

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201801050



# 虚拟现实的无线网络传输 技术研究进展

魏三强<sup>1,2</sup>, 孙彦景<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 宿州职业技术学院 计算机信息系, 安徽 宿州 234101)

**摘要:** 随着通信技术、移动互联网技术和智能终端技术的高速发展, 虚拟现实(VR)系统相关设备已高度集成化和互联网化, 形成了由终端、内容生成系统、应用平台和网络传输系统组成的架构. 为了保证 VR 系统的高交互性和实时性, 从提升 VR 的无线网络传输效率、优化网络通信协议和提高无线网络传输带宽等方面阐述满足 VR 无线网络传输现实需求的技术方法, 并分析虚拟现实无线网络传输技术的发展趋势, 提出虚拟现实无线网络传输技术的研究挑战.

**关键词:** 虚拟现实; 通信协议; 无线网络传输; 5G

中图分类号: TP 311

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2018)03-0324-08

## Research Progress on Wireless Network Transmission Technology in Virtual Reality

WEI Sanqiang<sup>1,2</sup>, SUN Yanjing<sup>1</sup>

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Department of Computer and Information, Suzhou Vocational and Technological College, Suzhou 234101, China)

**Abstract:** With the rapid development of communication technology, mobile internet technology and intelligent terminal technology, virtual reality (VR) system related equipment is highly integrated and Internet, formed by the terminals, content generation system, the architecture of application platform and network transmission system. In order to ensure the high interactivity and real-time performance of VR system, from the aspects of how to improve the wireless network transmission efficiency of VR, optimize the network communication protocol and enhance the bandwidth of wireless network transmission, the technical methods to meet the demand of VR wireless network transmission are expounded in this paper. The development trend of virtual reality wireless network transmission technology is analyzed, and the research challenge of virtual reality wireless network transmission technology is put forward.

**Keywords:** virtual reality; communication protocol; wireless network transmission; 5G

随着通信网络、智能终端、大数据和云计算等相关技术的快速发展, 虚拟现实(virtual reality, VR)系统能够部署在云端, 借助无线通信网络为世界各地的用户提供多种类型的服务. 由于 VR 的内容具有高分辨率和高帧率的特点, 其海量数据对无线网络传输带宽能力有较高的要求<sup>[1]</sup>. 为了保证 VR 系统的

收稿日期: 2018-01-15

通信作者: 魏三强(1980-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事云计算、智能算法、虚拟现实无线网络传输技术的研究. E-mail: weiwei19801983@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274202); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51504255)

高交互性和实时性,使其能够为用户提供更好的视觉体验,国内外学者们针对 VR 无线网络传输技术的需求开展了大量的研究工作<sup>[2-3]</sup>. 鉴于此,本文在梳理、归纳和总结相关文献研究成果的基础上,主要从提升 VR 的无线网络传输效率、优化网络通信协议和提高无线网络传输带宽等 3 个方面着手,阐述满足 VR 无线网络传输现实需求的技术方法,未来 VR 无线网络传输技术的发展趋势,以及 VR 无线网络传输技术需要继续深入研究的问题.

## 1 虚拟现实无线网络传输架构

虚拟现实是指利用计算机等技术模拟产生一个为用户提供视觉、听觉及触觉等感官模拟的三度空间虚拟环境,用户可借助特殊的输入/输出设备,与虚拟的环境进行自然的交互并相互影响,获得一种仿佛在真实环境中的感受与体验效果<sup>[4]</sup>.

经典的 VR 系统主要由输入设备、输出设备及运行虚拟现实应用的计算机构成. 如今 VR 系统相关设备已高度集成化和互联网化<sup>[5]</sup>,形成由终端、内容生成系统、应用平台和网络传输系统组成的架构,如图 1 所示<sup>[1]</sup>. VR 的内容主要包括两类:一是基于计算机开发的 VR 三维环境;二是基于全景相机拍摄的真实全景视频.

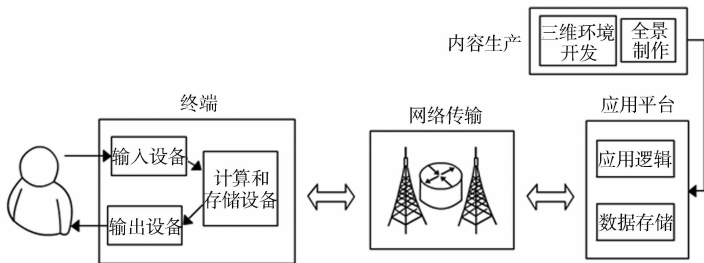


图 1 VR 系统架构图

Fig. 1 VR system architecture diagram

一个完整的 VR 视频无线网络传输架构主要由全景视频采集、视频拼接、映射过程、压缩编码和无线网络传输等 5 个部分组成(图 2). 1) 全景视频采集. VR 视频由全景摄像机拍摄而成. 2) 视频拼接. 视频拼接是将若干视频合成一路全景视频,最终提供给用户一个完整的 VR 视频. 3) 映射过程. 为方便存储与压缩编码,VR 视频内容需被几何映射至平面. 4) 压缩编码. VR 视频主要使用压缩编码以减少视频中的冗余信息. 当前 VR 视频主要采用 H. 264 和 HEVC/H. 265 等编码标准,以兼容现有的编码器及播放设备. 5) 无线网络传输. 通过互联网将 VR 视频分发给用户,为了达到流畅、清晰的 VR 视频体验效果,无线网络传输效率是当前最大的挑战.

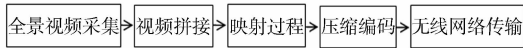


图 2 VR 视频无线网络传输架构

Fig. 2 VR video wireless network transmission architecture

## 2 虚拟现实无线网络传输的技术需求

为了保证 VR 系统的高交互性和实时性,VR 无线网络传输的技术需求包括提升无线网络的传输效率、优化网络通信协议和提高网络传输带宽等方面<sup>[1]</sup>.

### 2.1 VR 无线网络传输效率的提升

自二十世纪九十年代起,国内外的专家学者已开始研究如何通过改进算法提升 VR 的无线网络传输效率,并取得了一定的研究成果. 在 VR 系统中,用户的交互界面、游戏中的角色和场景等内容均由三维模型构成,针对三维模型的压缩传输则成为提升 VR 无线网络传输效率的一个重要问题. 1996 年,业界提出三维模型渐进压缩传输算法,但它只支持对静态模型的流式传输,由于模型的顶点删除及分裂方式与表面有关,在模型表面出现形变后,其原始的记录不再有效<sup>[4]</sup>. 文献[6]使用谱变换方法,把网格在空间域上表示为基矩阵与一系列多分辨率变换矩阵,能够用于渐进传输及恢复,只传输变形后的谱系数而不是完整模型,明显降低网络开销,初步实现变形模型的压缩与流式传输<sup>[4]</sup>. 文献[7]又进一步将实时变形模型引入移动终端,提出一种渐进的变形压缩和流式传输技术. 文献[8]提出一种大规模场景模型的网络流式传输策略,能够有效提高大规模三维城市市场景模型的网络传输效率. 文献[9]为了提升大规模三维网格模型的传输效率,深入研究了三维模型简化技术和渐进式传输技术,并将这两种技术有效地结合. 文献[10]提出一种新的单分辨率三角形网格拓扑编码算法和一种几何预测编码算法,该压缩方法能够减少三维网格的数据量.

为了压缩三维模型中的海量数据,进一步提高三维模型网络传输的速度,文献[11]提出一种基于三维模型几何信息的纹理图像压缩算法,取得了较好的数据压缩效果.文献[12]提出一种新颖的三维模型压缩算法,该算法在三维模型网络传输中能取得很好的压缩效率.针对大数据环境下,三维模型的传输需求问题,文献[13]提出一种基于数据类型转换的点云快速无损压缩算法,在保证整个三维点云模型质量的前提下,具有较好的压缩效果.文献[14]提出一种基于改进八叉树的三维点云压缩算法,该算法具有良好的压缩率且能够缩短压缩时间.文献[15]在系统研究目前三维模型压缩和简化技术的基础上,为了提高三维模型的压缩效率,提出一种基于标准劳埃德算法的点云模型压缩技术、一种基于邻域聚类合并的点云模型简化技术及一种协作简化三角形网格及其纹理图像的技术.文献[16]也提出一种改进的渐进网格算法,该压缩方法主要包括网格简化和网格拓扑几何数据编码压缩.以上压缩方法虽各有利弊,但都达到了一定的数据压缩效果,在一定程度上提升了 VR 的无线网络传输效率.

由于全景视频具有侵入感强、观看视角自由、较好的用户体验效果等优点,已被作为 VR 重要的内容来源之一<sup>[17]</sup>.当前,全景视频压缩技术尚处于探索阶段.NextVR 公司提出了一种立体视频压缩技术(降低信息熵),而 Facebook 公司专门针对 VR,提出了动态流(dynamic streaming)技术,其技术原理主要是压缩非用户当前视点范围内的所有视频,仅传输当前视点的高清内容给用户,为了确保画质与分辨率的无损,传至用户 VR 设备上的视频压缩比最多达到原来的 20%.

2.2 VR 网络通信协议的优化

当前,在网络系统中常用的基本通信协议是传输控制协议(TCP)和用户数据包协议(UDP).相比无连接的 UDP,面向连接的 TCP 有更好的数据一致性,但是由于 TCP 接收到数据包时需要确认机制,假如出现丢包,就得重传,其实时性明显要比 UDP 差一些<sup>[18]</sup>.为了能够有效地解决实时性和可靠性之间的矛盾,业界提出以下 3 种 VR 通信优化协议<sup>[1]</sup>.

1) 分布式交互仿真协议(DIS).DIS 是由电气和电子工程师协会(IEEE)定义的一种平台级实时战略游戏标准,它建立了单独的协议元素的形式和内容.DIS 是 VR 与网络技术相结合的产物,它被广泛应用于军事、太空探测及医疗等领域.

2) 交互式共享传输协议(ISTP).ISTP 是构建在 TCP,UDP,RTP,HTTP 4 个协议之上的混合通信协议,它支持在一个虚拟环境中一组进程的信息共享.

3) 分布式虚拟世界传输和通信协议(DWTP).DWTP 是 Internet 上的共享虚拟环境的应用层协议.它允许一个虚拟环境收发诸如事件、消息、文件和流等类型的数据.虚拟现实传输协议(V RTP)是 VR 的应用层协议.它试图使用一个统一的框架支持 VR 所有类型数据的传输,使用协议模块的集合提供给客户必要的连接.

如今,虽然学界和业界一直不断地优化 VR 的网络通信协议,但在该领域仍没形成被广泛认可的工业或科学标准<sup>[1]</sup>.VR 网络通信协议的优化依然有较大的研究空间.

2.3 VR 无线网络传输带宽的提高

VR 的内容具有高分辨率及高帧率的特点,其海量数据对无线网络传输带宽能力(实时传输速率)有非常高的要求.为了避免其较大延迟所带来的眩晕感,无线网络传输系统需要将端到端时延有效控制 在 10 ms 以内.

针对不同分辨率、每像素点比特数及帧率的内容,在百倍压缩比的情形下,对无线网络传输带宽的要求,如表 1 所示<sup>[1]</sup>.

例如,表 1 中 8K 3D 的无压缩视频传输速率可达近 100 Gbit · s<sup>-1</sup>,在经过百倍压缩后,需要 960 Mbit · s<sup>-1</sup>(将近 1 Gbit · s<sup>-1</sup>)的网络传输带宽,它对当前的网络承载,特别是无线通信网络提出新的挑战.然而,面向 2020 年及未来的第五代移动通信技术(5G)在设计当初便充分考虑到虚拟现实的网络承载需求<sup>[19-20]</sup>.国际电信联盟(ITU)定义的 8 项 5G 核心能力指标,如表 2 所示<sup>[1]</sup>.依据 ITU 所发布的 IMT-2020 Vision 报告,未来 5G 主要面向的应用场景是:增强型移动带宽、大规模机器间通信和高可靠

表 1 VR 内容对无线网络传输带宽能力的要求  
Tab.1 Requirements of VR content for network transmission bandwidth capability

分辨率	每像素比特数/ bit · px <sup>-1</sup>	帧率/ 帧 · s <sup>-1</sup>	带宽/ Mbit · s <sup>-1</sup>
1 080P	12	60	15
4K	12	60	60
8K	12	60	240
8K 3D	24	120	960

低时延通信<sup>[21]</sup>. 5G 计划提供高达  $1\text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  的用户体验速率及毫秒级的端到端时延, 这将稳步提升 VR 的用户体验效果. 为了实现此目标, 5G 在大规模天线、超密集组网、新型多址技术、全频谱接入, 以及新型网络架构等关键技术领域取得了实质性的科研进展及突破. 另外, 基于滤波的正交频分复用、灵活双工、终端直连和全双工等也是 5G 潜在的关键技术<sup>[1]</sup>.

1) 大规模天线. 大规模天线是在现有多天线的基础上增加天线数量、提升波束赋形增益和多用户复用增益, 以大幅提升频谱效率为最终目的. 大规模天线能够提升系统容量和用户速率<sup>[22]</sup>, 并且能够抑制小区间的干扰. 文献[23]提出在热点覆盖区域大量增加协作节点或小区的个数, 或在各节点把目前采用的多天线替换为大规模阵列天线<sup>[24]</sup>, 构建一种大规模协作无线通信环境(图 3)<sup>[25]</sup>, 以解决未来移动通信的频谱效率和功率效率问题. 另外, 为抑制大规模多输入多输出(MIMO)用户间的干扰<sup>[26]</sup>, 文献[27]结合迫零预编码与块对角化预编码算法, 提出一种优化的块对角化算法, 它有效降低了用户间的干扰, 提高了系统的整体性能. 文献[28]介绍了大规模 MIMO 和 mmWave 技术, 以及 5G 无线异构网(HetNet)的功能及面临的挑战.

为解决全双工中继的残留回路干扰及大规模 MIMO 的导频污染问题, 文献[29]设计了一个多对用户的全双工双向中继系统, 和传统的中继系统相比, 该系统具有更高的效率. 目前, 大规模天线亟待解决信道测量与反馈、天线阵列设计、低成本实现等技术难题. 为此, 文献[30]提出一种基于多径的双极化信道信息反馈方法, 它仅需少量的长周期宽带反馈的相位信息便可获得准确的预编码, 提高了量化反馈效率, 降低了终端侧复杂度. 随着科学技术的进步与发展, 大规模天线将向天线小型化、一体化、隐形化及宽带化的方向发展<sup>[1]</sup>.

2) 超密集组网. 超密集组网主要通过增加小基站的密度, 提升系统容量与用户效率. 当前, 很多公司都将超密集组网视为 5G 满足数百倍、上千倍流量增长需求的关键技术攻关方向之一. 超密集组网的小蜂窝网络是一种能够满足更高无线通信服务需求的重要技术<sup>[31-33]</sup>. 文献[34]提出除了增加频谱带宽及提高频谱利用率之外, 还可使用加密小区部署、提升空间复用度的方法提高无线系统容量. 为了解决未来 5G 超密集组网“覆盖”和“容量”的问题, 文献[35]提出一种基于控制承载分离及簇化集中控制技术的 5G 超密集组网网络架构, 如图 4 所示.

表 2 5G 核心能力指标

Tab. 2 5G core competence index

指标名称	数值
流量密度/ $\text{Tbit} \cdot (\text{s} \cdot \text{km}^2)^{-1}$	10
连接数/ $\text{万} \cdot \text{km}^{-2}$	100
时延/ms	1
移动性/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	500
能效	比 4G 提升 100 倍
用户体验速率/ $\text{Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$	100~1 000
频谱效率	比 4G 提升 3 倍
峰值速率/ $\text{Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$	20

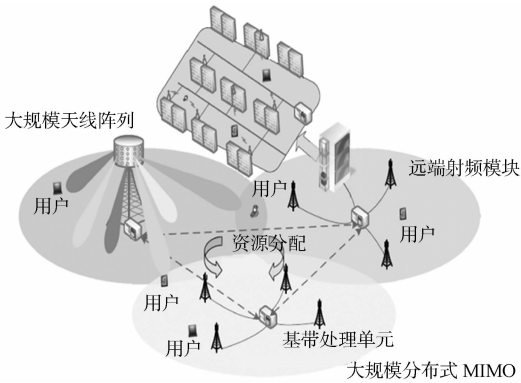


图 3 大规模协作无线通信

Fig. 3 Large-scale cooperative wireless communications

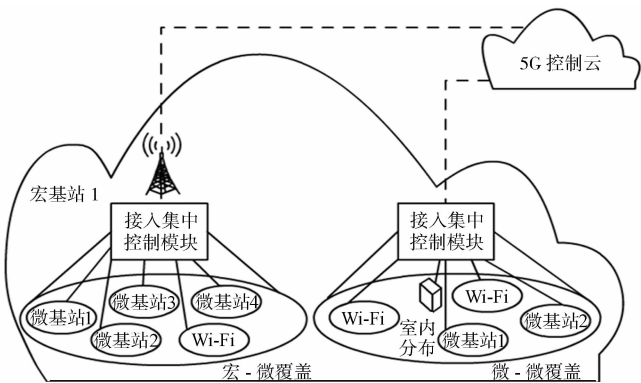


图 4 5G 超密集组网部署场景架构图

Fig. 4 5G ultra dense network deployment scenarios architecture diagram

同时, 针对“宏-微”和“微-微”的超密集组网部署场景, 给出具体的设计与实现方案. 针对小区密集部署的网络, 文献[36]提出一种增强型动态分簇算法. 该算法能够更好地权衡系统的性能和复杂度, 并降低移动台之间的干扰. 目前, 干扰管理与抑制、小区虚拟化技术等都是超密集组网的重要研究方向.

3) 新型多址技术. 新型多址技术通过在空域、时域、频域、码域发送信号的叠加传输, 以此实现多种

场景下系统频谱效率、连接数密度及用户速率的大幅提升<sup>[1]</sup>。当前,业界提出的技术方案主要有稀疏码多址(SCMA)技术、图样分割多址(PDMA)技术、多用户共享接入(MUSA)技术、基于功率叠加的非正交多址(NOMA)技术、资源扩频多址(RSMA)技术等<sup>[37]</sup>。除了 MUSA 技术外,其他非正交的多址技术方案在提出之初未充分考虑通信用户的多址接入过程,若 5G 系统依然采用基于竞争的多址接入协议,就将面临繁重的接入信令负担,甚至将会产生信令风暴,这必将严重削弱非正交多址技术的优势。针对这种问题,文献[38]提出一种免信令的上行非正交多址方法,它的主要技术原理是发送端利用预编码矩阵扩展数据包,再通过系统预先分配的天线时频资源块发送扩展后的数据包,而接收端则利用多天线接受并完成对数据包的恢复。该方法能够免去接入信令开销,系统可允许多用户使用相同的时频资源,频谱效率也有明显提升。另外,新型多址技术还可通过免调度传输而降低信令开销,缩短接入时延。

4) 全频谱接入。全频谱接入通过充分利用各类移动通信频谱资源,以此提升用户数据传输速率及系统容量,分为两类频段:对于 6 GHz 以下的低频段,因其具有较优的信道传播特性,故可作为 5G 的优选频段;而在 6~100 GHz 的高频段,因其包含更为丰富的空闲频谱资源,可以作为 5G 的辅助频段。在全频谱接入的技术框架下,低频和高频亦可采用混合组网的形式(图 5),运用控制面和数据面分离的技术,既能发挥各自频段的优势,又能满足覆盖面、速率和流量等需求,并可减少基站的数量,降低布网的成本<sup>[39]</sup>。将来可考虑低频与高频分别承载控制面及用户面,以此实现高低频统一设计。而高频器件、高频接入回传一体化、信道测量和建模,将是全频谱接入面临的主要技术性挑战<sup>[1]</sup>。

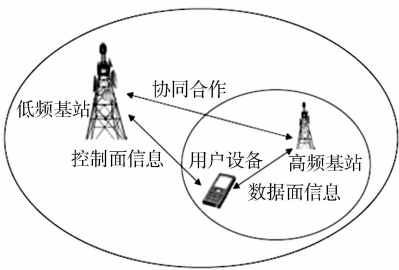


图 5 高低频混合组网  
Fig. 5 High frequency and low frequency hybrid networking

5) 新型网络架构。随着 VR 等新业务的快速发展,对无线通信网络的端到端时延和速率等提出了更加严格的需求,基于长期演进(LTE)网络,以后向兼容的方式满足现实需求将面临极大的挑战<sup>[40]</sup>。以更扁平、基于控制面和转发面功能的进一步分离,按业务需求灵活动态组网的新型网络架构为特征的网络编辑功能与接口,以及网络拓扑与平台组合的 5G 技术成为这些新兴业务发展的基石<sup>[1]</sup>。文献[41]中给出一种新型的 5G 网络架构图,如图 6 所示。

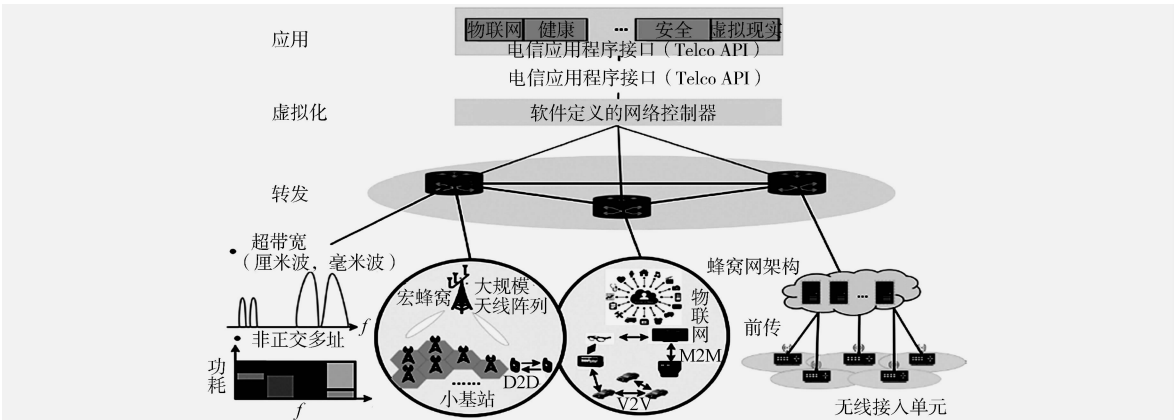


图 6 新型的 5G 网络架构图  
Fig. 6 New type of 5G network architecture

新型网络架构的设计内容主要有:业务下沉和本地化,降低业务时延,减少回传网络传输要求;多网融合和多连接,基于 5G 多网共存,提高网络效率及资源利用率,降低无线网络部署与运维成本;网络容量和效率优化,进而满足海量连接、数据洪流的需求并减少网络开销;IT 化和虚拟化,现有的专用网络设备节点被通用 IT 技术平台所取代,采用软件定义网络(SDN)和网络功能虚拟化(NFV)技术促进网络的集中控制和分布转发,从而实现网络计算与存储资源虚拟化,以及网络功能、性能的可动态重构和定制化能力;网络接入更加灵活及智能化,包括密集灵活部署、业务与内容感知,最终实现低成本和用户体验一致性<sup>[1]</sup>。在 VR 应用中,为了满足低延迟和大规模数据传输的需求,文献[42]提出一种基于 SDN 架构的 5G 小蜂窝网络解决方案,如图 7 所示。

### 3 发展趋势与研究挑战

#### 3.1 发展趋势

中国信息通信研究院在《虚拟(增强)现实白皮书(2017 年)》中提出:未来虚拟现实网络传输技术呈现大带宽、低时延、高容量、多业务隔离的发展趋势,VR 涉及接入网、承载网、数据中心网络、网络传输运维与监控及投影、编码压缩等网络传输技术. VR 端到端网络传输的需求以用户体验为发展主线,不断增强沉浸感.

新型 Wi-Fi、大容量无源光纤网络(PON)与 5G 将成为 VR 接入网络技术的发展趋势. 下一代 Wi-Fi 技术为 802.11ax,最大能够实现  $10\text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  空口速率的家庭无线网络覆盖,VR 头显无线化则是基于 60 GHz 的 Wi-Fi 技术. 随着 10G PON 技术的即将部署,预计能将无线网络传输带宽提升 10 倍左右. 而 ITU-T 也已经开始“10G+”速率的下一代 PON 需求与相关技术研究,以期能够满足 VR 业务的承载需求. 从 5G 的应用场景看,5G 用户体验速率能达到  $100\sim1\,000\text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ,无线网络传输时延将达毫秒量级,5G 能确保虚拟现实完全沉浸体验,VR 将成为 5G 先期商用的重点应用领域,如表 3 所示.

表 3 5G 先期商用的重点应用领域

Tab. 3 Key application areas of 5G early commercial

5G 商用规划较早的国家	频谱/GHz	应用时间	5G 先期重点应用领域
韩国	3.4~3.7,28.0	2018 年展示	VR(2018 年平昌冬季奥运会)
日本	4.5,28.0	2018 年展示	VR、无人机、云计算、工业设备等
	3.6~4.2,4.4~4.9	2020 年商用	VR(2020 年东京奥运会)

架构简化、智能管道、按需组播、网络隔离将成为 VR 承载网络技术的发展趋势. 从 VR 业务的具体时延需求出发,承载网络规划合理的无线网络带宽进行带宽满足. 例如,承载网络须在 10 ms 级的粒度内以满足 VR 大流量的传输需求. 由于 VR 的大视频对带宽、时延和丢包率都有很高的要求,故需要对传统网络的层次及网络结构进行简化,通过实现网络架构扁平化,以此提高承载网的传输效率. 当下 VR 业务的视觉体验功能主要依赖于价格高昂的 GPU,将来的发展趋势是将 VR 本地计算能力云化(即在数据中心内部署复杂的运算功能). 在 VR 计算能力云化后,将产生更大的数据流和更低的业务时延要求. 因此,低延迟的数据中心将成为实现 VR 计算能力云化的关键方向. 当下 H.264 和高效视频编码(HEVC)编码是 VR 主要使用的编码形式. 根据动态图像专家组(MPEG)等标准组织的研究新进展,表明下一代编码技术(即 H.266)的压缩效率最多提升 30%. VR 无线网络传输技术路线将由全视角等质量传输向全视角不等质量、FOV 传输方向发展,投影、编码与传输技术将成为优化 VR 网络性能的重要方向. 此外,面向 VR 业务的网络运维及评估将成为优化 VR 用户体验效果的重要途径.

#### 3.2 研究挑战

基于中国在 5G 通信产业中所积累的技术基础优势,VR 作为 5G 时代最为重要的垂直应用场景之一,它与通信产业在市场准备、技术研究、标准制定及产业构建等方面的协同合作和创新具有十分广阔的想象空间. 一方面,VR 无线网络传输技术是垂直领域业务在时延、可靠性、带宽、移动性等方面的现实需求,从而不断地推动无线网络传输技术的发展;另一方面,随着承载网技术的不断演进,它将促进无线网络的敏捷、开放和达到多业务隔离承载及越来越灵活的运营模式.

VR 无线网络传输技术的研究挑战主要有:1) 为能够在有限带宽上传输高质量的 VR 视频,可深入研究 VR 视频处理技术、VR 视频传输架构及关键技术;2) 为进一步提高 VR 的无线网络及视频传输效率,可在现有的压缩传输算法研究基础上,进行算法的改进和优化;3) 为提高 VR 的无线网络传输带宽,可深入研究 5G 在大规模天线、超密集组网、新型多址、全频谱接入和新型网络架构等方面的关键技术及应用.

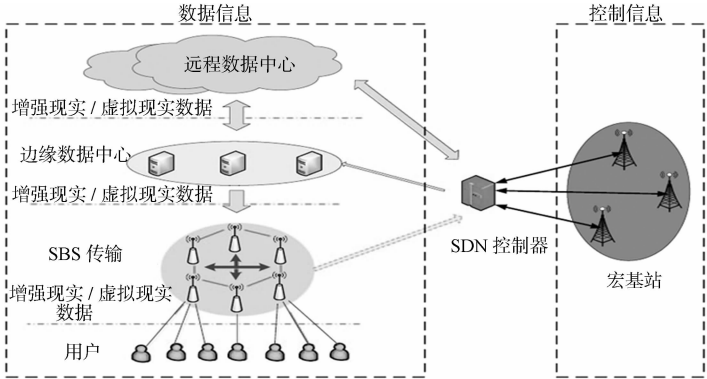


图 7 基于 SDN 的 5G 小蜂窝网络架构

Fig. 7 SDN-based network architecture for 5G small cell networks

## 4 结束语

随着无线网络技术的日趋成熟,虚拟现实技术在网络上的应用领域也越来越广泛,面向虚拟现实的无线网络传输技术具有一定的研究意义.从提升 VR 的无线网络传输效率、优化网络通信协议和提高无线网络传输带宽等方面阐述满足 VR 无线网络传输现实需求的技术方法,并分析了虚拟现实无线网络传输技术的发展趋势.下一步研究工作的重点主要是基于用户视点的 VR 视频处理与传输、VR 视频业务对承载网络的需求分析、高效率的视频压缩编码及如何实现低时延等关键技术及应用.

### 参考文献:

- [1] 徐兆吉,马君,何仲,等.虚拟现实:开启现实与梦想之门[M].北京:人民邮电出版社,2016.
- [2] 董振江,张东卓,黄成,等.虚拟现实视频处理与传输技术[J].电信科学,2017,33(8):45-52. DOI:10.11959/j.issn.1000-0801.2017244.
- [3] NOH W J,SHIN C Y. Novel control framework for multi-user display and data transmission in networked virtual reality services[J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics,2016,11(2):164-169. DOI:10.1166/jno.2016.1857.
- [4] 周忠,周颐,肖江剑.虚拟现实增强技术综述[J].中国科学(信息科学),2015,45(2):157-180. DOI:10.1360/N112014-00076.
- [5] 张新彩,赵晓亮.基于虚拟现实技术的安全智能无线网络资源动态分配方法研究[J].科学技术与工程,2017,17(15):278-283. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2017.15.045.
- [6] PRABHAKARAN B. Streaming 3D shape deformations in collaborative virtual environment[C]// Proceedings of Virtual Reality Conference. Waltham:IEEE Press,2010:183-186. DOI:10.1109/VR.2010.5444793.
- [7] TANG Ziyang,OZBEK O, GUO Xiaohu, *et al.* Real-time 3D interaction with deformable model on mobile devices [C]// Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia. Scottsdale:DBLP,2011:1009-1012. DOI:10.1145/2072298.2071925.
- [8] 任慧玲,申闫春.大规模三维城市市场景模型的流式传输策略[J].计算机仿真,2013,30(11):209-213. DOI:10.3969/j.issn.1006-9348.2013.11.048.
- [9] 孙中轩.三维模型简化算法与渐进式传输方法研究[D].成都:电子科技大学,2016.
- [10] 刘浩然.三维模型压缩及网络传输关键技术的研究[D].济南:山东大学,2016.
- [11] 吴晓军,徐广毅.基于三维模型几何信息的纹理图像压缩[J].计算机辅助设计与图形学学报,2016,28(3):471-479.
- [12] 何辰,王磊,王春萌.新颖的网格模型压缩算法:网格切片[J].计算机应用,2016,36(2):546-550. DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.02.0546.
- [13] 律师,达飞鹏,黄源.基于数据类型转换的点云快速无损压缩算法[J].图学学报,2016,37(2):199-205. DOI:10.11996/JG.j.2095-302X.2016020199.
- [14] 黄源,达飞鹏,唐林.基于改进八叉树的三维点云压缩算法[J].光学学报,2017,37(12):141-149. DOI:10.3788/AOS201737.1210003.
- [15] 范玉雪.带多种属性的三维模型的简化与压缩技术研究[D].济南:山东大学,2017.
- [16] 王冷晶.三维模型编码压缩算法研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [17] LEE W T,CHEN H I,CHEN M S. High-resolution 360 video foveated stitching for real-time VR[J]. Computer Graphics Forum,2017,36(7):115-123. DOI:10.1111/cgf.13277.
- [18] 尚慧萍,张丽娜.网络虚拟现实的网络架构和通信协议研究[J].计算机工程与设计,2006,27(24):4699-4703. DOI:10.3969/j.issn.1000-7024.2006.24.027.
- [19] SHAFI M,MOLISCH A F,SMITH P J, *et al.* 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2017,35(6):1201-1221. DOI:10.1109/JSAC.2017.2692307.
- [20] ALAM M F,KATSIKAS S,BELTRAMELLO O, *et al.* Augmented and virtual reality based monitoring and safety system: A prototype IoT platform[J]. Journal of Network and Computer Applications,2017,89:109-119.
- [21] DONG Lei,ZHAO Hongyi,CHEN Yan, *et al.* Introduction on IMT-2020 5G trials in China[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2017,35(8):1849-1866. DOI:10.1109/JSAC.2017.2710678.

- [22] ZHANG Jianhua,ZHANG Yuxiang,YU Yawei,*et al.* 3-D MIMO: How much does it meet our expectations observed from channel measurements? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2017,35(8):1887-1903. DOI:10.1109/JSAC.2017.2710758.
- [23] HUH H,CAIRE G,PAPADOPOULOS H C,*et al.* Achieving massive MIMO spectral efficiency with a not-so-large number of antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2012,11(9):3226-3239. DOI:10.1109/TWC.2012.070912.111383.
- [24] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2010,9(11):3590-3600. DOI:10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [25] 王东明,张余,魏浩,等. 面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术[J]. 中国科学(信息科学),2016,46(1):3-21. DOI:10.3969/j.issn.1006-4222.2016.22.082.
- [26] BJORNSEN E,SANGUINETTI L,HOYDIS J,*et al.* Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: Is massive MIMO the answer? [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2015,14(6):3059-3075. DOI:10.1109/TWC.2015.2400437.
- [27] 王军,戴建新,程崇虎,等. 一种改进的大规模 MIMO 预编码算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2016,36(6):30-33. DOI:10.14132/j.cnki.1673-5439.2016.06.005.
- [28] BOGALE T E,LE L B. Massive MIMO and mm wave for 5G wireless HetNet: Potential benefit and challenges [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine,2016,11(1):64-75. DOI:10.1109/MVT.2015.2496240.
- [29] 邱梦婷,赵普,俞晖. 大规模天线全双工双向中继系统的干扰分析[J]. 上海交通大学学报,2017,51(6):647-656. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2017.06.002.
- [30] 郑凤,陈艺骞. 基于多径的双极化信道信息反馈方法[J]. 北京理工大学学报,2017,37(4):365-370. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2017.04.007.
- [31] 贾亚男,岳殿武. 面向 5G 的小蜂窝网络研究综述[J]. 电讯技术,2015,55(11):1296-1303. DOI:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.11.019.
- [32] BARROAS M T,MULLINS R,BALASUBRAMANIAM S. Integrated terahertz communication with reflectors for 5G small-cell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2017,66(7):5647-5657. DOI:10.1109/TVT.2016.2639326.
- [33] DING Ming,LOPEZ-PEREZ D,MAO Guoqiang. Performance impact of idle mode capability on dese small cell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2017,66(11):10446-10460. DOI:10.1109/TVT.2017.2754416.
- [34] AAYAPONG P,IWAMURA M,STAEHLE D,*et al.* Design considerations for a 5G network architecture[J]. IEEE Communalization Magazine,2014,52(11):65-75. DOI:10.1109/MCOM.2014.6957145.
- [35] 张建敏,谢伟良,杨峰义. 5G 超密集组网网络架构及实现[J]. 电信科学,2016(6):36-43. DOI:10.11959/j.issn.1000-0801.2016076.
- [36] 曾捷,张琪,栗欣,等. 超密集组网中基于上行容量分析的增强型动态分簇算法[J]. 科学技术与工程,2017,17(18):69-73. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2017.18.010.
- [37] 胡显安. 5G 新型非正交多址技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
- [38] 谢榕贵. 免信令的上行非正交多址方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- [39] 詹文浩,戴国华. 全频谱接入现状与技术分析[J]. 移动通信,2016,40(17):45-48. DOI:10.3969/j.issn.1006-1010.2016.17.027.
- [40] 史志明,黄诚惕. 使用网络编码技术的同步传输方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2017,38(4):546-549. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201704019.
- [41] LIU Yuwei,QIN Zhijin,ELKASHLAN M,*et al.* Nonorthogonal multiple access for 5G and beyond[J]. Proceedings of the IEEE,2017,105(12):2347-2381. DOI:10.1109/JPROC.2017.2768666.
- [42] GE Xiaohu,PAN Linghui,LI Qiang,*et al.* Multipath cooperative communications networks for augmented and virtual reality transmission[J]. IEEE Transactions on Multimedia,2017,19(10):2345-2358.