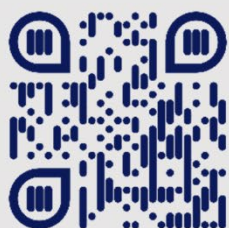


# Анализ спектральной эффективности беспроводной связи MISO с помощью IRS - предложение по сценарию метавселенной



Опубликован: 20 июля 2023



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:

**NEW REALITY**

immersive technologies

## Абстракт

Метавселенная становится интернет-парадигмой следующего поколения, которая улучшит человеческое взаимодействие и подключение. Цифровые двойники, фундаментальная стратегия, используемая в метавселенной, позволяет виртуализировать реальные предметы, людей, действия и настройки. Виртуальный мир, называемый метавселенной, построен на множестве технологий. Беспроводная связь является важной частью этих технологий. В частности, беспроводная связь 6G может иметь важное значение для роста метавселенной. В соответствии с целью достижения более высоких скоростей в беспроводной сети следующего поколения для метавселенной, в этой статье предлагается новая концептуализация беспроводной связи на основе интеллектуальной отражающей поверхности (IRS) с несколькими входами и одним выходом в среде физического мира. В частности, в этом документе предлагается, чтобы в физическом мире связь между коммуникационной сетью и пользователями с помощью IRS могла быть отражена в метавселенной через виртуальный мир (например, цифровые аватары и виртуальная среда). В ходе моделирования частота битовых ошибок и спектральная эффективность терминала-приемника были выполнены и рассчитаны в движке метавселенной для дальнейшего рассмотрения.

**Ключевые слова:** метавселенная; беспроводная связь; интеллектуальная отражающая поверхность; спектральная эффективность; Частота битовых ошибок

## 1. Введение

Термин «метавселенная» относится к общей и постоянной онлайн-среде виртуальной 3D-реальности, которая объединяет несколько технологий, включая сенсорика, коммуникацию и вычисления, и подчеркивает смешение виртуального и реального миров [1]. В метавселенной дополненная реальность (AR), виртуальная реальность (VR), расширенная реальность (XR) и смешанная реальность (MR) могут использоваться для создания виртуальных сред, которые обеспечивают взаимодействие между виртуальными моделями (т. е. цифровыми двойниками) и аватарами (т. е. человеческими моделями) (MR) [2]. Обзор структуры метавселенной показан на рисунке 1а, а связи между тремя мирами метавселенной объясняются следующим образом [3]:

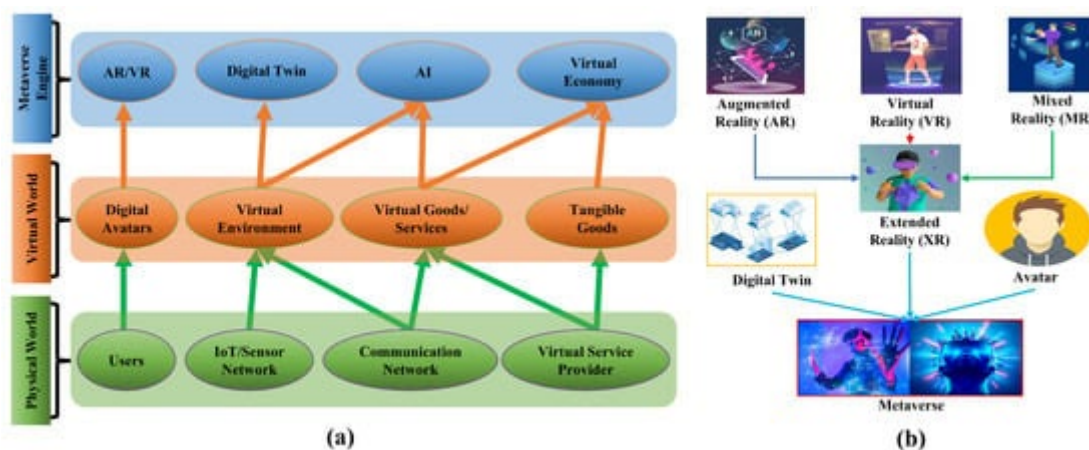


Рисунок 1. (а) Обзор структуры метавселенной с различными частями (такими как физический мир, виртуальный мир и движок метавселенной); (б) Концептуализация краткого обзора метавселенной.

**Физический мир:** Физическая вселенная предлагает структуры, поддерживающие метавселенную (включая сенсорные/управляющие, коммуникационные, вычислительные и хранильные структуры), чтобы облегчить мультимодальное восприятие, передачу, обработку и кэширование данных наряду с физическими ограничениями. Эффективное взаимодействие между человеческим и компьютерным мирами стало возможным благодаря физической вселенной. Инфраструктура датчиков/управления специально состоит из

повсеместно распространенных интеллектуальных устройств, датчиков и исполнительных механизмов, которые позволяют выполнять общую мультимодальную интерпретацию данных об обстоятельствах и человеческом теле, а также очень точное управление приборами. Коммуникационная архитектура, состоящая из множества разнородных беспроводных или проводных коммуникаций (таких как спутниковая связь, сотовая связь и связь с беспилотными летательными аппаратами), обеспечивает сетевое взаимодействие. Кроме того, структуры вычислений и хранения, поддерживаемые облачными периферийными вычислениями, позволяют использовать значительные вычислительные ресурсы и ресурсы хранения данных [4]. Например, виртуальный мир должен генерировать высококачественные изображения для каждого аватара с минимальной частотой кадров 30 кадров в секунду [5], что создает огромные требования к обработке и ограничения задержки (например, не более 1/30 секунды).

Виртуальный мир: Как и в соответствии с нормами ISO/IEC 23005 и IEEE 2888, цифровой мир может состоять из нескольких связанных и рассредоточенных виртуальных миров (также известных как субметавселенные) [6]. Каждая субметавселенная может предоставлять пользователям, изображенным в виде цифровых аватаров, определенный спектр виртуальных сред и услуг (таких как игры, социальные знакомства, онлайн-музеи и онлайн-концерты).

Движок метавселенной: Благодаря использованию интерактивного искусственного интеллекта, цифровых двойников и технологий блокчейна, движок метавселенной [7] создает, обновляет и поддерживает виртуальную среду, используя обширные данные из реального мира в качестве входных данных. В частности, с помощью XR и человеко-компьютерных взаимодействий (особенно интерфейсов мозг-компьютер) люди, находящиеся в реальной среде, теперь могут иммерсивно управлять своими цифровыми аватарами в метавселенной, используя свои ощущения и тела для различных групповых и социальных мероприятий, включая автомобильные гонки, свидания и торговлю виртуальными товарами. Благодаря этим цифровым производственным действиям, основанным на аватарах, метавселенная позволяет развивать виртуальную экономику.

Кроме того, 3D-виртуальная среда, в которой виртуальные персонажи могут общаться друг с другом, известна как метавселенная. Эти персонажи могут быть аватарами реальных людей или виртуальными версиями реальных людей. Основная концепция метавселенной резюмируется в соответствии с рисунком 1b, следующим образом:

1. Аватар: Аватар часто воспринимается как компьютерная иконка, символизирующая персонажа игрока в видеоигре. Но это нечто гораздо большее. Идея аватара и цифрового двойника сопоставима в метавселенной. Это компьютеризированное представление о человеке. Движения и жесты людей зеркально отражаются аватарами в метавселенной [8].

2. Расширенная реальность: Термин «расширенная реальность» (XR) охватывает VR, AR и MR. AR позволяет управлять реальными предметами с помощью виртуальных элементов управления, в то время как VR позволяет удаленно управлять только виртуальными объектами из реального мира. AR позволяет накладывать виртуальные вещи на объекты реального мира. Пользователи могут плавно взаимодействовать между виртуальным и реальным мирами благодаря MR, который объединяет их и объединяет VR и AR [8].

3. Цифровой двойник: Виртуальная или цифровая версия всего, что существует в реальном мире, называется «цифровым двойником». Физический объект в реальном мире должен иметь необходимые датчики, чтобы обеспечить его воспроизведение в цифровую форму, в которой существует цифровой двойник.

## **2. Концептуальная мотивация**

Метавселенная будет использовать передовые технологии, такие как блокчейн, машинное обучение, сетевое нарезание, семантическая паутина, компьютерное зрение, обработка естественного языка, а также беспроводная связь и сети [9], для изучения и управления

физическими системами. Беспроводная система шестого поколения (6G) сталкивается со многими ранее несслыханными проблемами, включая повсеместное подключение, сверхнизкую задержку, сверхвысокую пропускную способность, надежность и строгую безопасность из-за строгих требований метавселенной к полному погружению, многочисленным одновременным пользователям и бесперебойному подключению [1]. Кроме того, чтобы обеспечить высокое качество пользовательского опыта, беспроводные системы для приложений метавселенной должны обладать высокой пропускной способностью и сверхнадежностью, что не может быть достигнуто существующей технологией 5G. Таким образом, революция беспроводной связи 6G, которая, как ожидается, обеспечит низкую задержку, высокую пропускную способность и услуги безопасности, будет необходима для доступа к метавселенной. В результате, ожидается, что мобильная связь 6G произведет революцию в беспроводных сетях и будет поддерживать широкий спектр первоклассных приложений метавселенной [10]. В работе [11] авторы предложили революционную стратегию цифрового двойника, которая была поддержана метавселенной за счет совместного учета интегрированной модели коммуникаций, вычислений и хранения, использования мобильных периферийных вычислений и очень надежных коммуникаций с низкой задержкой. Большую часть времени передачи в миллиметровом и терагерцовом диапазонах работают в условиях затрудненной прямой видимости (LOS). Только когда лучи приемника и передатчика выровнены, связь может быть успешной. Любое небольшое несоответствие может привести к остановке потока данных от сервисов метавселенной [12]. В последние годы коммуникационное сообщество уделяет много времени изучению интеллектуальных отражающих поверхностей (IRS) [13]. В работе [10] авторы изложили архитектуру метавселенной, ориентированную на систему 6G с высокой вероятностью использования устройства IRS. Сигнал столкновения может быть отражен ИС в целевом направлении. С другой стороны, IRS состоит из большого количества пассивных отражающих компонентов, которые могут интеллектуально изменять среду беспроводного распространения, регулируя фазовые сдвиги. ТГц, IRS и мобильные периферийные вычисления (MEC) в [14] были использованы для создания систем виртуальной реальности в небольших помещениях. Таким образом, высокая скорость передачи данных и надежная низкая задержка гарантируются для бесперебойного подключения пользователей. Архитектура IRS показана на рисунке 2.

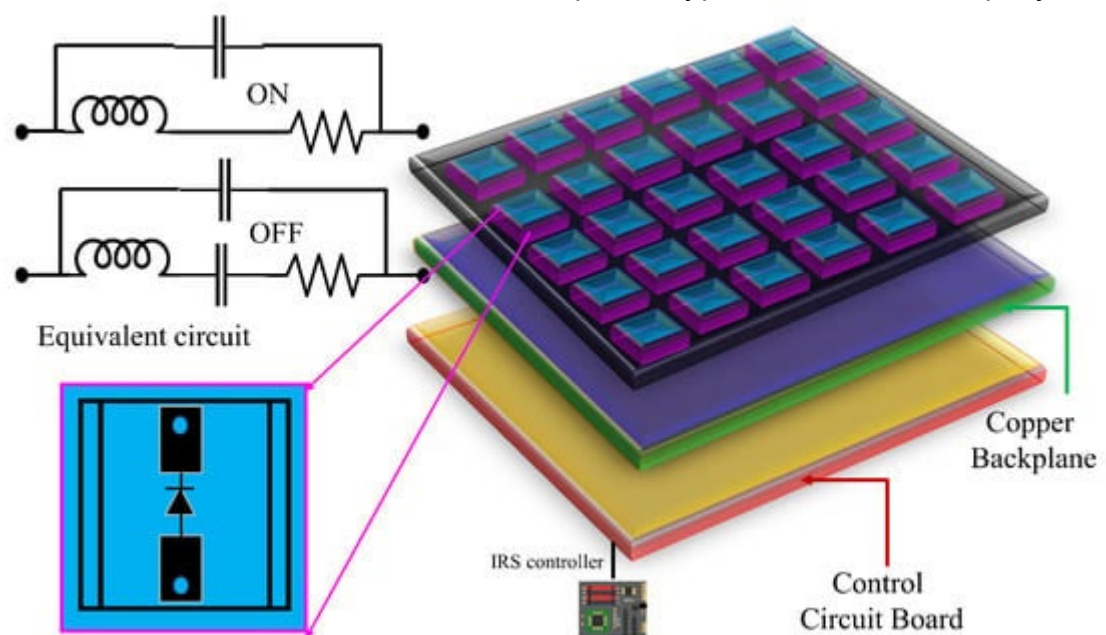


Рисунок 2. Архитектура ИК-рефлектора.

Ключевые функции IRS могут быть реализованы при скромных инвестициях в оборудование и минимальных затратах энергии; Это обеспечивает формирование диаграммы направленности с высоким коэффициентом усиления и служит резервным каналом, когда прямой канал недоступен [15]. Беспроводные сети 6G обеспечивают невероятно высокую



скорость передачи данных, высокую надежность, обширное покрытие по всему миру, минимальную задержку, высокую энергоэффективность и высокую надежность [16]. Для достижения этих целей нам требуется более сложное сетевое оборудование, а также новые стратегии эффективной беспроводной связи. Согласно последним научным публикациям, IRS и терагерцовая связь являются ключевыми концепциями для 6G [17,18]. Таким образом, для достижения цели 6G предпочтительнее использовать IRS. Таким образом, система, поддерживаемая IRS, может значительно повлиять на высокую пропускную способность и достижимые показатели исследований метавселенной для следующего поколения. В дополнение к беспроводным системам связи в сценариях метавселенной, внедрение системы связи с поддержкой IRS может стать потенциальным решением для достижения систем с низкой задержкой и более высокой пропускной способностью. В работе [19] авторы предложили уникальную концепцию утилитарно-ориентированной связи (UOC) и обсудили ее значение для беспроводной технологии 6G. В дополнение к новым разработанным принципам коммуникации, ориентированным на человека и задачу, UOC принимает устоявшиеся коммуникационные парадигмы. Авторы использовали автомобильную метавселенную в качестве кейса UOC для изучения семантических коммуникаций и передачи семантической информации для систем IRS. Более того, системы беспроводной связи с поддержкой IRS, основанные на глубоком машинном обучении [16,20], могут стать возможной применимой новой областью в сценариях метавселенной.

Основываясь на вышеупомянутых полезных приложениях, концептуализации и возможной области метавселенной в направлении 6G, эта статья фокусируется на системе беспроводной связи в средах физического мира для повышения высокой скорости передачи данных и высокой пропускной способности между физическим миром и виртуальными средами. В этой статье мы предлагаем новый физический уровень технологии в системе связи с помощью IRS для реализации вышеуказанного предложения в среде метавселенной. В частности, предлагается многопользовательская (MU) многоходовая система с одним выходом (MISO) с поддержкой IRS для анализа частоты битовых ошибок (BER) и спектральной эффективности (SE); достижимый результат отражается в среде метавселенной для достижения цели беспроводной связи 6G. Основные вклады этой статьи заключаются в следующем:

- Предложена новая концептуализация сценариев метавселенной с помощью системы MISO при поддержке IRS для системы беспроводной связи с поддержкой 6G. Мы предлагаем концепцию связи на физическом уровне (PHC), которая обеспечивает новую связность в физическом мире и метавселенной за счет повышения желаемой достижимой скорости, пропускной способности и низкой задержки для плавных коммуникационных парадигм. Таким образом, беспроводная связь с помощью IRS повышает общую производительность сети для ожиданий связи 6G в сценариях метавселенной.
- В PHC каскадный канал связи IRS между базовой станцией (BS) и IRS, а также IRS и пользовательским оборудованием (UE) рассматривается для преодоления потерь сигнала, связанных с различными препятствиями, такими как здания, деревья и т. д. Таким образом, PHC может запускать цифровой двойник реального и виртуального мира и снижать требования к пропускной способности и задержке с помощью семантической коммуникации.
- Для устранения межпользовательских помех (IUI) в BS используется предварительное кодирование с нулевым форсированием (ZF) с распределением мощности для эффективного канала. Кроме того, для эффективного распределения энергии используется метод наполнения водой [21].
- Наконец, BER, SE и пропускная способность наблюдаются по отношению к различным схемам модуляции и элементам IRS. Результаты моделирования показывают, что эти результаты могут сыграть жизненно важную роль в достижении цели 6G в метавселенной.

Остальная часть статьи организована следующим образом. В разделе 3 описывается системное моделирование с поддержкой метавселенной. В разделе 4 описывается моделирование каналов связи со спектральной эффективностью и формулировка

прекодера. В разделе 5 представлены результаты моделирования; наконец, будущие направления исследований и выводы представлены в Разделе 6 и Разделе 7 соответственно.

### 3. Системное моделирование с поддержкой метавселенной

Предлагаемая система включает в себя различные сетевые параметры в физической сети связи, изображенные на рисунке 3. Чтобы внедрить метавселенную в беспроводную коммуникационную сеть, физические обстоятельства реалистично моделируются (т.е. цифровой двойник) в качестве начального этапа для построения метавселенной. Для выполнения этого типа моделирования можно использовать различные методологии, включая математическое, имитационное, экспериментальное и моделирование на основе данных. Затем на виртуальную модель накладывается новая информация, использующая различные методы обнаружения и мониторинга (например, виртуальные объекты в мобильных контекстах). Наконец, в метавселенной цифровые аватары человека создаются в качестве моделей для беспроводных сетей, которые могут представлять целый ряд заинтересованных сторон, включая сетевых операторов и пользовательское оборудование.

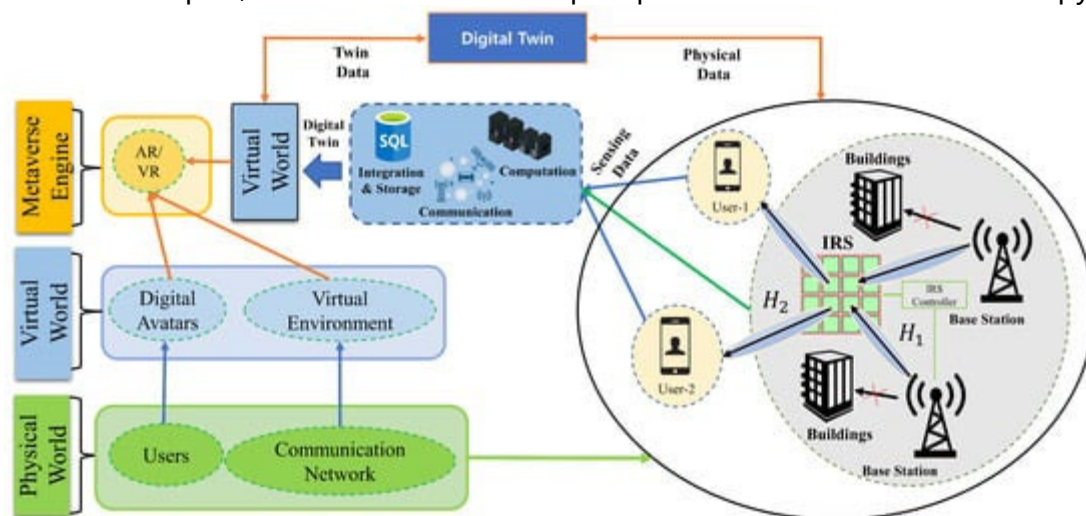


Рисунок 3. Предлагаемая структура сценариев метавселенной в коммуникационной системе MISO при поддержке IRS.

В предлагаемой концепции это стадия предварительной концептуализации реализации коммуникационной сети на основе IRS, которая задействована в сценариях физического мира, как показано на рисунке 3. Целью предлагаемой системы является обеспечение высокой скорости передачи данных и пропускной способности для терминала пользовательского оборудования за счет использования многопользовательской системы MISO с поддержкой IRS в средах метавселенной. Прямые каналы между BS и UE затруднены из-за препятствий (например, зданий), которые приводят к значительным потерям при распространении. Для решения этой проблемы при содействии IRS реализован отраженный каскадный нисходящий канал связи между BS и IRS, а также IRS и UE. Каналы BS — IRS и IRS — UE определяются как  $H_1$  и  $H_2$  соответственно. Поэтому каскадный канал  $H_{cas}$  записывается следующим образом:  $H_{cas} = H_1 + H_2$  с дополнительным шумом. Предполагается, что предложенный сценарий связи в физическом мире связан с виртуальной реальностью, где система беспроводной связи с помощью IRS может быть расширена за счет пропускной способности сети и высокой достижимой скорости. Кроме того, предлагаемая система с поддержкой IRS может быть компенсирована сложными проблемами, связанными с системой связи 6G без канала связи IRS.

В данной работе предполагается, что BS имеет  $M$ -антенны, а UE —  $K$ -одиночные антенны. Единая IRS рассматривается с числом элементов  $N$ . Принятый сигнал на UE  $f=1,2,3,\dots, F$  можно сформулировать следующим образом [22]:

$$y_f = \mathbf{h}_{2f}^H \Phi \mathbf{H}_1 \mathbf{x} + s_f, \quad (1)$$

где матрица каналов между IRS и UE равна  $\mathbf{H}_2 = [\mathbf{h}_{2,1}, \mathbf{h}_{2,2}, \mathbf{h}_{2,3}, \dots, \mathbf{h}_{2,F}]^H \in \mathbb{C}^{F \times N}$  с  $\mathbf{h}_{2,F}$  представляя вектор канала между IRS и  $f$ UE, матрица каналов между BS и IRS представлена в виде  $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ,  $s_f \sim \mathcal{KN}(0, \sigma^2)$  – аддитивный белый гауссов шум (AWGN) в точке  $f$ , матрица фазового сдвига IRS может быть представлена в виде  $\Phi = \text{diag}(e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, e^{j\phi_3}, \dots, e^{j\phi_N})$ , где переменная фазового сдвига  $n$  отражающих элементов (IRS) обозначается как  $\phi_n \in [0, 2\pi]$ . После этого передаваемый сигнал  $x$  от BS равен  $x = \sum_{f=1}^F \mathbf{p}_f x_f$ , где символы данных  $f$ th UE обозначаются  $x_f$ ,  $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \dots, \mathbf{p}_F] \in \mathbb{C}^{M \times F}$  – матрица предварительного кодирования вектора-столбца  $F$ .

#### 4. Моделирование каналов связи со спектральной эффективностью и формулировкой прекодера

Мы применяем широко используемую 3D-модель канала Салеха–Валенсуэлы [23] для применения характеристик распространения миллиметровых волн, где рассеивателями являются  $R$ . Таким образом, представление канала  $H_1$  между BS и IRS можно выразить следующим образом:

$$\mathbf{H}_1 = \sqrt{\frac{MN}{R}} \sum_{r=1}^R \alpha_r^1 \mathbf{a}_s(\phi_{s,r}^1, \theta_{s,r}^1) \mathbf{a}_t^H(\phi_{t,r}^1), \quad (2)$$

где  $R$  представляет собой число путей между BS и IRS, усиление для  $r$ -го пути равно  $\alpha_r$ , векторы массива обозначаются как  $\mathbf{a}_g(\phi_g, \theta_g, \rho)$  и  $\mathbf{a}_t(\phi_t, \rho)$ , соответственно, азимутальный угол вылета (AOD), а также прилет АО (AOA) обозначаются символами  $(\phi_g, \rho, \theta_g, \rho)$  и  $(\phi_t, \rho)$ ;

Наконец, коэффициент нормализации представлен  $\sqrt{\frac{MN}{R}}$ . Однако вектор отклика массива (ARV) однородной планарной решетки (УПА) с  $N$  элементами ИК можно записать следующим образом [24]:

$$\mathbf{a}(\phi, \theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[ 1, \dots, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d (a \sin \phi \sin \theta + \beta \cos \theta)}, \dots, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} ((N_x - 1) d \sin \phi \sin \theta + (N_y - 1) \cos \theta)} \right]^T, \quad (3)$$

где  $d$  и  $\lambda$  – расстояния между РЭ и длины волн сигнала  $\alpha$  и  $\beta$  – горизонтальный и перпендикулярный индексы RE. Кроме того, на BS ARV однородной линейной решетки (UPA) можно сформулировать следующим образом [24]:

$$\mathbf{a}_i(\phi) = \frac{1}{\sqrt{M}} \left[ 1, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \phi}, \dots, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d \sin \phi} \right]^T. \quad (4)$$

Кроме того, канал  $\mathbf{h}_{r,f}$  между IRS и UE можно написать следующим образом:

$$\mathbf{h}_{r,f}^H = \sqrt{\frac{N}{R_1}} \sum_{r_1=1}^{R_1} \alpha_{r_1}^2 \mathbf{a}_t^H(\phi_{t,r_1}^2, \theta_{t,r_1}^2). \quad (5)$$

Наконец, канал от BS к UE (т.е. каскадный канал  $H_{cas}$ ) может быть выражено следующим образом:

$$\mathbf{H}_{cas} = \mathbf{h}_{2f}^H \Phi \mathbf{H}_1. \quad (6)$$

Здесь описывается SE и конструкция матрицы предварительного кодирования. Общий SE Sca системы можно сформулировать следующим образом [22]:

$$S_{se} = \sum_{f=1}^F \log \left( 1 + \frac{|\mathbf{h}_{2f}^H \Phi \mathbf{H}_1 \mathbf{w}_f|^2}{\sum_{i \neq f} |\mathbf{h}_{2f}^H \Phi \mathbf{H}_1 \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \right) \quad (7a)$$

$$\sum_{f=1}^F \log \left( 1 + \frac{|\mathbf{H}_{cas} \mathbf{w}_f|^2}{\sum_{i \neq f} |\mathbf{H}_{cas} \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \right). \quad (7b)$$

Однако для устранения межпользовательских помех (IUI) BS учитывает матрицу предварительного кодирования с нулевым форсированием (ZF) для каскадного канала. Таким образом, матрица предварительного кодирования  $\mathbf{P}$  может быть сконструирована следующим образом [22]:

$$\mathbf{P} = \bar{\mathbf{P}} \sqrt{\mathbf{E}}, \quad (8)$$

где матрица ZF равна  $\bar{\mathbf{P}} = \mathbf{H}_{cas}^H (\mathbf{H}_{cas} \mathbf{H}_{cas}^H)^{-1}$ . Для того, чтобы правильно уменьшить IUI через матрицу предварительного кодирования ZF, необходимо выполнить следующее требование  $\bar{\mathbf{P}}$  то есть  $M, N \geq F$ . Наконец,  $\mathbf{E} = \text{diag}(E_1, E_2, E_3, \dots, E_F)$  — матрица распределения мощности пользовательского оборудования, состоящая из диагональных компонентов и предназначенная для удовлетворения наивысшего ограничения мощности.

## 5. Результаты моделирования

Для наблюдения за достижимой скоростью и пропускной способностью предложенной схемы для систем беспроводной связи MU-MISO с поддержкой IRS в физическом мире сценариев метавселенной были оценены результаты моделирования с учетом различных элементов IRS и схем модуляции. При моделировании комбинации различных элементов IRS настраиваются с помощью  $8 \times 8 \times 8$  и  $16 \times 16$  г.  $16 \times 16$ . Рассмотрены схемы модуляции двоичной фазовой манипуляции (BPSK), квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) и 16-квadrатурной амплитудной модуляции (16QAM). Распространение канала  $P=7$  Рассматриваются пути. Кроме того, расстояние между антеннами BS и ИК-элементами  $0.50.5$  и  $4\lambda$  предполагаются. Маршрут LOS от BS до IRS имеет коэффициент Райса 15 дБ. Параметры моделирования приведены в таблице 1. Схема случайного IRS, которая представляет собой механизм случайной генерации фаз. IRS RE, i.e.,  $\phi_n \in [0, 2\pi]$  с  $|\phi_n| = 1, n = 1, \dots, N$ , используется в данной работе. Таблица 1. Проведено моделирование параметров предлагаемой системы.

Parameters	Value
Numbers of paths	R = 7
Number of scatters	R = 15
BS antenna spacing	0.5λ
Number of UE	F = 2
Number of BS antennas	M = 2
Channel noise	AWGN
Rician factor	15 dB
Modulation schemes	BPSK, QPSK, 16QAM
IRS elements	8 × 8, 16 × 16

На рисунке 4 показаны характеристики BER предлагаемой системы с точки зрения различных диапазонов сигнал/шум. Из рисунка 4 видно, что модуляция BPSK с 256 элементами IRS достигает максимальной производительности по сравнению с различными модуляциями



моделирования, такими как QPSK, 16QAM и элементы IRS. Кроме того, результаты моделирования показывают, что BER усиливается в соответствии с увеличением элемента IRS. Кроме того, мы сравнили результаты моделирования с аналитическим случаем; видно, что результаты моделирования следуют той же тенденции, что и аналитический результат.

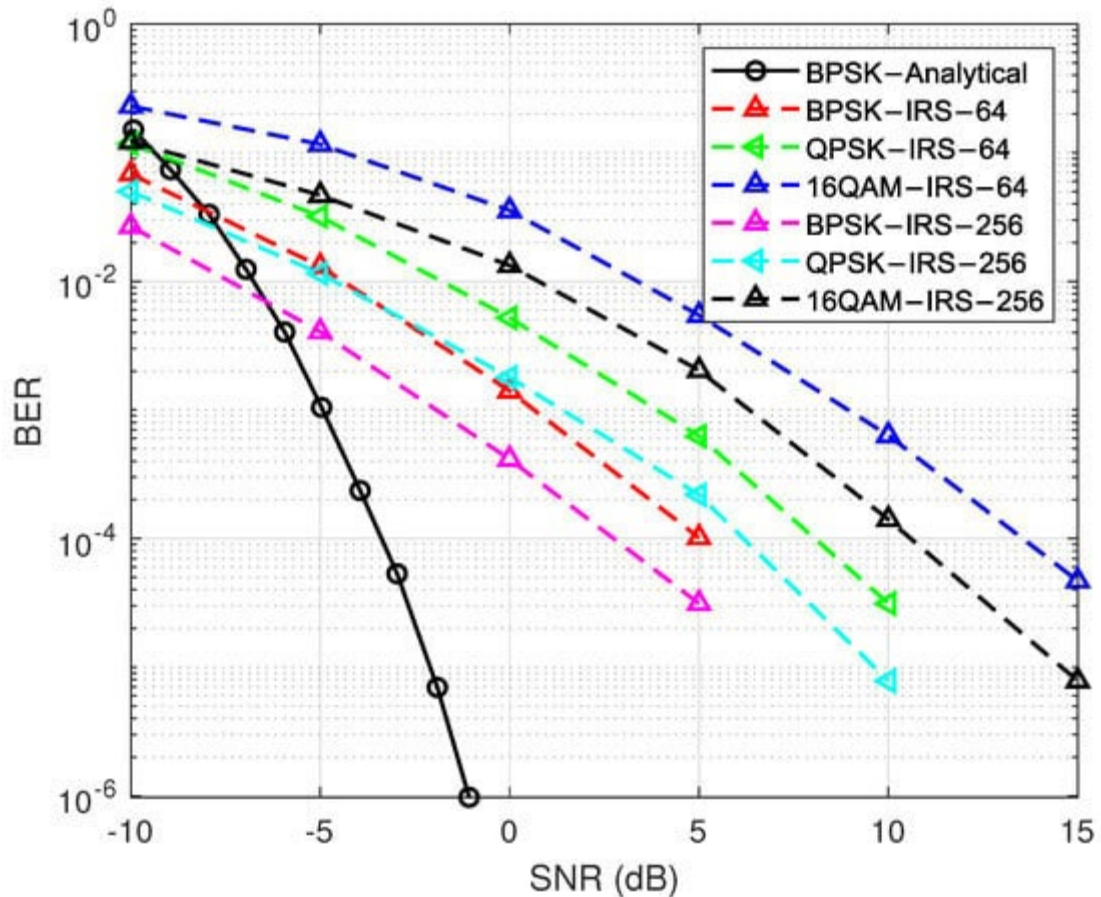


Рисунок 4. Результаты BER в сравнении с SNR предложенных и аналитических кейсов для беспроводной системы на базе IRS в метавселенной.

На рисунке 5 показаны характеристики SE предлагаемой системы с точки зрения различных схем модуляции и номеров элементов IRS. На рисунке 5 видно, что при использовании схем модуляции BPSK, QPSK и 16QAM с элементами IRS 64 и 256 достижения SE показывают минимальные вариации при различных значениях SNR, что видно на увеличенном графике. На рисунке 6 показана общая производительность SE предлагаемой системы с другими схемами оптимизации и идеальный случай по количеству элементов IRS и различным значениям SNR. Для результатов этой концепции моделирования метавселенной мы выбрали общую схему фазового сдвига IRS, которая представляет собой схему случайного фазового сдвига. Из рисунка 6 видно, что SE-достижения предложенной схемы следуют SE-тренду идеального случая с номерами IRS 64 и 256 соответственно. Кроме того, показатели СЭ предложенной схемы (в пересчете на различные SNR) превосходят исследования в [25] и [26] соответственно. Достижимый SE этой симуляции достигается почти на 21 и 23 бит/с с элементами IRS 64 и 256. Тем не менее, мы также можем реализовать много хороших схем оптимизации (например, минимальную среднеквадратическую ошибку (MMSE), наибольшее собственное значение и итерационную оптимизацию) в предлагаемой концептуальной системе. В работе [22] вышеуказанные схемы были предложены в системе связи на базе IRS. Они продемонстрировали многообещающую производительность SE и, таким образом, потенциально могут быть применены в предлагаемой системе с поддержкой метавселенной.

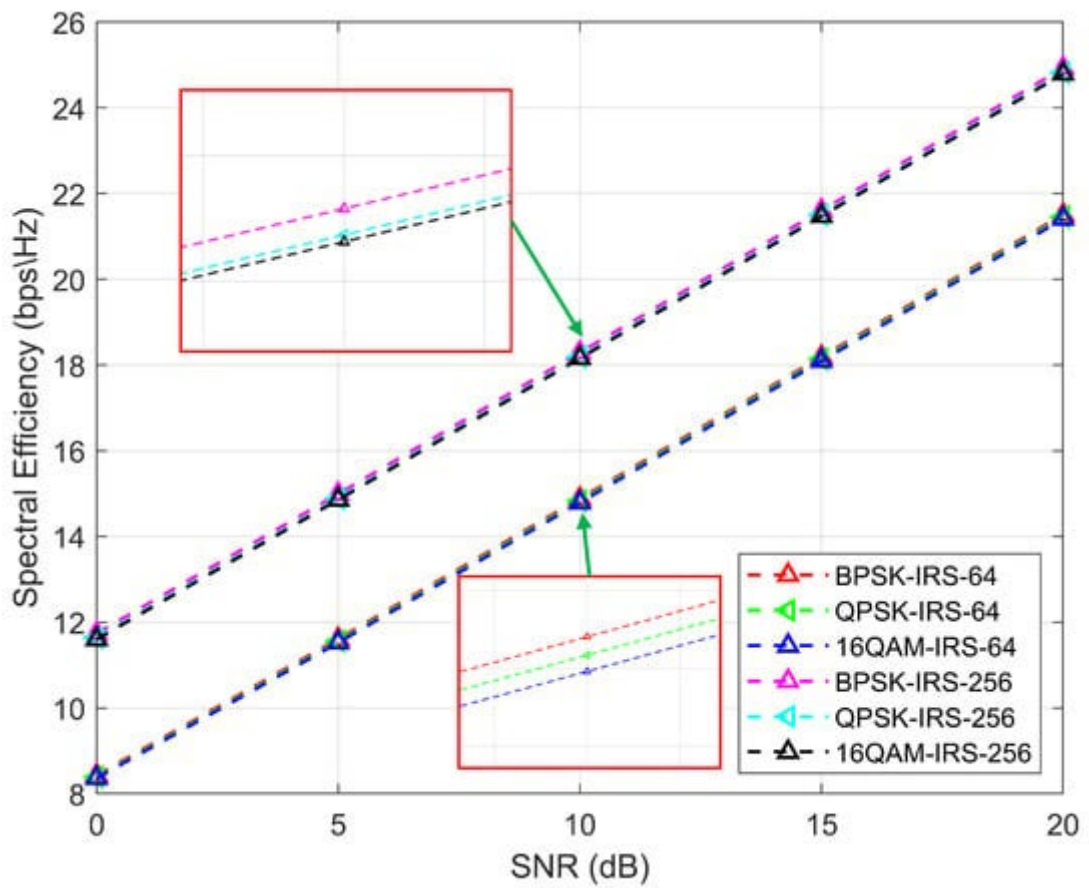


Рисунок 5. Результаты SE в сравнении с отношением сигнал/шум предлагаемой системы беспроводной связи на основе IRS с точки зрения различных методов модуляции.

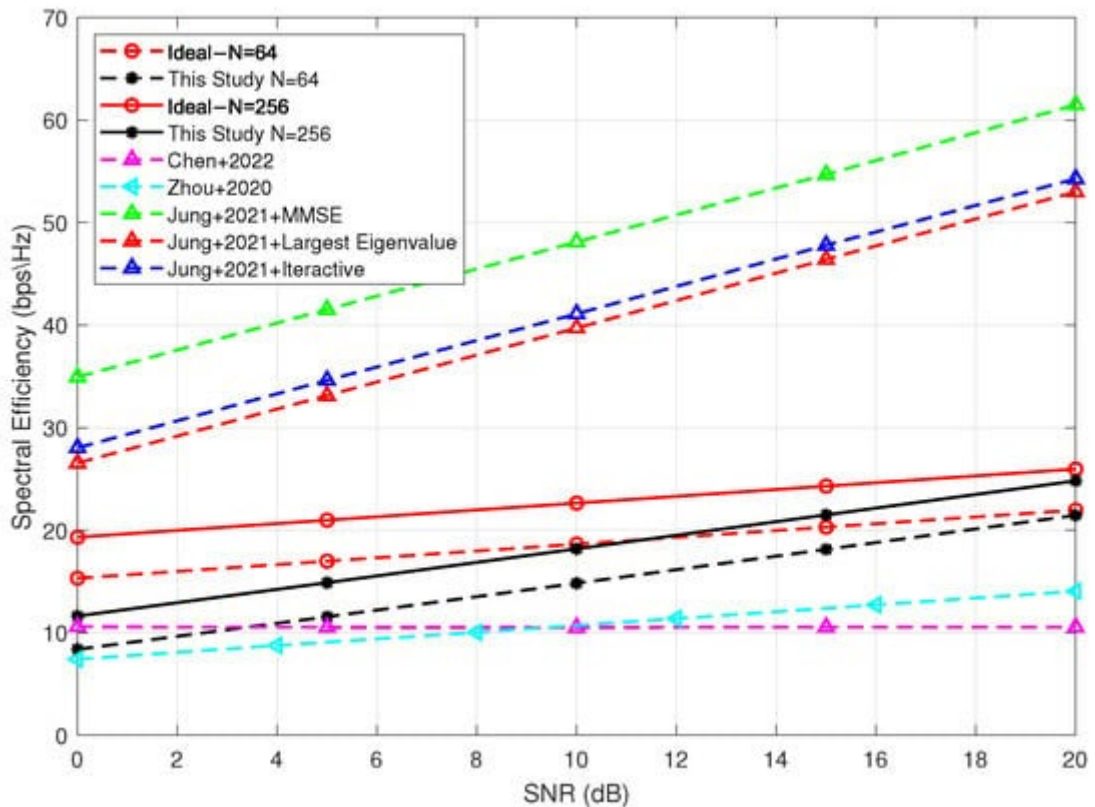


Рисунок 6. Сравнение SE и SNR предложенных и других методов для беспроводной системы на базе IRS в метавселенной [22,25,26].

Производительность SE в соответствии с количеством пользователей показана на рисунке 7. Показано, что SE увеличивается в зависимости от количества элементов IRS. В частности, элемент IRS с номером 256 достигает наиболее значимого SE с UE 4 и 5 соответственно. Однако из-за проблемы с низким рангом производительность падает, когда пользователей более 6. Вообще говоря, ожидается, что IRS будет размещена рядом с BS. Кроме того, маршрут LOS

включен в канал замирания Rician между BS и IRS. Из-за повышенной пространственной корреляции каналов в этой системе многопользовательские системы с поддержкой IRS испытывают нехватку ранга. Проблемы низкого ранга также возникают из-за разреженности каналов короткой длины волны миллиметрового диапазона. На рисунке 7 показано, что недостаток ранга приводит к тому, что кривая производительности появляется по мере роста пользователя. В результате, в системах с большим количеством пользователей используется большое количество IRS, или требуется надежная среда рассеяния. Кроме того, на рисунке 7 показано, что в предлагаемых системах SE работает практически одинаково при наличии 10 пользователей. Информация об идеальном состоянии канала на кривой передатчика (CSIT) [27] показана черной линией. Аналогичная тенденция наблюдается и по сравнению с другими результатами.

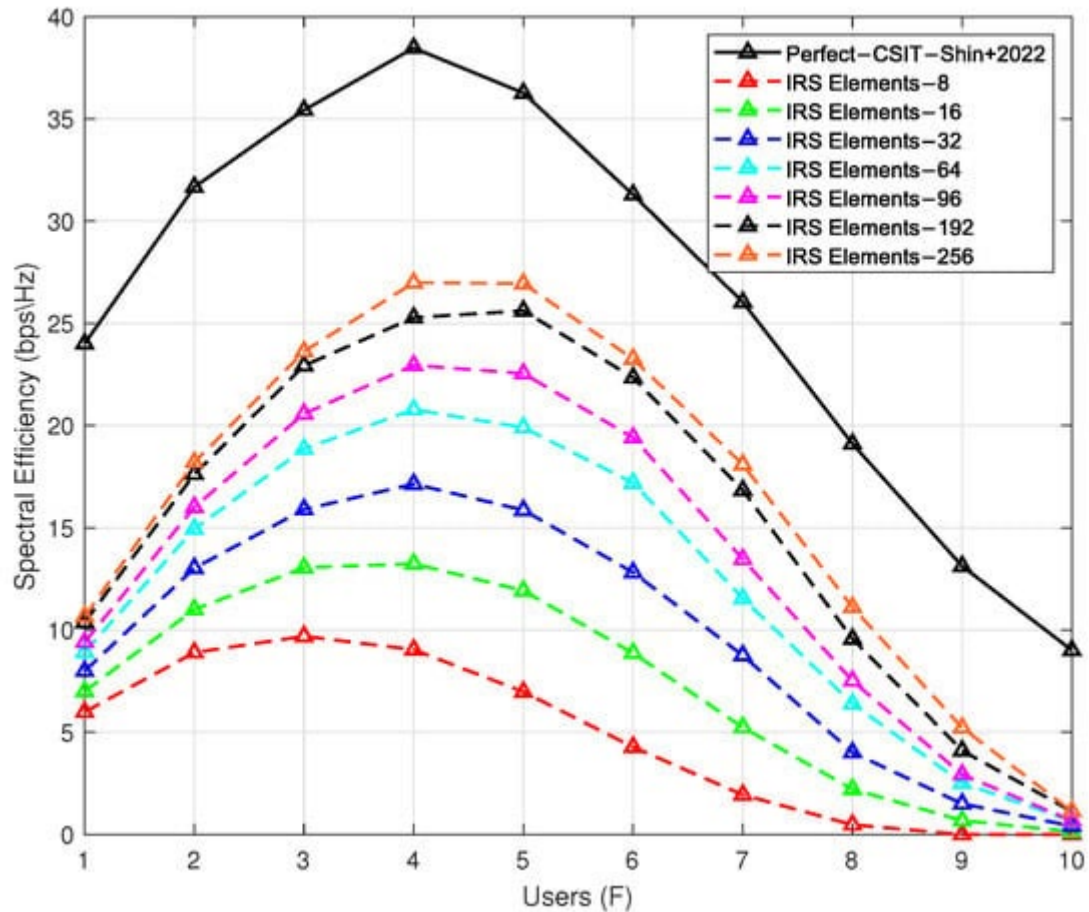


Рисунок 7. Приведены результаты сопоставления СЭ и количества пользователей с различными отражающими элементами IRS и схемой модуляции БПСК предлагаемой беспроводной системы в метавселенной [27].

На рисунке 8 показана производительность фактически передаваемых и обработанных данных по сети с различными значениями SNR. В этом анализе рассматриваются три различных метода модуляции — BPSK, QPSK и 16QAM. Также аналитические результаты сравниваются с модуляциями; видно, что результаты моделирования следуют той же тенденции, что и аналитические результаты. Кроме того, производительность измеряется изменением номеров элементов IRS 64 и 256 соответственно. На рисунке 8 видно, что пропускная способность системы постепенно увеличивается с помощью элементов IRS и изменения порядка модуляции. После отношения сигнал/шум 15 дБ большинство методов модуляции достигают самых высоких значений пропускной способности. Благодаря номеру элемента IRS 256, а также модуляции BPSK пропускная способность максимальна. В отличие от этого, самая низкая пропускная способность достигается при номере элемента IRS, равном 64, и модуляции QAM, равной 16.



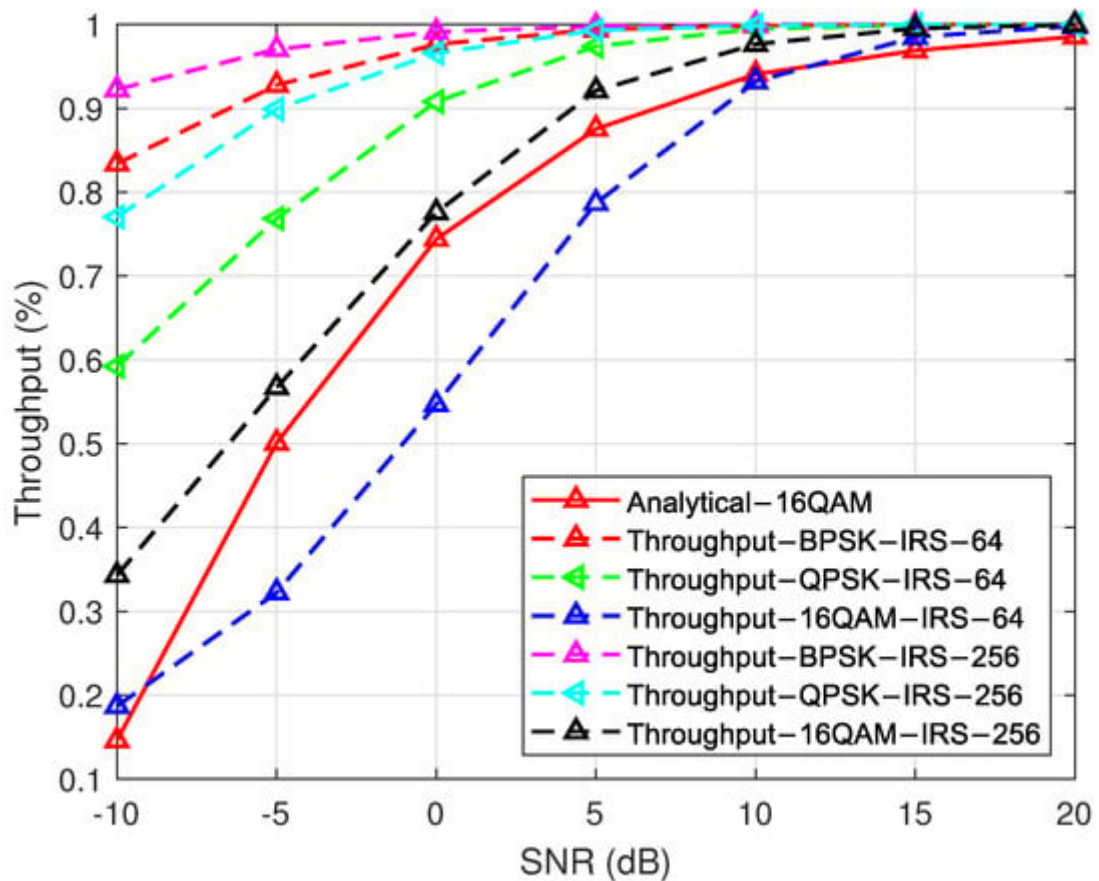


Рисунок 8. Результаты сравнения пропускной способности с различными элементами IRS и аналитическими случаями, включая BPSK, QPSK и схемы модуляции 16QAM предлагаемой беспроводной системы в метавселенной.

## 6. Будущие направления исследований

Наряду с достижимыми проблемами скорости, существует ряд нерешенных вопросов в области коммуникаций и сетевых исследований, которые необходимо решить, чтобы продвинуться в реализации метавселенной.

- Экологичные коммуникационные сети: для постоянного зондирования, передачи данных и коммуникации в режиме реального времени в метавселенной необходимы значительные энергетические ресурсы. Для достижения «зеленых» сетей необходимо разработать энергоэффективные [28] протоколы связи и использовать методы сбора энергии для обеспечения функционирования сети. Эти темы должны быть исследованы в будущих работах.
- Улучшенная сверхнадежность и система с низкой задержкой: для поддержки устройств VR/AR сервисы метавселенной требуют превосходной надежности данных и стабильности передачи в ситуациях с высокой пропускной способностью. Для повышения надежности передачи беспроводных сетей 6G в качестве жизнеспособных решений исследуются элементы IRS и искусственные метаповерхности, которые могут изменять рефлекторную решетку входящих электромагнитных волн путем автономного манипулирования фазовым сдвигом. Кроме того, для критически важных приложений метавселенной в режиме реального времени требуется чрезвычайно низкая задержка, чтобы обеспечить удовлетворенность пользователей и избежать головокружения из-за задержки. Для разработки системы с поддержкой метавселенной сокращение задержки в связи 6G — сложная задача, которая может быть изучена в будущих исследованиях.
- Управление гетерогенными сетями: в метавселенной объединяются различные сообщества. Важной областью, требующей исследования, является управление различными ресурсами и сервисами при интеграции многочисленных разнородных сетей.



- Объединение нескольких систем: Сеть должна включать в себя несколько сенсорных, коммуникационных и вычислительных методов, чтобы соответствовать строгим критериям 6G, включая терагерцовую (ТГц) связь, периферийный ИИ, передачу и сбор энергии, а также связь с огромными элементами IRS.
- Стандартные спецификации: Стандартизированные протоколы доступа к сети, сети, маршрутизации и управления перегрузками необходимы для коммуникационных и сетевых технологий, лежащих в основе метавселенной. Несмотря на то, что из-за неоднородности единой сети метавселенной это требует тщательного последующего изучения, эти стандарты должны быть адаптированы к каждой подсистеме метавселенной.
- Улучшение пользовательского опыта: в сценарии метавселенной пользовательскому опыту отдается первостепенное значение, чтобы сделать виртуальную среду реальной. Для тестирования производительности сред метавселенной можно использовать различные перспективы беспроводной связи. Параметры могут рассматриваться как эффекты ухудшения канала, тракты каналов, методы модуляции, скорости передачи данных и т. д.

## **7. Заключение**

В этой статье мы предлагаем новую коммуникационную систему MISO с помощью IRS в концептуализации среды метавселенной. Предложенная система реализована в качестве первичной концепции в физическом мире метавселенной. Целью этой концепции в метавселенной является увеличение пропускной способности сети и достижимой скорости по общему каналу связи за счет внедрения канала связи с помощью IRS. Чтобы обосновать эту концепцию, результаты первоначального моделирования были исследованы при различных параметрах и настройках канала. Показано, что достижимый показатель предлагаемой системы значительно улучшен, и она может стать перспективным решением в метавселенной для системы связи следующего поколения. Предлагаемая система позволяет достичь до 50% большей спектральной эффективности при отношении сигнал/шум 20 дБ по сравнению с тем, что было представлено в работах [25,26]. В будущем эта работа будет расширена для подключения физического мира к виртуальной среде для реализации полной инфраструктуры метавселенной с помощью системы связи с помощью IRS. Кроме того, машинное обучение может быть выполнено для повышения производительности предлагаемой системы.

## **Вклад авторов**

Концептуализация, M.H.R. и M.A.S.S.; методология, M.H.R.; программное обеспечение, M.H.R., M.A.S.S. и M.A.A.; валидация, M.H.R. и M.A.S.S.; формальный анализ, M.H.R., M.A.S.S. и M.A.A.; исследование, M.H.R. и M.A.S.S.; ресурсы, X.-K.C.; курирование данных, M.H.R. и M.A.S.S.; письменное письмо — подготовка первоначального черновика, M.H.R. и M.A.S.S.; написание—рецензирование и редактирование, M.H.R., M.A.S.S., M.A.A., D.-S.K. и X.-K.C.; визуализация, M.H.R., M.A.S.S. и M.A.A.; супервизия, Ю.-Х.Й., Д.-С.К. и X.-К.С.; Администрация проекта, Y.-H.Y., D.-S.K. и X.-K.C.; привлечение финансирования, X.-K.C. Все авторы ознакомились и согласились с опубликованной версией рукописи.

## **Финансирование**

Эта работа была поддержана Институтом планирования и оценки информационно-коммуникационных технологий (ИИТ) в рамках программы поддержки метавселенной для воспитания лучших талантов (ИИТ-2023-RS-2023-00254529), финансируемой правительством Кореи (MSIT), и частично Программой фундаментальных научных исследований через Национальный исследовательский фонд Кореи (NRF), финансируемой Министерством образования (2020R1A6A1A03038540).

**Заявление Наблюдательного совета учреждения**

*Неприменимо.*

**Заявление об информированном согласии**

*Неприменимо.*

**Заявление о доступности данных**

*Неприменимо.*

**Конфликт интересов**

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## References

1. Tang, F.; Chen, X.; Zhao, M.; Kato, N. The Roadmap of Communication and Networking in 6G for the Metaverse. *IEEE Wirel. Commun.* 2022, 1–15. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Ning, H.; Wang, H.; Lin, Y.; Wang, W.; Dhelim, S.; Farha, F.; Ding, J.; Daneshmand, M. A Survey on Metaverse: The State-of-the-art, Technologies, Applications, and Challenges. *arXiv* 2021, arXiv:2111.09673. [Google Scholar] [CrossRef]
3. Wang, Y.; Su, Z.; Zhang, N.; Xing, R.; Liu, D.; Luan, T.H.; Shen, X. A Survey on Metaverse: Fundamentals, Security, and Privacy. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2022. [Google Scholar] [CrossRef]
4. Kai, C.; Zhou, H.; Yi, Y.; Huang, W. Collaborative cloud-edge-end task offloading in mobile-edge computing networks with limited communication capability. *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.* 2020, 7, 624–634. [Google Scholar] [CrossRef]
5. Kumar, S.; Chhugani, J.; Kim, C.; Kim, D.; Nguyen, A.; Dubey, P.; Bienia, C.; Kim, Y. Second life and the new generation of virtual worlds. *Computer* 2008, 41, 46–53. [Google Scholar] [CrossRef]
6. Yoon, K.; Kim, S.K.; Jeong, S.P.; Choi, J.H. Interfacing Cyber and Physical Worlds: Introduction to IEEE 2888 Standards. In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Intelligent Reality (ICIR), Piscataway, NJ, USA, 12–13 May 2021; pp. 49–50. [Google Scholar] [CrossRef]
7. Xu, M.; Ng, W.C.; Lim, W.Y.B.; Kang, J.; Xiong, Z.; Niyato, D.; Yang, Q.; Shen, X.S.; Miao, C. A Full Dive into Realizing the Edge-enabled Metaverse: Visions, Enabling Technologies, and Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2022. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Park, S.M.; Kim, Y.G. A Metaverse: Taxonomy, components, applications, and open challenges. *IEEE Access* 2022, 10, 4209–4251. [Google Scholar] [CrossRef]
9. Njoku, J.N.; Nwakanma, C.I.; Kim, D.S. The Role of 5G Wireless Communication System in the Metaverse. In Proceedings of the 2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC), Jeju Island, Republic of Korea, 19–21 October 2022; pp. 290–294. [Google Scholar]
10. Peng, H.; Chen, P.C.; Chen, P.H.; Yang, Y.S.; Hsia, C.C.; Wang, L.C. 6G toward Metaverse: Technologies, Applications, and Challenges. In Proceedings of the 2022 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), Seoul, Republic of Korea, 24–26 August 2022; pp. 6–10. [Google Scholar]
11. Van Huynh, D.; Khosravirad, S.R.; Masaracchia, A.; Dobre, O.A.; Duong, T.Q. Edge Intelligence-Based Ultra-Reliable and Low-Latency Communications for Digital Twin-Enabled Metaverse. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 2022, 11, 1733–1737. [Google Scholar] [CrossRef]
12. Yu, J.; Alhilal, A.; Hui, P.; Tsang, D.H. 6G mobile-edge empowered metaverse: Requirements, technologies, challenges and research directions. *arXiv* 2022, arXiv:2211.04854. [Google Scholar]
13. Jalaja, R.R.U.; Thirumavalavan, V.C.; Velmurugan, P.G.S.; Thiruvengadam, S.J. Spatially correlated dual hop RIS aided next generation wireless systems: An outage perspective. *IEEE Access* 2021, 9, 56127–56139. [Google Scholar] [CrossRef]
14. Chaccour, C.; Soorki, M.N.; Saad, W.; Bennis, M.; Popovski, P. Risk-based optimization of virtual reality over terahertz reconfigurable intelligent surfaces. In Proceedings of the ICC 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), Virtual, 7–11 June 2020; pp. 1–6. [Google Scholar]
15. Sejan, M.A.S.; Rahman, M.H.; Song, H.K. Demod-CNN: A Robust Deep Learning Approach for Intelligent Reflecting Surface-Assisted Multiuser MIMO Communication. *Sensors* 2022, 22, 5971. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
16. Sejan, M.A.S.; Rahman, M.H.; Shin, B.S.; Oh, J.H.; You, Y.H.; Song, H.K. Machine Learning for Intelligent-Reflecting-Surface-Based Wireless Communication towards 6G: A Review. *Sensors* 2022, 22, 5405. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
17. Dang, S.; Amin, O.; Shihada, B.; Alouini, M.S. What should 6G be? *Nat. Electron.* 2020, 3, 20–29. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
18. Viswanathan, H.; Mogensen, P.E. Communications in the 6G era. *IEEE Access* 2020, 8, 57063–57074. [Google Scholar] [CrossRef]
19. Wang, Z.; Zhao, J. Utility-Oriented Wireless Communications for 6G Networks: Semantic Information Transfer for IRS aided Vehicular Metaverse. *arXiv* 2023, arXiv:2305.05891. [Google Scholar]

20. Rahman, M.H.; Sejan, M.A.S.; Aziz, M.A.; Baik, J.I.; Kim, D.S.; Song, H.K. Deep Learning Based Improved Cascaded Channel Estimation and Signal Detection for Reconfigurable Intelligent Surfaces-Assisted MU-MISO Systems. *IEEE Trans. Green Commun. Netw.* 2023. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Di, B.; Zhang, H.; Li, L.; Song, L.; Li, Y.; Han, Z. Practical Hybrid Beamforming With Finite-Resolution Phase Shifters for Reconfigurable Intelligent Surface Based Multi-User Communications. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2020, 69, 4565–4570. [Google Scholar] [CrossRef]
22. Jung, J.S.; Park, C.Y.; Oh, J.H.; Song, H.K. Intelligent reflecting surface for spectral efficiency maximization in the multi-user MISO communication systems. *IEEE Access* 2021, 9, 134695–134702. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Wei, X.; Shen, D.; Dai, L. Channel Estimation for RIS Assisted Wireless Communications—Part II: An Improved Solution Based on Double-Structured Sparsity. *IEEE Commun. Lett.* 2021, 25, 1403–1407. [Google Scholar] [CrossRef]
24. El Ayach, O.; Rajagopal, S.; Abu-Surra, S.; Pi, Z.; Heath, R.W. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2014, 13, 1499–1513. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
25. Chen, J.; Tan, W.; Liu, T.; Li, S.; Li, Y.; Zhou, M. Spectral efficiency for IRS-assisted uplink mmWave massive MISO systems with low-resolution ADCs. *Phys. Commun.* 2022, 55, 101865. [Google Scholar] [CrossRef]
26. Zhou, S.; Xu, W.; Wang, K.; Di Renzo, M.; Alouini, M.S. Spectral and energy efficiency of IRS-assisted MISO communication with hardware impairments. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 2020, 9, 1366–1369. [Google Scholar] [CrossRef]
27. Shin, B.S.; Oh, J.H.; You, Y.H.; Hwang, D.D.; Song, H.K. Limited Channel Feedback Scheme for Reconfigurable Intelligent Surface Assisted MU-MIMO Wireless Communication Systems. *IEEE Access* 2022, 10, 50288–50297. [Google Scholar] [CrossRef]
28. Nain, M.; Goyal, N. Energy efficient localization through node mobility and propagation delay prediction in underwater wireless sensor network. *Wirel. Pers. Commun.* 2022, 122, 2667–2685. [Google Scholar] [CrossRef]