video streaming in infrastructure-to-vehicle telematic platforms with 60-GHz radiation and IEEE 802.11 ad baseband", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 12, pp. 10111-10115, Dec. 2016.

Show in Context View Article

Google Scholar

176.

J. Kim, J.-J. Lee and W. Lee, "Strategic control of 60 GHz millimeter-wave high-speed wireless links for distributed virtual reality platforms", *Mobile Inf. Syst.*, vol. 2017, Mar. 2017.

Show in Context CrossRef Google Scholar

177.

Y. Leng, C.-C. Chen, Q. Sun, J. Huang and Y. Zhu, "Energy-efficient video processing for virtual reality", *Proc. 46th Int. Symp. Comput. Archit.*, pp. 91-103, 2019.

Show in Context View Article

Google Scholar

178.

X. Yang, Z. Fei, J. Zheng, N. Zhang and A. Anpalagan, "Joint multi-user computation offloading and data caching for hybrid mobile cloud/edge computing", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 11, pp. 11018-11030, Nov. 2019.

Show in Context View Article

[Google Scholar](#)

179.

Y. Liu, J. Liu, A. Argyriou and S. Ci, "MEC-assisted panoramic VR video streaming over millimeter wave mobile networks", *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 21, no. 5, pp. 1302-1316, May 2019.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

180.

F. Qian, L. Ji, B. Han and V. Gopalakrishnan, "Optimizing 360 video delivery over cellular networks", *Proc. 5th Workshop All Things Cellular Oper. Appl. Challenges*, pp. 1-6, 2016.

[Show in Context](#) [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

181.

S. Mangiante, G. Klas, A. Navon, Z. GuanHua, J. Ran and M. D. Silva, "VR is on the edge: How to deliver 360 videos in mobile networks", *Proc. Workshop Virtual Real. Augmented Real. Netw.*, pp. 30-35, 2017.

[Show in Context](#) [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

182.

Y. Sun, Z. Chen, M. Tao and H. Liu, "Communications caching and computing for mobile virtual reality: Modeling and tradeoff", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 11, pp. 7573-7586, Nov. 2019.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

183.

L. Zhao, Y. Cui, C. Guo and Z. Liu, "Optimal streaming of 360 VR videos with perfect imperfect and unknown FoV viewing probabilities", *Proc. IEEE Global Commun. Conf.*, pp. 1-6, 2020.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

184.

K. Long, Y. Cui, C. Ye and Z. Liu, "Optimal wireless streaming of multi-quality 360 VR video by exploiting natural relative smoothness-enabled and transcoding-enabled multicast opportunities", *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 23, pp. 3670-3683, 2020.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

185.

S. Gupta, J. Chakareski and P. Popovski, "Millimeter wave meets edge computing for mobile VR with high-fidelity 8k scalable 360 video", *Proc. IEEE 21st Int. Workshop Multimedia Signal Process. (MMSP)*, pp. 1-6, 2019.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

186.

J. Du, F. R. Yu, G. Lu, J. Wang, J. Jiang and X. Chu, "MEC-assisted immersive VR video streaming over terahertz wireless networks: A deep reinforcement learning approach", *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 10, pp. 9517-9529, Oct. 2020.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

187.

M. Chen, W. Saad and C. Yin, "Liquid state based transfer learning for 360 image transmission in wireless VR networks", *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, pp. 1-6, 2019.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

188.

C. Han and Y. Chen, "Propagation modeling for wireless communications in the terahertz band", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 6, pp. 96-101, Jun. 2018.

Show in Context View Article

Google Scholar

189.

X. Liu, Y. Deng, C. Han and M. Di Renzo, "Learning-based prediction rendering and transmission for interactive virtual reality in RIS-assisted terahertz networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 2, pp. 710-724, Feb. 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

190.

M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed and Y. M. Jang, "6G wireless communication systems: Applications requirements technologies challenges and research directions", *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 957-975, 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

191.

C. De Alwis et al., "Survey on 6G frontiers: Trends applications requirements technologies and future research", *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 836-886, 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

192.

J. Park et al., "Extreme URLLC: Vision challenges and key enablers", *arXiv:2001.09683*, 2020.

Show in Context Google Scholar

193.

J. Wallace and A. Valdivia, "A high-performance 5G/6G infrastructure for augmented virtual and extended reality", *Proc. Int. Conf. Comput. Sci. Comput. Intell. (CSCI)*, pp. 1291-1296, 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

194.

X. Li, W. Feng, J. Wang, Y. Chen, N. Ge and C.-X. Wang, "Enabling 5G on the ocean: A hybrid satellite-UAV-terrestrial network solution", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 6, pp. 116-121, Dec. 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

195.

D. Mourtzis, V. Zogopoulos and E. Vlachou, "Augmented reality application to support remote maintenance as a service in the robotics industry", *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 46-51, Jul. 2017.

CrossRef Google Scholar

196.

J. Cheng, W. Chen, F. Tao and C.-L. Lin, "Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing", *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 10, pp. 10-19, Jun. 2018.

CrossRef Google Scholar

197.

M. Erol-Kantarci and S. Sukhmani, "Caching and computing at the edge for mobile augmented reality and virtual reality (AR/VR) in 5G" in *Ad Hoc Network*, Cham, Switzerland:Springer, pp. 169-177, 2018.

CrossRef Google Scholar

198.

P. Ren et al., "Edge AR X5: An edge-assisted multi-user collaborative framework for mobile Web augmented reality in 5G and beyond", *IEEE Trans. Cloud Comput.*, vol. 10, no. 4, pp. 2521-2537, Oct.–Dec. 2022.

Show in Context View Article

[Google Scholar](#)

199.

P. Zhou et al., "5G MEC computation handoff for mobile augmented reality", *arXiv:2101.00256*, 2021.

[Google Scholar](#)

200.

W. C. Ng, W. Y. B. Lim, J. S. Ng, Z. Xiong, D. Niyato and C. Miao, "Unified resource allocation framework for the edge intelligence-enabled metaverse", *arXiv:2110.14325*, 2021.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

201.

P. Ren, L. Liu, X. Qiao and J. Chen, "Distributed edge system orchestration for Web-based mobile augmented reality services", *IEEE Trans. Services Comput.*, vol. 16, no. 3, pp. 1778-1792, May/Jun. 2023.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

202.

W. Zhang, B. Han and P. Hui, "SEAR: Scaling experiences in multiuser augmented reality", *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 28, no. 5, pp. 1982-1992, May 2022.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

203.

D. Van Huynh, S. R. Khosravirad, A. Masaracchia, O. A. Dobre and T. Q. Duong, "Edge intelligence-based ultra-reliable and low-latency communications for digital twin-enabled metaverse", *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 8, pp. 1733-1737, Aug. 2022.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

204.

J. Kang et al., "Blockchain-based federated learning for industrial metaverses: Incentive scheme with optimal Aol", *arXiv:2206.07384*, 2022.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

205.

M. F. Alam, S. Katsikas and S. Hadjiefthymiades, "An intelligent and modular sensing system for augmented reality application", *Proc. 9th Int. Conf. Sens. Technol. (ICST)*, pp. 850-855, 2015.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

206.

S. Kim and J.-H. Yun, "Motion-aware interplay between WiGig and WiFi for wireless virtual reality", *Sensors*, vol. 20, no. 23, pp. 6782, 2020.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

207.

M. Sugimoto, "Cloud XR (extended reality: Virtual reality augmented reality mixed reality) and 5G mobile communication system for medical image-guided holographic surgery and telemedicine" in *Multidisciplinary Computational Anatomy*, Singapore:Springer, pp. 381-387, 2022.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

208.

Y. Han, D. Niyato, C. Leung, C. Miao and D. I. Kim, "A dynamic resource allocation framework for synchronizing metaverse with IoT service and data", *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 1196-1201, 2022.

[View Article](#)

Google Scholar

209.

Q. Zhang, J. Liu and G. Zhao, "Towards 5G enabled tactile robotic telesurgery", *arXiv:1803.03586*, 2018.

Google Scholar

210.

R. Gupta, S. Tanwar, S. Tyagi and N. Kumar, "Tactile-Internetbased telesurgery system for healthcare 4.0: An architecture research challenges and future directions", *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 6, pp. 22-29, No./Dec. 2019.

View Article

Google Scholar

211.

H. M. Kusuma, V. K. Shukla and S. Gupta, "Enabling VR/AR and tactile through 5G network", *Proc. Int. Conf. Commun. Inf. Comput. Technol. (ICCICT)*, pp. 1-6, 2021.

View Article

Google Scholar

212.

G. Minopoulos, K. E. Psannis, S. Goudos, S. Nikolaidis, G. Kokkonis and Y. Ishibashi, "Efficient integration of XR with haptic feedback and 5G networks", *Proc. IEEE 9th Int. Conf. Inf. Commun. Netw. (ICICN)*, pp. 240-244, 2021.

View Article

Google Scholar

213.

K. Sartipi, R. C. DuToit, C. B. Cobar and S. I. Roumeliotis, "Decentralized visual-inertial localization and mapping on mobile devices for augmented reality", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS)*, pp. 2145-2152, 2019.

View Article

Google Scholar

214.

F. Guo, F. R. Yu, H. Zhang, H. Ji, V. C. Leung and X. Li, "An adaptive wireless virtual reality framework in future wireless networks: A distributed learning approach", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 8, pp. 8514-8528, Aug. 2020.

View Article

Google Scholar

215.

D. Chen et al., "Federated learning based mobile edge computing for augmented reality applications", *Proc. Int. Conf. Comput. Netw. Commun. (ICNC)*, pp. 767-773, 2020.

View Article

Google Scholar

216.

D. De, "FedLens: Federated learning-based privacy-preserving mobile crowdsensing for virtual tourism", *Innovations Syst. Softw. Eng.*, vol. 1614, pp. 1-14, Jan. 2022.

CrossRef Google Scholar

217.

X. Chen and G. Liu, "Joint optimization of task offloading and resource allocation via deep reinforcement learning for augmented reality in mobile edge network", *Proc. IEEE Int. Conf. Edge Comput. (EDGE)*, pp. 76-82, 2020.

View Article

Google Scholar

218.

P. Lin, Q. Song, F. R. Yu, D. Wang and L. Guo, "Task offloading for wireless VR-enabled medical treatment with blockchain security using collective reinforcement learning", *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 21, pp. 15749-15761, Nov. 2021.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

219.

Y. Jiang, J. Kang, D. Niyato, X. Ge, Z. Xiong and C. Miao, "Reliable coded distributed computing for metaverse services: Coalition formation and incentive mechanism design", *arXiv:2111.10548*, 2021.

[Google Scholar](#)

220.

R. Adeogun, G. Berardinelli, P. E. Mogensen, I. Rodriguez and M. Razzaghpour, "Towards 6G in-X subnetworks with submillisecond communication cycles and extreme reliability", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 110172-110188, 2020.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

221.

C. Benzaid and T. Taleb, "AI-driven zero touch network and service management in 5G and beyond: Challenges and research directions", *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 2, pp. 186-194, Mar./Apr. 2020.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

222.

A. Rizwan, M. Jaber, F. Filali, A. Imran and A. Abu-Dayya, "A zero-touch network service management approach using AI-enabled CDR analysis", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 157699-157714, 2021.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

223.

B.-M. Andrus et al., "Zero-touch provisioning of distributed video analytics in a software-defined metro-haul network with P4 processing", *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.*, pp. 1-3, 2019.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

224.

M. Xu, D. Niyato, J. Kang, Z. Xiong, C. Miao and D. I. Kim, "Wireless edge-empowered metaverse: A learning-based incentive mechanism for virtual reality", *arXiv:2111.03776*, 2021.

[Show in Context](#) [Google Scholar](#)

225.

A. Aijaz, Z. Dawy, N. Pappas, M. Simsek, S. Oteafy and O. Holland, "Toward a tactile Internet reference architecture: Vision and progress of the IEEE P1918.1 standard", *arXiv:1807.11915*, 2018.

[Show in Context](#) [Google Scholar](#)

226.

A. C. Baktir, A. Ozgovde and C. Ersoy, "How can edge computing benefit from software-defined networking: A survey use cases and future directions", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2359-2391, 4th Quart. 2017.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

227.

W. Rafique, L. Qi, I. Yaqoob, M. Imran, R. U. Rasool and W. Dou, "Complementing IoT services through software defined networking and edge computing: A comprehensive survey", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 3, pp. 1761-1804, 3rd Quart. 2020.

[Show in Context](#) [View Article](#)

[Google Scholar](#)

228.

S. K. Sharma, I. Woungang, A. Anpalagan and S. Chatzinotas, "Toward tactile Internet in beyond 5G era: Recent advances current issues and future directions", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56948-56991, 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

229.

C. Zhang, G. He, Y. Chen, P. Zhu and S. Dou, "Challenges and road ahead for wireless networks to serve immersive human centric applications", *Proc. IEEE 92nd Veh. Technol. Conf. (VTC-Fall)*, pp. 1-5, 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

230.

M. Maier and A. Ebrahimzadeh, "Towards immersive tactile Internet experiences: Low-latency FiWi enhanced mobile networks with edge intelligence", *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 11, no. 4, pp. B10-B25, Apr. 2019.

Show in Context View Article

Google Scholar

231.

M. Chen, W. Saad and C. Yin, "Deep learning for 360 content transmission in UAV-enabled virtual reality", *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, pp. 1-6, 2019.

View Article

Google Scholar

232.

A. El Saer, C. Stentoumis, I. Kalisperakis, L. Grammatikopoulos, P. Nomikou and O. Vlasopoulos, "3D reconstruction and mesh optimization of underwater spaces for virtual reality", *Proc. Int. Arch. Photogrammetry Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. 43, pp. 949-956, Aug. 2020.

CrossRef Google Scholar

233.

J. Zhang and F. Wu, "A method of offline reinforcement learning virtual reality satellite attitude control based on generative adversarial network", *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 2021, Aug. 2021.

CrossRef Google Scholar

234.

A. T. Z. Kasgari and W. Saad, "Stochastic optimization and control framework for 5G network slicing with effective isolation", *Proc. 52nd Annu. Conf. Inf. Sci. Syst. (CISS)*, pp. 1-6, 2018.

View Article

Google Scholar

235.

K. Xu, "Electrical automation teaching based on VR virtual reality technology", *Proc. 2nd Asia-Pacific Conf. Image Process. Electron. Comput.*, pp. 925-928, 2021.

CrossRef Google Scholar

236.

R. M. Sohaib, O. Onireti, Y. Sambo and M. A. Imran, "Network slicing for beyond 5G systems: An overview of the smart port use case", *Electronics*, vol. 10, no. 9, pp. 1090, 2021.

CrossRef Google Scholar

237.

Y.-J. Liu, H. Du, D. Niyato, G. Feng, J. Kang and Z. Xiong, "Slicing4Meta: An intelligent integration framework with multidimensional network resources for metaverse-as-a-service in Web 3.0", *arXiv:2208.06081*, 2022.

Google Scholar

238.

M. Chen, W. Saad and C. Yin, "Virtual reality over wireless networks: Quality-of-service model and learning-based resource management", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 11, pp. 5621-5635, Nov. 2018.

View Article

Google Scholar

239.

Y. Yang, L. Feng, C. Zhang, Q. Ou and W. Li, "Resource allocation for virtual reality content sharing based on 5G D2D multicast communication", *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2020, no. 1, pp. 1-12, 2020.

CrossRef Google Scholar

240.

H. Du et al., "Attention-aware resource allocation and QoE analysis for metaverse xURLLC services", *arXiv:2208.05438*, 2022.

View Article

Google Scholar

241.

T. Dang and M. Peng, "Joint radio communication caching and computing design for mobile virtual reality delivery in fog radio access networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 7, pp. 1594-1607, Jul. 2019.

View Article

Google Scholar

242.

W.-C. Chien, H.-Y. Weng and C.-F. Lai, "Q-learning based collaborative cache allocation in mobile edge computing", *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 102, pp. 603-610, Jan. 2020.

CrossRef Google Scholar

243.

Y. Cai, J. Llorca, A. M. Tulino and A. F. Molisch, "Joint compute-caching-communication control for Online data-intensive service delivery", *arXiv:2205.01944*, 2022.

Google Scholar

244.

M. Zhao et al., "Virtual carbon and water flows embodied in global fashion trade—A case study of denim products", *J. Clean. Prod.*, vol. 303, Jun. 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

245.

Greenhouse Gas Emissions From a Typical Passenger Vehicle, Washington, DC, USA, 2023, [online] Available: <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhousegas-emissions-typical-passenger-vehicle>.

Show in Context Google Scholar

246.

National water footprint, 2020, [online] Available: <https://waterfootprint.org/en/water-footprint/national-water-footprint/>.

Show in Context CrossRef Google Scholar

247.

C. Nugent, Airlines' emissions halved during the pandemic. can the industry preserve some of those gains as travel rebounds, 2021, [online] Available: <https://time.com/6048871/pandemic-airlines-carbon-emissions/>.

Show in Context Google Scholar

248.

M. Rasmussen, Touring the musical metaverse: Virtual concerts are here to stay, 2021, [online] Available: <https://www.virtualhumans.org/article/touring-the-musical-metaverse-virtual-concerts-are-hereto-stay>.

Show in Context Google Scholar

249.

D. Mourtzis, "Digital twin inception in the era of industrial metaverse", *Front. Manuf. Technol.*, vol. 3, pp. 1-8, Apr. 2023.

Show in Context CrossRef Google Scholar

250.

A. Meige et al., *The industrial metaverse: Making the invisible visible to drive sustainable growth*, 2023, [online] Available: <https://www.adlittle.com/en/insights/report/industrial-metaverse/>.

Show in Context Google Scholar

251.

F. Betti and E. de Boer, *The global lighthouse network playbook for responsible industry transformation*, Cologne, Switzerland, Mar. 2022.

Show in Context Google Scholar

252.

I. Kaplan, *Why Manufacturers Should Use Digital Twins for Sustainability Not Just Productivity*, Cologne, Switzerland, May 2023, [online] Available: <https://www.weforum.org/agenda/2023/05/digital-twins-manufacturing-sustainability/>.

Show in Context Google Scholar

253.

S. S. Kamble, A. Gunasekaran, H. Parekh, V. Mani, A. Belhadi and R. Sharma, "Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends future perspectives and an implementation framework", *Technol. Forecast. Social Change*, vol. 176, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

254.

H. S. Govindasamy, R. Jayaraman, B. Taspinar, D. Lehner and M. Wimmer, "Air quality management: An exemplar for modeldriven digital twin engineering", *Proc. ACM/IEEE Int. Conf. Model Driven Eng. Lang. Syst. Compan. (MODEL-C)*, pp. 229-232, 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

255.

G. P. Lydon, S. Caranovic, I. Hischier and A. Schlueter, "Coupled simulation of thermally active building systems to support a digital twin", *Energy Build.*, vol. 202, Nov. 2019.

Show in Context CrossRef Google Scholar

256.

S. M. E. Sepasgozar, "Differentiating digital twin from digital shadow: Elucidating a paradigm shift to expedite a smart sustainable built environment", *Buildings*, vol. 11, no. 4, pp. 151, 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

257.

L. Zhao, H. Zhang, Q. Wang and H. Wang, "Digital-twin-based evaluation of nearly zero-energy building for existing buildings based on scan-to-BIM", *Adv. Civil Eng.*, vol. 2021, Apr. 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

258.

M. Egkolfopoulou and A. Gardner, *Even in the metaverse not all identities are created equal*, 2021, [online] Available: <https://www.bloomberg.com/news/features/2021-12-06/cryptopunknft-prices-suggest-a-diversity-problem-in-the-metaverse>.

Show in Context Google Scholar

259.

R. Di Pietro and S. Cresci, "Metaverse: Security and privacy issues", *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Trust Privacy Security Intell. Syst. Appl. (TPS-ISA)*, pp. 281-288, 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

260.

R. Zhao, Y. Zhang, Y. Zhu, R. Lan and Z. Hua, "Metaverse: Security and privacy concerns", *J. Metaverse*, vol. 3, no. 2, pp. 93-99, 2023.

Show in Context CrossRef Google Scholar

261.

A. Gupta, H. U. Khan, S. Nazir, M. Shafiq and M. Shabaz, "Metaverse security: Issues challenges and a viable ZTA model", *Electronics*, vol. 12, no. 2, pp. 391, 2023.

Show in Context CrossRef Google Scholar

262.

Y. Huang, Y. J. Li and Z. Cai, "Security and privacy in metaverse: A comprehensive survey", *Big Data Min. Anal.*, vol. 6, no. 2, pp. 234-247, 2023.

Show in Context View Article

Google Scholar

263.

Y. Wang et al., "A survey on metaverse: Fundamentals security and privacy", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 25, no. 1, pp. 319-352, 1st Quart. 2023.

Show in Context View Article

Google Scholar

264.

H. Duan, J. Li, S. Fan, Z. Lin, X. Wu and W. Cai, "Metaverse for social good: A university campus prototype", *Proc. 29th ACM Int. Conf. Multimedia*, pp. 153-161, 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

265.

H. Du, B. Ma, D. Niyato and J. Kang, "Rethinking quality of experience for metaverse services: A consumer-based economics perspective", *arXiv:2208.01076*, 2022.

Show in Context Google Scholar

266.

K. J. Nevelsteen, "Virtual world defined from a technological perspective and applied to video games mixed reality and the metaverse", *Comput. Animation Virtual Worlds*, vol. 29, no. 1, 2018.

Show in Context CrossRef Google Scholar

267.

L. V. Kiong, *Metaverse Made Easy: A Beginner's Guide to the Metaverse: Everything You Need to Know About Metaverse NFT and GameFi*, Amazon Seattle, WA, USA, Jan. 2022, [online] Available: <https://www.amazon.com/Metaverse-Made-Easy-Beginners-Everything/dp/B09PW6G98C>.

Show in Context Google Scholar

268.

D. Gursoy, S. Malodia and A. Dhir, "The metaverse in the hospitality and tourism industry: An overview of current trends and future research directions", *J. Hospitality Market. Manage.*, vol. 31, no. 5, pp. 527-534, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

269.

T. Um, H. Kim, H. Kim, J. Lee, C. Koo and N. Chung, "Travel Incheon as a metaverse: Smart tourism cities development case in Korea", *Proc. ENTER22 e-Tourism Conf.*, pp. 226-231, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

270.

B. Ryskeldiev, Y. Ochiai, M. Cohen and J. Herder, "Distributed metaverse: Creating decentralized blockchain-based model for peerto- peer sharing of virtual spaces for mixed reality applications", *Proc. 9th Augmented Human Int. Conf.*, pp. 1-3, 2018.

Show in Context CrossRef Google Scholar

271.

D. Bennett, "Remote workforce virtual team tasks and employee engagement tools in a real-time interoperable decentralized metaverse", *Psychosociol. Issues Human Resour. Manage.*, vol. 10, no. 1, pp. 78, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

272.

G. H. Popescu, C. F. Ciurlău, C. I. Stan, C. Băcănoiu and A. Țanase, "Virtual workplaces in the metaverse: Immersive remote collaboration tools Behavioral predictive analytics and extended reality technologies", *Psychosociol. Issues Human Resour. Manage.*, vol. 10, no. 1, pp. 21-34, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

273.

P. Ludlow and M. Wallace, *The Second Life Herald: The Virtual Tabloid That Witnessed the Dawn of the Metaverse*, Cambridge, MA, USA:MIT Press, 2007.

Show in Context Google Scholar

274.

T. F. Tan et al., "Metaverse and virtual health care in ophthalmology: Opportunities and challenges", *Asia-Pacific J. Ophthalmol.*, vol. 11, no. 3, pp. 237-246, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

275.

J. Thomason, "MetaHealth-how will the metaverse change health care?", *J. Metaverse*, vol. 1, no. 1, pp. 13-16, 2021.

Show in Context Google Scholar

276.

F. C. Moore, N. Obradovich, F. Lehner and P. Baylis, "Rapidly declining remarkability of temperature anomalies may obscure public perception of climate change", *Proc. Nat. Acad. Sci.*, vol. 116, no. 11, pp. 4905-4910, 2019.

Show in Context CrossRef Google Scholar

277.

D. M. Markowitz and J. N. Bailenson, "Virtual reality and the psychology of climate change", *Current Opin. Psychol.*, vol. 42, pp. 60-65, Dec. 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

278.

D. Shin, "The actualization of meta affordances: Conceptualizing affordance actualization in the metaverse games", *Comput. Human Behav.*, vol. 133, Aug. 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

279.

S. Hamilton, "Deep learning computer vision algorithms customer engagement tools and virtual marketplace dynamics data in the metaverse economy", *J. Self-Governance Manage. Econ.*, vol. 10, no. 2, pp. 37-51, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

280.

S. Mackenzie, "Criminology towards the metaverse: Cryptocurrency scams grey economy and the technosocial", *Brit. J. Criminol.*, vol. 62, no. 6, pp. 1537-1552, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

281.

H. J. Oh, J. Kim, J. J. Chang, N. Park and S. Lee, "Social benefits of living in the metaverse: The relationships among social presence supportive interaction social self-efficacy and feelings of loneliness", *Comput. Human Behav.*, vol. 139, Feb. 2023.

Show in Context CrossRef Google Scholar

282.

S. Monaco and G. Sacchi, "Travelling the metaverse: Potential benefits and main challenges for tourism sectors and research applications", *Sustainability*, vol. 15, no. 4, pp. 3348, 2023.

Show in Context CrossRef Google Scholar

283.

S. Mystakidis, "Metaverse", *Encyclopedia*, vol. 2, no. 1, pp. 486-497, 2022.

Show in Context Google Scholar

284.

P. Fernandez, "Facebook meta the metaverse and libraries", *Library Hi Tech News*, vol. 39, no. 4, pp. 1-3, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

285.

J. Kim, "Advertising in the metaverse: Research agenda", *J. Interact. Advertis.*, vol. 21, no. 3, pp. 141-144, 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

286.

R. Cheng, N. Wu, S. Chen and B. Han, "Will metaverse be NextG Internet? Vision hype and reality", *arXiv:2201.12894*, 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

287.

D. Vidal-Tomás, "The new crypto niche: NFTs play-to-earn and metaverse tokens", *Finance Res. Lett.*, vol. 47, Jun. 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

288.

L. Ante, Non-fungible token (NFT) markets on the Ethereum blockchain: Temporal development cointegration and interrelations, 2021, [online] Available: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3904683>.

Show in Context CrossRef Google Scholar

289.

M. Eshghie, L. Quan, G. A. Kasche, F. Jacobson, C. Bassi and C. Artho, "CircleChain: Tokenizing products with a role-based scheme for a circular economy", *arXiv:2205.11212*, 2022.

Show in Context Google Scholar

290.

M. Deveci, A. R. Mishra, I. Gokasar, P. Rani, D. Pamucar and E. Ozcan, "A decision support system for assessing and prioritizing sustainable urban transportation in metaverse", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 475-484, Feb. 2023.

Show in Context View Article

Google Scholar

291.

S. A. Khowaja, K. Dev, N. M. F. Qureshi, P. Khuwaja and L. Foschini, "Toward industrial private AI: A two-tier framework for data and model security", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 29, no. 2, pp. 76-83, Apr. 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

292.

S. A. Khowaja, I. H. Lee, K. Dev, M. A. Jarwar and N. M. F. Qureshi, "Get your foes fooled: Proximal gradient split learning for defense against model inversion attacks on IoMT data", *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 5, pp. 2607-2616, Sep./Oct. 2023.

Show in Context View Article

Google Scholar

293.

Y. Zhang, X. Ma, J. Zhang, M. S. Hossain, G. Muhammad and S. U. Amin, "Edge intelligence in the cognitive Internet of Things: Improving sensitivity and interactivity", *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 3, pp. 58-64, May/Jun. 2019.

Show in Context View Article

Google Scholar

294.

L. U. Khan, I. Yaqoob, N. H. Tran, Z. Han and C. S. Hong, "Network slicing: Recent advances taxonomy requirements and open research challenges", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 36009-36028, 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

295.

H. Lee, D. Woo and S. Yu, "Virtual reality metaverse system supplementing remote education methods: Based on aircraft maintenance simulation", *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 5, pp. 2667, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

296.

S. Tayal, K. Rajagopal and V. Mahajan, "Virtual reality based metaverse of gamification", *Proc. 6th Int. Conf. Comput. Methodol. Commun. (ICCMC)*, pp. 1597-1604, 2022.

Show in Context View Article

Google Scholar

297.

B. Kye, N. Han, E. Kim, Y. Park and S. Jo, "Educational applications of metaverse: Possibilities and limitations", *J. Educ. Eval. Health Prof.*, vol. 18, pp. 32, Dec. 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

298.

J. Wu et al., "Toward native artificial intelligence in 6G networks: System design architectures and paradigms", *arXiv:2103.02823*, 2021.

Show in Context Google Scholar

299.

H. Fourati, R. Maaloul, L. Chaari and M. Jmaiel, "Comprehensive survey on self-organizing cellular network approaches applied to 5G networks", *Comput. Netw.*, vol. 199, Nov. 2021.

Show in Context CrossRef Google Scholar

300.

S. Vittal et al., "Self Optimizing network slicing in 5G for slice isolation and high availability", *Proc. 17th Int. Conf. Netw. Service Manage. (CNSM)*, pp. 125-131, 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

301.

Z. Nadir, T. Taleb, H. Flinck, O. Bouachir and M. Baggaa, "Immersive services over 5G and beyond mobile systems", *IEEE Netw.*, vol. 35, no. 6, pp. 299-306, Nov./Dec. 2021.

Show in Context View Article

Google Scholar

302.

F. Rinaldi et al., "Non-terrestrial networks in 5G & beyond: A survey", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165178-165200, 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

303.

B. Lin, J. Duan, M. Han and L. X. Cai, *Next Generation Marine Wireless Communication Networks*, Cham, Switzerland:Springer, pp. 1-143, 2022.

Show in Context CrossRef Google Scholar

304.

H. Du, D. Niyato, J. Kang, D. I. Kim and C. Miao, "Optimal targeted advertising strategy for secure wireless edge metaverse", *arXiv:2111.00511*, 2021.

Show in Context Google Scholar

305.

S. Ghafoor, N. Boujnah, M. H. Rehmani and A. Davy, "MAC protocols for terahertz communication: A comprehensive survey", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 4, pp. 2236-2282, 4th Quart. 2020.

Show in Context View Article

Google Scholar

306.

B. Han, W. Jiang, M. A. Habibi and H. D. Schotten, "An abstracted survey on 6G: Drivers requirements efforts and enablers", *arXiv:2101.01062*, 2021.

Show in Context Google Scholar

307.

T. Chen et al., "Novel augmented reality interface using a selfpowered triboelectric based virtual reality 3D-control sensor", *Nano Energy*, vol. 51, pp. 162-172, Sep. 2018.

Show in Context CrossRef Google Scholar