

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕДАЧИ МУЛЬТИМЕДИЙНОЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СРЕДЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются технология и системы виртуальной реальности, представляющие собой комплексные решения погружения пользователя в иммерсивный виртуальный мир при использовании специализированных устройств и средств сопряжения. Предметом исследования являются технологии проводной/беспроводной передачи аудиовизуальной и параметрической информации в системах виртуальной реальности. Цель работы – провести анализ и обобщить достоинства и недостатки современных средств передачи мультимедийной и параметрической информации, используемых в системах виртуальной реальности.

Материалы и методы. В качестве материалов исследования использовался поисковый метод научных публикаций в российских и международных журналах баз данных научного цитирования.

Результаты. В работе проведен анализ особенностей (достоинств и недостатков) применения виртуальной реальности в условиях оптической передачи информации, беспроводных протоколов (WiFi, Bluetooth, Wireless USB, LIDAR, ZBee) и проводных интерфейсов (DisplayPort, HDMI, USB), обеспечивающих коммуникацию пользователя с системой виртуальной реальности. Виртуальная реальность формирует новый искусственно-реальный мир, передаваемый пользователю через различные проводные/беспроводные (WiGig (802.11ad), WiFi 6 (802.11ax), WiHD (802.15.3c) и DisplayPort 2.0) средства сопряжения с учетом физиологических, физических и психометрических показателей.

Выводы. Современные технические решения должны дать толчок для создания адаптивной виртуальной реальности с полным эффектом погружения, когда пользователь не сможет отличить виртуальный мир от реальных событий.

Ключевые слова: беспроводная/проводная передача информации, тактильные средства сопряжения, адаптивная виртуальная реальность.

A. Yu. Tychkov, A. V. Grachev, A. K. Alimuradov, P. P. Churakov

A RESEARCH OF THE FEATURES OF MULTIMEDIA AND PARAMETRITIC INFORMATION TRANSMISSION IN THE VIRTUAL REALITY SYSTEMS²

¹ Авторы благодарят Российский научный фонд за финансовую поддержку проекта «Поиск скрытых паттернов пограничных психических расстройств и разработка системы экспресс-оценки состояния психического здоровья человека», № 17-71-20029.

² The authors thank the Russian Science Foundation for financial support for the project implementation “Search for hidden patterns of borderline mental disorders and development of a system for rapid assessment of human mental health” No. 17-71-20029 to solve the tasks highlighted in this article.

© Тычков А. Ю., Грачев А. В., Алимуратов А. К., Чураков П. П., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The article is devoted to technologies and virtual reality systems as comprehensive solutions for immersion of the user into virtual reality using specialized devices and interfaces. Technologies for wire/wireless transfer of audio-visual and parametric information in virtual reality systems are discussed. The purpose of the article is to analyze and summarize advantages and disadvantages of modern facilities for multimedia and parametric information transmission used in virtual reality systems.

Materials and methods. The research materials used the search method of scientific publications in Russian and international journals of scientific citation databases.

Results. The paper analyzes the features (advantages and disadvantages) of using virtual reality in conditions of optical information transfer, wireless protocols (WiFi, Bluetooth, Wireless USB, LIDAR, ZigBee), and wire interfaces (Display Port, HDMI, USB) that provide user communication with virtual reality system. Virtual reality forms a new artificial real world transferred to the user via various wire/wireless (WiGig (802.11ad), WiFi 6 (802.11ax), WiHD (802.15.3c), and Display Port 2.0) interfaces, taking into account physiological, physical and psychometric indicators.

Conclusions. Modern technical solutions should give impetus to the creation of adaptive virtual reality with a total immersion effect, when the user cannot distinguish a virtual world from real events.

Keywords: wireless/wire information transmission, tactile interfaces, adaptive virtual reality.

Введение

Развитие микропроцессорной техники, совершенствование способов и средств регистрации, обработки и передачи измерительной информации, а также разработки в области искусственного интеллекта и интерфейсов человек-машина привели к созданию нового поколения инструментов и механизмов восприятия реального мира через условно виртуальные события.

Виртуальная реальность (virtual reality, VR) – это технически конструируемая интерактивная среда, позволяющая пользователю погрузиться в иммерсивный мир и действовать в нем посредством специальных датчиков и программ. При этом зрительное, слуховое, осязательное, моторное и другие восприятия пользователем заменяются имитацией или симуляцией [1].

Еще в 1996 г. Rosen J. [2] четко сформулировал области развития аппаратной и программной базы VR в XXI в., отмечая наиболее перспективные области внедрения в образовательном процессе, моделировании различных объектов и текстур, а также в дистанционном управлении роботами-симуляторами в инженерных и медицинских приложениях.

Обобщенная структурная схема передачи информации в системах VR (рис. 1) состоит из:

- узлов построения моделей сцен VR (модели, сценарии и их позиционирование в среде);
- узлов передачи информации посредством физиологических средств сопряжения (зрение, слух и осязание);
- узлов приема информации посредством специальных датчиков положения тела пользователя;
- узлов контроля и состояния пользователя и параметрических датчиков в системе позиционирования посредством специализированных баз данных и знаний о физиологическом, физическом и психоэмоциональном состоянии пользователя.

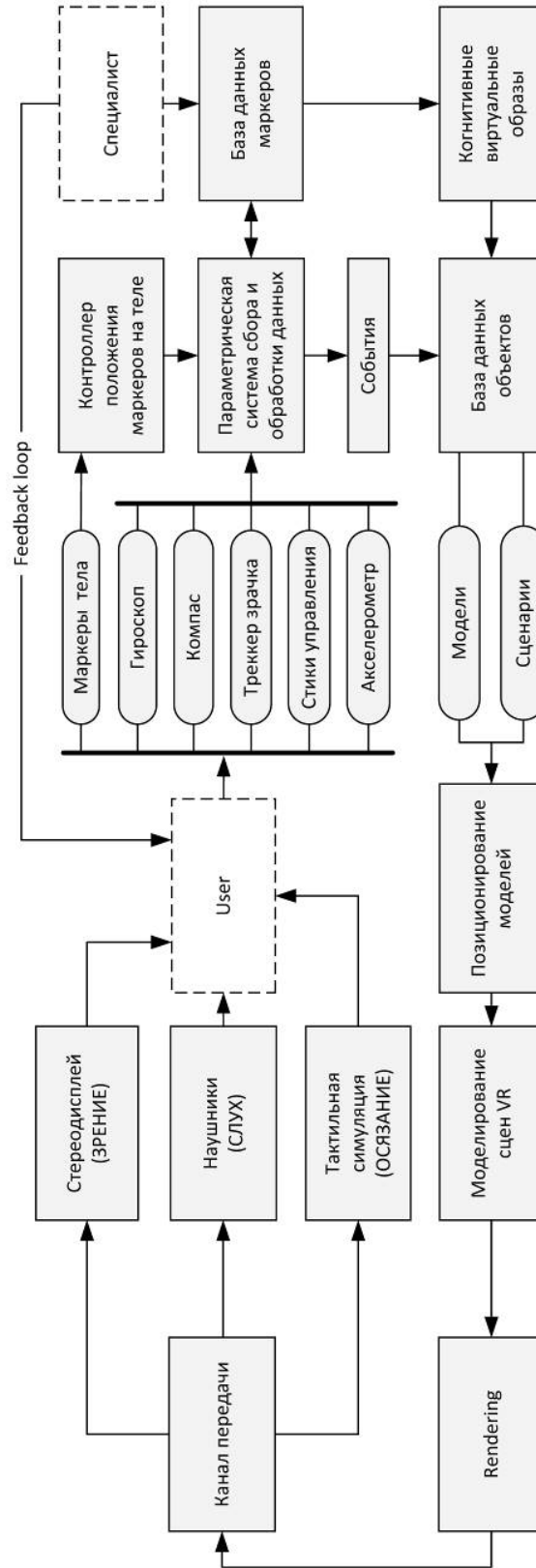


Рис. 1. Структурная схема передачи информации в системах VR

Посредством адаптивного управления событиями виртуального мира (при условии быстродействия, беспроводности приема-передачи информации, высокой помехозащищенности, минимальных массе и размерах устройства, а также комплексности измерения информативных параметров состояния пользователя и узлов в условиях свободной двигательной активности) возможно создать биотехническую систему с биологической обратной связью на основе VR нового поколения.

Для создания виртуальных событий используется специальное программно-аппаратное обеспечение и источники изображений (сцены). Различают два основных аппаратных инструмента погружения в VR: очки и шлем с системой VR. Отличием является то, что в конструкции устройства очков VR отсутствуют встроенные дисплеи, поэтому для взаимодействия с пользователем необходим дополнительный экран или смартфон. Одним из достоинств данной системы является практически полная свобода передвижений. Шлемы VR полностью автономны и имеют встроенный дисплей, требующий подключения к стационарному компьютеру. Однако наиболее полное и реалистичное погружение пользователя достигается посредством систем VR, дополненных различными датчиками и узлами.

На данный момент можно выделить систему с рассредоточенными сенсорами (LIDARs) и компактные системы на основе камер для отслеживания положения пользователя в пространстве (WMR), интегрированных в шлем [3]. Первая система более громоздка и требует подключения нескольких LIDARs, размещаемых по периметру рабочей зоны для VR. Вторая более компактная, но не работает в условиях плохого освещения и требует периодической калибровки. Системы датчиков начального уровня, размещаемых на шлеме, способны отследить только повороты головы вверх-вниз, вправо-влево – 3 степени свободы (3 DoF), чего недостаточно, поэтому в современных VR используются системы продвинутого уровня 6 DoF, которые отслеживают еще и наклоны.

В разное время системы VR на рынке были представлены следующими компаниями-производителями: Epson BT-300, Oculus Rift S, HTC Vive, Microsoft HoloLens, Lumus dk-32, Samsung GearVR, Facebook, Sony, Nokia. Конструктивно известные системы VR включают в себя все необходимые узлы и элементы в одном монокорпусе. Основным компонентом системы VR является узел с двумя линзами и встроенным дисплеем. Как правило, системы VR оснащены одним экраном, который разделен на две части, каждая из которых показывает различные изображения для каждого глаза (стереоизображение). То есть каждый глаз видит только свою часть изображения, которая попеременно отображается с высокой частотой. Благодаря встроенным линзам изображение получает объем и правильную фокусировку взгляда на сцену и события виртуального мира [4, 5]. Кроме встроенных линз и экрана, система VR дополнительно оснащается датчиками и узлами, обеспечивающими привязку пользователя к системе координат виртуальной сцены, определение его положения и ориентацию в реальном пространстве.

Передача оптической информации в системах VR

К основным оптическим характеристикам систем VR можно отнести разрешение дисплея (видимый размер пикселя экрана дисплея), угловое

разрешение, обеспечивающий окуляр, поле зрения (угловая часть пространства) [6].

Для формирования естественного восприятия изображения виртуального мира и создания сцен VR высокого качества необходимо воспроизведение видео высокой четкости с повышенной частотой смены кадра в секунду и увеличенной глубиной цветности, что в свою очередь накладывает ограничения на способы и инструменты передачи визуализируемой информации [6]. Важным фактором в формировании естественного восприятия сцен и изображений в VR является их качество, с которым оптическая система передает сигнал с дисплея на сетчатку глаза пользователя. Для фотореалистичности (например, для моделирования живых органов и биологических систем организма) используются дисплеи с высоким разрешением на каждый глаз.

Угловая часть пространства, которую в системе VR воспринимает приемник изображения (глаз пользователя) является полем зрения (Field of View, FV). Геометрически горизонтальный (измеряется в горизонтальной плоскости) и вертикальный (в вертикальной плоскости) угол обзора – это сектор с вершиной, находящейся между глазами пользователя. Максимальный горизонтальный угол обзора человека, как правило, составляет не более 220° [7]. В современных системах VR угол зрения в горизонтальной плоскости достигает $170\text{--}200^\circ$, что уже близко к максимальному восприятию. Немаловажными аспектами погружения в VR является вопрос аккомодации и конвергенции человеческого зрения, что решается постоянным трекингом зрачка.

Для формирования реалистичных изображений виртуального мира угловой размер пикселя экрана должен составлять меньше углового разрешения человеческого глаза и пользователь не должен видеть отдельных пикселей, составляющих изображение сцены. Следовательно, чтобы исключить возможности различать пиксели, необходимо, чтобы их количество на дюйм было существенно больше. Отметим, что большинство современных систем VR имеют общее разрешение выше, чем у современных мониторов, однако при малом расстоянии и увеличении событий сцен пользователь по-прежнему наблюдает промежутки между отдельными пикселями – «эффект москитной сетки» [8]. С целью уменьшения данного искажения необходимо использовать специальное сочетание дисплеев и линз. Зачастую производители для снижения веса шлема применяют пластиковые линзы и/или линзы Френеля, что не лучшим образом сказывается на качестве изображения.

Самым же эффективным способом является увеличение плотности пикселей и одновременное снижение расстояния между ними. Для формирования естественного восприятия смоделированной сцены VR необходимо повышать частоту смены кадра в секунду.

Внедрение стандарта Res.2020 поможет более полному погружению в VR из-за расширения цветового охвата, увеличения глубины цвета для каждого канала RGB и повышения частоты кадров. Res.2020 позволяет охватить до 75,8 % цветового пространства CIE 1931 (рис. 2). Количество бит возрастает до 10 или 12 на каждый цвет RGB [9]. Максимальная частота обновления повышается до 120 Hz. Цветовая субдискретизация улучшается с 4:2:0 до 4:2:2 или 4:4:4.

Однако увеличение количества кадров и повышение разрешения изображения накладывает определенные условия на минимальную полосу про-

пускания и пропускную способность канала передачи и на узлы обработки информации. Если для частоты обновления 60 Hz при 1080P сигналу достаточно полосы пропускания 149 MHz, то для 4 K нужно 594 MHz, а для частоты обновления изображения при 1080P сигналу потребуется 297 MHz, для 4 K – 1,19 GHz.

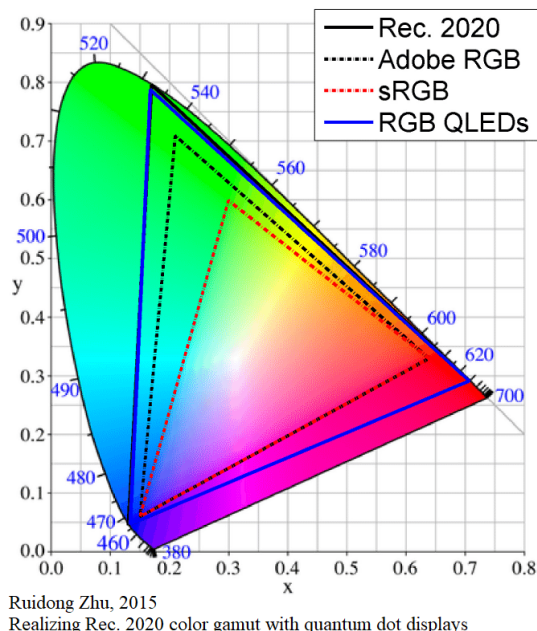


Рис. 2. Локус цветных пространств

В настоящее время для систем VR максимальная частота обновления кадров составляет 90–120 Гц, что является недостаточным и приводит к формированию низкополигональных сцен и изображений.

Беспроводная передача данных в системах VR. К основным способам беспроводной передачи данных можно отнести для мультимедийного контента WiFi 802.11ac (WiFi 5), 802.11ax (WiFi 6), сети поколений 4G и 5G (архитектура идентична WiFi 6), для параметрических данных Bluetooth (также возможна передача аудио), ZigBee и ранние версии WiFi (например, WiFi 4). Сводная информация параметров беспроводных протоколов передачи данных приведена в табл. 1.

Широко распространенные системы WiFi 5 не способны передать сжатое видео, а на кодирование и декодирование требуется время. Задержки в несколько миллисекунд критичны при работе в VR. Например, при использовании распространенных кодеков H.264 (1080P @60Hz 4:2:2) и H.265 (4K@60 Hz 4:2:0) задержка может достигать нескольких секунд, а канал должен обеспечивать скорость до 20 и до 40 Mbit/s соответственно. Для кодека MJPEG2000 (4K@60 Hz 4:2:0) характерна задержка 30–90 ms и требуется до 850 Mbit/s. У кодека SDVOE(4K 60 Hz 4:2:2) задержка равна 0,1 ms, но для использования требуется обеспечить прохождения потока до 9 Gbit/s. Современный протокол WiFi 6 позволяет работать в диапазонах 2,4 и 5 ГГц, что

обеспечивает высокую скорость передачи информации в VR (в 4–10 раз быстрее, чем WiFi 5). За счет большой пропускной способности WiFi 6 способен поддерживать до 12 выходных каналов, четыре из которых в диапазоне 2,4 ГГц и восемь в диапазоне 5 ГГц соответственно [10–12]. WiGig работает на собственной частоте 60 ГГц для беспроводной передачи видео потока VR на скорости до 4,6 Гбит/с на короткие расстояния [8].

Таблица 1

Параметры беспроводных протоколов передачи данных

	Bluetooth	ZigBee	WiFi 4	WiFi 5	WiFi 6	WiHD
IEEE Standard	802.15.1	802.15.4	802.11n	802.11ac	802.11ax	802.15.3c
Frequency	2.4 GHz	900 MHz/ 2.4 GHz	2.4 GHz/ 5.1–5.8 GHz	5.1–5.8 GHz	5.1–5.8 GHz	57–66 GHz
Maximum bit rate	1 Mbit/s	250 Kbit/s	450 Mbit/s	1.3 Gbit/s	10 Gbit/s	2 Gbit/s
Nominal range, metr	10	100	100	100	100	10
Number of RF channels	79	16	24	24	Multiple	Multiple
Channel bandwidth	1 MHz	0.3–0.6 MHz, 2 MHz	40 MHz	Up to 160MHz	Up to 160MHz	2.16 GHz
Modulation system	GFSK	BPSK, OPSK	OFDM	OFDM / 256QAM	1024QAM	OFDM/ 256QAM
Применимость для VR	–	–	–	+	+	+

При беспроводной передаче информации на несколько систем VR возникают сложности интерференции входных сигналов. Данная проблема влияет на скорость и качество передачи информации. Однако увеличение скорости передачи данных возможно за счет расширения полосы пропускания канала, уменьшения вероятности ошибки передачи информации, а также за счет увеличения мощности сигнала. Основными проблемами, ограничивающими реализацию данного подхода, являются рассеяние энергии сигнала во времени и влияние внешних аддитивных помех.

Данная проблема частично решается при использовании технологии Multiple Input Multiple Output MIMO [13, 14]. Реализовать данную технологию позволяет передача информации несколькими антеннами с корреляцией замираний сигналов. Диверсифицированный режим позволит улучшить качество и дальность связи за счет уменьшения локальных зон неуверенного приема. В этом случае общий поток информации в системе VR будет делиться на несколько подпотоков, а затем передаваться в общий канал связи, что позволит улучшить емкость беспроводного канала, спектральную эффективность и скорость передачи информации при неизменной полосе частот. При этом канальная скорость передачи повышается пропорционально числу используемых антенн.

Передача информации по проводным интерфейсам в системах VR

Качественное погружение в виртуальную реальность требует повышенной вычислительной нагрузки. Автономные VR на данном этапе развития не способны к созданию эффекта безупречного погружения. В свою очередь, шлем и вычислительное устройство требуют широкополосный, помехозащищенный и быстродействующий канал связи. Пока такое возможно только по проводам. Это позволяет не учитывать автономность работы шлема, но накладывает ограничения на удаленность пользователя VR от вычислительного устройства.

Одним из основных способов, посредством которого осуществляется передача сигнала в среде VR, является HDMI интерфейс. Данный интерфейс позволяет передавать видеопоток данных высокой четкости (HDTV). Используя HDMI, можно объединить устройства VR посредством четырех линий [14]. Одной из главных проблем HDMI-интерфейса является появление в канале гармоник тактового сигнала. Причиной их появления является работа без фильтрующих элементов между персональным компьютером и разъемом HDMI.

Одним из способов решения данной проблемы является использование высококачественного HDMI-кабеля. Использование данных средств является существенным барьером, защищающим кабельное соединение от влияния посторонних сигналов и флуктуационного шума, что позволяет уменьшить вероятность искажения и потери части аудио-визуального контента VR и получить на выходе информацию с высокими показателями мощности и качества полезного сигнала.

Другим способом проводной передачи данных, нашедшим широкое применение в системах VR, является DisplayPort интерфейс. DisplayPort – это универсальный цифровой интерфейс, включающий возможности передачи звука и изображения, обеспечивающий одновременный двусторонний обмен информацией между персональным компьютером и системой VR [15].

В интерфейсе DisplayPort может использоваться до четырех шин в зависимости от необходимой полосы пропускания сигнала. Суммарная полоса пропускания основного канала при использовании всех четырех шин превосходит полосы HDMI. Современный интерфейс DisplayPort 1.4 обеспечивает скорость передачи данных до 32,4 Гбит/с, подключение до четырех дисплеев к одному персональному компьютеру, поддержку 8K-разрешение и DSC (Display Stream Compression) [14, 16].

Применение режима Alt на разъемах USB type C для HDMI и DisplayPort позволяет уменьшить количество подключаемых интерфейсных кабелей и увеличить уровень интеграции плат графического контроллера, стереодисплея, параметрических датчиков VR и обеспечить их питанием.

Анонсируемое появление DisplayPort 2.0 переведет VR на более высокий уровень. Например, появится возможность подключения дисплея с разрешением 16K (15360×8460), частотой обновления экрана 60 Hz и глубиной цвета 30 bit 4:4:4 HDR (с DSC) или 10K (10240×4320)@60 Hz и 24 bit 4:4:4 (без компрессии). Сводная информация параметров проводных интерфейсов передачи данных приведена в табл. 2 (HDR-High dynamic range; DSC – Display stream compression).

Таблица 2

Параметры проводных интерфейсов передачи данных

Интерфейс	Max bit rate, GBit/s	Максимальное разрешение	Глубина цвета для 4K	Поддержка HDR	Поддержка DSC	Alt mode USB Type-C
HDMI 1.4b	10.2	4K@30Hz	8bit	–	–	–
HDMI 2.0b	18	5K@30Hz	8bit	–	–	+
HDMI 2.1	48	10K@30Hz	16bit	+	1.2	+
DP 1.2	21.6	5K@30Hz	10bit	–	–	–
DP 1.3	32.4	8K@30Hz	16bit	–	–	+
DP 1.4	32.4	8K@30Hz	16bit	+	1.2	+
DP 2.0	80	16K@60Hz	30bit	+	1.2a	+

В отличие от HDMI, DisplayPort обладает малым уровнем электромагнитных помех, использует надежное шифрование данных и гибкое распределение доступной полосы пропускания аудио-визуального контента в системах VR.

Заключение

Технология VR позволяет конструировать искусственный мир, передаваемый человеку через его восприятие (зрение, слух, эмоции). Синергетический эффект VR и технологий беспроводной/проводной передачи информации позволит обеспечить бесперебойную работу систем VR и увеличить скорость загрузки аудио-визуального контента о сценах и событиях реального мира.

Для обеспечения полного эффекта погружения, когда пользователь не способен отличить виртуальный мир от реальных событий, необходимо использовать WiGig (802.11ad), WiFi 6 (802.11ax), WiHD (802.15.3c) и DisplayPort 2.0, обеспечивающих высокую скорость передачи информации. Перспективными проводными каналами коммуникаций технологий VR для проводных соединений является канал передачи Display Port 2.0, для беспроводной передачи – сети пятого поколения, а также применение компрессии DSC. Результатом адекватной передачи данных по различным каналам связи станет создание новых технологий визуализации, которые позволят достичь цветового охвата стандарта Rec.2020 для дисплеев на квантовых точках.

В будущем технология VR будет представлять собой совокупность сложных технологических решений и разработок в сфере математики, физики, инженерии, философии, психологии и других наук. Создание подобных комплексных решений для нужд здравоохранения, образования, промышленности позволит обеспечить цифровизацию экономики страны и соответствующих отраслей производства.

Библиографический список

1. **Gigante, M. A.** Virtual reality: definitions, history and applications / M. A. Gigante // Virtual Real. Syst. – 1993. – P. 3–14.
2. **Rosen, J.** Evolution of virtual reality (Medicine) / J. Rosen, D. Laub, H. Soltanian, R. Redett // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. – 1996. – Vol. 15 (2). –P. 16–22.

3. **Suvorov, K. A.** Virtual reality system and their application / K. A. Suvorov // *T-Comm.* – 2013. – № 9. – P. 140–143.
4. **Faleev, D. S.** A comparative analysis of our virtual reality systems and features of their design / D. S. Faleev // *Youth Scientific and Technical Bulletin.* – 2012. – № 3. – 6 p.
5. **Tapani Levola** Diffractive optics for virtual reality displays / Tapani Levola // *Society for Image Display.* – 2006. – Vol. 14. – 8 p.
6. *Virtual, Augmented and Mixed Reality Systems Study Guide* / A. A. Smolin, D. D. Zhdanov, I. S. Potemin, A. V. Mezhenin, V. A. Bogatyrev. – St. Petersburg : ITMO University, 2018 – 59 p.
7. **Rakkolainen, I.** Field-of-view extension for VR viewers / I. Rakkolainen, T. Höllerer // *Conference: the 21st International Academic Mindtrek Conference, 2017.* – 4 p.
8. **Navarro, F.** Integrating 3D Reconstruction and Virtual Reality: A New Approach for Immersive Teleoperation / F. Navarro // *ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference, 2018.* – P. 606–616.
9. **Zhu, R.** Realizing Rec. 2020 color gamut with quantum dot displays / R. Zhu // *Optics Express.* – 2015. – Vol. 23. – P. 680–693.
10. **Elbamby, M.** Towards Low-Latency and Ultra-Reliable Virtual Reality / M. Elbamby, C. Perfecto, M. Bennis, K. Doppler // *IEEE Network.* – 2018. – № 32 (2). – 8 p.
11. Huawei Technologies Co., Ltd. *Virtual Reality/Augmented Reality White Paper* / China Academy of Information and Communications Technology (CAICT), 2017. – 38 p.
12. **Lewicki, A.** A Virtual Prototype for Bluetooth over Ultra Wide Band System Level Design / A. Lewicki, J. Talayssat // *Conference: Design, Automation and Test in Europe, DATE, 2008.* – 4 p.
13. Semi Round Robin Pairing and Scheduling in Uplink Virtual Multiple Input Multiple Output (VMIMO) communications // *Journal of Space Technology.* – 2014. – № 4 (1). – P. 61–66.
14. Kramer Electronics. – URL: <https://www.kramer.ru>
15. **Bamodul, O.** Virtual Reality and Virtual Reality System Components / O. Bamodul // *Proceedings of the 2nd International Conference On Systems Engineering and Modeling (ICSEM-13), 2013.* – P. 921–924.
16. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Технологии виртуальной и дополненной реальности». – Москва, 2019. – 50 с.

References

1. Gigante M. A. *Virtual Real. Syst.* 1993, pp. 3–14.
2. Rosen J., Laub D., Soltanian H., Redett R. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine.* 1996, vol. 15 (2), pp. 16–22.
3. Suvorov K. A. *T-Comm.* 2013, no. 9, pp. 140–143.
4. Faleev D. S. *Youth Scientific and Technical Bulletin.* 2012, no. 3, 6 p.
5. Tapani Levola *Society for Image Display.* 2006, vol. 14, 8 p.
6. Smolin A. A., Zhdanov D. D., Potemin I. S., Mezhenin A. V., Bogatyrev V. A. *Virtual, Augmented and Mixed Reality Systems Study Guide.* Saint-Petersburg: ITMO University, 2018, 59 p.
7. Rakkolainen I., Höllerer T. *Conference: the 21st International Academic Mindtrek Conference.* 2017, 4 p.
8. Navarro F. *ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference.* 2018, pp. 606–616.
9. Zhu R. *Optics Express.* 2015, vol. 23, pp. 680–693.
10. Elbamby M., Perfecto C., Bennis M., Doppler K. *IEEE Network.* 2018, no. 32 (2), 8 p.
11. *Huawei Technologies Co., Ltd. Virtual Reality/Augmented Reality White Paper.* China Academy of Information and Communications Technology (CAICT), 2017, 38 p.

12. Lewicki A. A, Talayssat J. *Conference: Design, Automation and Test in Europe, DATE*. 2008, 4 p.
13. *Journal of Space Technology*. 2014, no. 4 (1), pp. 61–66.
14. *Kramer Electronics*. Available at: <https://www.kramer.ru>
15. Bamodul O. *Proceedings of the 2nd International Conference On Systems Engineering and Modeling (ICSEM-13)*. 2013, pp. 921–924.
16. *Dorozhnaya karta razvitiya «skvoznoy» tsifrovoy tekhnologii «Tekhnologii virtual'noy i dopolnennoy real'nosti»* [Roadmap for the development of “interface” digital technology “Technologies of virtual and augmented reality”]. Moscow, 2019, 50 p. [In Russian]

Тычков Александр Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра радиотехники
и радиоэлектронных систем, заведующий
лабораторией «Биомедицинские
и когнитивные технологии»
Научно-исследовательского института
фундаментальных и прикладных
исследований, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Tychkov Aleksandr Yur'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of radio engineering
and radioelectronic systems, head
of the laboratory “Biomedical
and Cognitive Technologies”, Research
Institute for basic and applied studies,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Грачев Андрей Владимирович

начальник отдела технических средств
обучения, ассистент, кафедра
радиотехники и радиоэлектронных
систем, Пензенский государственный
университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Grachev Andrey Vladimirovich

Head of the educational technology
department, assistant, sub-department
of radio engineering and radioelectronic
systems, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алимурадов Алан Казанферович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиотехники
и радиоэлектронных систем,
научный сотрудник лаборатории
«Биомедицинские и когнитивные
технологии» Научно-исследовательского
института фундаментальных
и прикладных исследований, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: alansapfir@yandex.ru

Alimuradov Alan Kazanferovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of radio
engineering and radioelectronic systems,
researcher of the laboratory “Biomedical
and Cognitive Technologies”, Research
Institute for basic and applied studies,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Чураков Петр Павлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии, главный
научный сотрудник лаборатории
«Биомедицинские и когнитивные
технологии» Научно-исследовательского
института фундаментальных
и прикладных исследований, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: churakov-pp@mail.ru

Churakov Petr Pavlovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
principal researcher of the laboratory
“Biomedical and Cognitive Technologies”,
Research Institute for basic and applied
studies, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Тычков, А. Ю. Исследование особенностей передачи мультимедийной и параметрической информации в среде виртуальной реальности / А. Ю. Тычков, А. В. Грачев, А. К. Алимуратов, П. П. Чураков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 27–38. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-3.