



研究与开发

端网协同的传输层自适应创新框架设计

朱龙薇¹, 蒋胜¹, 饶明仨², 顾明²

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876;

2. 咪咕文化科技有限公司, 北京 100043)

摘要: 在现有分层网络体系结构下, 传输层只能通过层间接口为上层应用提供无差别的端到端传输服务, 缺乏根据应用传输需求和网络状态进行自主调整的能力。为此, 以提高端侧传输层对网络和应用传输需求的感知与协同能力为目标, 聚焦面向全场景的通用传输层自适应优化设计, 使传输层能够提供灵活、高质量的传输服务。讨论了传输层在感知应用传输需求和网络状态方面的能力拓展途径, 并在此基础上提出一种创新的端网协同传输层自适应框架。该框架具备根据应用传输需求和网络状态进行自适应协议选择与配置的能力, 可增强传输层在复杂应用场景和异构网络环境下的灵活适配性, 更好地适应并推动新一代通信系统和网络的发展。

关键词: 传输层协议; 自适应; 端网协同; TCP; UDP; QUIC

中图分类号: TP393.04; TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025218

End-network-collaborative and self-adaptive optimization for transport layer

ZHU Longwei¹, JIANG Sheng¹, RAO Mingquan², GU Ming²

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Migu Culture Technology Co., Ltd., Beijing 100043, China

Abstract: Under the existing layered network architecture, the transport layer is only able to provide undifferentiated end-to-end transmission services to upper-layer applications through inter-layer interfaces, lacking the capability to autonomously adjust according to application requirements and network conditions. To address this, the focus is on the adaptive optimization design of the transport layer for full-scenario applications, with the goal of enhancing the perception and coordination capabilities toward network and application transmission demands, was conducted, enabling the transport layer to provide more flexible and high-quality transmission services. Approaches for extending the transport layer's ability to perceive application transmission requirements and network status were discussed. Based on this, an innovative adaptive transport layer framework with end-to-network coordination capability was proposed.

收稿日期: 2025-05-22; 修回日期: 2025-09-16

通信作者: 蒋胜, shengjiang@bupt.edu.cn



This framework was designed to adaptively select and configure protocols based on application transmission needs and real-time network conditions, thereby improving the transport layer's flexibility and adaptability in complex application scenarios and heterogeneous network environments. Ultimately, it was intended to better support and promote the development of new-generation communication systems and networks.

Key words: transport layer protocol, self-adaptive, end-network-collaborative, TCP, UDP, QUIC

0 引言

传输层是 OSI 网络体系结构中的第 4 层，主要通过传输层协议为上层应用提供端到端的传输服务。用户数据报协议（user datagram protocol, UDP）和传输控制协议（transmission control protocol, TCP）是最传统、应用最广泛的两类传输层协议。TCP 是一种面向连接、基于字节流的协议，并提供重传、流量控制和拥塞控制等可靠性机制；UDP 仅提供无连接的、尽力交付的端到端数据传输服务。随着底层网络技术的发展和应用的日趋多样化，针对不同传输需求的传输层协议相继被提出，如数据报拥塞控制协议（datagram congestion control protocol, DCCP）、流控制传输协议（stream control transmission protocol, SCTP）和快速 UDP 网络连接（quick UDP Inter-

net connections, QUIC）等。主流传输层协议对比见表 1。其中，DCCP 提供了一种拥塞控制框架，能在兼顾实时性的同时满足上层应用的拥塞控制需求；SCTP 则进行了多流、多宿主及安全拓展，在一定程度上规避了 TCP 存在的队头阻塞、移动性支持和安全性不足等问题。尽管相对 TCP 和 UDP 来说，DCCP 和 SCTP 都有了一些改进和优化，但是由于传输层骨化等，它们的应用仅限于信令传输等特定场景，并没有得到广泛部署，当前传输层的主流协议仍为 TCP 和 UDP。QUIC 的出现激起了学术界和工业界对传输层协议新的研究热情。作为基于 UDP 的可靠传输协议，QUIC 在连接管理、安全性等方面的特性有效解决了 TCP 在不同网络环境中（特别是弱网条件下）面临的一些问题。其用户态实现特性，使其更易于部署和更新，因此获得了广泛的关注和

表 1 主流传输层协议对比

协议	RFC	主要机制	优势	不足	实现
UDP	RFC 768 ^[1]	面向数据包，尽力交付，无连接，不可靠	提供高实时性的端到端传输服务	不提供可靠性；容易被防火墙等中间件拦截	操作系统内核
TCP	RFC 9293 ^[2]	面向数据流，可靠，具有面向连接、超时重传、拥塞控制等机制	提供可靠性的端到端传输服务	实时性低；连接不支持迁移；存在队头阻塞问题	操作系统内核
DCCP	RFC 4340 ^[3]	提供一种拥塞控制框架，但不可靠	保持高实时性的同时，提供拥塞控制	不可靠；实现在内核，不易部署更新	操作系统内核
SCTP	RFC 9260 ^[4]	可靠，面向连接，提供拥塞控制、多流、多宿主等机制	高可靠性；多流特性缓解了队头阻塞问题；多宿主机制允许冗余网络路径之间的透明故障转移；避免了 TCP 中存在的 SYN 洪泛攻击	实现在内核，不易部署更新	操作系统内核
QUIC	RFC 9000 ^[5]	基于 UDP，面向连接，具有超时重传、拥塞控制等可靠性机制，具有强制安全性、多流抽象、0-RTT/1-RTT 连接建立等机制	可靠性、安全性高；在用户空间实现，易于部署更新；连接建立时延低；支持连接迁移；多流抽象缓解了队头阻塞问题；在弱网环境中，相对 TCP 具有性能优势	CPU 占用率高；基于 UDP，容易被防火墙等中间件拦截；在高带宽、低 RTT 等网络环境中，性能增益相对较小；连接迁移机制和负载均衡设备转发、进程选择存在冲突；无损升级面临挑战	用户空间

应用。目前,UDP 仍是实时应用的首选,TCP 和 QUIC 则是可靠数据传输服务的主要选择。作为 TCP 的替代而被设计的 QUIC,相对来说具有更低的传输时延、更强的抗弱网能力,在丢包率高、低带宽、链路质量波动大的弱网环境中表现优异,但在网络条件较好的环境中其性能增益相对有限。

传输层作为端到端传输服务质量的提供者,是影响应用数据传输性能的关键环节,长期以来受到学术界和工业界的广泛关注。目前,传输层优化研究主要围绕两个方向展开:(1)在 TCP/IP 体系架构下,对特定场景中的传输层协议及算法进行有限优化,如对主流传输层协议的功能增强、拥塞控制算法的优化以及多路径拓展等;(2)对传输层进行能力拓展,如端网协同优化、跨层优化等。然而,现有优化方案基本上是针对特定场景和局部问题,相对独立且较为零散,尚未形成系统化的体系架构,也缺乏通用性和普适性。

随着应用传输需求与网络环境日益复杂,传输层面临的挑战也愈发多样。然而,由于设计理念与协议、算法的局限性,不同传输层协议仅适用于特定场景,难以全面适配多样化的应用需求和动态变化的网络环境。在无线网络等波动大、稳定性差的环境中,常常会出现由传输层能力与网络链路质量不匹配所引发的传输质量下降,从而影响用户体验。本文旨在开展面向全场景、通用的传输层自适应优化研究,提出一种能够根据网络状态和应用传输需求进行自适应调整的传输层框架。该框架通过对传输层能力进行自适应拓展,实现端侧传输层对网络环境与传输需求的及时感知与自主适配,从而为上层应用提供灵活、高质量的传输服务。

1 传输层优化需求和能力拓展

受限于 TCP/IP 的层间隔离及端侧运行的特性,传输层缺乏对上层应用需求与网络状态的感

知能力,只能根据设定的协议和算法进行端侧发送行为的调控。拓展和提升传输层对应用传输需求和网络状态的感知能力,是进行传输层自适应调整和优化的前提和核心。本节将进行传输层应用传输需求感知和能力拓展、网络状态感知和能力拓展以及传输层自适应优化需求和能力拓展的讨论。

1.1 应用传输需求感知需求和能力拓展

对于现有传输层来说,应用需求往往是不可见的。传输层仅能向上层应用提供传输层协议的调用接口,并基于所选协议提供相应的传输服务。若传输层能够识别和理解应用的特定传输需求,并据此进行自适应调整以提供差异化的传输服务,则有助于提升传输服务质量和用户体验。文献[6]在 QUIC 的基础上设计了一种能够感知应用截止时间的协议,即截止时间感知传输协议(deadline-aware transport protocol, DTP)。DTP 能够根据应用告知的优先级、截止时间、依赖关系等属性,对数据块的发送进行综合调度,从而优先保障高优先级的数据块在截止时间前到达,并避免重传已经超过播放截止时间的数据包。文献[7]则在多路径 QUIC (multipath QUIC, MP-QUIC) 的基础上设计了一种能够感知截止时间的多路径协议,即截止时间感知多路径调度器(deadline-aware multipath scheduler, DAMS)。DAMS 将数据块的截止时间作为数据包路径调度的重要因素,并宣称其性能相较现有多路径解决方案有 41%~63% 的提升。文献[8]在套接字接口中引入“套接字意图”增强机制,允许应用程序表达其对通信模式的需求和偏好。近年来,以“先理解、后传输”为核心的语义通信更关注应用数据的实际信息和语义内容。例如,文献[9]将包含关键语义信息的特征数据定义为“共性特征”,将包含非关键语义信息的特征数据定义为“个性特征”。

然而,现有的 TCP/IP 网络协议栈采用严格的分层结构,各层仅负责特定功能,并通过标准化



接口与相邻层通信。这种分层设计虽然简化了协议的开发和维护，但也使得各层之间缺乏信息交互和协同工作能力。这种层间隔离也为传输层感知应用数据的传输需求带来了挑战。一般而言，应用传输需求的感知可通过两种途径实现：(1) 设计面向应用和传输层的应用数据传输需求传递接口，并定义应用需求表示方法，允许应用主动通过接口向传输层表达其数据传输需求。例如，可在已有暴露给应用的传输层或相关协议的调用方法/函数的基础上增加时延限制、可靠性、优先级等与传输需求相关的可选项。(2) 不要求应用告知，而是由传输层通过应用行为、应用数据流量等特征主动感知、挖掘相关需求。例如，构建应用数据流类型等特征和传输需求的匹配规则或知识库。前者不仅需要传输层的革新，还要求应用配合完成数据传输需求的提取和传递，难以实现大规模部署与应用；后者虽然不需要应用的配合，但由于传输层可获取的应用信息较少（特别是在应用数据加密的情况下，基本上只能获取应用层协议包头信息），这对传输层的感知和提取能力提出了较高的要求。研究并设计一种能够既易于实现，又能最小程度甚至不需要修改协议栈和应用的传输需求感知方法，是实现传输层自适应优化的重要基础，也对传输层更好地适配应用多样化、语义感知的网络通信系统具有重要意义。

1.2 网络状态感知需求和能力拓展

当前，传输层一般由发送端基于已发送数据包或专门的探测包的确认和丢失信号，统计丢包率、带宽和往返时延（round-trip time, RTT）等指标，以估计或预测网络拥塞状态，并据此指导拥塞控制等机制的调控行为。除了依赖传输层协议的确认机制，还可以在接收端添加额外的反馈机制，用于收集并反馈包括RTT、丢包率和抖动等反映实时传输协议（real-time transport protocol, RTP）数据包分发质量的指标。不过，这种

依赖端侧的预测与估计方法存在一定的滞后性，也难以及时准确地感知网络状态的变化，这是端侧传输层固有的能力缺陷。

受限于端侧视角，传输层对网络状态的评估往往较为粗糙、不准确。端网协同机制能够在一定程度上拓宽传输层的网络状态感知能力。例如，基于网络反馈的显式拥塞通知（explicit congestion notification, ECN）^[10]允许端侧传输层及时感知真实网络状态的变化，是经典的端网协同拓展；低时延、低损耗、可扩展吞吐量（low latency, low loss, and scalable throughput, L4S）^[11]则基于增强的ECN和主动队列管理（active queue management, AQM），提出了一种端网协同的低时延、低拥塞丢包的可靠拥塞控制框架；Zhuge^[12]是一种基于无线接入点的网络反馈方案，其会根据数据包的到达情况进行拥塞预测和反馈，并将信号反馈路径与拥塞路径进行解耦，从而提升网络状态反馈的效率。然而，此类方法通常需要网络设备支持，特别是在网络管道化的趋势下，其大规模部署仍面临一定的挑战。

此外，链路层、物理层观测到的误码率、信号强度等链路质量参数较为真实地反映直连链路的状况。端侧传输层可以通过主动感知链路状态、估计与预测链路参数，增强对网络状态的感知能力，并进一步动态调整传输层算法与参数，实现更高效的资源利用和传输性能提升。例如，可以基于链路层的重传信息^[13]和物理层的信号强度^[14]判断链路通断情况，从而及时调整多路径协议的调度选择和资源分配策略；利用链路误帧率等指标估计链路时延和带宽^[15]，以辅助传输层拥塞控制算法的拥塞判断和窗口调整。将链路质量参数作为网络状态评估的输入，有助于提升端侧估计的准确性。然而，受限于协议栈的层间隔离，在不过多修改协议栈的前提下，传输层链路质量参数收集通常难度较大，但在特定场景下，仍有部分底层观测信息能够通过特定接口函数向

传输层暴露。例如, IEEE 802.11 系列协议所定义的信息管理库 (management information base, MIB) 支持直接读取链路层和物理层参数^[16], 包括反映传输失败帧数的 dot11FailedCount、反映重传成功的帧数 dot11retrycount、反映因 FCS 校验序列错误而丢弃帧数的 dotFCSErrorCount、反映未接收到 ACK 帧确认帧数的 dot11ACKFailureCount 等^[16]。

1.3 传输层自适应需求和能力拓展

在现有网络体系下, 传输层只能依赖协议栈中的协议为应用数据提供限定的传输服务。即使协议栈中包含了多种传输层协议, 上层应用中特定类型的应用数据传输也只能使用一种传输协议。然而, 单一的传输协议并不能完美适配所有网络环境。例如, UDP 适用于对实时性要求较高的应用场景, 但无法保证传输的可靠性, 当丢包率较高时, 其传输质量将受到严重的影响; TCP 具有较高的可靠性, 但也不可避免地会引入额外的时延, 尤其是在不稳定的网络环境中, 如在不稳定的无线链路中, 节点可能因掉线而需要频繁重建连接, 从而引入更多的时延开销^[17]; 由于在网络拥塞和丢包检测方面使用了更精细的算法, 因此 QUIC 相对 TCP 具有更强的抗丢包能力, 但 QUIC 的强制安全机制会引入额外的 CPU 开销, 文献[18]宣称当网络流量较大时, 其 CPU 占用率能达到同等条件下的 3.5 倍。

对上层应用来说, 传输层不具备自主性, 只能使用应用选择或预先配置的协议和算法, 而无法根据网络状态自主调整, 也不能主动为同一传输层会话上具有不同传输需求的应用数据提供差异化的传输服务。此外, 实现和作用在端侧的传输层只能通过观测丢包和时延等指标对网络状态进行估计和预测, 并按照预先选定的协议和算法调整端侧发送行为。由于缺少对真实网络情况的感知与适应能力, 在多变、不稳定的无线网络环境中, 常常会出现由传输层协议性能表现与网络

链路质量不匹配所造成的传输质量下降的状况, 从而影响用户体验。

在特定时延和带宽条件下, QUIC、TCP、UDP 在不同丢包率下的带宽利用率 (带宽利用率 = $\frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T \frac{R_t}{B_t}$, 其中 R_t 为第 t 次采样时刻的接收速率, B 为链路最小带宽, T 为观测采样总次数) 如图 1 所示。TCP 和 QUIC 都对丢包敏感, 即使少量丢包也会引起两者链路利用率的急剧下降, 而 UDP 的带宽利用能力在低丢包场景中则相对稳定, 显然 UDP 对要求非严格可靠的应用数据传输来说更有性能优势。整体而言, QUIC 相对 TCP 具备较好的抗弱网能力; 在低时延和极低丢包的稳定网络场景下, TCP 的带宽利用能力与 QUIC 基本相当。对于可靠性要求较高的应用, 在接近无损的稳定网络条件下, 考虑 QUIC 的 CPU 占用开销大等因素, TCP 的整体性能可能更优; 而在高丢包的弱网条件下, 使用 QUIC 则更有利于保障数据传输的质量和效率。手机等移动设备经常需要经历从低时延、低丢包率的稳定室内网络移动到如地铁、电梯等高丢包率、高时延的弱网场景, 若端侧传输层具备及时感知网络条件变化并进行自适应调整的能力, 则能够从 TCP 切换到 QUIC, 从而为其上层业务提供更好的抗弱网能力支持。

总的来说, 由于对应用传输需求和网络状态感知能力的缺失, 传输层只能提供固定的、无差别的端到端传输服务, 并不具备根据应用传输需求和网络环境进行自适应调整的能力。为提升传输层对日益多样化的网络环境和应用需求的适应能力, 特别是在游戏社交、元宇宙等新兴应用场景迅速发展的当下, 有必要对传输层进行包括协议、算法以及参数等在内的自适应能力优化, 并进一步关注端侧传输层和网络及其设备的自适应协作, 例如路径选择、分段代理等。此外, 近年来语义通信逐渐兴起, 对上层网络架构提出了新的要求和挑战。区别于传统的不关注数据语义的



比特传输通信, 语义通信首先会根据通信意图对通信数据进行语义提取, 并按关键程度对提取出的语义信息进行区分, 只传输或重点传输关键语义信息, 以压缩传输数据量, 从而提升通信效率和质量。具备自适应能力的传输层将能够更好地支持语义通信进行数据差异化传输的需求, 语义通信也可以为传输层的自适应调整提供基座支撑。

目前, 已有少量关于该领域的研究。例如, 文献[19]基于XGBoost算法构建了最优拥塞控制算法的预测模型, 并利用eBPF (extended Berkeley packet filter) 技术实现了运行时的动态算法切换; 文献[20]提出了一种基于RTT变化情况判断是否触发传输层协议切换及行为调整的方法。整体来说, 当前学术界围绕传输层自适应优化的相关研究仍相对有限, 且较为零散, 尚未形成系统化的解决方案。本文将在后续内容讨论如何基于应用传输需求和网络状态感知能力的增强, 构建一种科学的传输层自适应能力拓展框架。

2 端网协同的传输层自适应框架

2.1 整体设计

为实现传输层的自适应优化和能力拓展, 本节提出一种创新的端网协同传输层协议自适应框架。该框架能够根据应用数据传输需求与实时网络状态, 为应用选择合理的传输层配置, 并在运行时实现实时、无感知的协议切换或参数配置。端网协同传输层自适应框架如图2所示。

该框架集成了应用传输需求感知模块、网络状态感知模块和传输层自适应配置模块3个功能模块。其中, 应用传输需求感知模块主要负责感知应用数据的传输需求, 包括但不限于可靠性需求和实时性需求, 并生成应用数据传输需求。网络状态感知模块包括权重参数生成子模块、网络状态参数监控子模块和网络状态评估子模块。权重参数生成子模块依据应用传输需求, 确定各网络状态参数在评估中的权重; 网络状态参数监控子模块动态采集诸如时延、丢包率、带宽等反映网络状态的指标; 网络状态评估子模块则基于监测到的各评估指标和生成的权重参数, 对网络状态进行评估, 并将结果反馈至传输层自适应配置模块。传输层自适应配置模块需要在综合考虑应用数据传输需求和实时网络状态的基础上, 选择和配置最合理的传输层协议、算法及相关参数

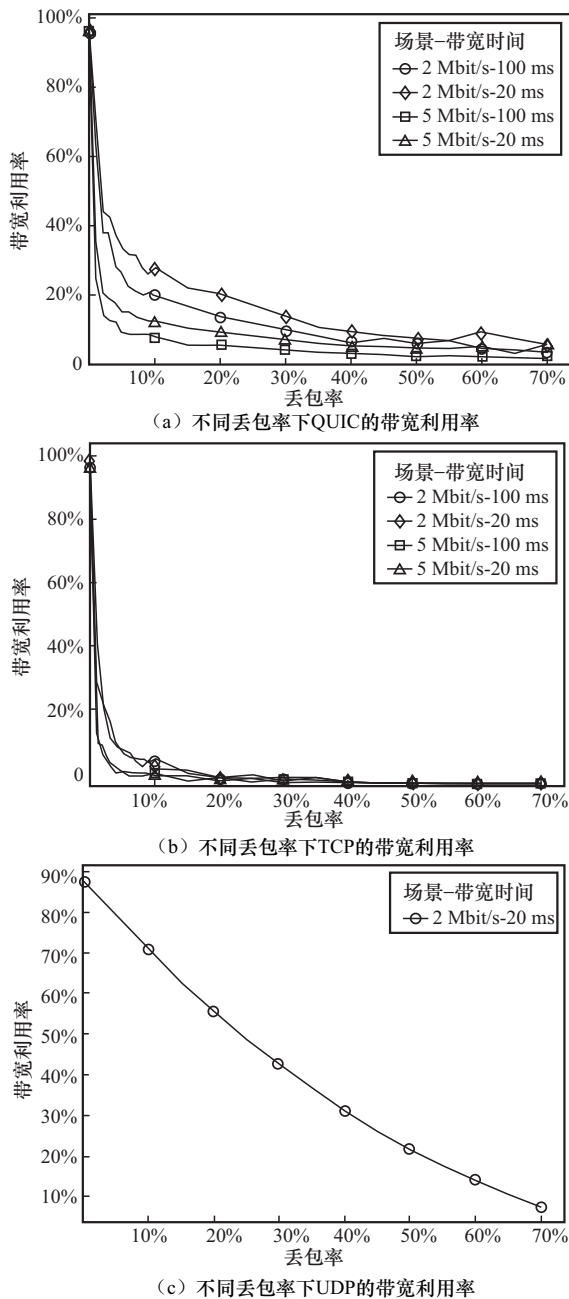


图1 不同丢包率下QUIC、TCP、UDP的带宽利用率

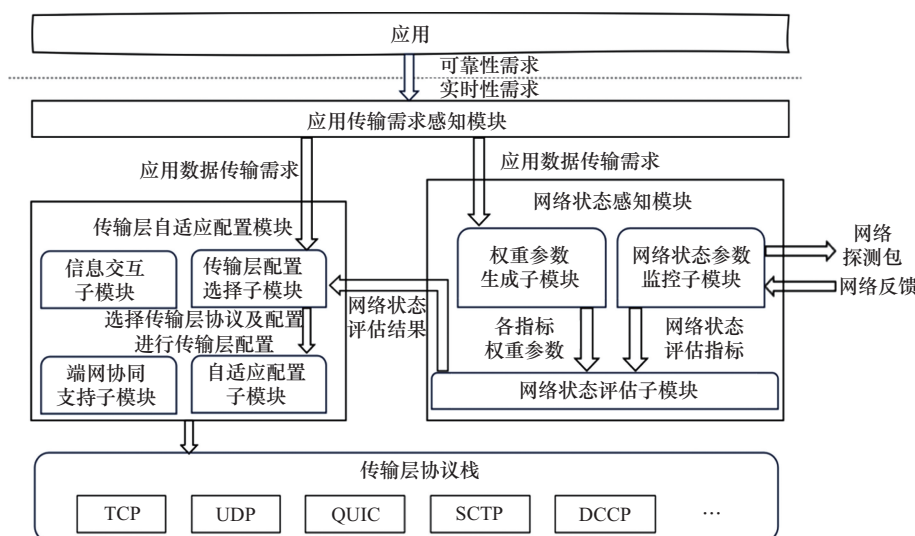


图2 端网协同传输层自适应框架

等，并集成端网协作的支持机制。

该框架旨在拓展传输层能力，但无意对现有传输层协议栈进行修改。因此，该框架主体被设计为位于应用层与传输层之间的中间层，其核心功能模块以中间模块的形式存在，能够在不改变协议栈已有逻辑和不影响应用运行的前提下，实现传输层协议与算法的自适应调整，具备易于部署和良好可移植性的特点。通过引入应用传输需求感知、网络状态评估以及协议自适应选择与切换等机制，本框架显著增强了传输层的自适应能力。传输层不再仅限于为应用程序提供单一协议的调用接口，而是能够根据实际网络状态和应用数据传输需求进行主动的自适应调整，从而充分利用传输层协议栈，为应用提供灵活、高效的传输服务，同时为未来传输层和网络的深度协同提供技术支撑。

2.2 应用传输需求感知模块

为实现传输层的自适应调整，需要增强其对应用需求感知的能力，从而为网络状态评估和传输层配置选择提供依据。应用传输需求包括但不限于可靠性需求和实时性需求。应用传输需求感知模块可同时集成第 1.1 节中提到的两种途径：一方面提供面向应用的传输需求传递方法；另一

方面，具备能够根据应用数据流量特征提取相应传输需求的能力。具体而言，应用传输需求感知模块可向应用提供包括时延限制、可靠性要求、优先级等可配置选项，并允许应用指定这些需求是否为强制性约束。同时，该模块亦可构建应用数据流类型等特征和传输需求的匹配规则或知识库。应用传输需求感知模块在接收到上层应用传递的数据后，可根据已有规则或知识库实时进行传输需求的匹配。当应用同时通过上述两种方式传递需求时，其获得的传输需求可作为前者的补充；否则，则作为最终结果。如果两者的结果存在冲突，当前者传递的需求为强制性时，以前者的结果为准；否则，则取两者具有较强限制性的结果。例如，有时延限制优于无时延限制，高可靠性要求优于低可靠性要求。作为示例，提供了一种可能的实时音视频场景中应用数据类型和传输需求对应关系，见表 2。

2.3 网络状态评估模块

考虑不同类型的应用对应用数据传输的需求不同，单一的或固定参数的网络状态评估方法稍显僵化，网络状态感知模块试图将应用数据传输需求纳入网络状态的评估。通过考虑应用数据传输需求，网络状态感知模块输出的评估结果能够



表2 实时音视频场景下应用数据类型和传输需求及传输层配置偏好对应关系

数据类型	传输需求	传输层配置选择及发送策略偏好
音频帧	时延限制的, 强可靠性, 优先级 1	
视频I帧	时延限制的, 强可靠性, 优先级 1	
视频P帧	时延限制的, 弱可靠性, 优先级 2	可选 RTP over UDP 或 RTP over QUIC 等; 优先发送重传包; 优先重传高优先级的包 (优先级等级数字越小, 优先级越高); 可靠性需求越高, 可允许越多重传次数
FEC (forward error correction) 冗余包	时延限制的, 弱可靠性, 优先级 3	
重传包	时延限制的, 优先级 0	
NACK 请求、FIR/PLI 请求等	时延限制的	
非音视频数据	时延限制的, 强可靠性	SCTP 或 QUIC 等
信令	弱时延限制的, 强可靠性	TCP 或 QUIC 等

更好地反映当前网络状态对应用数据传输的影响。例如, 当应用要求高可靠性、非时延限制时, 可以提升丢包率等指标对评估结果和降低时延的影响权重。

网络状态感知模块可使用的一种可行的网络状态评估方法是, 根据应用数据传输需求生成能够反映网络状态各评估指标对应的影响权重, 并进行归一化评估。考虑的评估指标包括但不限于丢包率、时延、重传率、可用带宽等, 具体选用的评估指标可根据实际情况进行取舍。在具备跨层交互的条件下, 可再考虑一些链路质量指标, 例如, 在 Wi-Fi 网络场景中, 网络状态感知模块可从 MIB 读取链路质量指标相关参数作为网络状态的辅助评估参数, 或反馈至传输层自适应配置模块作为传输层相关算法参数调整的依据。与此同时, 还可对各评估指标进行基于时间的平滑处理, 以反映各指标较长时间内的表现情况。各评估指标应由网络状态感知模块自行监测, 有必要设计独立于传输层协议机制的网络状态探测、端侧或网络侧的反馈机制, 尤其是考虑 UDP 并不能提供能够反映网络状态的指标信息。例如, 端侧网络状态感知模块可通过设计并部署轻量级的主动探测及其响应机制, 周期性地发送探测报文并适当复用已有流 (如基于 ACK 统计 RTT 与丢包率, 以尽可能减少独立探测流量), 以估计 RTT、丢包率、可用带宽等指标。具体探测周期可根据网络状态动态自适应调整, 如当网络状态较稳定

时, 适当增大探测周期, 以降低探测流量引入的额外开销; 当检测到状态波动较大时, 探测周期可适当缩小, 以增强快速感知和响应能力。此外, 网络状态感知模块还可以引入网络侧的反馈机制, 以提升端侧对真实网络状态的感知。例如, 设计基于 ECN 的轻量化显式信号反馈机制及拓展, 允许网络设备向通信双方传递拥塞信号及程度、排队和丢包行为等关键信息, 辅助端侧实现及时响应与自适应调节。在具备网络可编程能力的场景下, 亦可通过边缘代理或智能交换设备等中间件对链路状态进行实时监控, 并通过自定义字段或控制通道向端侧主动反馈网络状态等信息。通过端网协同构建弹性、自适应的网络状态感知体系, 可以有效提升端侧对动态网络环境的感知和适应能力。

一种可能的网络状态评估方法可通过以下表达式进行:

$$\text{netscore} = e^{-\left(\alpha_1 \cdot L + \alpha_2 \cdot \frac{D_{\text{now}}}{D_{\text{max}}} + \alpha_3 \cdot \frac{1}{R}\right)} \cdot 100 \quad (1)$$

其中, L 为丢包率, D_{now} 为当前观测到的 RTT 值, D_{max} 为一定时间段内观测到的 RTT 最大值, R 为重传恢复率, α_1 、 α_2 、 α_3 分别为丢包率、RTT 和重传恢复率的计算权重。

在无重传行为的情况下, 不考虑重传率相关指标; 在涉及多路径场景时, 将可获取的链路质量指标引入评估当中。当评估结果在 90~100 时, 网络状态为优秀; 当评估结果在 80~90 时, 网络

状态为良好；当评估结果在 70~80 时，网络状态为较差；当评估结果小于 70 时，网络状态为差。基于数据传输需求设置各评估指标对应影响权重的具体方法可以根据预设规则设置，例如，在表达式 (1) 中， α_1 、 α_2 和 α_3 的初始值一般应该服从 $\alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_1$ ， α_1 和 α_3 的值与应用对可靠性的需求成正比， α_2 的值与实时性需求成正比。

2.4 传输层自适应配置模块

传输层自适应配置模块包括传输层配置选择子模块、自适应配置子模块和信息交互子模块。其中，传输层配置选择子模块综合应用传输需求与实时网络状态，为当前数据流选择最适合的传输层配置，包括但不限于传输层协议类型、相关算法（拥塞控制、重传和 FEC 方法等）及参数设置。配置选择的目标是在满足应用传输需求的前提下，适应当前网络条件，实现低时延、低重传率与高带宽利用率的平衡。具体策略可基于预定义规则或由实时智能算法动态生成。传输层协议选择规则参考示例见表 3。该规则会在初始阶段根据应用数据传输需求选择合适的初始传输层协议，并在应用运行过程中根据网络状态评估结果执行传输层协议切换的决策。

自适应配置子模块负责应用运行期间执行无

感知协议切换。协议切换可以采用重复发送、去重选收机制，以避免可能出现的丢包和乱序，实现协议的平滑切换。典型的传输层协议切换过程如下：接收到协议切换信号后，首先与对端切换设备同步拟切换的协议，并协商新传输层协议会话所需端口及重复发送期间的双发策略；协商一致后，进行新协议会话的建立及必要的初始化操作；新会话建立完成后，进入重复发送阶段，切换双方按照协商一致的双发策略在新旧会话上进行重复发送、去重选收，逐步将上层应用数据的收发从旧协议会话转移到新协议会话中；当应用数据发送完全转移至新传输层会话中时，终止旧会话，完成切换。自适应配置子模块采用渐进式双发选收等协议切换机制，在切换阶段同时维护旧协议会话与拟切换目标新协议会话的数据流通路，在不中断应用的前提下，通过同步传输与差异化接收策略，逐步将应用数据流迁移至新协议会话，实现传输层协议的无感切换，有效避免服务中断与性能抖动。

信息交互子模块负责终端间的信令同步与协调。由于传输层及其协议具备端到端特性，进行运行时的协议、算法或参数的动态配置时，不同终端间需要进行信息的同步和交流。例如，协议切换需要双方就拟切换协议类型、会话端口等信

表 3 传输层协议选择规则参考示例

应用数据传输需求	初始传输层协议选择偏好	运行时协议切换规则
时延限制的弱可靠性	UDP	当网络状态为优秀或良好时，考虑继续使用 UDP 或由其他协议切换至 UDP；当网络状态变为较差或差，并持续一段时间时，考虑切换为 DCCP
时延限制的强可靠性	音视频数据可基于 RTP over UDP 非音视频数据可基于 SCTP 等	不考虑传输层协议切换；可关注重传、冗余策略的调整 当网络状态为优秀或良好时，考虑继续使用 SCTP 或由其他协议切换至 SCTP；当网络状态变为较差或差，并持续一段时间时，考虑切换为 QUIC
弱时延限制的强可靠性	TCP	当网络状态为优秀或良好时，考虑继续使用 TCP 或由其他协议切换至 TCP；当网络状态为较差时，不进行协议切换，但可考虑根据 RTT 和丢包率调整重传超时时间和重传次数（重传超时时间略大于 RTT；重传次数与丢包率成正比，但不超过 3 次）；当网络状态为差，并持续一段时间时，考虑切换为 QUIC，并根据 RTT 和丢包率调整重传超时时间和重传次数（重传超时时间和重传次数设置同上）
弱时延限制的弱可靠性	UDP	网络状态较好（或优秀）并持续一段时间时，考虑继续使用 UDP 或由其他协议切换至 UDP；网络状态为良好，并持续一段时间时，则考虑切换为 TCP；网络状态为较差，并持续一段时间时，则考虑切换为 DCCP；网络状态为差，并持续一段时间时，则考虑切换为 QUIC



息达成一致,以保障新旧会话的关联和通信数据的无损迁移。信息交互子模块的信息交互可基于“请求-响应”模式实现,并对信令格式进行统一定义。信息传递可基于已有应用消息交互协议(如CoAP),或设计独立的信息交互协议完成。此外,传输层自适应配置模块还可以考虑拓展端网协同支持功能,如分段传输的端侧适配。

传输层自适应配置模块是传输层自适应优化框架的核心模块,支持传输层依据应用需求与网络状态动态、灵活地选择与调整传输策略。传输层自适应配置模块可以以中间模块的形式实现于终端业务应用和传输层会话之间,而不需要更改操作系统内核中的协议栈。该模块还支持以软件形式在终端设备的用户空间进行部署和更新,部署和更新方法相对简单、易于推广。除了协议层面的选择和切换外,传输层自适应配置模块还可以借助eBPF、Hook等技术实现拥塞控制参数、重传参数等参数的自适应选择和配置,进一步提升数据传输的自适应性。

3 结束语

本文探讨了传输层由于端侧实现所固有的能力局限和拓展需求,以及增强应用传输需求与网络状态感知能力的可能方法,并提出了一种能够基于应用数据传输需求和实时网络状态主动选择传输层协议并自适应切换传输协议的创新传输层框架。该框架重点关注和讨论了应用传输需求感知、网络状态感知、传输层自适应配置3种技术。传输层自适应框架作为一种通用的解决方案,具有较好的应用前景。例如,它能够灵活适配元宇宙等新兴应用场景、语义通信等新型底层通信技术对传输能力提出的多样化需求。考虑到现有网络和设备情况以及实际部署的可行性,本文所提出的传输层自适应框架在设计上基本遵从TCP/IP体系架构,能够以软件中间件的形式实现,同时可以最小限度修改甚至不修改现有

协议栈,具备较高的易部署性和推广潜力。本文提出的端网协同的传输层自适应创新框架还考虑了传输层与网络及其他各层级间的协同需求。未来,随着传输层在端网协同及跨层协作方面的发展和普及,该框架可便捷地进行扩展以提供更丰富的功能支持,其应用场景与整体能力也有望得到进一步拓展和增强。

参考文献:

- [1] IETF. User datagram protocol: RFC 768[S]. 1980.
- [2] IETF. Transmission control protocol (TCP): RFC 9293[S]. 2022.
- [3] IETF. Datagram congestion control protocol (DCCP): RFC 4340[S]. 2006.
- [4] IETF. Stream Control Transmission Protocol: RFC 9260[S]. 2022.
- [5] IETF. QUIC: a UDP-based multiplexed and secure transport: RFC 9000[S]. 2021.
- [6] SHI H, CUI Y, QIAN F, et al. DTP: deadline-aware transport protocol[C]// Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Workshop on Networking. New York: ACM, 2019, 1-7.
- [7] ZUO X T, CUI Y, WANG X, et al. Deadline-aware multipath transmission for streaming blocks[C]// Proceedings of the IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 2178-2187.
- [8] SCHMIDT P S, ENGHARDT T, KHALILI R, et al. Socket intents: leveraging application awareness for multi-access connectivity[C]// Proceedings of the Ninth ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2013: 295-300.
- [9] BAO Z C, LIANG H T, DONG C, et al. MDVSC - efficient wireless model division video semantic communication[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(2): 1109-1124.
- [10] IETF. The addition of explicit congestion notification (ECN) to IP: RFC 3168[S]. 2001.
- [11] IETF. Low latency, low loss, and scalable throughput (L4S) Internet service: Architecture: RFC 9330[S]. 2023.
- [12] MENG Z L, GUO Y N, SUN C, et al. Achieving consistent low latency for wireless real-time communications with the shortest control loop[C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. New York: ACM, 2022: 193-206. [LinkOut]
- [13] LIMYS, CHEN Y C, NAHUMEM, et al. Cross-layer path management in multi-path transport protocol for mobile devices[C]// Proceedings of the IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Com-

- puterCommunications.Piscataway:IEEEPress,2014:1815-1823.
- [14] SINKY H, HAMDAOUI B, GUIZANI M. Proactive multipath TCP for seamless handoff in heterogeneous wireless access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(7): 4754-4764.
- [15] ZHANG X F, NGUYEN T M T. Concurrent multipath transfer performance optimization using Kalman filter based predictive delay estimation in wireless networks[C]//Proceedings of the Global Information Infrastructure Symposium - GIIS 2011. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [16] IEEE. IEEE standard for information technology--telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks--specific requirements - part 11: wireless lan medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: IEEE 802.11-2020[S]. 2020.
- [17] KUMAR P, DEZFOULI B. Implementation and analysis of QUIC for MQTT[J]. Computer Networks, 2019, 150: 28-45.
- [18] LANGLEY A, RIDDOCH A, WILK A, et al. The QUIC transport protocol: design and Internet-scale deployment[C]//Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM, 2017: 183-196.
- [19] ZHOU J E, QIU X Y, LI Z Y, et al. A machine learning-based framework for dynamic selection of congestion control algorithms[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2023, 31(4): 1566-1581.
- [20] 郑卫凯, 黄金强. 媒体流传输方法、装置、设备及介质: CN112995182A[P]. 2021-06-18.
- ZHENG W K, HUANG J Q. Media stream transmission method and device, equipment and medium: CN112995182A[P]. 2021-06-18.

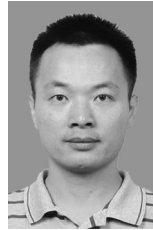
[作者简介]



朱龙薇 (2001-), 女, 北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为信息与通信工程。



蒋胜 (1978-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院教授, 主要研究方向为6G、智简网络、计算机网络(数据通信网络)、互联网协议(TCP/IP)创新及相关国际国内标准等。



饶明俊 (1979-), 男, 咪咕文化科技有限公司高级工程师, 主要研究方向为大规模互联网平台系统、低时延流媒体传输、音视频实时互动等。



顾明 (1983-), 男, 咪咕文化科技有限公司平台运营技术中心副总经理, 主要研究方向为大型互联网分布式系统、音视频传输、大数据、安全风控等。