



专题：数据网络技术与应用

新传输层技术

万俊杰, 李泰新

(华为技术有限公司, 北京 100095)

摘要: 未来应用的发展对网络能力提出了新的挑战, 传输层作为衔接应用层和网络层的媒介, 局限于本层提升网络资源利用率已无法满足未来应用的需求。以全息通信为背景, 对未来网络传输的特征进行了分析, 描述了新传输层面向未来应用需要具备的能力, 提出了基于两级调度机制的多路传输层架构, 为迎接未来应用对网络带来的挑战提供了灵活、可扩展的传输模型。

关键词: 全息通信; 两级调度; 传输层

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019225

New transport layer technology

WAN Junjie, LI Taixin

Huawei Technology Co., Ltd., Beijing 100095, China

Abstract: The development of future applications poses new challenges to network capabilities. As a medium for the application layer and the network layer, it is no longer sufficient of improving network resource utilization limited to this layer for future applications. Based on the background of holographic type communication, the characteristics of future network transmission was analyzed, the capabilities that the new transport layer should face for future applications were described, and a multi-transport layer architecture based on two-level scheduling mechanism was proposed. A flexible, scalable transport model was provided to meet the network challenges of future applications.

Key words: holographic communication, two-level scheduling, transport layer

1 引言

网络应用的发展已逐渐跨入新纪元, 未来网络应用开始进入人们的视野, 如全息通信、智慧城市、自动驾驶、增强/虚拟现实以及远程医疗。随着未来应用的发展, 越来越多的互联网用户受

益其中, 应用和用户二者将会进入相辅相成的良性循环阶段, 随之而来的是用户对未来网络应用日益攀升的需求, 最终牵引出对网络能力的全新挑战。例如, 媒体技术的演进经历了从文字、图像、音频、视频、虚拟现实发展到全息的过程。在此发展过程中, 用户的感官体验也由基本的视

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-10-08

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No. 2018YFB1800100)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB1800100)



觉和听觉发展到触觉甚至味觉和嗅觉，其所产生的数据量急剧增大，潜在带宽需求的量级可达到 Tbit/s 级。因此，“大流量”“超高吞吐”是未来网络应用的基本需求，来源于应用持续产生的超大数据量。全息通信作为“大流量”特征的代表应用，同时又具备了自身独特的新特征，如数据多源化等，这些特征对传输层提出了新的要求。为支持全息通信等相似的未来网络应用，传输层需具备如下能力：基于未来网络基础设施的高带宽利用率、配合数据多源化的能力、表达业务策略和需求的能力。

未来全息通信的吞吐需求将会达到十万兆甚至更高的量级：全息通信的采集端是一组视点阵列，由若干相机组成，而相机的数量和采集的分辨率直接影响全息显示的效果。为满足人们对高分辨率、高保真显示质量与日俱增的需求，全息通信采集矩阵将不断扩充相机数量和提高分辨率，同时数据量也将不断攀升。预期网络基础设施也将发展到足以支撑未来网络应用的程度，但是如何发挥充足的物理传输条件一直处于持续研究中，其中，保证足够的吞吐是全息通信的基本保障。在 OSI 参考模型中，传输层负责协助应用使用网络带宽资源，提升吞吐量。因此，未来传输层应该具备为未来应用提供超大吞吐量的能力，充分利用网络资源，保证高带宽利用率。全息通信还具有多源化的特征：全息通信本质上是一种多视点视频流传输的过程，其在采集端产生的多视点视频数据经过压缩编码可被划分为若干视点组，每个视点组可以被看作一个独立的数据源。因此，在发送端，全息通信由若干独立数据源构成；在传输过程中，全息数据由若干独立数据流组成。最后，全息通信需要传输层配合业务需求：当数据存在多源化时，类似于全息直播等时效性较强的流媒体传输会有数据源同步的需求，如显示端需要各数据源同一时间产生的视频帧同时完成传输，进行播放，这需要传输层配合

业务需求进行调控。同时，对于应用来说，数据源间不是一视同仁的，可能存在重要性的差异，这也需要传输层能配合业务需求调整传输策略，以提升用户体验。

本文基于上述未来应用的特征，提出具备两级调度机制的多路新传输层技术，以支持未来应用对超高吞吐和高品质用户体验的需求。假设未来基础网络端到端是普遍具备多接口的，并且在传输过程中存在多条完全不相交物理链路或者网络提供区分真实瓶颈链路的能力，新传输层充分利用多物理链路的带宽叠加能力，同时保证高带宽利用率，确保未来应用的吞吐需求。由于未来应用日趋复杂，用户需求日益严格，传输层在保证高吞吐的基础上也需配合应用层提升用户体验。新传输层的两级调度机制在“一级调度”层面综合流传输情况、数据特征、应用需求等因素，调控数据子流在物理路径的迁移以及不同数据部分在数据子流的分配等，达到如重要数据传输高可靠性、数据子流相互协调的目的。在“二级调度”层面，新传输层实现各子流拥塞控制算法和可靠性保障的独立，配合不同物理路径传输情况和应用对不同类型数据的需求，提供各子流传输的独立控制。对于全息通信，新传输层首先保证物理带宽资源的充分利用，在此基础上，显示端业务应用对数据传输还有额外需求。例如，各采集点同一“周期”的数据尽量同时到达接收端以维持流畅的显示效果以及不同数据子流对显示端的重要性不同。因此，新传输层结合应用需求，通过两级调度分别在宏观和微观上调整数据传输，表达应用期望的传输策略，提升用户体验。

2 全息技术

全息技术是用来记录光线模式的方法，这些模式被再现称为全息图的三维图像。匈牙利物理学家丹尼斯·加博尔于 1947 年发明了全息图，而如今更先进的全息技术开始为个体用户、企业和政

府提供支持^[1]。目前,全息技术朝着两个方向发展:全息显示的视觉质量以及多维度全息体验^[2]。全息显示设备通过全息技术将大尺寸、高分辨率的图像在不同的焦点距离投射到不同的平面上,实现视觉立体效果。随着硬件能力的不断提升以及成本的降低,全息显示向规模更大、成本更低、保真度更高的目标发展。全息显示的采集端是一组相机阵列,称为视点矩阵,通常视角每旋转一度需要7个视点才能满足人眼的基本需求,而人眼的生理极限为每度60个采集视点。因此,未来全息显示要做到完美的视觉质量,需要大规模和高分辨率视点矩阵支持,这将持续产生大量媒体数据。同时,全息显示的发展也不再局限于单一的视觉维度,而是将延伸到人体所有感官。早期计算机控制的触觉手套就可以重现那些不存在的物体的触感,该技术已经在虚拟现实(VR)中用于许多成功的应用程序^[3]。之后,触觉显示器通过使用空气超声波的辐射压力,在没有任何接触的情况下在用户的裸手上产生力,为悬浮在半空中的光学图像增添了触感^[4]。近期,一种利用超声空间调制在空中呈现触觉物体的方法被提出,其使用固定超声波产生空间触觉图像,使得用户能够触摸3D图像而不依赖于振动触觉刺激和传感器反馈^[5]。由此可见,触觉以愈发成熟的状态融入全息技术,提升了全息的维度,未来全息结合嗅觉甚至味觉也不再是空谈。而全息技术每扩张一个维度,就意味着数据量提升一个量级。所以,未来全息在维度数量的增加以及在各维度的深入发展将导致全息通信所承载的数据流急剧增大。并且,全息通信在数据维度上的发展也为网络传输提供了更多发展空间,例如不同级别的信息属性将具有不同程度的可靠性,一种做法是通过属性矩阵封装声音和其他信息并使网络能够感知,使得网络可以选择性地在拥塞的情况下丢弃部分数据并且在对端仍然能够重建信息^[6]。

本文研究的应用场景具备以下特征:

- 存在多数据源,且各数据源对应用的重要性不同,各数据源不同部分的数据的重要性也可能不同,都由应用本身决定;
- 网络层存在多条不相交瓶颈链路供传输层使用,各瓶颈链路的分组丢失、时延等情况存在不同;
- 业务应用所产生的数据量极大,吞吐要求可能超过单路瓶颈链路可用带宽。

基于上述特征,多路传输层协议具备满足该类应用的潜在能力,本节将介绍CMT-SCTP、MPTCP、和MPQUIC的相关背景,并基于应用特征做简要分析。

参考文献[7]和参考文献[8]分别描述了CMT-SCTP和MPTCP的概念和设计原则,两者都采用了“资源池(RP)”机制,多个资源(路径)被认为是单个池化资源,并且拥塞控制关注整个网络而不是单独一个路径。因此,即使仅在同一条路径上发生拥塞,也会限制完整的多路径连接(即所有路径),这避免了多数据流共享同一瓶颈链路的公平性问题,并将流量从更拥挤的路径转移到更少拥塞的路径^[9]。MPQUIC的设计动机在于两方面。

(1) 汇集不同路径的资源,以便为单个连接传输数据^[10]。这对于智能手机等多宿主设备上的大型传输非常重要。当IPv4和IPv6路径的质量不同时,也可以允许双栈主机自动选择最佳路径。

(2) 提升连接故障的抗性,这部分与MPTCP一样,服务于具有无线接口的双宿主主机,如智能手机。总的来说,MPQUIC在单路QUIC的基础上吸收了MPTCP的优势,如带宽聚合、网络切换。在没有数据分组丢失的情况下,虽然单路径TCP和单路径QUIC的性能相似,但MPQUIC优于MPTCP。在有损场景中,MPQUIC也优于MPTCP^[11]。

上述3种多路传输都面向于通过利用多路径



提升单连接传输的能力, 是基于单数据源的, 对于多数据源的数据只能汇聚到单个数据池再分配到多路传输, 无法区分对待各数据源传输。并且, 现有多路传输协议无法区分网络中的不相交瓶颈链路, 也未配合网络层区分瓶颈链路的潜在能力。最后, 上述协议也无法表达应用层需求, 配合业务策略提升用户体验。

3 方案设计

未来应用带来网络数据量的爆炸式增长, 网络基础设施的承载能力固然重要, 同时充分利用链路的传输资源也十分关键。网络协议架构中, 传输层协议主要负责利用网络的带宽资源为应用层提供尽可能高效的数据传输服务。本文立足于未来网络存在若干条不相交物理链路的假设, 提出一种新型多路传输层架构, 旨在实现不相交瓶颈链路的带宽资源叠加, 通过新型传输技术配合应用层传输的需求和策略, 并支持网络层潜在路径规划能力, 为未来应用提供充足带宽资源以及提升应用的用户体验, 如图 1 所示。

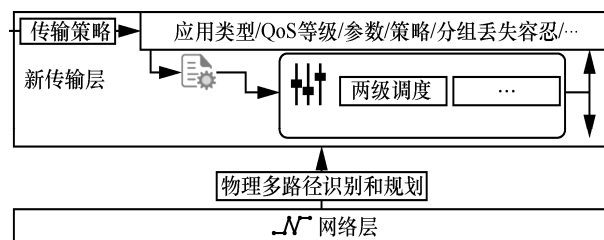


图 1 新传输层架构

3.1 多路传输层两级调度机制

新传输层的核心为一种新型的“两级调度”机制。由于应用数据由若干数据源产生, 数据源之间可能重要性不同, 或者同一数据源产生的数据在不同部分的重要性也不同, 差异化对待不同数据源或不同部分数据能够显著提升用户体验。现有的解决方案多集中在利用应用层做集中控制, 如建立多条数据流, 重要的数据源使用 TCP 传输, 不重要的使用 UDP 传输, 若有其他需求再

单独实现, 定制化十分明显。然而, 这种方式也无法充分提升如多源媒体流的用户体验, 比如无法控制某数据源部分数据的收发, 以至于应用层只能等待传输层数据提交上来才能进行处理, 导致可以舍弃的数据依然占用了传输资源。并且, 在应用层实现复杂控制传输效率低且复杂度高。

两级调度机制是一个作用于数据发送端的架构, 如图 2 所示, 基于网络存在多物理链路感知能力的前提, 为多源数据应用提供高吞吐和高效率的传输层技术。两级调度机制由“一级调度”和“二级调度”两部分组成, 一级调度位于二级调度之上, 是全局数据子流的控制, 二级调度是各数据子流独立的控制, 不依赖于其他子流。

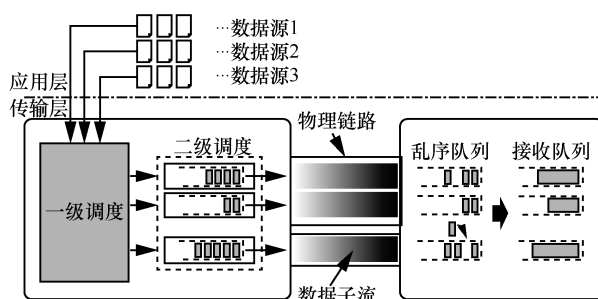


图 2 新型两级调度机制

3.1.1 一级调度

一级调度作为数据子流级别的调控, 负责数据子流在物理路径间的迁移以及基于策略分配应用数据对象至数据子流, 充分利用网络资源实现最优传输效率。

数据子流迁移是一种基于网络路径情况和端侧应用或传输策略的端侧传输层, 进行的将数据子流在物理路径间迁移调整的技术策略。本文认为未来网络架设是具有多物理路径的, 如端侧具备多接口, 或者网络设备具有规划出若干真实瓶颈链路能力的。因此, 新传输层可以充分利用未来网络的带宽资源, 在基于各种真实瓶颈链路的数据流带宽公平性的基础上, 实现多路径带宽叠加。然而, 各物理路径的传输状况由于硬件本身的状况或背景数据流的竞争会发生变化, 而且数

据源的数据量也会发生变化,为保证吞吐最大化需要将数据流分配或调整到相应物理路径传输。同时,数据源的重要性不同,端侧有分配重要数据流至可靠链路的需求,以确保重要数据流的传输可靠性,如接收端传输层尽可能少地出现乱序情况。

如上文所述,数据子流迁移的目的为优化总吞吐以及提升应用的用户体验,二者分别由传输层发送端和接收端主导。一级调度在传输层发端掌握所有数据子流的传输情况,通过分组丢失程度、RTT 的变化、节点反馈的队列深度等感知各物理路径的传输能力,并且由应用业务或自身统计得知数据量的大小。最后,一级调度基于算法综合各类信息输出以最大化吞吐为目标的数据子流分配策略。例如,网络实际存在 3 条真实瓶颈链路 $\{P1, P2, P3\}$ 且被端侧感知,发送端有 3 个数据源 $\{S1, S2, S3\}$ 产生数据,且传输层建立了 3 条数据子流 $\{F1, F2, F3\}$ 。数据源与子流存在多种对应关系,如一对一的关系,即一个数据源仅在一条子流中传输;也存在多对多的关系,即一个数据源的数据被拆分至多条子流中传输。本例仅考虑数据源与子流一对一的关系,假设数据源以等价的形式按序分配到子流上,则有对应关系 $\{(S1, F1), (S2, F2), (S3, F3)\}$ 。初始状态下,一级调度缺乏决策信息,默认以等价的方式将数据流分配给物理路径,则对应关系为 $\{(F1, P1), (F2, P2), (F3, P3)\}$ 。当传输一段时间后,一级调度经过统计发现子流 F1 的平均窗口较小、RTT 增大趋势明显、且分组丢失事件频繁,但是 F3 情况相反,RTT 平稳且无分组丢失事件发生,同时发送端应用层告知一级调度 S1 将要传输的数据量很小。由于当前 F1、F3 分别在 P1 与 P3 上传输,且 S1 对应于 F1,一级调度认为 P1 链路状况较差, P3 链路状况良好并且有剩余带宽可以使用。为提升总吞吐,一级调度倾向于将 F1 从 P1 迁移至状态良好的 P3,其基于自身决策算法得出量化结果,产出新的数据

流与物理路径对应关系 $\{(F2, P2), ((F1, F3), P3)\}$ 。当接收端传输层基于用户体验主导数据流迁移时,接收端应用层感知各数据流的重要性并通告给传输层,接收端传输层同时根据各数据子流的分组丢失或乱序情况推测所在链路的状态,决策算法还允许应用表达关于子流的其他请求,最终综合考虑各因素输出子流与物理路径对应结果。例如,当前对应关系为 $\{(F1, P1), (F2, P2), (F3, P3)\}$,接收端传输层得到上层通告得知 F1 重要性远高于 F3,要求完全可靠的传输,同时接收端传输层发现 F1 时常出现分组乱序到达,经过算法推测 F1 所对应的 P1 链路状况一般,而 F3 对应的 P3 状况良好。接收端传输层综合应用需求、链路状态以及其他参数,通过决策算法输出优化的子流分配策略 $\{(F1, P3), (F2, P2), (F3, P1)\}$,将可靠性要求高的 F1 迁移至状态良好的 P3 进行传输,将重要性低的 F3 迁移至状态一般的 P1 传输,该决策可通过指令反馈给发送端的一级调度实现迁移。当以提升总吞吐和用户体验为目标的决策算法所产生的决策结果发生冲突时,一级调度可以通过一个加权算法进行最终决策的调整。

数据对象分配是一种基于传输层对应用数据对象的边界有基本感知的基础上,通过一级调度实现的,为满足一定业务需求或传输需求的技术过程。关于具备多数据源的应用,其数据特征较为复杂,当前使用广泛的传输层协议无论单路或多路都只能满足基本的传输需求。现有多路传输协议如 MPTCP、MQIC 等是面向单源数据应用的,旨在提升传输能力,如基于多接口终端的网络垂直切换以充分利用带宽资源保证数据传输流畅,并未考虑多源数据的特征。如前文所述,多源数据作为一个独立应用产生的数据和单源数据一样需要被当作一个整体在接收端按时间轴被使用,同时,各数据源产生的数据本身也具有独立性,如可以被拆分为若干数据对象,各对象对应用的意义不同。因此,对于多源数据来说,除了



需要提升整体吞吐之外, 还需要考虑多源数据传输的同步性以及结合数据特征进一步提升传输效率的空间。

数据对象分配机制通过应用层配合, 在传输层感知数据对象的边界和其他特征, 如重要性、优先级、分类等, 并基于策略将数据对象分配至已有数据子流内传输, 突破“同源同溯”的限制。例如, 全息直播要求各视点同时刻的视频帧在显示端同时播放, 假设存在 3 个视点 $\{V1, V2, V3\}$, 每一个视点对应一条数据子流, 则一共 3 条子流 $\{F1, F2, F3\}$, 且对应关系为 $\{(V1, F1), (V2, F2), (V3, F3)\}$ 。在一段时间内, 各视点按序产生 3 个视频帧且大小相同, 在传输第一个视频帧时各数据子流带宽相等, 因此接收端同时接收完成 3 个视点的第一个视频帧顺利播放; 此时, 发送端算法发现下一个视频帧的传输过程中, $F3$ 的可用带宽将变为零, 其他子流带宽稳定不变, 并且 $V1$ 和 $V3$ 的第二个视频帧大小将减小为之前的一半。若不实施数据块分配, 则 $V3$ 的第二个视频帧无法顺利送达或者产生较大时延, 然而进行数据块调度后, $V3$ 的第二个视频帧可以调整到 $F1$ 进行传输, 整体传输没有产生额外时延, 各数据流的传输耗时相同保证了同步性, 即播放端在最短整体耗时间内接收到所有视点的同时刻视频帧数据。除了同步需求, 全息直播作为一种多视点视频流应用, 各视点产生的数据和常规视频流一样被压缩为 I 帧、P 帧、B 帧 3 种类型的视频帧, 其中 I 帧是关键帧要求无损, 而 P 帧和 B 帧数据通过应用的部分恢复能力可以有不同程度的分组丢失情况。假设 3 条子流 $\{F1, F2, F3\}$ 对应的 3 条物理路径 $\{P1, P2, P3\}$ 传输状态不平衡, 导致 $F3$ 分组丢失严重而 $F1$ 状态良好, 若依旧采取如 $\{(V1, F1), (V2, F2), (V3, F3)\}$ 的视点与数据子流一一对应的关系, $F3$ 糟糕的传输状态会使得 $V3$ 的 I 帧发生分组丢失影响业务性能, 而一级调度相关算法通过数据对象分配机制可以使各视点的 I 帧拆分出来全部放在状态良好

的 $F1$ 进行传输, 其余帧根据分组丢失容忍度分配到不同子流上传输。

一级调度实现的数据子流迁移和数据对象分配机制基于物理多路径的传输能力, 使能“流”级别和“块”级别的调度, 最大化满足吞吐和应用等多维度的多重需求。

3.1.2 二级调度

二级调度是各数据子流自身的调控, 负责决定自身的拥塞控制算法、传输可靠性等控制机制。由于不同物理路径的传输能力和状况不同, 对数据子流使用单一的拥塞控制算法必然限制传输能力, 比如随机分组丢失发生频繁的链路使用基于分组丢失的拥塞控制算法将极大地限制带宽利用, 这时需要二级调度将该数据子流的拥塞控制算法调整为基于时延的算法, 以提高带宽利用率。并且, 当某条数据流传输的是次要数据时, 该数据流可以调整为不可靠传输, 降低头阻塞带来的影响, 提升传输效率。例如, 某全息直播应用存在 3 条子流 $\{F1, F2, F3\}$ 正在进行数据传输, 并且在传数据经过一级调度分配, $F1$ 传输视频 I 帧、 $F2$ 传输 P 帧、 $F3$ 传输 B 帧。此时发送端通过网络节点反馈或端侧信息猜测 $F3$ 所在的物理路径随机分组丢失频繁, 导致默认使用的 Reno 拥塞控制算法(基于分组丢失的拥塞控制算法)平均窗口偏小, 带宽利用率很低, 因此该数据子流的二级调度机制将拥塞控制算法调整为基于时延的拥塞控制算法如 BBR 或 Vegas, 避免链路分组丢失的影响。同时, 接收端传输层在接收数据时通过应用得知 $F3$ 的数据是视频 B 帧, 允许分组丢失, 为了提升传输效率决定将 $F3$ 的传输可靠性改为不可靠传输, 则接收端传输层通过返回发送端的数据分组或指令告知发端调整可靠性, 发送端调整命令后将相应数据流的传输可靠性机制进行更新, 这样收发两端相互配合实现 $F3$ 的不可靠传输, 而 $F1$ 、 $F2$ 依旧维持可靠传输。当接收端应用收到缺失的 B 帧数据时, 利用自身回复能力确保数据完

整, 保证播放质量和流畅度。

3.2 应用数据特征表达能力

在描述两级调度机制时, 本文有提到传输层需要有感知数据边界的能力, 而不像传统传输层只感知字节流或数据分组。因为某些应用如流媒体应用和网页内容具备鲜明的数据对象特征, 且数据对象类别、重要性、优先级等特征都不同, 传输层可以使能端侧对不同对象进行差异化处理, 提升传输能力。

首先, 新传输层通过应用层配合, 感知数据分类和对象边界, 如视频流中视频帧的传输顺序可能为 IBPBBB, 若发送端一级调度未进行数据对象的分配或只进行部分分配, 那么一条数据子流传输多种视频帧, 甚至一条数据流对应一个视频视点产生的数据。这时, 若要使能 I 帧可靠传输而 B 帧不可靠传输, 即“部分可靠”传输, 则需要传输层识别数据对象的类型, 进行差异化分组丢失控制, 而识别的方式有多种, 如数据分组标识或端侧维护数据对象与地址空间的对应关系表。同时, 同一类别的数据对象可能连续存在, 如视频流中的 B 帧, 而接收端应用不希望 B 帧连续丢失, 因此传输层也需要区分同类型的不同数据对象为传输控制提供更多的操作空间。其次, 发送端传输层也有主动标识数据对象或数据分组优先级的需求, 能配合部分可靠的传输机制, 实现差异化的概率性分组丢失。例如, 对于连续的视频帧 B 帧, 发送端应用设定每 3 个 B 帧为一组, 在一组内 B 帧优先级依次降低, 且端侧已经交互好不同等级对应的分组丢失容忍程度, 则接收端对不同优先级的 B 帧实施不同程度的可靠性保障。

3.3 新传输层部署条件

由于新传输层技术在网络存在物理多路径的环境下发挥最大优势, 所以理想的物理环境为主机具备多接口, 链路具备不相交链路或能通过网络设备规划出多路径。若网络不具备物理多路径,

“两级调度”的带宽叠加能力被单路瓶颈限制, 仅能发挥多数据流传输的调控的能力。并且, 主机需完全部署新传输层技术的协议模块, 使得内核适配协议的运行。部署的主要挑战来自于网络环境的配合, 如今主机多接口在手机终端 Wi-Fi 和移动通信接口上实现, 其他终端环境多为单接口, 而且网络通信共享骨干网资源, 在大网设备实现多路径规划或建设新网都需要时间和成本。

上文所描述的传输层携带的数据信息只是一部分, 实际需要考虑业务应用的需求做定制化, 本节旨在提供一种启发性的思路, 表达未来应用对新传输层提供丰富能力的期望。核心思想仍然是主张传输层不应该仅仅局限于提升带宽利用率, 还应为复杂的未来应用提供可扩展的传输支持。

4 结束语

本文从未来网络应用的发展出发, 分析其对未来网络能力的挑战, 牵引出未来网络的需求。大流量作为主要需求又以全息通信为首要代表, 所以本文从全息通信出发, 抽象出部分未来网络应用的数据特征, 如高带宽利用率、数据多源化、配合应用策略, 然后分别对这 3 个特征简单展开, 描述了这些特征出现的原因, 最后概括了新传输层技术的技术框架和总体方案。

在背景部分, 本文先介绍了全息技术的背景, 简要描述了其发展过程, 并对未来全息通信的数据形态和数据量进行了展望。随后, 本文分析了常用的多路传输协议, 如 CMT-SCTP、MPTCP 和 MPQUIC, 认为这些多路协议的设计宗旨未完全考虑未来网络应用的新数据特征, 无法满足未来传输的需求。

在技术方案部分, 本文首先简单描述了新传输技术基于的未来网络背景, 对新传输技术的总体架构和技术组成做了概括, 主要包括核心机制“两级调度”和应用层数据表达能力两部分。随后



本文详细介绍了“两级调度”框架中的“一级调度”部分和“二级调度”部分，其中“一级调度”部分具体为数据子流迁移的过程和数据块分配的过程，“二级调度”为子流独立控制的部分，本文列举了拥塞控制算法调整和传输可靠性变更的例子具体说明运作机制。

本文为基于未来网络应用的新传输层提供一种思考方向，并提出部分可行技术方案作为启发，对未来研究所做的技术补充十分友好，并且现存技术方案的具体算法实现也是可以进一步研究的方向。本文所提到的未来网络应用的需求和挑战是基于当前研究成果的，随着应用发展可能会能发生更新，所以，新传输层协议或者技术的设计应该是具备灵活性和可拓展性的，以充分应对需求的更新和新需求的出现。

参考文献：

- [1] ELMORSHIDY A. Holographic projection technology: the world is changing[J]. Journal of Telecommunications, 2010, 2(2): 104-112.
- [2] ABBASI M, VASSILOPOULOU P, STERGIOULAS L. Technology roadmap for the Creative Industries[J]. Creative Industries Journal, 2017, 10(1): 40-58.
- [3] JONES M R E. Haptic hologram[C]//Fifth International Symposium on Display Holography, July 18-22, 1994, Lake Forest, United States. Washington: International Society for Optics and Photonics, 1994: 444-448.
- [4] HOSHI T, ABE D, SHINODA H. Adding tactile reaction to hologram[C]//RO-MAN 2009-the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, Sep 27-Oct 2, 2009, Toyama, Japan. Piscataway: IEEE Press, 2009: 7-11.
- [5] INOUE S, MAKINO Y, SHINODA H. Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram[C]//2015 IEEE World Haptics Conference (WHC), Jun 22-25, 2015, Chicago, United States. New York: IEEE Press, 2015: 362-367.
- [6] ITU-T. Towards a new internet for the year 2030 and beyond: 13[S]. 2017.
- [7] IETF. Load sharing for the stream control transmission protocol (SCTP)[S]. 2019.
- [8] IETF. TCP Extensions for multipath operation with multiple addresses, draft-ietf-mptcp-multiaddressed-09[S]. 2012.
- [9] IETF. Comparison of multipath TCP and CMT-SCTP based on intercontinental measurements[C]//2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Dec 9-13, 2013, Atlanta, USA. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1360-1366.
- [10] WISCHIK D, HANDLEY M, BRAUN M B. The resource pooling principle[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(5): 47-52.
- [11] DE C Q, BONAVENTURE O. Multipath quic: Design and evaluation[C]//the 13th International Conference on emerging Networking Experiments and Technologies, Dec 12-15, 2017, Incheon, Korea. New York: ACM Press, 2017: 160-166.
- [12] 祝谷乔, 宋皓. MPEG-DASH 与 HLS 流传输技术的比较分析[J]. 电信科学, 2015, 31(4): 29-33.
- ZHU G Q, SONG H. Comparison and Analysis of MPEG-DASH and HLS Adaptive Streaming Delivery Technology[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(4): 29-33.

[作者简介]



万俊杰（1992—），男，华为技术有限公司工程师，主要研究方向为传输技术、流量工程等。



李泰新（1990—），男，博士，华为技术有限公司工程师，主要研究方向为网络架构、路由协议、网络服务、卫星网络等。