



专题：数据网络技术与应用

未来网络应用场景与网络能力需求

王凌豪^{1,2}, 王淼¹, 张亚文^{1,2}, 张玉军^{1,2}

(1. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以 TCP/IP 为体系架构的互联网已经发展为当前信息社会的重要基础设施。但随着网络流量的迅速增长和各种新兴应用的不断出现, 现有网络体系结构在各方面的问题日益突出。分析了未来网络的新型应用, 并明确了未来网络应用的性能需求会给网络体系结构的研究和设计提供更清晰的方向。对沉浸式体验、物联网、触觉互联网和智能交通这几类典型未来网络应用的应用场景进行了分析, 总结出未来网络应用对未来网络的能力需求, 导出关键的网络性能指标需求。

关键词: 未来网络; 需求分析; 虚拟现实; 物联网; 触觉互联网

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019223

Future network application scenarios and network capability requirements

WANG Linghao^{1,2}, WANG Miao¹, ZHANG Yawen^{1,2}, ZHANG Yujun^{1,2}

1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The TCP/IP based internet had evolved into an important infrastructure for current information society. However, with the rapid growth of network traffic and the appearance of various emerging applications, the existing network architecture had become increasingly prominent in all aspects. Analyzing and clearing the performance needs of emerging Web applications could provide a clearer direction for the research on network architecture. The application scenarios of typical future network applications were analyzed such as immersive experience applications, IoT applications, tactile internet applications and intelligent transportation applications. The future network applications' requirements for future networks were summarized, and key network performance indicators were derived.

Key words: future network, requirement analysis, VR, IoT, tactile internet

收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-10-10

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2016YFE0121500, No.2018YFB1800403); 国家自然科学基金资助项目 (No.61672500, No.61572474); 中国科学院战略性先导科技专项 (No.XDC02030500)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China(No.2016YFE0121500, No.2018YFB1800403), The National Science Foundation of China (No.61672500, No. 61572474), The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDC02030500)

1 引言

以 TCP/IP 为体系架构的互联网已经发展为当前信息社会的重要基础设施。随着技术的不断发展和网络流量的迅速增长,互联网接入方式的变化和网络角色定位转换导致现有的 TCP/IP 体系结构在路由扩展性、动态性、可管理、QoS 以及能耗等方面的问题日益突出^[1]。为了解决现有网络架构存在的问题,很多研究机构提出从根本上改变互联网体系结构的未来网络体系结构,并随之出现了一系列的新技术和新架构。

针对可扩展性问题,研究者提出了 CCN^[2]/NDN^[3]架构,将网络的中心转变为内容而非位置,降低网络流量的冗余,解决地址空间爆炸问题。针对网络的灵活性问题,提出了 SDN^[4]技术,将网络层控制平面和转发平面分离,进行中心化的集中管理,使网络更容易编程和定义,管理更加灵活和高效。针对可管理的问题,提出了 NFV^[5]技术,将网络硬件设备通过虚拟化技术,集成到通用的服务器或其他硬件平台上,降低运维成本。针对云计算模型造成的网络负载大和网络拥堵问题,提出了边缘计算^[6]技术,利用网络的边缘节点进行存储、计算。这些技术有望成为未来网络的关键技术。

以上对未来网络体系结构的研究都是为了更好地支撑未来的网络应用,而明确未来网络应用的性能需求反过来也会给网络体系结构的研究提供更清晰的方向,网络应用的发展逐渐成为网络技术发展的需求来源。目前针对未来新型网络应用所需的具体明确的网络指标的研究还很少,本文将从应用驱动的角度入手,对几类典型未来网络应用的应用场景进行分析,总结未来网络应用对未来网络的能力需求及关键的网络性能指标。

2 浸入式体验应用

2.1 概述

浸入式体验应用,又称沉浸式体验应用,是

指利用计算机仿真、人机交互等多种技术模糊物理世界与虚拟世界之间的界限,模拟多种感官(视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉),创造沉浸式感觉的应用。目前对于视觉、听觉的模拟技术已经相对成熟,对触觉、嗅觉和味觉的模拟应用也已出现,但还处在概念性的阶段。已经商业化的产品有如 Google Cardboard、HTC Vive、Oculus Rift 等,处在概念和实验阶段的嗅觉味觉模拟产品如 Vocktail^[7]。

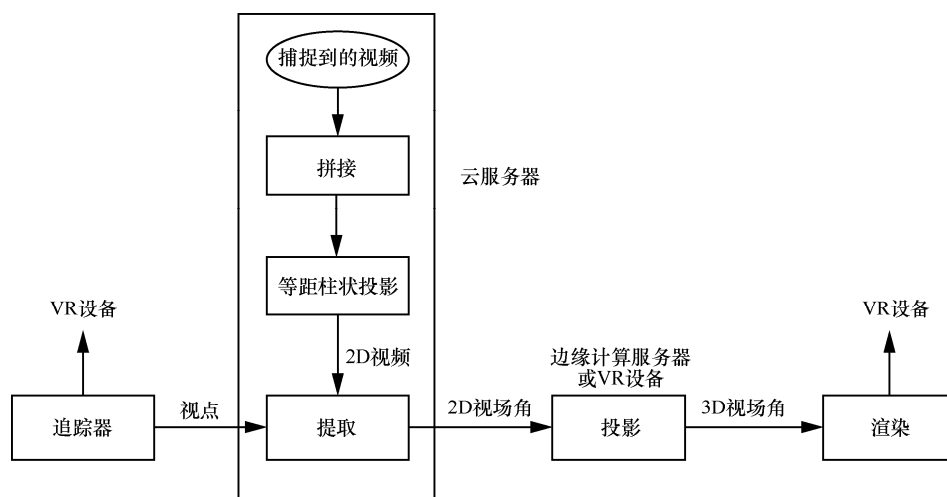
本节主要聚焦于已经得到了一定发展的主要基于视觉和听觉体验的虚拟现实(VR)/增强现实(AR)/混合现实(MR)技术和未来或将成为趋势的全息通信技术。VR 强调利用计算机模拟产生一个三维空间的虚拟世界,提供用户关于视觉等感官的模拟,目前用户主要是通过头戴式显示器(helmet mounted display, HMD)观看;AR 强调通过图像分析技术和对摄像设备位置和角度计算使得显示屏上的虚拟世界能够与现实世界场景进行结合与交互;MR 技术则结合了前两者的优势,不仅是将虚拟物品简单叠加到现实,而是将虚拟对象锚定到现实世界,代表产品有 Microsoft Hololens、Magic Leap 等。全息通信系统捕获远程人和周围物体的图像,通过宽带网络传输,并最终使用激光束投射,以产生传统全息图大致相同的方式投影出实时的动态 3D 图像。

根据资源存储的位置,浸入式体验应用可以划分为离线型应用和在线型应用,后者需要通过网络传输模拟虚拟场景所需要的数据资源,这类应用通常对于网络的时延和带宽有着较高的要求。本节也主要针对这类应用的网络传输问题进行调研。

2.2 场景描述

对于典型的 VR 网络应用,可以抽象出系统架构,如图 1 所示。

VR 应用中通过网络传输的主要是 3D 全景视频^[9]。制作资源时通过摄像机阵列获得多个角度

图1 典型的VR应用架构^[8]

的视频, 经过拼接 (stitching) 操作获得球形视频, 再经过等距柱状投影 (equirectangular projection) 得到 2D 视频, 存储在云服务器上。在使用过程中, VR 设备从云服务端取得视频流, 接着通过追踪用户视角, 从 2D 视频中提取出 2D 视场角 (field of view, FOV), 完成投影操作将 2D 视频变为 3D 视频, 投影过程可以在 VR 设备或者 MEC (移动边缘计算) 服务器上完成。最终 VR 设备将 3D 视频渲染并显示给用户, 营造沉浸式的视觉体验。可以看出, 在当前架构下, 在线型 VR 应用对于云服务器的数据传输效率提出了较高的需求。全息通信与 VR 在网络能力方面的需求比较类似, 关键在于视频数据的高效和可靠传输。

2.3 网络需求

研究者对于提高 VR 网络应用的传输效率的技术展开了研究^[1], 部分研究也指出了未来需要用到的关键技术。为了降低对带宽的需求, 基于视场的自适应流式传输成为了业界和学界的一个研究热点, 通过将用户视线内的高分辨率视频与视线外的低分辨率视频相结合的方式减少带宽消耗^[11]。为了尽可能减少需要传输的视频数据的大小, 研究者也在视频编解码的技术上做出了努力, 如参考文献[12]给出了一个优化 16K 超高分辨率 VR 视频的编码和传输方法。在未来网络系统架构

方面, 信息中心网络的架构非常有利于自适应流媒体传输, 例如一些工作设计了使用 CCN/NDN 架构传输 VR 视频的系统^[13]。另外, 边缘计算的理论也有利于在网络中进行数据缓存, 从而降低传输时延。

未来的沉浸式体验应用会对所在的网络能力提出如下需求。

(1) 改进视频传输中的时延

未来 5G 网络会有效降低时延, 与此同时, 将计算压力分到边缘设备以及为沉浸式应用带来 QoS 支持也是非常必要的。

(2) 尽可能提高网络大带宽的支持能力

在 VR 技术方面, 可以通过预测用户行为、改进压缩和编码算法等方式尽可能降低对带宽的占用。

(3) 对网络边缘计算能力的需求增加

为了加快应用中的计算如处理视频编码和上行数据流 (如上传位置信息) 以降低时延, 在网络边缘的计算压力将会增加, 如何更好地将计算任务分配给边缘设备还需要进一步研究。

2.4 性能指标

为了用户的良好体验, 沉浸式体验应用在这些方面对网络指标提出了要求。

(1) 时延

为了获得更真实的沉浸式体验, 对于网络时

延的要求是必需的。VR 技术中经常提到运动的光子时延 (motion-to-photons latency) 这个概念, 它指的是用户的运动需要充分反映在显示屏上的时间。一般认为小于 20 ms 的 MTP 时延能够实现虚拟现实的感觉, 如果 MTP 时延较高会使得虚拟现实变得不够真实。考虑到 VR 设备的硬件和显示技术等, 对于网络时延的要求将会非常高。4K 分辨率 120 f/s 的 VR 视频平滑的播放需要至少 10 ms 的端到端时延。而全息通信技术则需要小于 1 ms 的超低时延。

(2) 带宽

由于 VR 应用主要传输视频资源, 因此对于带宽的需求还需要考虑视频的分辨率以及帧数。帧数和分辨率越高, 将给用户带来更高的沉浸感。4K 分辨率 120 f/s 的 VR 视频平滑的播放需要至少 1 Gbit/s 左右的带宽^[14]。研究^[16]进行了实验性的全息影像传输和测量, 认为根据投影物体和帧率的大小, 带宽需要在 100 Gbit/s~1 Tbit/s。

(3) 可靠性

沉浸式应用对网络的可靠性也提出了要求。网络环境不稳定造成的滞后尖峰会使得沉浸感大大降低, 因此网络的每一层都要尽量保证时延的确定性和降低分组错误率。5G 网络能提供的最大分组错误率在 10^{-5} 量级^[15], 而未来随着全息通信技术的逐渐成熟, 对于网络可靠性的要求还会继续提高。

3 物联网应用

3.1 概述

物联网 (internet of things, IoT) 是指通过物理设备、车辆、家用电器以及其他具有电子器件、软件、传感器执行器的物品之间的网络, 这使得这些物品可以相互连接, 采集和交换数据。2005 年的《ITU 互联网报告 2005: 物联网》正式提出了物联网的概念。物联网打破了过去 IT 设施与物理设施分离的思维, 应用前景广泛, 遍及智能家居、医

疗保健 (远程患者监护、急救系统、可穿戴医疗检测设备)、交通 (智能交通管理、智能停车、ETC、车联网)、建筑 (建筑自动化、家庭自动化)、工业生产 (信息物理系统 (cyber-physical systems, CPS)) 等领域。

物联网应用可以分为事后分析型和实时反馈型两种。前者以采集为主, 不需要反向的数据传输。后者需要反馈, 对时延和可靠性有较高要求。目前的 IoT 应用主要还是以云为中心, 在终端数据采集, 到云通信、在云端完成数据分析。今后对实时反馈的需求会不断增加, 云端的计算、网络、存储能力有向网络边缘延伸和扩展的趋势。现有的各大物联网平台如 Amazon AWS IoT、Apple Homekit 中, 使用的主要移动通信技术如 Wi-Fi / ZigBee / Z-wave 等, 随着未来 5G 技术的成熟和商用, 物联网技术将随之得到更大的发展, 对网络能力的需求也将进一步提高。

3.2 场景描述

典型的物联网架构可以划分为 3 层: 感知层、网络层以及平台层, 如图 2 所示。感知层主要包括传感器和智能设备, 用于收集数据。网络层是物联网中的物联网网关, 进行数据的聚合、转发和交换, 组成了一个异构融合的泛在通信网络。平台层是物联网后台的云平台, 主要负责处理数据和提供应用。



图2 典型的物联网架构

物联网架构中抽象的网络层决定了应用的网



络传输能力和质量。具体到特定应用，在远程医疗应用中，网络层需要支持各种医疗传感器采集的数据的可靠稳定的上传，在远程手术场景中更需要支撑低时延、高可靠、大带宽的数据传输；在智能制造中也需要保证云基础设施与各种不同机器和设备彼此之间的工业数据的互联互通。

目前已有的系统（如 Amazon AWS IoT、Apple Homekit、Microsoft Azure IoT 等）主要依赖的还是 WLAN 物联网，以 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、Z-wave 等技术为代表，受限于覆盖范围和功耗。为了解决存在的问题，低功耗广域网（low power wide area network, LPWAN）的概念被研究者提出来。爱立信的一项报告显示，到 2022 年，广域物联网的连接数将达到 21 亿以上，其中大多数是通过 LPWAN 连接^[17]。LPWAN 的优势在于低功耗、广覆盖和大连接。LPWAN 包括很多技术标准，其中的 NB-IoT、eMTC 已于 2016 年由 3GPP 确定为国际标准。

3.3 网络需求

未来，物联网技术的发展还需要应对如下的挑战，也对未来网络提出了能力需求。

（1）安全与隐私

目前的 IoT 架构缺少对于安全的内生集成，物联网的高可扩展性需要自动化的安全保护措施，因而一个安全的架构是必需的。

（2）异构性

未来 SDN/NFV 技术在物联网网关中的使用有助于降低 IoT 管理复杂度和更好地解决 IoT 中的异构性问题，但 SDN 控制器的中心化也带来了单点失效的问题。

（3）伸缩性

很多提案提出可广泛运用的 IoT 架构，同时也提高了网络功能的复杂性。运用 SDN 技术可以克服架构和网络功能的多样化问题，同时中心化架构对时延、吞吐量而言都是挑战。

（4）低时延和确定性时延的保证

目前的系统通常用云计算为 IoT 系统提供存

储和计算力。但以云计算作为后端的 IoT 系统在数据传输方面面临着高时延、单点失效的挑战。以雾计算、移动边缘计算、微云计算等为代表的边缘计算技术可以带来低时延、QoS 控制等好处，但在物联网网关中运用边缘计算技术时也需要确定哪些数据在网关处理、哪些数据在云端处理，以及如何找到一个更好的策略也是一个挑战。

具体到特定应用，因为应用场景的不同，对于网络的需求也不同，物联网的技术未来会朝多元化方向发展。

3.4 性能指标

由于每个行业的应用需求范围不同，目前物联网的连接方式和连接标准呈现多样化。部分应用场景对网络指标的需求如下。

（1）时延

工厂自动化应用需要对工厂机器进行实时控制，因此对时延和抖动较为敏感，需要网络有 25~50 ms 不等的时延^[18]。而智能抄表、智慧农业等时间不敏感的应用，对时延的需求则为秒级。

（2）带宽

物联网应用对带宽的需求同样根据场景不同而变化。如 LPWAN 适用的智能抄表、智能停车等场景对传输带宽和速率的要求较低，而远程医疗场景为了传输实时视频和高分辨率图像，对带宽和传输速率提出了较高的要求，网络应能够提供从 Mbit/s 到 Gbit/s 不同级别的带宽。

（3）可靠性

工厂自动化应用和远程手术应用对于可靠性要求较高，需要网络具有 10^{-9} 级别的分组丢失率，而智能交通系统根据路况的不同对于分组丢失率的需求在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 之间^[18]。

4 触觉互联网应用

4.1 概述

触觉互联网（tactile internet）通过触觉传感器

和视听沉浸式输入辅助对远程基础设施进行实时、全面的控制。这一概念由德国德累斯顿工业大学的研究人员在 2014 年提出^[19]，并由 IEEE 发起成立了关于制定触觉互联网标准的工作组 IEEE P1918.1。触觉互联网使得触觉通信成为可能，为人与机器的交互增加了一个维度，在智能工厂、远程医疗和教育方面都可以发挥作用。由于触觉互联网对于网络基础设施提出了很有挑战性的要求，自提出以来得到的研究和发展并不是很迅速，但随着 5G 和其他网络技术的不断发展和成熟，近年来对于触觉互联网的研究有所增加，触觉互联网的构想会在未来得到进一步的实现。

4.2 场景描述

触觉互联网的架构可大致分为 3 个独立的部分：主（master）、从（slave）与网络（network）^[20]。在 master 端用户与人机界面进行交互、控制，发送命令，得到音频/视频的反馈；slave 端是被远程操作的设备，其中的传感器测量系统的状态，而执行器根据从控制器接收的命令操纵系统；network 端进行可靠的、确定时延的网络传输，以实现信息的实时传送。典型的触觉互联网应用架构如图 3 所示。

触觉互联网的应用场景比较广泛。在智能工厂方面，可以通过控制机器人进行高风险生产操作或对难以到达的地方进行日常的检查维护。在远程医疗方面，可以通过触觉的反馈实现远程身体检查或远程手术。教育方面，特别是涉及精细

操作的领域，学习者可以在虚拟训练中心进行远程学习和操作。

4.3 网络需求

目前的网络还不足以支撑触觉互联网的需求。未来，触觉互联网需要应对如下的挑战。

（1）极低时延的保证

为了实现触觉互联网的实时性，一般需要满足 1 ms 的端到端时延。极低时延的实现网络基础设施提出了挑战，远距离传输场景下这一时延的要求可能会超过光速的限制，边缘计算模型的使用有助于缓解这一问题。

（2）安全性的保证

现有安全技术的使用会增加端到端时延，为了使触觉互联网能够以极低时延提供安全传输，一个方案是将针对窃听者和攻击者的通信安全性嵌入物理传输中，确保只有合法的接收器才能处理控制和反馈消息，并针对新型的触觉消息开发新的、安全的编解码方案。对于安全要求较低的应用还可以考虑时延和安全的折中^[21]。

（3）多种感官的整合

研究表明，人类大脑需要 1 ms 接收触觉信号、10 ms 理解视觉信息、100 ms 解码音频^[22]，触觉互联网应用中的多种感官数据应当如何合理同步和整合以保证用户体验也是一个研究的方向。

4.4 性能指标

为了确保触觉互联网能够正常使用，该应用对于端到端时延和可靠性有着非常高的性能指标

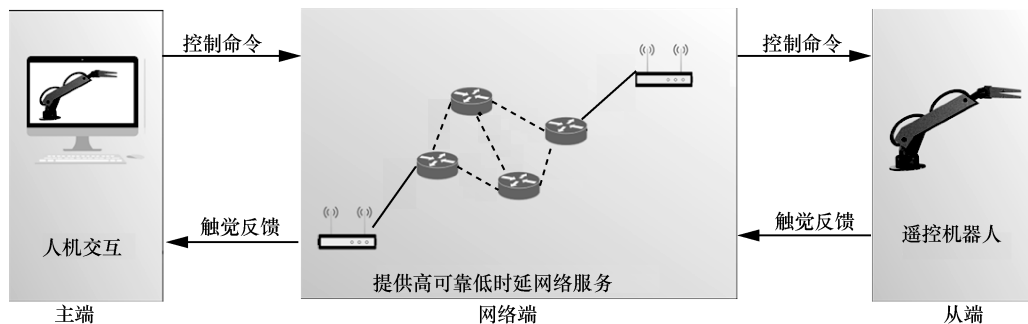


图 3 典型的触觉互联网应用架构



要求。

(1) 时延

这是保证触觉互联网应用体验最重要的因素。触觉互联网应用的端到端时延需要保证在 1 ms 及以下^[20]，此时使用者不能在触觉上分辨控制本地物体和远程物体的区别，这对网络能力是一个极大的挑战。

(2) 可靠性

可靠性也是保证触觉互联网应用体验的一个重要指标，收到错误的数据可能会导致错误的反应。触觉互联网应用需要有 99.999 99%^[20]的可靠性，即一年的故障停机时间需要小于 3.17 s。网络的分组丢失率不应超过 0.001%。

5 智能交通应用

5.1 概述

智能交通系统 (intelligent transport system, ITS) 将信息和通信技术用于交通运输，从车辆和基础设施内的传感器采集数据，车与车之间、车辆与基础设施之间可以通过高效可靠的网络连接实现精确信息的交流，从而实现碰撞预警、自动驾驶、交通效率等功能，使得交通运输服务更加安全、高效、可靠、智能。为了使 ITS 未来得到真正大规模的应用，保障 ITS 的各个不同节点之间能够高效、可靠连接的网络技术是一个关键的基础。

5.2 场景描述

ITS 中主要包含 4 种不同类型的实体：个人、车辆、中央和路边。每个实体都以 ITS 站作为核心组件。ITS 站有着相同的核心架构，承载着不同的应用程序，通过骨干网络和大量的边缘和接入网络与其他组件和 ITS 站互相连接进行通信^[1]。

ITS 中的设备和网络连接如图 4 所示，不同的 ITS 站之间常通过不同的网络进行信息交换，如车辆之间通过 IEEE 802.11p 这样的 Ad Hoc 网络进行直接通信，路边 ITS 站通过 ITS 接入网互连，除此之外 ITS 站还可以连接公共接入网和专有本地网络，不同的网络为不同的用例提供通信支持，其中 ITS 之间的直接通信 (如 V2V (vehicle to vehicle)、V2I (vehicle to infrastructure) 等) 是其中的重点。

ITS 可以提供多种不同需求的应用，以下重点关注其中的几类场景。

(1) 协同感知

该场景下，不同的 ITS 站定期广播和交换彼此的位置和运动状态等信息和传感器数据，使车辆对外界环境有着更精确的感知或实现对紧急车辆、紧急事件等的提醒和警告。

(2) 协同驾驶

该场景用于协调车辆的行驶轨迹，实现车辆排队、车道变换、碰撞避免等功能。

(3) 交通效率

该场景下，车辆接收路边基础设施或 ITS 网

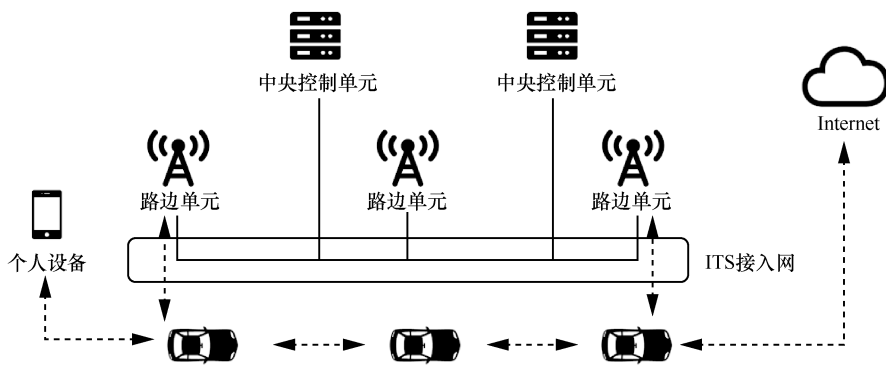


图4 ITS中的设备和网络连接

络消息,完成对定位、路况信息或地图的定期更新,从而选择更有效率的路线。

(4) 远程驾驶

该场景下,车辆通过网络连接远程驾驶员,完成对车辆的实时控制,也属于第4节提到的触觉互联网的一类应用。

5.3 网络需求

智能交通系统对未来网络的能力提出了一定的要求。

(1) 对于网络的基本能力,部分场景如碰撞检测、自动驾驶等需要保证极低和确定性的时延以及较高的可靠性。

(2) 对于移动性,需要保证车辆在 100 ~ 500 km/h 的高速移动运行中依然可以稳定通信。还需要考虑恶劣天气等外界环境对网络通信带来的影响。对于车辆间的直接无线通信,通信距离的保证也需要进行考虑。

(3) 安全性也是尤为重要的一环,ITS 可能会受到黑洞攻击、GPS 信息欺骗、位置跟踪等威胁。传输过程需要对网络内的设备进行身份的准确识别,还要实现对数据的加密传输和防篡改,保证网络外部和内部的安全性。

5.4 性能指标

不同的 ITS 应用场景需要网络满足不同的指标要求。

(1) 时延

根据场景不同端到端传输时延的需求从 3 ms 到大于 1 s 不等。协助驾驶场景下,对于时延和可靠性要求会更高,最好需要小于 5 ms 的端到端时延以实现远程控制。而交通效率场景下,数据周期性传输且车辆无需做出快速回应,时延可以大于 1 s^[24]。此外对时延的需求也会根据消息的紧急程度而变化。协同感知需要 3 ms~1 s 的时延,协同驾驶需要 3~100 ms 的时延。

(2) 带宽

需要交换大量传感器数据以及视频数据的场景

如协同感知和远程驾驶会对传输速率和带宽提出要求。远程驾驶场景对车辆来说至少需要 25 Mbit/s 的上行速率来上传,协同感知场景下分享传感器数据带宽要求可能达到 Gbit/s 级别,而其他数据如控制指令等没有严格要求,需要 5~5 000 kbit/s 不等的带宽。

(3) 可靠性

应满足高速环境下合理的分组丢失率和低抖动。多数场景需要 99% 以上的可靠度。部分场景如协同驾驶、协同感知中的较紧急的场景、远程驾驶场景等需要 99.999% 的可靠度。

6 未来网络的发展

本文分析了几类新型网络应用的需求和性能指标,此外还有很多需要网络技术支撑的新型应用(如脑机接口、工业互联网、智慧农业等),但它们的共同点就是以目前的网络技术还难以达到这些应用场景构想中的指标。为了使未来网络能够支撑起这些应用,在网络的系统架构和技术上都不断有新的研究出现,这些技术也有望在未来成为支持新型网络应用的关键技术。

在网络架构方面,为了解决当前 TCP/IP 架构的问题人们进行了很多研究,但对现有架构的修补无法从根本上解决问题。近些年有很多研究机构都提出了彻底推翻当前 TCP/IP 架构的新型架构,如面向可扩展性的 CCN/NDN、面向移动性的 MobilityFirst^[25]、面向云的 Nebula^[26]、面向服务定制的网络架构 SCN^[27]等,但这些项目目前主要还在实验阶段,尚未得到大规模的部署和应用,未来网络应当采取一个怎样的架构标准仍是一个需要讨论的问题。

在网络技术方面,基于当前的网络架构,每一层都不断有新的技术被提出和应用。对于底层网络,NFV 技术通过虚拟化技术将原本各种专业设备的功能抽象化到通用设备上,从而更好地利用和部署网络资源。在网络基础措施建设上各国



也开始依托太赫兹通信、可见光通信、卫星网络和无人机基站等技术来满足更大的覆盖范围和更高的速率的需求。此外，如何降低网络基础设施的能耗也是研究的方向之一。对于链路层和网络层来说，SDN 的思想为网络技术的创新提供了一个非常开放的平台，SDN 技术已经在 5G 核心网中得到引入^[28]，未来也将在各种不同的网络应用中与其他网络技术相结合使用，SDN 的规模也在从中小规模网络向广域网发展。对于传输层来说，也有研究者在研究专门为某些特定场景所设计和优化的传输层协议，如用以取代 TCP 以加快网页传输的 QUIC 协议^[29]。对于应用层来说，去中心化的网络应用（如区块链^[30]、IPFS^[31]等）在近几年得到了一定的发展，去中心化的网络技术可以应用到多种应用的开发和问题解决上^[32]，同时也在性能和可管可控等多个方面带来了挑战。

此外，云计算作为一种重要的网络基础设施，其发展也将为这些应用提供更好的支持。集中式的云计算由于网络传输和时延瓶颈的存在，将很难满足这些新型应用不断增长的需求^[33]。下一代云计算出现了雾计算、移动边缘计算（MEC）、微云计算（cloudlet）等近端计算模型，有助于分担计算压力，降低网络传输的负担。也出现了志愿计算、无服务器计算、软件定义计算、Multi-cloud、异构计算等新模型和架构^[34]，将一定程度地推动新型网络应用的发展。

网络智能化也是未来的发展方向之一。SDN/NFV、大数据和人工智能等技术的发展为实现网络智能提供了机遇，基于这些技术能够构建满足复杂应用需求与差异化的网络通信基础设施。互联网领域知名学者 David Clark 在 2003 年提出知识平面的概念，从而构建了由知识平面、控制平面和数据平面构成的互联网架构，这种架构为未来网络演进提供了基本概念和结构。未来互联网应该构建精准知识平面，利用大数据技术收集信息，使用人工智能技术挖掘网络业务对网

络资源的需求情况，建立不同时空维度的网络行为模型，揭示网络业务、物理资源与协议各要素的相互作用机理，实现对网络的精准感知；构建智能控制平面，通过人工智能技术对动态差异化业务实现网络资源、体系结构与功能的智能高效自适应适配，进行网络资源的智能调度；构建统一数据平面以及基于软件定义的通信与网络范式、虚拟网络功能实现机制，对融合存储、处理与转发的网络数据平面进行统一资源抽象与灵活高效的实现，从而提升网络在性能、可靠性以及安全性等多个方面随业务需求和网络环境的适应能力。知识平面的概念也在近年得到了进一步扩展，有研究者提出了知识定义网络^[35]的概念，有望为网络智能化的发展注入新的活力。

7 结束语

本文从需求入手，重点调研了 4 种典型的未来网络应用——沉浸式体验应用、物联网应用、触觉互联网应用和智能交通应用对于未来网络能力需求和性能指标。这些新兴未来网络应用对于未来网络的时延、带宽、时延抖动、可靠性、安全性等都提出了不同的要求。通过分析这些应用对网络能力的要求，得出未来网络不仅仅提供简单的数据传输，而将会是一个智能的处理池。它应当提供路由可扩展性和流量可扩展性、支持终端移动性，并提供网络安全和可控性。

对于实际场景下的基本网络性能指标，未来网络应既需要提供一个基本的网络性能，也需要针对不同的应用类型满足特定的需要。时延方面，需要提供超低的时延（<1 ms），还需要保证时延的确定性和高精度。带宽方面，某些应用可能需要 1 Tbit/s 级别的带宽。同时，未来应用也对网络的内生安全性和隐私保护、移动性、极高的可靠性等方面提出了要求。部分应用的指标需求现在的网络还无法满足，但通过调研未来应用的指标和能力需求为未来网络的发展提供了一个更加

清晰的方向。

参考文献:

- [1] 谢高岗, 张玉军, 李振宇, 等. 未来互联网体系结构研究综述[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1109-1119.
XIE G G, ZHANG Y J, LI Z Y, et al. A survey on future internet architecture[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(6): 1109-1119.
- [2] JACOBSON V. Special plenary invited short course: content-centric networking(CCN)[J]. Future Internet Summer School, 2009: 1-35.
- [3] ZHANG L, ESTRIN D, BURKE J, et al. Named data networking (NDN) project[J]. Relatório Técnico NDN-0001, Xerox Palo Alto Research Center-PARC, 2010 (158): 1-27.
- [4] KREUTZ D, RAMOS F M V, ESTEVES VERISSIMO P, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 103(1): 10-13.
- [5] JOSHI K, BENSON T. Network function virtualization[J]. IEEE Internet Computing, 2016, 20(6): 7-9.
- [6] SHI W, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 637-646.
- [7] RANASINGHE N, NGUYEN T N T, LIANGKUN Y, et al. Vocktail: a virtual cocktail for pairing digital taste, smell, and color sensations[C]//the 25th ACM international conference on Multimedia, Oct 17, 2017, Beijing, China. New York: ACM Press, 2017: 1139-1147.
- [8] MANGIANTE S, KLAS G, NAVON A, et al. VR is on the edge: How to deliver 360 videos in mobile networks[C]//the Workshop on Virtual Reality and Augmented Reality Network, Aug 25, 2017, Los Angeles, USA. New York: ACM Press, 2017: 30-35.
- [9] SUN Y, CHEN Z, TAO M, et al. Communication, computing and caching for mobile VR delivery: modeling and trade-off[C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20-24, USA, Kansas City, USA. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [10] GARCIA-LUNA-ACEVES J J, HE D, WESTPHAL C. Network support for AR/VR and Immersive video application: a survey[C]//the 15th International Joint Conference on e-Business and Telecommunications, July 26 - 28, 2018, Porto, Portugal. [S.l.:s.n.], 2018: 1-11.
- [11] CORBILLON X, SIMON G, DEVLIC A, et al. Viewport-adaptive navigable 360-degree video delivery[C]//2017 IEEE international conference on communications (ICC), May 21-25, 2017, Paris, France. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-7.
- [12] RONDAO ALFACE P, AERTS M, TYTGAT D, et al. 16k cinematic VR streaming[C]//the 25th ACM International Conference on Multimedia. New York: ACM Press, 2017: 1105-1112.
- [13] ZHANG L, AMIN S O, WESTPHAL C. VR video conferencing over named data networks[C]// the Workshop on Virtual Reality and Augmented Reality Network. New York: ACM Press, 2017: 7-12.
- [14] MANGIANTE S, KLAS G, NAVON A, et al. VR is on the edge: How to deliver 360 videos in mobile networks[C]// the Workshop on Virtual Reality and Augmented Reality Network. New York: ACM Press, 2017: 30-35.
- [15] ELBAMBY M S, PERFECTO C, BENNIS M, et al. Toward low-latency and ultra-reliable virtual reality[J]. IEEE Network, 2018, 32(2): 78-84.
- [16] XU X, PAN Y, LWIN P P M Y, et al. 3D holographic display and its data transmission requirement[C]//2011 International Conference on Information Photonics and Optical Communications, Oct 21-23, 2011, Jurong West, Singapore. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-4.
- [17] 赵小飞. 低功耗广域网络产业现状及国内市场前景[J]. 信息通信技术, 2017(1): 60-65.
ZHAO X F. Research on current situation and domestic prospect of LPWAN industry[J]. Information and Communications Technologies, 2017(1): 60-65.
- [18] SCHULZ P, MATTHE M, KLESSIG H, et al. Latency critical IoT applications in 5G: perspective on the design of radio interface and network architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 70-78.
- [19] FETTWEIS G P. The tactile internet: applications and challenges[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(1): 64-70.
- [20] AIJAZ A, DOHLER M, AGHVAMI A H, et al. Realizing the tactile Internet: Haptic communications over next generation 5G cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 24(2): 82-89.
- [21] VAN DEN BERG D, GLANS R, DE KONING D, et al. Challenges in haptic communications over the tactile internet[J]. IEEE Access, 2017(5): 23502-23518.
- [22] FETTWEIS G P. A 5G wireless communications vision[J]. Microwave Journal, 2012, 55(12): 24-36.
- [23] ALAM M, FERREIRA J, FONSECA J. Introduction to intelligent transportation systems[M]// Intelligent Transportation Systems. Heidelberg: Springer, 2016.
- [24] BOBAN M, KOUSARIDAS A, MANOLAKIS K, et al. Connected roads of the future: Use cases, requirements, and design considerations for vehicle-to-everything communications[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2018, 13(3): 110-123.
- [25] SESKAR I, NAGARAJA K, NELSON S, et al. Mobility first future internet architecture project[C]//the 7th Asian Internet Engineering Conference, November 9-11, 2011, Bangkok, Thailand. New York: ACM Press, 2011: 1-3.
- [26] ANDERSON T, BIRMAN K, BROBERG R, et al. The NEBULA future internet architecture[C]//2013 Annual Future Inter-



- net Assembly, May 8-10, 2013, Dublin, Ireland. Heidelberg: Springer, 2013: 16-26.
- [27] 刘韵洁, 张娇, 黄韬, 等. 面向服务定制的未来网络架构[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2018:1-8.
- LIU Y J, ZHANG J, HUANG T, et al. Service customized future network architecture[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2018:1-8.
- [28] 朱浩, 项菲. 5G 网络架构设计与标准化进展[J]. 电信科学, 2016, 32(4):126-132.
- ZHU H, XIANG F. Architecture design and standardization progress of 5G network[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 126-132.
- [29] LANGLEY A, RIDDOCH A, WILK A, et al. The quic transport protocol: design and internet-scale deployment[C]//the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. ACM, August 21-25, Los Angeles, USA. New York: ACM Press, 2017: 183-196.
- [30] NAKAMOTO S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system[Z]. 2008:1-9.
- [31] BENET J. Ipfs-content addressed, versioned, P2P file system[J]. arXiv: 1407.3561, 2014:1-11.
- [32] 李董, 魏进武. 区块链技术原理、应用领域及挑战[J]. 电信科学, 2016, 32(12): 20-25.
- LI D, WEI J W. Theory, application fields and challenge of the blockchain technology[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(12): 20-25.
- [33] 周悦芝, 张迪. 近端云计算: 后云计算时代的机遇与挑战[J]. 计算机学报, 2019, 42(4): 3-26.
- ZHOU Y Z, ZHANG D. Near-end cloud computing: opportunities and challenges in the post-cloud computing era[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(4): 3-26.
- [34] VARGHESE B, BUYYA R. Next generation cloud computing: New trends and research directions[J]. Future Generation Computer Systems, 2018(79): 849-861.
- [35] MESTRES A, RODRIGUEZ-NATAL A, CARNER J, et al. Knowledge-defined networking[J]. ACM SIGCOMM Computer

Communication Review, 2017, 47(3): 2-10.

[作者简介]



王凌豪(1996-), 男, 中国科学院计算技术研究所博士生, 主要研究方向为未来网络、网络体系结构。



王淼(1975-), 女, 博士, 中国科学院计算技术研究所副研究员, 中国计算机学会会员, 主要研究方向为未来网络、网络安全。



张亚文(1997-), 女, 中国科学院计算技术研究所硕士生, 主要研究方向为未来网络、网络体系结构。



张玉军(1976-), 男, 博士, 中国科学院计算技术研究所研究员、博士生导师, 中国科学院大学教授, 主要研究方向为计算机网络。