

多路径传输技术研究综述*

苏金树^{1,2}, 宋丛溪¹, 计晓岚¹, 徐 草¹, 韩 彪¹

¹(国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

²(军事科学院, 北京 100091)

通信作者: 韩彪, E-mail: nudtbill@nudt.edu.cn



摘 要: 多路径传输技术是指通过设备上的多个网络接口, 在通信双方建立多条传输路径, 实现带宽聚合、负载均衡、路径冗余, 增加传输的吞吐量, 提高可靠性. 多路径传输技术凭借其上述优势, 已被广泛应用于服务器、终端和数据中心等场景, 是网络体系结构和传输技术研究的重要组成部分, 具有重要研究价值和意义. 为此, 从概念、核心机制等方面, 系统梳理了多路径传输技术. 首先概述了多路径传输的基本概念、标准化进程以及应用价值. 其次, 阐述多路径传输技术的核心机制, 包括拥塞控制、报文调度、路径管理、重传机制、安全机制, 以及面向特定应用的机制设计. 对每种机制的分类方法、主要研究成果给予了总结和评述, 分析总结了不同机制的优缺点与发展方向. 最后, 探讨了多路径传输技术研究面临的挑战, 展望了未来研究方向.

关键词: 多路径传输; QUIC; 拥塞控制; 报文调度; 智能网络

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 苏金树, 宋丛溪, 计晓岚, 徐草, 韩彪. 多路径传输技术研究综述. 软件学报, 2025, 36(1): 289–320. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/7193.htm>

英文引用格式: Su JS, Song CX, Ji XL, Xu C, Han B. Research Review on Multipath Transmission Technology. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2025, 36(1): 289–320 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/7193.htm>

Research Review on Multipath Transmission Technology

SU Jin-Shu^{1,2}, SONG Cong-Xi¹, JI Xiao-Lan¹, XU Cao¹, HAN Biao¹

¹(College of Computer Science and Technology, National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China)

²(Academy of Military Science, Beijing 100091, China)

Abstract: Multi-path transmission technology establishes multiple transmission paths between communication parties via various network interfaces on devices. In this way, bandwidth aggregation, load balance, and path redundancy will be achieved to increase transmission throughput and reliability. These benefits allow the multipath transmission technology to be widely used in several application scenarios such as servers, terminals, and data centers. As a part and parcel of network architecture and transmission technology studies, the technology is of research significance and value. To this end, this study systematically analyzes the multi-path transmission technology in terms of its concepts and core mechanisms. Firstly, the basic concepts, standardized process and application value of multi-path transmission are outlined. Secondly, the core mechanisms of the multi-path transmission technology are enunciated, including congestion control, packet scheduling, path management, retransmission mechanism, security mechanism, and the mechanism for specialized applications. Classification methods and the main research results of each mechanism are elaborated, and the advantages, disadvantages and the development direction of mechanisms are summarized. Finally, this study probes into challenges faced by multi-path transmission technology research and envisions the prospect for relevant studies.

Key words: multipath transmission; QUIC; congestion control; packet scheduling; intelligent network

* 基金项目: 国家自然科学基金 (62102430, 62372462, 62372762); 湖湘青年英才项目 (2020RC3027); 湖南省自然科学基金 (2021JJ40688); 长沙市杰出创新青年培养计划 (kq2206001); 国防科技大学科研计划 (ZK22-50)
收稿时间: 2023-11-02; 修改时间: 2024-01-07, 2024-02-16; 采用时间: 2024-03-28; jos 在线出版时间: 2024-06-14
CNKI 网络首发时间: 2024-06-17

互联网技术已经有 50 多年的发展历史, 是 21 世纪最伟大的工程成就之一^[1]. 为了支持各类互联网应用间的通信, 计算机网络被抽象成层次模型, 网络对等实体之间交换信息时遵守的规则被定义为协议. 无论是国际标准化组织 (international organization for standardization, IOS) 1997 年提出的开放系统互联 (open system interconnection, OSI) 7 层模型^[2], 还是 TCP/IP 提出的 5 层模型, 传输层都是不可或缺的一部分, 为通信双方提供端到端的传输服务. 目前网络中最常用的传输层协议是用户数据报协议 (user datagram protocol, UDP) 和传输控制协议 (transmission control protocol, TCP). UDP 不保证可靠传输, 双方无需建立连接就可以发送数据. TCP 中设计了保序、重传、拥塞控制等机制, 提供了可靠传输服务.

为了适应设备上的网卡数量增加, 以及数据中心的服务器架构的革新, 多路径传输技术应运而生. 多路径传输技术通过多路径传输协议, 聚合设备上的多网卡资源, 例如以太网、4G、WiFi、5G 等^[3], 提升传输带宽和可靠性. 多路径传输技术为数据中心、流媒体传输等应用场景, 提供了高带宽、低延迟、高可靠的服务质量保障. 多路径传输控制协议 (multipath TCP, MPTCP) 和多路径 Quick UDP Internet Connection 协议 (multipath QUIC, MPQUIC), 分别是对 TCP 和 QUIC 进行的多路径扩展. 近年来, 围绕 MPTCP 和 MPQUIC 开展的多路径传输机制优化工作受到了工业界和学术界的关注.

多路径传输协议包括 5 个重要的组成机制, 分别是: 拥塞控制、报文调度、路径管理、重传机制、安全机制. 这 5 个机制负责维持连接并进行传输决策, 从不同的角度保证了数据传输的可靠性. 从需求驱动、算法创新等维度, 学术界和工业界的研究人员设计了多种不同的机制. 多路径传输对网络体系结构的研究具有重要意义, 因此系统梳理已有研究成果和发展历程显得尤为重要. 本文从多路径传输技术的 5 个重要机制, 以及面向应用的机制设计这 6 个方面对研究进展进行综述. 之后, 讨论了目前存在的技术难点. 最后, 对未来研究方向提出了展望, 并提出可能的发展趋势.

我们首先分析了之前发表的多路径传输技术的相关综述文献, 表 1 总结了本文与之前综述出发点的不同.

表 1 已有综述的主要研究内容

工作	年份	主要内容
Raiciu 等人 ^[4]	2013	传输层的多路径传输可提供的服务
Li 等人 ^[5]	2016	全层次的多路径传输
Habib 等人 ^[6]	2016	传输层的多路径传输、拥塞控制机制
Xu 等人 ^[3]	2016	拥塞控制机制
Kimura 等人 ^[7]	2020	报文调度机制
Afzal 等人 ^[8]	2023	多路径传输在流媒体传输中的应用
本综述	2023	传输层的多路径传输, 包括拥塞控制、报文调度、路径管理、重传机制、安全机制以及面向应用的机制设计

文献 [4] 概述了传输服务的定义, 着重分析中间件对协议的影响, 在此基础上介绍了多路径传输协议 MPTCP 和 Minion. 文献 [5] 从 TCP/IP 协议栈的层次出发, 分别在链路层、网络层、传输层、应用层以及跨层分析了多路径传输技术的概念. 文献 [6] 分析了传输层从单路径到多路径传输协议的发展过程, 主要对比分析了流控制协议 (stream control transport protocol, SCTP) 和 MPTCP 协议以及相关的扩展工作, 重点对比了各类多路径拥塞控制机制. 文献 [3] 则更着重分析多路径拥塞控制机制, 总结多路径拥塞控制着力解决 4 个问题, 分别是 TCP 友好性、负载均衡、稳定性和帕累托最优. 在此基础上, 对现有的基于窗口和基于速率控制的多路径拥塞控制算法进行了分类对比. 文献 [7] 关注了多路径传输协议的报文调度机制, 总结了报文调度需要解决队头阻塞 (head of line, HoL) 以及缓冲区膨胀 (Bufferbloating) 问题, 对 MPTCP 报文调度机制按照单目标和多目标分成了两类, 最后对它们进行了性能对比. 文献 [8] 研究多路径传输技术在流媒体传输中的应用, 对比分析了应用层、传输层、网络层和跨层的多路径流媒体传输方案.

虽然上述文献都是围绕多路径传输技术开展的综述, 但是它们的出发点与本文存在较大的差异. 本综述关注的是传输层的多路径传输技术, 全面探讨端到端传输过程中多路径传输机制的 6 个方面开展的研究工作, 从方法

和目标上, 对多路径传输相关研究进行分类对比, 为未来的多路径传输协议设计和优化提供更多思路. 我们在 IEEE, ACM, Springer, Elsevier 和 CNKI 等论文数据库, 以及互联网技术规范 RFC 进行检索, 检索时采用的主要英文关键词包括“multipath transmission”“multipath transport protocol”“multipath scheduling”和“multipath congestion control”等; 然后, 聚焦与研究问题相关的文献, 通过查阅相关的参考文献和相关研究人员发表的论文列表, 进一步识别出遗漏的文献; 最终, 选择与该研究问题直接相关的高质量论文. 绝大部分论文发表在计算机网络的权威会议或期刊上, 例如计算机网络领域国际会议、ACM/IEEE 国际期刊、国内学报等重要期刊.

1 多路径传输技术概述及分类

1.1 典型传输层协议

在 TCP/IP 协议栈中, 传输层位于应用层和网络层之间, 为运行在不同主机上的应用进程之间提供通信服务支持^[2]. 传输层协议可根据传输的服务类型被分为两类: 一类提供不可靠、无连接的传输, 代表协议为 UDP; 另一类提供可靠的、面向连接的传输, 代表协议为 TCP. QUIC 协议基于 UDP 实现, 并在此基础上实现了可靠传输机制. 在表 2 对比了这 3 种典型传输层协议的特点.

表 2 典型传输层协议 TCP、UDP 和 QUIC 的对比

对比项	TCP	UDP	QUIC
连接方式	面向连接	无连接	面向连接
可靠性	可靠	不可靠	可靠
基本单元	报文段	数据报	数据流帧
应用	电子邮件、Web、文件传输、流媒体	流媒体、网络电话、网络管理、域名转换	Web、文件传输、流媒体

TCP^[9]以报文段为传输基本单元, 是面向连接并提供可靠传输服务的协议. TCP 的可靠传输服务确保应用接收到的报文段是无损坏、无间隙、非冗余和保序的. 为了支持可靠传输服务, TCP 实现了重传、流量控制、拥塞控制等机制. 对可靠性有要求的应用, 例如 Web、文件传输等一般基于 TCP 传输. UDP^[10]以数据报为传输单元, 是无连接的协议, 不保证数据的交付、顺序以及完整性. 因此 UDP 适合传输需要实时性确保且能容忍部分数据丢失的应用传输, 例如流媒体、网络电话等.

然而, UDP 和 TCP 传输协议存在以下局限性^[11].

- 1) 协议迭代缓慢: 由于 TCP 和 UDP 协议一般在内核态实现, 更新扩展协议功能需要对操作系统内核修改, 致使协议的更新迭代速度缓慢.
- 2) 中间件设备僵化: 已部署在网络中的陈旧中间件设备无法识别新的协议报文格式, 造成报文错误处理.
- 3) 建立连接延迟大: TCP 建立安全可靠的连接, 需要经历 1–3 个往返时延 (round-trip time, RTT) 的 TCP 协议和 TLS 协议握手过程, 导致建立连接速度慢.

为了解决上述问题, 谷歌于 2012 年提出了基于 UDP 的传输协议 QUIC, 全称为 Quick UDP Internet Connections. 2021 年, 国际互联网标准化组 IETF (The Internet Engineering Task Force, IETF) 推出 QUIC 协议参考 RFC9000^[12]. QUIC 协议在用户态实现, 可以根据用户需求灵活定制协议功能. QUIC 协议不仅可以通过 0–1 个 RTT 的低延迟建立连接, 还可以提供可靠安全加密的传输. QUIC 协议当前已经有 24 种实现版本, 包括了不同语言的实现版本. Chrome 浏览器默认开启 QUIC 协议, Microsoft Edge、Firefox 和 Safari 也支持 QUIC 协议. 截至 2019 年 4.6% 的网站 (9.1% 的流量) 使用 QUIC, 谷歌的 42.1% 的流量通过 QUIC 协议传输^[13]. 截至 2021 年, 75% 的 Facebook 的流量通过 QUIC 传输.

QUIC 数据传输以数据流帧为基本单元, 通过应用之间建立多个流实现多流复用. 超文本传输协议 (hyper text transport protocol, HTTP) 在 QUIC 协议上实现了轻量化的 HTTP/3^[14], 解决了 HTTP/2 基于 TCP 协议带来的队头阻塞问题. QUIC 连接通过 Connection ID 标识, 而不是传统的 IP 地址/端口四元组索引, 可以实现更便捷的连接迁移^[11].

1.2 多路径传输技术

多路径的概念可以分为狭义和广义. 狭义上指传输层协议的多路径扩展. 广义上, 从物理层、链路层到应用层均有多路径的概念^[5]. 物理层的多路径通常指通过聚合多个信道增加带宽并提高网络吞吐量的多信道聚合技术. 链路层的多路径概念指链路聚合, 例如利用以太网链路聚合将多链路聚合成单个逻辑信道, 提供更高链路带宽. 网络层的多路径主要探究的是寻址或路由的问题, 即多路径路由. 多路径路由^[15]是控制平面的问题, 主要进行多路径的选择和流量的动态分配. 应用层的多路径^[16]与底层接入技术以及路由无关, 指的是应用程序建立多个传输连接, 绑定到不同的 IP 地址, 并根据这些连接上的可用容量, 适当地分配数据传输比例.

本文主要探讨是狭义的传输层的多路径传输技术, 是指通过设备上的多网卡、多链路、多协议栈在端到端之间, 建立多条路径进行数据传输. 多路径传输技术的出现, 是因为越来越多的设备具备了多张网卡、多协议或多种异构接入方式. 为了解决数据中心网络中存在的“多对一”数据发送导致的 TCP Incast 问题, 以及基于 TCP 单路径传输带来部分链路资源空闲、部分连接堵塞问题, 多路径传输技术率先被应用于数据中心网络中, 基于多路径传输协议, 同时利用多条路径传输数据. 尤其在接入层网络设备中, 多路径传输技术可以提高数据传输吞吐量和可靠性.

随着设备革新, 移动终端上出现了多网卡或异构接入方式 (例如: 3G、4G、5G 以及 WiFi). 如何合理整合移动终端上的多网卡资源, 提升端到端的传输性能和可靠性, 成为亟需解决的关键问题. 多路径传输协议为保证移动终端的多路径传输, 实现了路径的管理以及流量的调度机制, 提升了移动网络应用的服务质量.

MPTCP 和 MPQUIC 是当前工业界和学术界关注的多路径传输协议扩展协议, 因此本文围绕这两种多路径传输协议展开研究. 表 3 总结了两个协议的区别.

表 3 MPTCP 与 MPQUIC 的区别

对比项	MPTCP	MPQUIC
建立连接方式	3次握手+TLS握手	3次握手
索引方式	四元组 (源地址、目的地址、源端口、目的端口)	连接标识符 (connection ID)
增加地址或地址迁移	3次握手	直接发送
传输基本单元	报文段	帧 (控制帧、数据流帧)
逻辑路径名称	子流	路径
多流复用	否	是
报文调度	选路	选路+流调度
重传机制	同路重传	不同路重传

为了更好地阐述多路径传输协议的工作原理, 我们首先介绍其中涉及的一些名词的定义.

(1) 连接 (connection): 传输层在端到端之间维持的共享状态, TCP 和 QUIC 都是面向连接的协议, 所以在发送数据之前, 通信双方需要建立一条连接. TCP 的连接由四元组构成^[17], QUIC 的连接由连接标识符 (connection ID) 标识^[18]. 连接和应用套接字可以建立一对一的映射^[19].

(2) 路径 (path) 和子流 (subflow): 指端到端之间的一对四元组 (源 IP 地址, 目的 IP 地址, 源端口, 目的端口) 形成的数据通路. MPTCP 中的路径也被称作子流.

(3) 流 (stream): QUIC 中提供给应用的轻量级的保序的字节流.

(4) 机制: 传输层中为保证端到端传输而实现的控制逻辑.

1.2.1 MPTCP 协议

2009 年, IETF 开始研究 TCP 的多路径扩展 MPTCP^[19], 其目的是使 TCP 连接通过多个路径最大化带宽资源使用. MPTCP 将路径抽象成子流, 通过在设备的多 IP 地址或网卡间建立多条子流实现多路径传输. MPTCP 的设计目标还包括^[20]: 可以兼容所有支持 TCP 的场景、无需占用过多的内存和计算开销、对应用透明、不侵占其他 TCP 连接的公平性等.

建立一个 MPTCP 的连接也是从 3 次握手开始, 首先从客户端的一个 IP 地址发送一个携带 MP_CAPABLE

选项的 SYN 报文宣告支持多路径传输功能. 在建立连接后, 客户端可以通过 ADD_ADDR 选项宣告对端设备上的其他地址, 并通过 SYN 和 MP_JOIN 选项建立子流^[21].

为了使 MPTCP 报文能够通过中间件, 每个报文里保持了 TCP 连接序号 (sequence number, SN). 同时, 在扩展选项中添加了数据序号 (data sequence number, DSN) 字段. DSN_MAP 字段实现了 DSN 与 SN 的映射, 以便接收方对分散在各个子流上的数据重新排序. 在 MPTCP 的报文调度机制决策为报文段选择子流发送. 目前 MPTCP 内置了一些报文调度算法, 如轮询 (round robin, RR)、最小延迟 (minimum round-trip time, minRTT) 等. MPTCP 除了可以采用传统的 TCP 的拥塞控制策略, 为了保证公平性等目标实现了耦合的拥塞控制策略 (coupled congestion control)^[22].

1.2.2 MPQUIC 协议

2017 年鲁汶大学的 De Coninck 等人实现了 QUIC 协议的多路径扩展 MPQUIC^[23], 并提交了草案. 2018 年, Viernickel 等人^[24]也提出了多路径 QUIC. 2021 年, De Coninck 等人面向上下行传输需求不同, 将传统多路径传输协议中建立双向路径改为建立单向路径^[25]. MPQUIC 的草案截至 2023 年 10 月更新至版本 06^[18]. 由于 QUIC 协议的用户态实现特性, MPQUIC 可以更灵活地面向应用进行定制化设计. 例如, 阿里巴巴提出的 XLINK^[26]是专门面向流媒体传输实现的多路径 QUIC 协议. MPQUIC 不仅继承了 QUIC 协议的帧类型, 还拓展了一系列保证多路径传输功能的控制帧, 支持宣告新地址、移除地址、宣告路径状态等功能.

和 QUIC 协议的建立连接方法类似. 在建立连接后, 通过 ADD_ADDRESS 帧宣告本机的地址^[18]. 与 MPTCP 在新建路径时需要握手不同, MPQUIC 可以直接开始使用一条新路径发送数据, 极大程度降低了延迟^[23]. 图 1 描述了 MPTCP 和 MPQUIC 协议各层之间的关系. 因为 MPQUIC 实现了多流复用, 报文调度机制不仅要进行路径选择, 也选取多流中的一条取数据并封装报文. MPQUIC 的重传策略相较 MPTCP 更加灵活, 当报文标记丢失时, 其中负载的数据流帧不必从同一条路重传. 也因为 MPQUIC 继承了 QUIC 的报文序号递增特性, 减少了重传时带来的歧义.

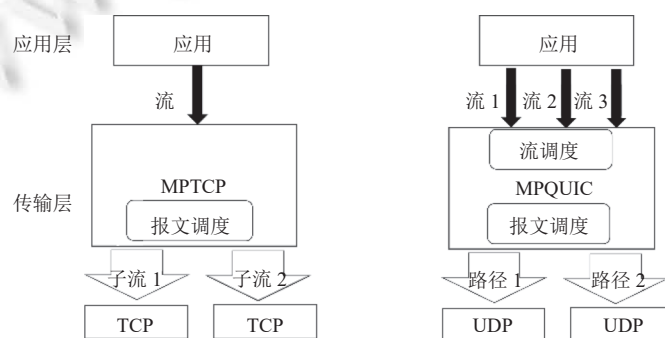


图 1 MPTCP 和 MPQUIC 协议对比

1.2.3 其他多路径传输协议

本节简要介绍其他 4 种多路径传输协议, 分别是 SCTP、MPUDP、MPRTP 和 MP-RDMA.

2000 年 IETF 提出了流控制传输协议 (stream control transmission protocol, SCTP)^[27]. SCTP 支持端到端的多路径传输, 但只使用一条路径作为传输的主路径, 将另一条路径作为备份路径. 并发 SCTP 多路径传输 (concurrent multipath transfer for SCTP, CMT-SCTP)^[28]在 SCTP 的基础上实现端到端并发数据传输. SCTP 和 CMT-SCTP 需要特定的应用层实现接口支持, 一些中间件无法识别 SCTP 和 CMT-SCTP 报文导致流量被阻塞. 另外, SCTP 和 CMT-SCTP 的路径切换缓慢, 且缺乏负载均衡功能. 由于上述问题, SCTP 与 CMT-SCTP 没有被广泛应用^[8]. 2017 年提出的多路径 UDP (multipath UDP, MPUDP)^[29]是 UDP 的多路径扩展, 但是基于 UDP 协议无法保证报文传输的可靠性, 对丢失的 UDP 报文也没有恢复策略, 目前应用较少. 2013 年, 多路径实时流媒体传输协议 (multipath RTP, MPRTP)^[30]将单 RTP 流分成多个路径, 为流媒体传输提供更高的网络资源. 但是 MPRTP 协议只面向流媒体

传输,不能支持其他应用.多路径远程直接内存访问 (multi-path remote direct memory access, MP-RDMA) 技术打破了单路径 RDMA 传输的限制,充分利用数据中心丰富的并行路径资源,提升网络利用率^[31].由于 MP-RDMA 需要更换支持 RDMA 的网卡 (RDMA network interface controller, RNIC),目前大规模部署困难.于是,基于软件的 MP-RDMA 解决方案被提出^[32-34].方案将路径选择、负载均衡和流量监控与 RNIC 解耦,在用户态实现,可以在不更换 RNIC 的条件下实现 MP-RDMA,同时也避免了由于 RNIC 的内存不足导致性能下降的问题,但需要消耗额外的 CPU 资源.

图 2 梳理了多路径传输技术标准化的进程.2009 年 5 月 IETF 启动 MPTCP 标准化工作,到 2013 年 1 月形成 MPTCP 标准 RFC6824.2020 年 3 月 RFC6824 标准被 RFC8684 取代.近年来,QUIC 与 MPQUIC 的标准化更新较多.2012 年谷歌提出 QUIC 协议,2016 年 7 月 QUIC 协议标准化进程开启,在此期间 QUIC 形成了多个实现版本.直到 2021 年 5 月,QUIC 协议正式形成了 RFC9000 标准.2017 年 12 月 De Coninck 等人^[23]提出 MPQUIC,之后即开始了 MPQUIC 标准化的进程.2020 年 12 月阿里巴巴提出了面向视频传输的多路径 QUIC 协议 XLINK 并形成了标准化草案.2021 年 De Coninck 等人^[25]围绕上下行传输异构的问题提出了 MFQUIC 并更新了草案.直到 2022 年 2 月,IETF 统一了 MPQUIC 的标准化进程.2023 年 10 月发布了最新的 06 版本草案.

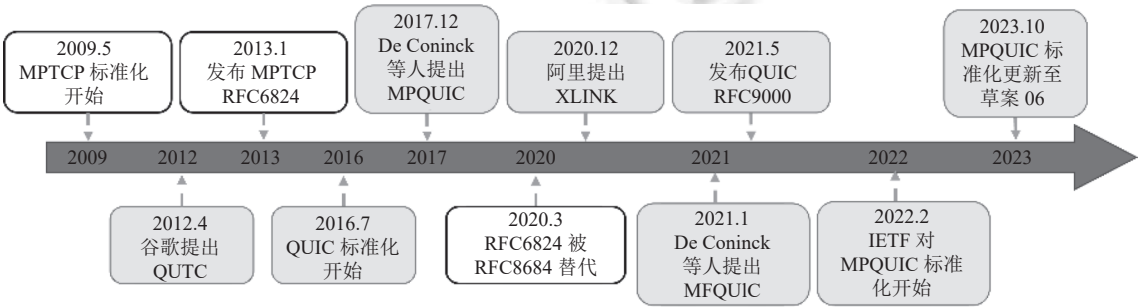


图 2 多路径传输技术标准化进程

1.3 应用价值

多路径传输技术的主要应用价值是提升了网络传输的以下能力^[35].

(1) 带宽聚合能力: 网络中传输的数据量随互联网用户和应用的增加呈现快速上升的趋势.应用的服务质量提升也增加了对高带宽传输的需求.以流媒体应用为例,YouTube 进行每秒 60 帧,4K 清晰度的直播需要 20~51 Mb/s 的带宽支持^[36].增强现实 (augmented reality, AR) 和虚拟现实 (virtual reality, VR) 应用需要为用户提供沉浸式体验,除了需要提供流畅、高清、多视角的画面,还需要传输听觉、触觉、方位等信息,至少需要 100 Mb/s 的带宽支持^[37].多路径传输技术凭借其聚合多网卡带宽资源的能力,可以为上述应用提供更高的聚合带宽.

(2) 传输可靠性: 如果单路径传输故障或丢包率、延迟较高,应用服务质量将会受到严重影响.多路径传输技术引入了多条传输路径可以提升可靠性.当多路径其中一条路径质量较差时,冗余的路径可以继续传输数据.例如,智能手机同时具有 WiFi 和 4G 网络.当 WiFi 路径质量较差时,可以切换到 4G 网络保持连接.

(3) 负载均衡能力: 多路径传输建立多条路径,可以将流量从拥塞的路径转移到不拥塞的路径,实现负载均衡.

(4) 差异化服务质量保障: 由于多路径在带宽、时延、丢包率等路径状态上具有差异性,多路径传输协议可以通过选择不同机制算法或参数,根据不同的路径状态为应用提供定制化、差异化的传输服务.

1.4 多路径传输技术分类

多路径传输协议中的多个机制协同作用保证多路径传输的基本功能.围绕多路径传输技术的相关研究从应用需求、算法创新等角度,对协议机制进行了设计和优化.其中,围绕拥塞控制、报文调度、路径管理、重传机制、安全机制这 5 个机制开展的研究较多.图 3 展示了这 5 个机制在多路径传输协议中的协同作用关系.本文在第 2~6 节中分别详述每一机制的研究进展.为了支持特定的应用需求,需要对多个机制同时进行优化.本文在第 7 节

梳理了面向应用的机制设计相关研究工作. 每一节从目标上对比了相关研究的异同点, 并分别提出机制的优化难点和改进方向.

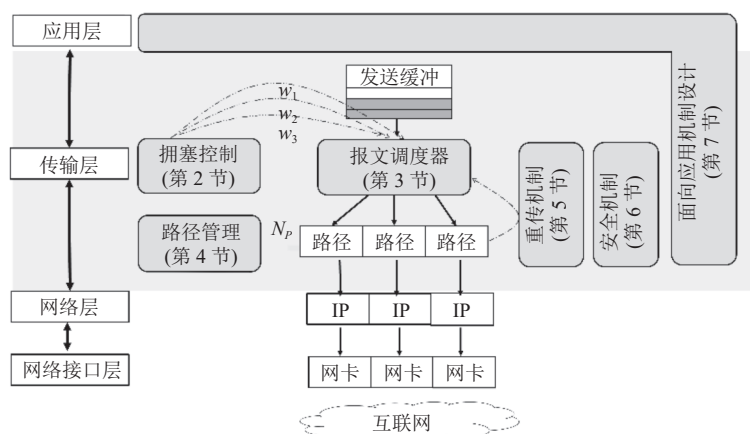


图3 多路径传输协议各机制之间的协同作用关系

2 拥塞控制

网络在承受大量通信负载时引起的传输性能下降, 甚至网络瘫痪的状态被称为网络拥塞. 传输层拥塞控制机制通过探测网络拥塞状况, 调整发送端的发送速率, 从而缓解甚至避免网络拥塞状态, 是保证可靠传输的关键机制^[17]. 拥塞控制的流程包含慢启动、拥塞避免、快速恢复阶段, 在根据不同条件判断网络处于拥塞状态后, 对发送速率进行调整. 调整时可以控制拥塞窗口大小^[38,39]或报文发送速率^[40,41]. 寻找合适的条件判定拥塞状态是拥塞控制研究中的关键问题, 主流判断网络拥塞状态的条件可以分成4种, 包括: 基于丢包、基于时延、基于带宽时延积、基于混合指标. 这些方法从观测不同网络指标入手, 探测网络中的拥塞情况, 并采用相应策略调整发送速率.

多路径拥塞控制机制应当满足以下3条设计原则^[42]: (1) 提升吞吐量, 保证多路径传输所有路径的聚合吞吐量至少大于其中最优路径的吞吐量; (2) 不损害其他连接, 在共享瓶颈链路时, 多路径连接不能侵占其他单路径连接的资源; (3) 平衡拥塞, 在某条路径拥塞时, 可以将拥塞路径上的流量迁移到其他路径上. 我们将多路径拥塞控制机制应该满足的目标细化为以下几点.

1) 为了满足上述的第(1)条设计原则, 拥塞控制机制的设计应该最大化利用可用带宽资源, 以达到应用吞吐量最大化.

2) 与上述多路径拥塞控制设计原则第(2)条相关, 当多个连接共享一段瓶颈链路的时候, 当前多路径连接不会侵占其他连接的资源, 满足友好性.

3) 多路径传输的拥塞控制需要同时控制同一连接内多条路径的拥塞窗口或发送速率, 需要满足公平性, 使各个路径的延迟、吞吐量、丢包率等指标都可以得到优化.

4) 拥塞控制问题中的帕累托最优性 (Pareto optimality) 指的是一个连接在不减少其他连接吞吐量的情况下, 最大化自己的吞吐量. 在满足友好性的基础上, 多路径拥塞控制算法也应尽可能满足帕累托最优性^[22].

5) 在网络状态波动的时候, 拥塞控制机制需要快速探测到网络资源的变化, 保持足够的响应速度快速收敛到最适合的发送速率或拥塞窗口大小.

面向上述优化目标, 多路径拥塞控制机制分为耦合型控制及非耦合型控制两类^[43]. 非耦合型拥塞控制以独立的策略控制连接中每条路径的拥塞窗口, 而耦合型采取统一的策略统一调控所有路径的拥塞窗口. 表4按照这两类对多路径拥塞控制相关研究进行了梳理, 分别对比了不同算法的面向协议、控制对象、拥塞判断条件所用指标以及是否满足上述细化目标.

表 4 多路径传输拥塞控制机制相关研究分类

类别	工作	面向协议	控制对象	拥塞判断指标	满足目标				
					吞吐	友好	公平	帕累托	响应速度
非耦合	EWTCP ^[44]	MPTCP	拥塞窗口	丢包	—	—	√	—	√
	DEFT ^[45]	MPTCP	拥塞窗口	时延	√	√	√	—	—
	DAIMD ^[46]	MPTCP	拥塞窗口	时延, 丢包	√	√	—	—	√
	C-MPBBR ^[47]	MPTCP	发送速率 拥塞窗口	时延, 带宽	√	√	—	—	√
	DRL-CC ^[48]	MPTCP	拥塞窗口	时延, 吞吐量, 发送速率, 拥塞窗口	√	√	√	—	—
	MARS ^[49]	MPQUIC	拥塞窗口	时延, 拥塞窗口, 发送缓冲区大小, 发送中报文数	√	—	—	—	—
耦合	wVegas ^[50]	MPTCP	拥塞窗口	时延	—	√	√	—	—
	LIA ^[51]	MPTCP	拥塞窗口	丢包, 时延	—	√	—	—	√
	OLIA ^[22]	MPTCP	拥塞窗口	丢包, 时延	—	√	—	√	—
	Balia ^[52]	MPTCP	拥塞窗口	丢包, 时延	—	√	—	√	√
	D-LIA ^[53]	MPTCP	拥塞窗口	丢包, 时延	√	√	—	—	√
	MPCC ^[54]	MPTCP	发送速率	丢包, 时延, 速率	√	—	√	—	—
	NMCC ^[55]	MPTCP	拥塞窗口	丢包, 时延	—	√	—	—	√
	eNMCC ^[56]	MPTCP	拥塞窗口	丢包, 时延	—	√	—	—	√
	ACCeSS ^[57]	MPTCP	发送速率	丢包, 时延, 速率	√	—	√	—	√
	SmartCC ^[58]	MPTCP	拥塞窗口	时延, 带宽, 抖动	√	—	√	—	—

2.1 非耦合型拥塞控制

非耦合型拥塞控制以独立的策略控制每条路径的拥塞窗口, 判断拥塞的条件与单路拥塞控制相似, 包括基于丢包、时延、带宽时延积以及混合指标, 对每条路径进行拥塞状态的判断后进行拥塞窗口或发送速率的调控。

拥塞控制判断条件依赖不同的网络状态指标。最初是根据丢包判断, 并采用“加性增, 乘性减 (additive increase multiplicative decrease, AIMD)”的控制策略。在端到端路径无拥塞时, 线性地增加拥塞窗口, 当网络丢包时就乘性减小拥塞窗口^[38,59]。该策略在面向较大带宽时延积的路径时, 需要经历多个 RTT 才能增长到较大拥塞窗口, 导致带宽利用率低下。为了解决这个问题, 文献^[39,60]采用了二分搜索或三次函数拟合的方法控制拥塞窗口增长, 在高速网络中达到了较好的可扩展性和稳定性, 并且具有较好的友好性。Equally weighted TCP (EWTCP)^[44]同样根据丢包判断路径拥塞, 其特点是将流量平均地分配给每条路径。当多路径之间的 RTT 差异较大时, EWTCP 性能较差^[61]。另外, 此类基于丢包判断拥塞的算法存在一个问题, 当丢包不是因为拥塞导致时, 如因为链路误码产生丢包, 也会降低发送速率, 致使带宽资源无法被充分利用。

拥塞导致报文在路由器中排队, 增加报文到达接收端的时延增加, 致使发送端测量到的 RTT 上升。因此, 基于时延判断拥塞的方法将时延作为拥塞信号, 通过分析时延的变化, 更敏锐地感知到路径的拥塞状况。DEFT^[45]考虑了 MPTCP 的路径异构性, 根据时延判断路径拥塞状态。在 5G 毫米波链路质量动态变化场景下, DEFT 通过保持一定数量的积压数据包保证每个路径的快速响应能力。为了解决基于时延拥塞控制过于敏感地响应时延变化导致吞吐量较差的问题, delay-based AIMD (DAIMD)^[46]提出了一种混合拥塞控制策略, 采用在加性增加窗口长度阶段采用基于丢包信号, 在乘性减窗阶段基于时延的拥塞估量方法, 既保证了敏锐的拥塞探测能力也不会过早减窗降低吞吐量。

带宽时延积根据带宽和 RTT 估算当前路径可用容量。基于带宽时延积感知拥塞状态的策略根据路径中正在发送的数据量与带宽时延积的关系, 调整发送速率。BBR^[40]是根据带宽时延积调整发送速率的拥塞控制策略, 通过将发送速率尽可能控制在最佳状态保持吞吐量。如果将 BBR 算法直接扩展到多路径传输中, 在共享瓶颈链路时, 多路径连接会侵占过多单路径连接的吞吐量, 不满足友好性要求。文献^[47]提出了基于瓶颈公平性的 C-MPBBR, 结合了 BBR 对带宽时延积的探测, 设计了参数调节共享瓶颈链路的所有路径的发送速率, 使得 MPTCP 的吞吐量

接近单路径 TCP 连接, 保证了友好性。

上述探测网络拥塞的方法难以适应动态网络环境变化以及满足多种服务质量确保的目标。近年来, 许多研究通过智能算法进行拥塞控制, 采用在线学习^[41]、深度强化学习^[62]、决策树^[63]以及模仿学习^[64,65]等算法, 将多个网络状态指标作为输入, 智能体根据当前网络状态调整发送速率或拥塞窗口。DRL-CC^[48]通过长短期记忆网络 (long short-term memory, LSTM) 对一段时间内的发送速率、吞吐量、RTT、拥塞窗口等网络状态进行表征, 并利用深度强化学习 (deep reinforcement learning, DRL) 算法 Actor-Critic 对每条路径的拥塞窗口调整量进行决策。MARS^[49]基于多智能体强化学习算法 MADDPG, 为每条路径训练了一个神经网络, 根据路径输入的状态分别控制每条路径的拥塞窗口, 减少了乱序报文, 降低了接收缓冲区开销, 提升了 MPQUIC 协议的聚合吞吐量, 并改善了动态网络环境下无法满足多样化应用服务质量需求的问题。

2.2 耦合型拥塞控制

耦合型拥塞控制借鉴了资源池化 (resource pooling, RP)^[66]的思想, 统一调控所有路径的拥塞窗口^[42]。这一类策略更加注重各个路径之间的公平性以及对其他连接的友好性。

wVegas^[50]衍生自基于时延进行拥塞判断的算法 Vegas^[67], 通过估算报文排队时延作为权重量化路径之间竞争能力, 根据权重控制发送速率, 将拥塞分摊到所有路径上, 满足了公平性的要求。但是 wVegas 对时延升高的信号过于敏感, 在与基于丢包判断拥塞的算法竞争瓶颈链路资源时会更早地减少窗口, 导致网络资源占有率不高的问题。

Linked increase algorithm (LIA)^[51]综合了不同路径的 RTT 和拥塞窗口信息, 设置了增长因子, 并且设定了窗口的增长上限。在探测到丢包时, 减窗的方式同传统的 New Reno 算法。LIA 可以将流量从拥塞路径转移到较少拥塞的路径, 保证了友好性但不保证帕累托最优性。为了解决 LIA 的问题, 文献 [22] 提出基于流体模型的 opportunistic linked increase algorithm (OLIA), 但是 OLIA 不能较快响应网络变化。在此基础上, balanced linked adaptation (Balía)^[52]权衡了响应速度和友好性, 并能够缓解窗口震荡问题。D-LIA^[53]通过调整拥塞窗口的削减因子, 适应可能发生突变网络的状态, 例如出现新的流量或需要重新分配带宽。NMCC^[55]发现 LIA、OLIA 和 Balía 不能快速收敛到 TCP 友好的状态。于是, 对拥塞控制算法进行了优化, 提升了友好性。NMCC 的特点是控制路径的吞吐量增长率, 而不是控制吞吐量本身。eNMCC^[56]进一步解决了 NMCC 在稀疏拥塞状态下不能满足友好性的问题。

PCC^[41]采用吞吐量、丢包率、时延等指标计算综合效用函数, 并基于在线学习算法优化效用函数, 调整发送速率。MPCC^[54]是在 PCC 的基础上拓展的多路径拥塞控制策略, 对每条路径独立异步地优化局部效用函数, 并通过在线学习算法进行发送速率决策。在计算时耦合了其他路径的发送速率, 保证了路径之间的公平性。ACCeSS^[57]实现了在异构动态网络中的多路径拥塞控制性能优化, 根据不同的服务质量需求, 如面向高吞吐、低延迟、低丢包等目标优化效用函数, 采用轻量的随机森林回归方法拟合吞吐量、丢包率、时延和发送速率之间的关系, 实现在效率和开销之间的均衡。SmartCC^[58]提出了基于异步强化学习的拥塞控制策略, 包含自举、离线训练、在线决策 3 个阶段。在离线训练阶段训练出一个规则表格同步到在线学习阶段, 进行拥塞控制的决策。为了提升学习效率, 设计了基于 Q 学习的瓦片编码 (tile coding) 方法, 将高维连续状态空间转化为离散空间。SmartCC 在设计奖励函数时也考虑了保证路径之间的公平性, 缺陷是没有考虑 TCP 友好性问题。

2.3 小 结

对多路径拥塞控制机制的性能评估通常包括吞吐量、友好性、公平性、响应速度等维度。为衡量公平性和友好性, 会对各条路径以及共享瓶颈链路连接的吞吐量以及带宽占用率进行衡量, 另一个常用的方式是引入 Jain's Fairness 计算公平性。为衡量响应速度, 会在带宽产生变化后, 观察发送窗口或发送速率调整到合适大小的收敛时间, 以评估拥塞状态感知的反应能力。

耦合和非耦合控制有不同的适用场景。非耦合型拥塞控制不需要在每条路径之间共享信息进行协同决策, 优点在于无需引入多路协同控制机制, 减少通信开销、时间开销与计算资源开销, 降低了算法复杂度。每条路径可以根据路径特性, 灵活调整拥塞控制策略及参数。因此, 非耦合型拥塞控制适用于异构性较强的网络场景, 当不同路

径的链路特性差异很大时, 每条路独立控制能更好地适应这种异构性. 然而, 非耦合方法在整体优化方面具有局限性, 无法全局性地最大化网络性能或公平性. 另一方面, 耦合型拥塞控制中各路径间协同工作, 共享信息和决策, 可以实现公平性和全局性能优化. 因此耦合型拥塞控制适合需要保证整体公平性、实现全局优化的场景. 然而, 各路径信息与策略的同步会增加通信与计算的开销, 异构网络场景也对各路径的传输协调机制带来挑战. 在多路径拥塞控制机制后续研究和应用中, 建议关注以下问题.

- 1) MPQUIC 协议中实现的拥塞控制算法基本沿用 MPTCP. 然而, QUIC 基于 UDP 实现, 流量特征与 MPTCP 相比存在着一定差异, 需要进一步针对 MPQUIC 中的拥塞控制问题进行深入探究.
- 2) 利用深度强化学习算法进行拥塞窗口、发送速率调控, 虽然可以满足动态网络环境下的适应能力, 但也需要权衡智能算法的开销和响应速度.
- 3) 拥塞控制需要满足的目标较多, 部分指标存在互斥关系, 需要在吞吐量和公平性、友好性之间的进行权衡.
- 4) 基于时延和基于带宽时延积进行拥塞状态探测依赖对路径状态的测量, 不准确或有滞后性的测量结果会对传输性能产生影响.

3 报文调度

多路径报文调度机制负责将发送缓冲区中的数据封装成报文, 并为每个报文选择一条最合适的路径传输. 因为 MPQUIC 支持多流复用, 在调度时需要同时进行路径和流的多粒度调度, 即还需要选择一条流上的数据进行封装. 对于没有实现多流复用的多路径传输协议 MPTCP 则无需考虑这个问题, 只需要进行路径级报文调度.

报文调度机制的设计主要围绕以下 6 个目标.

- 1) 负载均衡: 以负载均衡为目标的报文调度机制, 将报文均匀地分配到所有路径上, 使多路径均衡地承担应用流量.
- 2) 可靠性: 相较于单路径, 多路径传输提供了冗余路径可以作为链路备份. 因此, 报文调度可以通过复制相同内容的报文到多条路径上提升可靠性. 还有一类冗余策略是选定一条主发送路径, 将其余路径作为备选路径, 当主路径质量下降或故障时, 再将数据调度到备选路径.
- 3) 减少队头阻塞: 由于多条路径的状态具有差异, 不当的调度策略使报文乱序到达接收端, 引起队头阻塞 (head-of-line, HoL) 问题. 如图 4 所示, 路径 1 的 RTT 为 10 ms, 路径 2 的 RTT 为 100 ms, 如果 1 号报文首先被调度到较快的路径 1, 2 号、3 号报文被调度到路径 2, 之后的 4-6 号报文被调度到路径 1, 就会造成 HoL, 4、5 号报文被仍在慢路上的 2、3 号报文阻塞, 致使后序报文滞留在接收缓冲区中等待前序报文到达, 延缓了数据递交给应用层的时间.

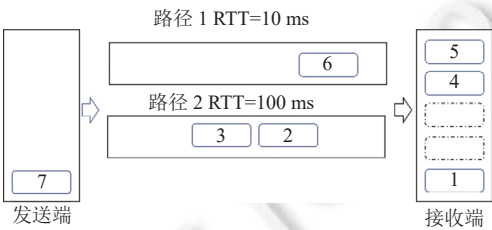


图 4 多路径传输队头阻塞问题

- 4) 聚合吞吐量: 多路径传输的吞吐量需要报文调度和拥塞控制共同保障. 优化报文调度算法降低 HoL, 优化拥塞控制合理调控发送速率, 从而最大化聚合吞吐量.
- 5) 满足服务质量需求: 由于上层应用具有不同的服务质量需求, 例如, 时延敏感型应用需要将数据快速交付接收端而相对不重视丢包, 文件下载应用需要保证传输的完整性而相对弱化了交付延迟. 报文调度策略间接影响了这些应用的服务质量. 因此, 一些报文调度策略结合了应用的特点, 面向特定服务质量需求而设计.
- 6) 自适应能力: 在无线网络中, 信道质量会随着遮挡、移动等因素动态变化, 进而导致传输性能受到应先向.

报文调度策略也需要具备根据动态网络状态进行自适应调整的能力。

接下来,我们将按照路径级报文调度与多粒度报文调度这两类,对报文调度相关研究进行分类梳理.表5分别对比了不同工作的面向协议、采用方法以及是否满足上述目标。

表5 多路径传输报文调度机制相关研究分类

类别	工作	面向协议	方法简介	满足目标					
				负载均衡	可靠性	HoL	吞吐量	特定需求	自适应
路径级报文调度	RR	MPTCP MPQUIC	轮询选择路径	√	—	—	—	—	—
	WRR ^[68]	MPTCP	赋予权重基于轮询选择路径	√	—	—	√	—	—
	minRTT	MPTCP MPQUIC	选择最小RTT路径	—	—	—	√	—	—
	REMP ^[69]	MPTCP	在所有路径上发送复制报文	—	√	—	—	—	—
	LAMPS ^[70]	MPTCP	选择最小丢包率的路径	—	√	—	√	√	—
	OTIAS ^[71]	MPTCP	估算传输时间并选择最短时间的路径	—	—	√	√	—	—
	DAPS ^[72]	MPTCP	估算传输时间并选择最短时间的路径	—	—	√	√	—	—
	STTF ^[73]	MPTCP	估算传输时间并选择最短时间的路径	—	—	√	√	—	—
	BLEST ^[74]	MPTCP	估算拥塞状况,选择慢路或等待快路	—	—	√	√	—	—
	ECF ^[75]	MPTCP	估算最小完成时间,选择慢路或等待快路	—	—	√	√	—	—
	DEMS ^[76]	MPTCP	将数据分段,两条路从分别从段头、尾传输数据	√	—	√	—	—	—
	STMS ^[77]	MPTCP	计算快慢路数据间隔并预留间隔	—	—	√	√	—	—
	OLS ^[78]	MPTCP	估算路径时延差异并生成冗余	—	√	√	√	—	√
	RELES ^[79]	MPTCP	基于深度强化学习的路径选择	—	—	√	√	—	√
	Roselló等人 ^[80]	MPQUIC	基于深度强化学习的路径选择	—	—	—	√	—	√
	COM ^[81]	MPTCP	面向开销的路径选择	—	—	—	—	√	—
	Peekaboo ^[82]	MPQUIC	基于在线学习的路径选择	—	—	√	√	—	√
	M-Peekaboo ^[83]	MPQUIC	基于深度强化学习的面向5G的路径选择	—	—	√	√	—	√
	FALCON ^[84]	MPQUIC	基于元学习的路径选择	—	—	√	√	—	√
多粒度报文调度	SA-ECF ^[85]	MPQUIC	基于优先级多粒度调度	—	—	—	√	√	—
	Wang等 ^[86]	MPQUIC	基于优先级多粒度调度	—	—	—	√	√	—
	FStream ^[87]	MPQUIC	基于优先级多粒度调度	—	—	—	√	√	—
	PStream ^[88]	MPQUIC	基于优先级多粒度调度	—	—	—	√	√	—
	SRPT ^[89]	MPQUIC	小流优先的多粒度调度	—	—	—	√	√	—
	SAILFish ^[90]	MPQUIC	基于深度强化学习的多粒度调度	—	—	—	√	√	√

3.1 路径级报文调度

路径级报文调度将发送缓冲区中的数据封装成报文,并为每个报文选择一条最合适的路径传输. RR 是较早集成在 Linux 内核中的 MPTCP 多路径调度算法.在每次发送报文时,轮询选择每条路径,保证每一条路径上分配的流量均匀.在此基础上,Weighted RR (WRR)^[68]认为达到负载均衡才能最优化传输效率,提出了基于权重的轮询分配策略.但是基于轮询的调度策略在面向多路径异构的情况时会出现比较严重的 HoL 问题,影响传输性能。

面向缓解异构网络环境下的 HoL 问题,OTIAS^[71]为每一个待调度报文选择可用队列里传输时间最短的路径发送. DAPS^[72]基于拥塞窗口、发送中报文数估算传输所用时间,尽可能使报文保序到达. STTF^[73]同样为报文估算最短发送时间的路径,相较于上述算法的区别是,STTF 再传输被中断时,将启动重新调度,快速响应网络变化. BLEST^[74]和 ECF^[75]面向较快路径拥塞的场景,估计路径的拥塞状况或下载完成时间,等待或选择在较慢路径发送

报文. DEMS^[76]为保证 MPTCP 多路径传输时各路径同时完成传输, 将待发数据分段, 两条路径分别从数据段的头部和尾部进行传输, 该算法的缺点是没有考虑到大于两条路径的情况. STMS^[77]根据当前时延计算出快慢路之间应保持的数据间隔, 按照间隔将报文分配给快路径和慢路径, 缓解 HoL 问题.

MPTCP 集成了将报文复制并发送到所有路径上的冗余调度策略^[69], 该策略在获得了更高可靠性的同时却造成了带宽资源浪费. 在高铁网络场景中, 丢包率会大幅波动, 极端情况下甚至会高达 20%–30%, 此时如果只采用 minRTT 策略将严重降低传输性能, 如果采用冗余策略将会浪费大量额外带宽. LAMPS^[70]为这种场景设计了两种模式, 常规模式根据丢包率和 RTT 估算出最短传输时间的路径并发送报文, 冗余模式将冗余发送队列中尚未被应答的报文, 调度器根据丢包情况在两种模式中切换. OLS^[78]也是一种基于冗余生成思想的报文调度策略, 通过评估每个报文的到达时间, 在多路径传输时生成相应的冗余数据, 降低网络抖动给报文到达时间估计带来的不准确性.

MPTCP 和 MPQUIC 中默认的调度策略 minRTT 的目标是提升聚合吞吐量, 该策略在选择路径时优先选择具有最小 RTT 的路径. minRTT 也集成了惩罚和机会重传策略, 当 HoL 发生时在快路上重传报文并通过缩减慢路拥塞窗口惩罚慢路. 但是 minRTT 不能在高带宽时延积的场景下达到较优的效果^[68].

由于移动终端通常具备蜂窝和 WiFi 两种网络接入方式, 调度还需要考虑用户的流量开销问题. COM^[81]提出探测多路径中的突发流量, 在满足应用和用户需求的条件下尽可能利用流量开销低的 WiFi 网络.

一些研究采用机器学习或深度学习算法提升报文调度的自适应能力. 文献 [79] 利用深度强化学习算法 DQN 和 LSTM 算法, 面向多服务质量确保的目标采集网络状态, 自适应地决策每条路径分配的报文比例. 文献 [80] 为了提升链路聚合能力, 采集网络状态并使用深度强化学习进行调度, 但该工作没有解决在快路爆发式发送的问题, 导致发送和接收窗口的大小保持在较低水平. Peekaboo^[82]为了缓解上述方法在训练时带来的开销, 采用了在线学习算法 LinUCB, 在网络动态变化时启动在线训练调整策略. 之后面向 5G 网络场景提出了 M-Peekaboo^[83]. FALCON^[84]借助元学习的思想, 通过离线训练元模型, 在线选择出最适合当前状态的元模型进行快速训练, 并用该模型进行调度决策.

3.2 多粒度报文调度

MPQUIC 协议支持多流复用, 因此在报文调度的时候需要考虑流粒度的调度和路径选择粒度的调度. Web 页面传输是一个需要多粒度报文调度的场景. 为了加载 Web 页面中的多个元素, 上层 HTTP 协议开启多个流传输, 传输要求是加载整个页面的延迟尽可能低. 然而, 一个页面中的多个元素有依赖关系, 在传输时需要考虑各个元素之间的优先级. 如何将优先级与报文调度机制统一考虑是 MPQUIC 需要解决的问题. SA-ECF^[85]面向最短完成时间进行多粒度调度, 根据应用层优先级给流赋予权重, 然后采用基于权重的轮询方法进行流粒度调度, 在路径粒度调度时采用 ECF 策略调度. 实验结果证明 SA-ECF 算法相对于传统 minRTT 算法和 ECF 算法降低了 Web 加载时间. 文献 [86,87] 利用了类似的思路进行流粒度调度, 路径粒度调度采用了 minRTT 算法. 实验证明, FStream 降低高优先级流大约 3 倍的加载时间, 在路径异构状态下的效果明显优于 SA-ECF 算法. 文献 [88] 提出了 PStream, 观察到大流更适合在高带宽路径上传输, 小流更适合在低时延路径上传输的现象. SRPT^[89]在流粒度调度上采用了优先小流的传输策略, 采用 ECF 作为路径粒度调度策略. 与其他算法对比, 降低了网页加载时间. SAILfish^[90]采用了深度强化学习方法来生成 MPQUIC 流粒度调度策略, 减少了 HTTP/2 高优先级流的完成时间.

3.3 小 结

对多路径报文调度机制的性能评估一般采用聚合后吞吐量、传输时延、丢包率等指标. 面向具体应用场景时, 会引入流完成时间、有效吞吐量、应用延迟等服务质量指标. 在衡量负载均衡能力时, 也会考量各路径的报文划分比例. 为衡量 HoL 的处理能力, 经常会引入乱序报文队列长度等指标衡量乱序程度. 对于产生冗余的报文调度策略, 会衡量因冗余引入的带宽开销. 对比两大类报文调度算法的优劣, 路径级别的报文调度算法的优势在于着重考虑了网络环境对于调度决策的影响, 算法根据网络状态进行传输决策, 且对上层应用较为透明. 另一类多粒度报文调度则是与应用紧密相关, 结合应用需求与应用数据的优先级进行流粒度调度, 更适用多应用数据流场景.

在具体应用上, 报文调度算法需要关注以下问题.

1) 许多报文调度算法建立在两条路径的假设基础上对调度过程进行建模和调度逻辑设计, 缺乏更多路径的情况的考虑. 在真实环境中, 很多设备会安装两个以上网卡, 建立两条以上的传输路径. 此时, 两条路径假设基础上的调度策略难以适应更多路径的场景.

2) 为了支持应用的服务质量, 一些调度策略需要结合应用流的时延、内容优先级进行调度. 因为 MPQUIC 继承了 QUIC 的用户态实现特征, 有较多与上层应用结合的报文调度策略实现, 特别是针对流媒体应用和 Web 应用的调度策略优化. 这种跨层优化思路可以扩展到整个协议机制的优化当中, 更好地提供服务质量和用户体验.

4 路径管理

路径管理机制探测设备上可用的 IP 地址, 并负责管理地址对之间路径的建立和断开. 在 Linux 0.91 版本中内置了 5 种路径管理模式, 分别是常规、全连接 (Fullmesh)、Ndiffports^[91]、Binder^[92]以及 Netlink^[93]. 还有一些研究对建立路径的数量和传输性能之间的关系进行了分析. MPTCP 在内核中维持了几种固定的路径管理模式. MPQUIC 为路径管理添加了几种控制帧类型, 通过发送控制帧进行路径的建立、验证以及关闭. 由于 MPQUIC 在用户态实现, 可以根据应用更加灵活地设计路径管理方法.

本文以是否内核内置对路径管理的相关研究进行了分类梳理, 如表 6 所示.

表 6 多路径传输路径管理机制相关研究分类

类别	工作	说明
Linux 内核内置	常规	被动接收路径建立, 效果同单路径传输
	Backup ^[91]	设置主路径和备份路径, 一条路径失效后切换到另一条
	Fullmesh ^[91]	监听网络接口, 在每一对活跃的地址间建立一条路径
	Ndiffports ^[91]	在相同的 IP 地址的多个端口间建立路径, 常用于数据中心的负载均衡
	Binder ^[92]	利用松散路由聚合无线 mesh 网络的路径
	Netlink ^[93]	利用 Linux 的 Netlink 技术自定义路径管理
其他优化方法	PCDC ^[94]	维持对总吞吐量产生增益的路径数量
	Li 等人 ^[95]	自适应路径控制
	MPTCP-ML ^[96]	采用随机森林算法计算可以保持的路径
	Alzadjali 等人 ^[97]	构建基于上下文的多臂老虎机算法选择主要传输路径

4.1 Linux 内核内置

Linux 内核中实现了以下 5 种多路径管理模式, 一是常规, 效果同单路径 TCP. 常用于移动设备上的是一种备份式的路径管理方式, 即建立 WiFi 和蜂窝两条路径, 一般优先选择 WiFi 路径传输数据, 当这条路径失效后, 转换到蜂窝路径发送数据. Fullmesh 在每一对活跃地址间建立一条路径. Ndiffports^[91]、Binder^[92]和 Netlink^[93]都是 MPTCP 专有的路径管理方法, Ndiffports 在一个 IP 地址间的多个端口间建立路径, 常作用于数据中心的负载均衡. Binder 利用 OpenVPN 隧道和松散路由聚合无线 mesh 网络的路径, 实现了在地理上分散的网关资源的聚合, 常用于社区网络之中. Netlink 基于 Linux 的 Netlink 技术进行自定义路径管理, 实现了控制平面和数据平面的分离, Netlink 可实现长连接保持、链路备份、流传输、负载均衡等功能. 应用程序通过 Netlink 消息和内核通信, 以便根据应用需求进行自适应的路径管理.

4.2 其他优化方法

PCDC^[94]对连接中建立新的路径是否会提升传输性能这一问题展开探讨. 首先, 判断经过 Fullmesh 模式建立的所有路径是否能对整个连接的传输性能产生增益, 并只保留可以产生增益的路径数量. 之后, 根据传输的数据量大小决定使用几条路径传输当前数据. MPTCP-ML^[96]基于随机森林算法判断路径的质量, 决定是否保持路径. Alzadjali 等人^[97]为了使路径管理可以更好地适应网络环境, 采用基于上下文的多臂老虎机算法决定应该将哪一条路径作为主要传输路径, 最大化连接吞吐量, 最小化延迟和丢包. Li 等人^[95]发现虽然聚合多路径会带来带宽增益,

但是随着路径数量的增加, 传输性能会产生边际效用递减. 尤其在异构网络中, 路径的数量影响了传输性能. 于是该工作针对无线网络连接中每个网卡应建立多少路径的问题开展了理论推导, 并提出 MPTCP 的自适应路径控制算法.

4.3 小 结

对路径管理优化工作主要的衡量指标是建立路径数量后的聚合后吞吐量. 另外, 建立和断开路径的所需时间也是路径管理机制的考量因素. Linux 内核的路径管理机制以固定的工作模式匹配不同的应用场景, 但不提供根据用户需求自行配置路径的接口. 然而, 随着多路径传输协议的应用逐渐广泛, 路径管理机制也正向跨层优化方向发展, 开始支持根据应用服务质量需求创建并维护路径. 新一代的路径管理机制允许用户自定义路径数量和行为, 并根据具体的应用场景和服务质量需求优化路径选择、负载均衡和服务质量, 实现更灵活的路径管理.

在路径管理机制后续研究和应用中, 建议关注以下问题.

- 1) 在移动终端设备中, 开销控制是至关重要的. 但是较少工作衡量建立新路径引入的带宽资源、能耗等方面的开销. 因此, 需要对路径引入的开销进行衡量.
- 2) 可以结合实际应用场景的需求, 进行灵活定制化的路径管理, 实现即时可插拔的路径管理功能.

5 重传机制

传输层的重传机制为了应对丢包而设计. 多路径传输中的重传机制设计需要考量多条路径的特性. MPTCP 中定义了两种粒度的重传, 连接级别和路径级别, 当路径级别的重传失败后, 会选择连接级的重传^[19]. 当一条路径失效后, 发送端在其他可以传输的路径重传, 并且在这条失效的路径上尝试重传, 在超过上限次数后, 宣告此路径失效. 由于 QUIC 在传输中维护的报文序号单调递增, 重传数据的报文序号比原报文大, 此时接收端会接收更高报文序号的数据^[11]. 区别于 MPTCP 的重传机制, MPQUIC 不限制重传报文在原来的路径上发送, 可以更加灵活地使用不同的重传策略, 例如在相同路径重传、在不同路径重传或在多条路径冗余重传^[18].

本文根据重传机制采用的不同方法, 将已有工作分为两类: 部分可靠传输、冗余生成, 如表 7 所示.

表 7 多路径传输重传机制相关研究分类

类别	工作	协议
部分可靠传输	PRMP ^[98]	MPTCP
	MO-PR ^[99]	MPTCP
	RFC 9221 ^[100]	MPTCP
	QUICU ^[101]	QUIC
	PR-MPTCP+ ^[102]	MPTCP
	Fix ^[103]	QUIC
	VOXEL ^[104]	QUIC
	DRTP ^[105]	MPTCP
	pTCP ^[106]	MPTCP
	DAC ^[28]	CMT-SCTP
	FastCoRe ^[107]	MPTCP
	CMT-SCTP ^[108]	CMT-SCTP
	RTX-LCS ^[109]	CMT-SCTP
冗余生成	Lee 等人 ^[110]	MPTCP
	M/TCP ^[111]	MPTCP
	SC-MPTCP ^[112]	MPTCP
	机会重传 ^[20]	MPTCP
	MPTCP-FEC ^[113]	MPTCP
	RTX-LCS ^[109]	CMT-SCTP

5.1 部分可靠传输

部分可靠传输方法在丢失某些报文时不进行重传,即使没有收到这些丢失的报文也保持向应用提交数据。该方法降低了时延敏感型应用的延迟,并减少由于频繁重传带来的带宽资源浪费。文献[114]分析了完全可靠和部分可靠传输在高丢包率环境下的吞吐量下降问题,引入了3个成本函数,衡量系统可支持的可靠性等级。文献[98]设计了新的MPTCP选项PR_CAPABLE,可通过该选项设置最长重传次数和最大传输时间,为传输提供部分可靠传输的功能。MO-PR在MPTCP上设计了面向消息的重传机制,及时放弃无用报文段并通告接收端,提升传输效率^[99]。RFC 9221为时延敏感型应用设计了新的QUIC帧格式Datagram,提供部分可靠传输功能^[100]。尽管不重传可以降低应用延迟,但是会带来应用质量不可控的下降,例如造成视频应用的图像模糊和声音突变。于是,文献[101]设计了3种新的帧类型,更精确地控制重传时间和数据量,确保应用质量不会过多损失。另外,还有对触发重传的阈值进行调整的相关工作。为了降低大量伪重传次数,文献[110]增加了快速重传阈值,并提出在报文乱序时延迟应答,在重传时立即应答的策略。DAC^[28]让TCP发送端等待3个重复的ACK后重传,降低快速重传和快速恢复的发生频率。

部分可靠传输常被应用于实时流媒体应用的传输优化。针对流媒体在异构网络传输中的性能下降问题,PR-MPTCP^[102]提出了面向用户体验优化的MPTCP部分可靠重传策略,既考虑了视频中的帧优先级也考虑了视频帧的有效时间。具体策略是在网络拥塞的状态下只发送不超时的多媒体帧,在发生丢包时,只重传具有高优先级的I帧报文。文献[103]为QUIC添加了不可靠流类型,给每个数据流帧加入是否需要可靠传输的标记,如果在传输过程中负载不可靠流帧的报文丢失了则不重传。DRTP^[105]提出了一种基于可靠度的报文重传机制,根据不同应用对可靠度的需求设置报文重传策略。在当前传输可靠度满足应用需求时,该策略减少了不必要的重传次数,提高了传输效率。为了降低数据中心中时延敏感型短流的完成时间,FastCoRe^[107]为MPTCP提出了一种快速耦合的重传机制,在流的最后一个报文已经乱序到达时即启动重传,将拥塞路径上的数据转移到非拥塞路径。CMT-SCTP^[108]提供了多种重传时路径选择的策略,包括重传和原数据发送到同一路径、重传随机发送到拥塞窗口还有可用空间的路径、重传到最低丢包率的路径、重传到最大慢启动阈值的路径。在此基础上,RTX-LCS^[109]提出了综合考虑拥塞窗口、丢包率、慢启动阈值的重传策略,提升了在有限接收窗口条件下的吞吐量。

5.2 冗余生成

除了部分可靠传输降低不必要重传的方法,还可以通过生成冗余的方法弥补丢包带来的损失,减少重传的次数。pTCP^[106]设计了冗余striping策略将重传报文发送到另一条路径上。M/TCP^[111]采用了两种机制应对丢包,首先在快速重传时,将所有丢失的报文发送到所有路径上。在超时重传的情况下,将丢失的报文在其他路径重传。

还有采用编码方法生成冗余的研究工作。SC-MPTCP^[112]对报文进行编码,提出了主动冗余算法根据重传率的变化更新冗余生成量。同时,为了平衡主动冗余算法带来的误估计设计了被动冗余算法。MPTCP实现了机会重传机制^[20],在拥塞窗口还有空间但接收窗口不足时,将报文在另一条路径上进行重传,这种方法的思想和文献[107,112]比较类似,文献[20]是面向接收窗口不足时,文献[107]是面向链路容量波动时,文献[112]是面向主动冗余有误估计时。文献[113]在MPTCP基础上实现了动态FEC纠错码生成方案,根据网络的状态调整FEC的生成,给时延敏感型应用提供0-RTT的丢包恢复能力。

5.3 小结

评估多路径传输中重传机制的关键指标是应用交付延迟与数据完整性,这两个指标衡量了延迟以及接收端收到的数据量是否满足应用需求。以视频传输为例,衡量视频帧的交付延迟与清晰度可以用来评估部分可靠重传机制的策略设计是否可以满足服务质量。对于冗余生成类型的重传机制,还会评估冗余开销、编码算法的时间复杂度等指标。关于两类重传机制,部分可靠传输机制在使用时需要关注应用数据类型。例如,交互式视频中,实时文字评论需要可靠传输,而视频内容允许部分丢失。然而,使用H.264编码在不同视频帧类型之间存在编解码上的依赖关系,使得负载不同视频帧的报文存在不同优先级和重要度。灵活、定制化、能充分利用有限网络资源是部分可靠传输机制的优点,但该机制也要求开发者明确应用的服务质量需求,设计并实现完善的策略,降低部分内容的传

输可靠度提升整体收益. 在丢包率较高的网络环境中, 冗余生成机制的收益更高. 荣誉生成机制通过付出少量的带宽资源, 节约了重传带来的时间成本. 在实际应用中, 可以根据应用需求和网络环境对两种机制进行选择, 优化整体传输性能. 在对重传机制的后续优化工作中, 建议关注以下问题.

- 1) 面向 MPQUIC 设计的重传机制较少, 基本上都是沿用 MPTCP 和 SCTP 的策略, 然而 MPQUIC 结合了多路径和用户态实现的优势, 提供了重传机制更高的设计自由度, 可以在此基础上设计更加适应异构网络等场景的重传机制.
- 2) 根据应用定制化重传, 不同的应用数据具有不同的服务质量需求, 有的需要保证可靠性, 有的需要尽快交付应用, 对可靠性要求较低, 因此, 可以根据应用的差异化需求为不同类的应用流量提供定制化的重传机制.

6 安全机制

多条路径发送数据会增加攻击者通过嗅探获取完整数据内容的难度, 增加了传输的安全性. 虽然如此, 防火墙和网关也会因为无法获取其他路径上的数据而无法进行流量分析, 导致入侵检测和数据泄漏预防机制的失效^[5]. 因此, 本文从两个维度看待多路径传输中的安全问题, 既可以通过多路径传输提升安全性, 也需要提防多条路径引入的安全威胁. 根据分析, 多路径传输中存在着以下安全隐患.

- 1) MPTCP 连接处理能力不足: 一些网络入侵检测系统无法处理 MPTCP 的连接, 在发现威胁时无法将所有路径同时切断, 导致连接通过其他路径继续保持. 当中间件不支持 MPTCP 时, MPTCP 流量可能会绕过安全监控和分析工具, 造成安全隐患.
- 2) 碎片攻击: 当攻击者向 MPTCP 或 MPQUIC 的多条路径分别注入恶意代码片段, 防火墙或入侵检测系统部署在单路径上时只具备检测单条路径传输流量的能力, 无法发现多路径传输数据组合起来之后带来的隐患. 基于这个特点, 碎片攻击可以将恶意代码拆分成片段利用多路径传输.
- 3) 数据篡改: 透明代理或应用层的入侵检测系统可能会修改应用数据, 破坏 MPTCP 选项添加的校验和.
- 4) 分布式拒绝服务 (distributed denial of service, DDoS) 攻击: MPTCP 具备多路径聚合能力, 相较于单路径 TCP, 更需要防范洪泛 TCP SYN 请求或 TCP SYN+MP_JOIN 引发的 DDoS 攻击.
- 5) 反弹攻击: 攻击者通过宣告受害者的地址的方式, 导致受害者被攻击且无法追踪攻击者的流量. 为了防范反弹攻击, 现在已经采取了建立新路径前进行地址验证的策略.
- 6) 会话劫持: 攻击者可利用 ADD_ADDR 选项发送自己的 IP 将会话劫持. MPTCP 版本 1 通过 HMAC (hash based message authentication) 机制在 ADD_ADDR 时, 对地址进行认证, 但是用于生成 HMAC 的密钥在初次握手阶段是明文, 在初次握手密钥交换阶段的安全性无法保障. 攻击者可以借助密钥交换阶段的部分信息, 进行加密参数生成, 进行后续的攻击.
- 7) 反射放大攻击: MPQUIC 基于 UDP 实现, 更容易遭受 DDoS 攻击, 且因为 MPQUIC 会产生大量的包含 TLS 证书的应答信息, 在 MPQUIC 上发动反射攻击时, 受害者会收到更大的攻击流量, 也被称为反射放大攻击^[115].

本节从两个角度探讨了多路径传输的安全防御机制. 首先是基于多路径传输的防御, 即利用多路径传输的特性去解决现存的安全问题. 其次是面向多路径传输提出的防御. 表 8 介绍了相关研究工作和防御效果.

表 8 多路径传输安全机制相关研究分类

类别	工作	方法简介	效果
基于多路径传输的防御	SPREAD ^[116]	基于Shamir秘密共享方案将消息分成多份	防御嗅探等攻击
	MEO ^[117]	基于Wyner窃听信道模型的划分方案	防御嗅探等攻击, 并降低带宽开销和计算复杂性
	Balfanz等人 ^[118]	多路径实现密钥协商过程	防御嗅探等攻击
	Chan等人 ^[119]	多路径实现密钥协商过程	防御嗅探等攻击
	SMKEX ^[120]	基于MPTCP和DH算法的密钥交换协议	增加TLS安全性

表 8 多路径传输安全机制相关研究分类 (续)

类别	工作	方法简介	效果
面向多路径传输提出的防御	Pearce等人 ^[121]	交叉路径时序分析	发现攻击者行为
	Diez等人 ^[122]	递归哈希算法生成哈希链加密	防御ADD_ADDR选项劫持
	Krishnan等人 ^[123]	基于和链	防御ADD_ADDR选项劫持并防御初次握手阶段的窃听
	SCMTCP ^[124]	椭圆曲线生成密钥, 对每一个路径生成一个认证密钥	防止DoS攻击
	Kim等人 ^[125]	基于椭圆曲线的加密算法, 公钥4次握手	防止握手时窃听
	MPTCP v1 ^[19]	设计新的ADD_ADDR选项	防御中间人攻击
	MPTCP TLS ^[126]	握手时采用不对称的密钥交换	防止密钥泄露以及会话被劫持
	Fischlin ^[127]	主路径上进行常规的握手流程, 并在路径上进行TLS1.3的密钥更新	防止密钥泄露以及会话被劫持
	MPTCPsec ^[128]	TCP_ENO选项对每一个报文选项进行认证, 调整路径的优先级	防止DoS攻击、数据的重定向以及报文注入攻击
	Noh等人 ^[129]	基于数字签名对ADD_ADDR选项进行后向验证	防止会话被劫持

6.1 基于多路径传输的防御

当前的加密机制存在一些问题, 例如加密机制存在漏洞 (10 年前在 802.11WEP 标准中发现的漏洞仍有 50% 的接入点在使用^[130])、强加密不一定被服务支持、强加密的计算复杂性高等. 多路径传输是一种增加传输安全性手段^[131], 部分研究工作利用多路径传输技术将数据分散发送特点, 提升了网络对嗅探等攻击的防御能力. SPREAD^[116]基于 Shamir 秘密共享方案^[132]将消息分成多份传输, 但这种方法也带来了带宽的开销以及编解码的计算开销. 文献^[117]提出基于 Wyner 的窃听信道模型设计了更加有效的划分方案 MEO, 降低了带宽开销和计算复杂性.

另外, 也有一些工作将密钥协商过程通过多路径实现^[118,119]. 虽然如此, 攻击者也有可能通过侧信道或统计手段获取到一些信息. 为了改进机会性加密^[133]无法防御中间人攻击等主动攻击方式的弱点, 文献^[120]基于 MPTCP 和 Diffie-Hellman (DH) 密钥交换算法, 提出了一种新的密钥交换协议 SMKEX. 通过路径差异性提供加密通道, 该协议可以兼容 TLS 并增加其安全性.

6.2 面向多路径传输的防御

文献^[121]分析了 MPTCP 在和系统交互时可能产生的问题, 因为多路径传输中攻击者需要在所控制的节点接收到两条路径发送的信息后才能进行数据完整性的修改, 因此可以通过交叉路径时序分析攻击者的行为.

文献^[122]提出基于递归哈希算法生成哈希链的加密方法, 在建立后续路径时基于该链进行认证, 从而防止攻击者在握手阶段通过 ADD_ADDR 选项劫持会话. 但该方法无法防御在初次握手阶段的窃听攻击. 文献^[123]提出基于和链的方法缓解文献^[122]的问题, 该方案内存开销较低, 但仍然会受到整数时移攻击的影响.

TCPCrypt 和 SMKEX 在攻击者同时进行多路径主动攻击时失效, 且基于 DH 和 RSA 算法生成的密钥较长, 带来较大的计算复杂性开销的同时, 也不适用于 MPTCP 的选项长度限制. 因此, 新的机会安全协议 SCMTCP^[124], 采用椭圆曲线生成密钥, 缩短了密钥长度. 通过第三方证书认证保障公钥交换, 对每一个路径生成一个认证密钥, 防止 DoS 攻击. 为了降低初次握手的开销并防止初次握手遭到窃听, 文献^[125]提出基于椭圆曲线的加密算法, 公钥通过 4 次握手交换但是降低了计算开销. 另外, MPTCP v1 提出了新的 ADD_ADDR 选项^[19], 在初次握手时交换计算好的 HMAC 防御中间人攻击, 但这两个方法依旧无法防御时移攻击.

文献^[126]在 MPTCP 中实现了 TLS, 在握手时采用不对称的密钥交换防止密钥泄露, 引入第三方证书认证防止会话被劫持. 文献^[127]基于 TLS1.3 提升了 MPTCP 的密钥交换的安全性, 在主路径上进行常规的握手流程, 在其他路径上进行 TLS1.3 的密钥更新.

MPTCPsec^[128]在加密机制上利用了 TCP_ENO 选项, 对每一个报文选项进行认证从而防止 DoS 攻击. 通过调

整路径的优先级防止数据重定向, 在发现某一路径有问题时, 只关闭该路径而不是切断整个 MPTCP 连接. 并且 MPTCPsec 可以防御报文注入攻击. 文献 [129] 对 ADD_ADDR 选项进行了后向验证, 利用数字签名确定该添加的地址是否被认证过, 但该方法在建立路径时增加了时延.

6.3 小 结

在评估多路径安全机制时, 首先会对提出的机制进行安全性分析, 分析该机制能否具备应对潜在威胁的能力. 另一方面, 也会评估机制引入的时延、冗余内容大小以及计算复杂度的开销. 针对握手阶段的安全机制, 也会进行连接建立时间的评估.

在多路径安全机制后续研究和应用中, 建议关注以下问题.

- 1) 许多安全威胁源自 MPTCP 以及 MPQUIC 的宣告地址消息, 因此应该建立完善的地址认证机制, 防止攻击者利用此机制伪造地址实现攻击.
- 2) 基于多路径传输的加解密机制虽然可以增加安全性, 但如何均衡安全性、计算复杂性以及建立连接的时延也是一个值得探究的问题.
- 3) 一些网络中间件对多路径传输技术缺乏支持, 防火墙和入侵检测设备应当具备识别多路径流量的能力, 防止恶意流量的组合渗透.

7 面向应用机制设计

为了支持特定的应用需求, 一些多路径传输的优化工作同时优化了多个机制, 或是将多路径传输技术与其他网络技术结合, 为具体应用场景定制化多路径传输服务. 本节将从数据中心网络、流媒体传输、无线网络、移动终端这 4 个场景出发, 梳理面向应用的多路径传输机制优化工作, 如表 9 所示.

表 9 多路径面向应用机制设计相关研究分类

应用	分类	工作
数据中心网络	负载均衡、拥塞控制策略优化	EW-MPTCP ^[134] 、CAPS ^[135]
	拓扑架构优化	Raiciu等人 ^[136] 、GRIN ^[137]
	流调度优化	MPTCP_OPN ^[138] 、RateSheriff ^[139]
	协议优化	DCQUIC ^[140]
流媒体传输	跨层调度框架	Corbillon等人 ^[141] 、MP-DASH ^[142] 、RTRA ^[143]
	面向时延敏感性建模	Chuat等人 ^[144] 、Yang等人 ^[145]
	面向多路径传输与网络编码的建模	Wu等人 ^[146,147]
	面向带宽资源不足场景下的调度问题	Afzal等人 ^[148] 、VOXEL ^[104]
无线网络	面向VR/AR应用	Silva等人 ^[149] 、Wei等人 ^[150]
	车联网场景	Nigel ^[151] 、Zhu等人 ^[152] 、MPTCP/NC ^[153] 、NCMPTCP ^[154] 、PTLIA ^[155] 、CELLFUSION ^[156]
	无人机场景	Chirwa等人 ^[157] 、ACODS ^[158]
	高铁场景	Li等人 ^[159] 、Dong等人 ^[160] 、POLYCORN ^[161]
移动终端	网络切片场景	Musher ^[162] 、M-Peekaboo ^[83] 、HVC ^[163]
	业界方案	苹果 ^[164] 、Tessares ^[165] 、XLINK ^[26]
	面向节能	eMPTCP ^[166,167]

7.1 数据中心网络

数据中心网络的各个节点包含多个网络接口, 多路径传输协议十分适用于数据中心的聚合传输. Incast 是数据中心中的一个普遍问题, 表现为多个服务器同时向单个目标服务器发送请求时, 目标服务器不堪重负产生网络拥塞, 导致拥塞窗口被削减、吞吐量下降、传输延迟增加. 数据中心中的 top of rack (TOR) 交换机架构造成了多个

服务器与单个接收方通信的瓶颈。MPTCP 中的多个路径同时传输数据时, 如果共享了瓶颈链路, 可能会产生与 TCP Incast 类似的问题, 导致网络吞吐量下降^[168,169]。

EW-MPTCP^[134]为 MPTCP 提出了一种均等权重的拥塞控制策略, 在 MPTCP 的耦合控制基础上, 通过与服务器数成反比对拥塞窗口进行加权, 让 MPTCP 路径公平竞争瓶颈链路, 消除了 Incast 的影响。MPTCP 可以建立单路径 TCP 无法实现的拓扑, 利用现有的技术 (如 ECMP) 轻松部署在数据中心中。CAPS^[135]关注到数据中心云服务应用流量为长流、短流动态混杂的特征, 利用多路径传输将短流分散到所有路径, 限制长流在部分路径上, 并且利用 FEC 技术对短流进行编码和重传缓解乱序的问题。

文献 [136] 结合 MPTCP 和胖树架构的双端口变体, 在同等开销下可以负载更大的流量, 在亚马逊 EC2 上与单路径 TCP 对比提升了 3 倍吞吐量。为了利用闲置带宽, GRIN^[137]通过 MPTCP 互联一个机架内服务器的空闲端口实现了网络拓扑的改变。GRIN 几乎可以在任何现有的数据中心网络中部署, 提高带宽利用率, 充分利用数据中心网络的资源。MPTCP_OPN^[138]对数据中心网络中的并发流数量进行了理论分析, 并提出了在实时网络环境下灵活调控流数量以及流量迁移的方法, 有效降低了流完成时间。RateSheriff^[139]基于可编程交换机实现了对报文的解析, 区分了多路径流和单路径流, 在此基础上考虑速率控制模块在数据中心网络中部署的位置, 可以有效控制多路径流的速率。

因为 QUIC 具有连接建立延迟低、多流复用的特性, 文献 [170] 评估了 QUIC 在数据中心部署的性能。实验证明, QUIC 在高丢包环境中相较于 TCP 能保持更高的吞吐量。DCQUIC^[140]在数据中心中采用 QUIC 协议建立连接, 与 DCTCP 相比提升了 49.59%–73.02% 的传输效率, 通过连接迁移技术提升了传输的可靠性。目前关于 MPQUIC 在数据中心中的研究工作比较少, MPQUIC 既具有 QUIC 的高效优势, 又可以借鉴现有基于 MPTCP 的数据中心优化技术, 在数据中心网络中部署具有较大的发展空间。

7.2 流媒体传输

流媒体应用现已充斥在人们的日常生活中, 根据思科 2021 年度报告显示, 网络中视频流量的占比逐年增加。短视频、直播、VR/AR 等流媒体传输具有缩短重缓冲时间、提升画面清晰度、提升有效吞吐量等共性业务指标, 同时也因为各自的用户需求具有特定的业务指标。例如, 短视频传输更关注首开延迟的优化; 直播应用需要同时保障直播视频流的推流侧和拉流侧的传输效率, 保持较低的端到端延迟; VR/AR 技术需要更低的用户交互延迟和超高清的画面清晰度以提供沉浸感。多路径传输技术可以聚合多路径带宽, 为流媒体传输提供更多带宽资源, 可以为各类流媒体应用更好的传输优化方案。

一些研究认为, 利用多路径传输技术进行流媒体传输时, 如果不考虑流媒体内容的特征, 将会产生不合理的决策。文献 [141] 提出跨层的调度框架, 结合传输层、应用层的信息, 将调度问题转化成整数规划问题, 尽可能保证视频帧的按时到达。另外, 传统的多路径传输协议难以获取用户对路径的实际偏好, 例如 MPTCP 同时利用 WiFi 和 LTE 建立两条路径, 不当的调度策略会造成对 LTE 路径的过度使用。MP-DASH^[142]提出了调度模块和视频自适应模块。调度模块通过获取每个视频块的截止期限和大小进行调度。同时, MP-DASH 提供了用户接口, 让用户选择更倾向使用的路径传输。文献 [143] 将多路径的视频流传输建模成一个强化学习任务的决策过程, 并在这个基础上设计了码率自适应算法 RTRA。奖励函数面向服务质量设计, 考虑了首开延迟、播放流畅度、播放质量、开销。动作包括下一个视频片段的质量、使用路径、是否等待发送与平滑动作。为了实时求解, 作者提出了一个自适应、最优动作搜索算法获取局部最优解。

为满足流媒体应用的时延敏感特性, 一些研究面向视频帧传输的时间限制建模, 尽可能地保证视频数据能够按时到达接收端。文献 [144] 将当前发送和重传的数据量, 根据网络状态和时间限制建模成最优化问题并求解出每条路上应当划分的数据比例。同时, 该工作引入部分可靠传输, 将超过时间限制的数据丢弃。文献 [145] 为基于 DASH-SVC 的分层传输设计了适用于高带宽和带宽不足两种情况的策略。对于高带宽情况, 提出基于截止时间的策略, 根据截止时间判定优先级, 尽可能传输所有视频层保证高的码率; 对于带宽不足的情况, 优先传输每个视频片段的基础层。该框架采用 UCB 算法根据网络状态决策, 在网络状态变化超过阈值时, 则进行策略的转换。

文献 [147] 为了在多路径带宽资源有限的情况下最小化视频传输失真提出了 BEMA 框架. 框架包括 FEC 编码和数据量分配策略, 对视频帧的时间限制进行数学建模, 并用启发式算法决定 FEC 的冗余量、编码大小以及各路径上的数据分配策略. 作者围绕多路径视频流传输问题, 从低能耗^[146]等目标出发提出了一系列优化工作.

另外还有一些工作通过部分可靠传输方法解决带宽资源不足场景下的调度问题. 文献 [148] 通过每 0.5 s 反馈报文获取网络状态, 将每条路径的质量划分为好、中、差这 3 种. 让视频流数据尽可能的在质量好的路径上发送, 并针对视频的 3 种帧类型设计相应的主动丢弃策略和关键帧保护策略. VOXEL^[104] 框架根据帧丢失对用户体验的影响对每个视频段内的帧进行排序, 设计了结合部分可靠传输的码率自适应算法. 该算法可以保证实验视频片段在承受大量视频帧丢失情况下, 仍然提供具有难以察觉的视频质量 (即 SSIM 为 0.99).

VR/AR 应用通常需要传输多个流比如控制信息、方位信息、用户动作信息等以及视频流. 同时 VR/AR 的视频流区别于常规视频流, 它的每一帧画面包括 360° 的图像数据, 所以 VR/AR 流媒体传输不仅需要更高的带宽支持, 为了保证用户的交互体验, 还需要较低的传输时延. 文献 [149] 面向 VR/AR 的内容分配提出 RDPA, 追踪高优先级的报文并在下一轮将其调度到最低时延的路径上. 文献 [150] 面向 VR 视频流的传输, 提出了码率选择算法和报文调度算法, 优先保证 VR 视频视口区域的数据及时传输给用户, 在有限带宽的情况下为用户提供更好的体验.

7.3 无线网络

在无线网络环境中, 遮挡、距离、干扰等因素造成的无线信道质量下降会导致传输的丢包率上升、时延增加^[171]. 本文聚焦分析了车联网、无人机自组网、高铁网络以及网络切片场景中涉及多路径传输的研究.

车联网的自动驾驶功能需要实现车辆与其他车辆、道路基础设施和行人的通信. 然而, 车联网具有动态拓扑和节点密集的特点, 在车联网中保证可靠性、鲁棒性和低响应延迟具有挑战性^[151]. 多路径传输技术可用于车联网, 聚合 IEEE 802.11p、蜂窝通信和毫米波等无线通信技术, 维持连接稳定性并提高传输效率^[172]. 然而在高移动速度下的车载环境中, MPTCP 表现不佳. Nigel^[151] 测试了 MPTCP 传输可以提升车辆到基础设施 (vehicle-to-infrastructure, V2I) 的吞吐量. 使用 MPTCP 的车辆可以使用 IEEE 802.11p 与路侧设备 (road side unit, RSU) 建立连接, 同时使用蜂窝通信与基站建立另外的路径. 文献 [152] 致力于提高 MPTCP 传输的稳定性, 当车辆检测到自身处于 RSU 的通信范围内时, 通过 RSU 和蜂窝同时与服务器建立连接, 当车辆移出范围时, 只会使用较为稳定的蜂窝网络传输数据. MPTCP/NC^[153] 与 NC-MPTCP^[154] 提出将 MPTCP 与网络编码结合, 在高丢包的网络环境中保持吞吐量. 文献 [155] 基于 MPTCP 设计了基于消息优先级和吞吐量估计的拥塞控制算法 PTLIA, 对安全消息等赋予高优先级, 保证这些消息可以在其他消息之前及时发送. CELLFUSION^[156] 针对车联网中的遥控驾驶场景, 提出了 XNC 框架, 结合无码率编码与多路径传输技术, 提供低延迟低冗余的传输. 在大规模道路测试, 降低了 66.11%–80.62% 的卡顿时间.

除了具有高速移动的特性, 无人机还会在 3D 空间内产生拓扑变化, 无人机自组网也面临着频繁断开连接和高丢包的问题. 文献 [157] 利用 MPTCP 确保无人机自组网在异构路径上的稳定连接和无缝切换, 通过数学建模的方法, 面向传输需求进行无人机无线路径类型的匹配, 实现最佳流量分配. ACODS^[158] 设计了一种适用无人机的 MPTCP 自适应卸载架构. 该架构由响应模块、卸载决策模块和远程执行模块组成, 响应模块和卸载决策模块部署无人机上, 远程执行模块部署在地面控制系统中, 卸载决策模块通过 MPTCP 与远程任务执行模块通信.

文献 [159] 测量了 MPTCP 在高铁峰值速度 310 km/h 下基于两条蜂窝网络的传输性能, 并证明 MPTCP 相较于 TCP 能达到更好的鲁棒性. 文献 [160] 引入了一种用于高铁网络的并发多路径传输方案, 进行 6 条可用链路聚合的实验, 验证了多路径传输可以为高铁网络提供更高的带宽支持. POLYCORN^[161] 为高铁网络中的 4 种事件 (基站入网切换失败、流即将完成、重复超时重传、路径空闲) 设计了可组合的多路径报文调度方案, 并将该方案部署于高铁的网关, 在北京到上海的大规模真实环境下高铁测试中, POLYCORN 被验证提升了 242% 的聚合吞吐量.

网络切片技术通过整合网络资源为不同业务标准提供网络服务. 为了有效利用毫米波资源, 需要解决其在遮挡或是移动场景下高丢包率的问题. Musher^[162] 基于聚合多频段无线信道的思路, 设计了聚合 802.11ad 和 802.11ac

频段的调度器,可以同时保证可靠性和数据传输率. 3GPP TS 23.501^[173]提出 ATSSS 架构,可以使 5G 核心网支持 3GPP 和非 3GPP 网络的多路聚合. M-Peekaboo^[83]提出基于机器学习优化 5G 和 WLAN 的多路径调度方法,相较于其他调度算法更能充分利用 5G 路径,在静态环境下获得了更高的吞吐量. 为保证 5G 的 3 大应用场景: eMBB (增强移动宽带)、URLLC (低时延高可靠) 以及 mMTC (海量大连接), HVC^[163]从网络层到应用层探讨了如何合理利用虚拟异构信道,协同拥塞控制以及调度策略,保证不同 5G 应用的服务质量. 上述工作通过多路径传输聚合异构频段以及无线网络资源,实现了多种服务质量的确保,为网络切片优化提供传输层的技术路线.

7.4 移动终端

现今的移动终端一般集成了多个网卡,例如 3G、4G、5G 以及 WiFi. 为了提供给用户更好的服务体验,多路径传输技术被广泛应用于移动终端上. 2013 年 9 月,苹果公司在 iOS7 系统中的 Siri 语音识别接口引入了 MPTCP 技术,降低了 20% 的应用延迟,该应用是 MPTCP 的第 1 个大规模商业部署. 后续, MPTCP 被应用在 iOS13 系统音乐播放器中,降低了 22% 的音乐播放卡顿时间^[164]. 比利时网络技术公司 Tessares 利用 MPTCP 聚合 DSL 和 5G 网络,该技术已在 6 个欧洲国家部署,为乡村网络环境中提升了 20–30 Mb/s 的吞吐量^[165]. 华为自主研发的 Turbo 技术基于 MPTCP 和 MPUDP 支持多网卡智能手机上的 WiFi 和 LTE 网络聚合. 韩国电信公司在 Galaxy S6 和 S6 Edge 智能手机上提供 Gigapath 服务,使智能手机能通过多路径聚合达到 1 Gb 的带宽.

QUIC 协议凭借其灵活、低延迟等特性得到了工业界的青睐,阿里巴巴淘系架构团队自研的 XQUIC 和其多路径扩展 XLINK,针对移动设备上的淘宝短视频应用进行了优化,并参与推进了 IETF 的 MPQUIC 标准化进程^[26,174]. 目前 QUIC 和 MPQUIC 没有像 MPTCP 一样直接集成到安卓系统中提供对应用透明的多路径传输服务,而是更聚焦于特定的应用进行优化.

在移动终端上应用多路径传输技术更需要考虑能耗以及流量消耗的问题. 多路径传输会产生比单路径更高的能耗,需要更好地平衡能耗和多路径的使用. 文献^[166,167]对 MPTCP 在同时使用蜂窝和 WiFi 条件下的能耗进行了建模,并提出了更节能的方案 eMPTCP.

7.5 小 结

面向应用的多路径传输机制设计需要从多个维度衡量,一是从传输层对通用指标进行评估,衡量吞吐量、传输时延和丢包率等. 另外,需要根据每个应用的特性采用不同的服务质量或用户体验指标衡量. 例如流媒体传输衡量同屏延迟、重缓冲时间、峰值信噪比以及结构相似性等指标,移动终端应用中会衡量设备功耗以及蜂窝数据流量的开销等指标.

各个应用具有不同的用户体验指标,且这些用户体验指标种类复杂,难以简单映射到传输层服务质量指标上. 目前多路径对应用的优化工作都是面向特定应用场景对协议的机制功能进行修改或是根据应用需求进行自适应的参数调节,难以产生一种通用方案实现上层应用透明. 因此,提出一种面向领域场景、可定制的多路径传输方案,是一个崭新的、具有应用前景的研究方向.

8 研究挑战与未来展望

本节对多路径传输技术面临的挑战进行了分析,并展望未来研究发展趋势.

8.1 研究挑战

(1) 多路径传输的可扩展问题

多路径传输方法的评估通常在可控的模拟仿真和真实网络中进行,在进行模拟仿真评估时存在一些共性问题. 首先,许多机制优化工作面向移动终端的通信场景构建模拟仿真拓扑,导致仿真环境过于单一: 一是从路径建立数量的角度来看,在仿真实验时倾向建立两条路径,例如建立一条 WiFi,另一条为 LTE 或 5G 路径;二是仿真拓扑节点规模小,拓扑较为简单. 最典型拓扑结构是建立一台主机,部署两张网卡,两条的路径经由两台交换机汇聚到一台路由器上,最后路由器连接到另一台主机. 虽然上述拓扑中的链路和网卡可以通过 Linux traffic control

(TC) 工具调整丢包率、时延和吞吐量等路径状态,但在真实的无线网络环境中,每一跳链路的质量以及拓扑都可能发生动态的变化.缺乏对复杂多变的网络环境的仿真难以验证算法在真实环境下的可扩展能力.

另一方面,在 Mininet^[175]、NS-3^[176]等模拟仿真环境中,测试得到的高性能不一定代表算法能良好地适应真实网络环境. Mininet 基于网络功能虚拟化技术,将网络设备(例如交换机、路由器、主机等)抽象为虚拟容器,使用 Linux 命名空间技术,隔离虚拟主机和虚拟路由器之间的网络,实现在单个主机上对整个网络的仿真. Mininet 的仿真结果受限于所运行的主机的硬件资源,例如 CPU、内存和网络带宽等.如果主机的资源不足,会导致仿真结果不准确. NS-3 模拟的网络行为基于计算机内部的内存和处理器,而不是真实网络设备和物理链路,因此它不会占用真实网络资源.但 NS-3 在仿真复杂网络时的速度比较慢,运行时会造成较大的内存开销,处理复杂网络时内存资源会受限.上述仿真属于网络行为仿真,具体表现受到宿主设备的资源约束.

因此,在进行传输算法验证时,需要结合在真实环境中的实验.如果在构建模拟仿真环境时,需要考虑构建一些复杂的拓扑场景,以充分进行算法的可扩展性验证.

(2) 异构网络下的适应性问题

网络异构由多种因素引起,包括接入方式、频段和运营商策略的链路异构,以及由于移动、遮挡等动态因素产生异构.首先,设备的接入方式是异构的,如智能手机同时具备 LTE、5G、WiFi 等接入方式.另外,在 6G 标准化演进过程中,提出了多频段的带宽聚合需求,例如需要支持太赫兹、毫米波等异构频段的聚合.无线网络也会因为移动、遮挡、拓扑变化等因素导致.路径异构主要体现在每条路径的状态上的差异性,表现在时延、可用带宽、丢包率、抖动率等指标上.多路径传输机制在面向异构路径时如果决策不当,就会影响传输效率.

报文调度机制的相关研究中,有不少工作都是面向异构链路展开,旨在通过路径状态的估算的方式减少乱序报文到达.这些方法依赖对路径状态尽可能准确的估算,难以在动态环境下达到较好的效果.文献[79,82]旨在利用学习算法适应动态异构的网络环境,但是这些基于学习的方法的决策能力与决策周期相关,如决策周期过长,难以快速适应动态网络环境,反之若周期过短,也会引入较大开销.学术界至今仍在探讨合理利用智能算法增加传输策略在多维度异构网络环境中的自适应能力的方案.目前看来,只从优化某一机制的角度出发解决异构网络问题是不足的,我们需要从多路径传输协议的整体优化出发,寻求解决思路.

(3) 网络状态准确感知问题

多路径传输的各项机制算法依赖于传输层感知到的状态进行决策,例如调度算法 minRTT 通过选择最小 RTT 的路径发送报文;基于时延的拥塞控制算法 wVegas^[50]估算当前路径的时延并进行拥塞窗口的调整,BBR^[40]需要根据估算到的带宽时延积进行发送速率的调节.由此可见,传输决策依赖网络状态指标的感知.但是,现有的网络状态感知存在着准确性不高、不及时的问题. RTT 根据收到应答报文与发送报文的时间差计算,如果路径发送数据量较小,收到应答报文频率较低,RTT 的更新就会不及时,无法及时感知到当前路径的状态的变化.另外,MPQUIC 协议实现中进行的带宽估算是基于拥塞控制窗口与 RTT 进行估算,但是传输启动阶段拥塞窗口较低,不合理的拥塞控制调整会导致拥塞窗口大小不能代表当前的路径拥塞状况.现有工作通过获取物理层指标提升传输状态指标感知的准确性,例如文献[177]通过物理层的接收信号的强度指示(RSSI)等指标估计 802.11n/ac 网络的丢包率,但是物理层信号感知根据不同的底层接入技术有较大差异,通过此类方法辅助传输层的感知仍然有待考量.

(4) 传输性能受到中间完了过影响

多路径传输机制旨在从端的角度提升传输性能,然而传输还是会受到中间网络的影响.首先,在每一跳的数据转发过程中,如果规划了不当的路由,也会导致传输性能受限.另外,5G 网络的多路径实现有两种方案,分别是“Above-the-core”和“Core-centric”^[178].前一种方案是直接在端到端的多接口之间建立多路径,后一种 Core-centric 聚合模式,多路径传输协议部署在客户端和 5G 核心网,5G 核心网再通过单路径与服务器相连,多路径在用户平面功能处聚合,从核心网到服务器就会共享单条链路.

多路径传输技术优化端上的决策机制入手提升数据传输的性能和可靠性,如果需要进一步提升多路径传输的服务质量,则需要将中间网络等方面因素纳入考虑,寻求更好的解决方案.

(5) 智能算法应用的局限性

文献 [48,80,171] 应用了智能算法针对多路径传输中的一项机制进行了优化。虽然在传输决策中采用深度强化学习等算法可以根据网络状态的变化做出自适应的决策,但其存在两点问题:一是需要较长的时间才能使模型收敛,难以快速适应变化的网络状态;二是基于学习的方法带来比基于规则的方法更高的能耗和 CPU、内存开销,难以支持在移动终端等设备上的部署。采用轻量级的机器学习方法 [55,58] 可以缓解这个问题,但其较为简单的模型和策略会产生不准确的决策。文献 [84] 采用了离线进行元学习并在线选择元模型进行轻量训练的策略,文献 [179] 通过深度强化学习输出基于规则的子策略,这两个工作在模型的准确性和开销之间做了权衡,可以有效缓解以上问题。但是,离线和在线之间的策略更新间隔需要进行考量。

另一方面,智能算法是数据驱动的,真实的网络状态动态多变,虽然模型在“分布内”的数据上性能优异,但是当模型面临“分布外”数据时,性能往往会有比较大的损失,甚至完全失效。如果这一特性被恶意攻击者利用,会造成安全隐患。目前虽然有研究针对深度神经网络的可解释性和安全性进行探究,但是关于网络应用中的深度神经网络的可解释性相关研究还较少,这也是一个亟待解决的问题。

8.2 未来展望

本文从多路径传输技术的各个机制出发梳理了相关研究工作。不同研究围绕方法创新、应用创新等角度提出新的算法与架构。从中我们看出多路径传输技术未来的发展方向呈现融合、分化、优化这 3 个趋势。

(1) 多路径传输技术呈现多维异构网络资源融合趋势

宏观角度看,追求更高的吞吐量、更低的传输延迟和更高的可靠性是多路径传输技术统一的优化目标。为了实现这个目标,多路径传输技术需要融合多维异构网络资源 [180]。

首先,多路径传输可以部署在数据中心、接入网络、核心网和互联网服务提供商,融合各域的网络资源,提升整体的传输性能。第二,可以纵向融合多个层次的指标和策略提升传输性能。在网络状态感知方面,除了可以获取传输层维持的网络状态,也可融合信号强度等指标辅助丢包率、时延、带宽等路径状态的评估,进一步提升感知的效率和准确性。另外,可以通过融合应用层的数据特性使传输决策应用服务质量优化。为了实现高效传输,多路径传输技术也可以和路由决策结合进行协同优化。第三,融合异构链路资源。6G 标准中定义了比 5G 更高的高数据传输率、低时延、海量连接和极高的可靠的需求。为满足这些目标,需要进一步探究多路径聚合多频段带宽的方法,不仅提供常用频段的聚合能力,也需要考虑 Sub-6G、毫米波、太赫兹甚至是可见光频段等新型频段的聚合方法 [181]。多路径传输技术可以为上述的融合提供支持,成为 6G 网络多维异构网络融合的基础技术。

(2) 多路径传输技术在具体应用场景中呈现分化趋势

随着 5G 的发展,新应用的涌现对网络传输提出了更高的服务质量需求。VR/AR、点云、工业控制、自动驾驶等复杂的应用包含了一系列组合的事件和任务。为了对这些应用提供服务质量保障,多路径传输除了需要传输层的指标外,也需要考虑消息优先级、设备状态、流量开销、能耗、用户偏好等指标。另外,不同的应用具有其不同的流量产生模式,流量产生的时间间隔、每次产生的数据量大小、所需可靠性保证均有差异。多路径传输需要进行定制化方案设计以满足服务质量的差异性和流量特征的异质性。QUIC 和 MPQUIC 的用户态实现,可以根据不同应用的需求灵活地更新协议功能,提供将协议解耦,实现协议机制模块化、面向应用定制化能力。另外,传输层各个机制根据不同目标设计了各种优化算法,在传输时,用户可以通过系统调用等接口进行算法选择和参数配置。为了进一步实现最优化的机制算法配置,可以将各项机制的算法作为一个独立单元,形成各个机制的算法库。可以通过对算法库中的不同机制算法进行组合测试的基础上,定制化匹配或采用智能方法为各类场景选择适合的算法组合方案,实现运行时自适应的机制配置 [182]。

(3) 多路径传输技术呈现智能优化趋势

机器学习和人工智能技术凭借数据驱动的方法增强了网络中决策的自适应能力,逐渐形成了“AI for network”的优化趋势。根据不同的网络适用场景,我们可以将深度神经网络算法分为几类:一是以 CNN 为代表,适用于网络感知、流量识别任务,具有较强的特征识别能力的算法;二是以 RNN 为代表适用于网络状态预测、故障检测

任务,具有较强的序列拟合和预测能力的算法;三是以强化学习算法为代表,适用于拥塞控制、调度、路由优化等决策任务中.强化学习算法常用于多路径传输决策之中,使用的算法包括了 DQN、Actor Critic、DDPG、LinUCB 等.其他类算法常用于为传输决策的输入提供多维度的特征.一些研究引入新的算法提升多路径传输决策能力.例如,基于迁移学习引入已有模型知识辅助新的模型训练^[183];借助元学习的思想,离线训练出一系列元模型,在线从元模型中选出最适合当前状态的模型进行传输决策^[84];以及基于模仿学习利用专家知识辅助训练等方法^[65].利用智能算法进行多路径传输机制的自适应调整也是一个新的优化方向.在 6G 网络发展中,人工智能技术将成为构建网络的关键一环,具有广阔的研究前景.

9 结 语

多路径传输技术聚合设备上的多网卡、多链路,提升了传输带宽和可靠性.围绕多路径传输开展的研究从优化不同机制策略出发,提升了传输性能和应用服务质量.历经 20 多年的研究和发展,在学术界取得了丰硕的成果,并在工业界得到广泛应用.

本文从介绍多路径传输技术的基本概念出发,重点阐述了多路径传输技术的 5 个核心机制以及面向应用的机制优化的相关研究,对方法和面向目标进行了分类综述和对比分析.最后总结了多路径传输技术面临的挑战,并指出了未来的研究方向.在如今万物互联的时代,多路径传输技术将作为一项新的关键技术,为多维异构网络的聚合提供支持,赋予网络体系架构革新的动能.

References:

- [1] China Academy of Cyberspace Research. World Internet development report 2019. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019 (in Chinese).
- [2] Kurose JF, Ross KW. Computer Networking: A Top-down Approach Featuring the Internet. 2nd ed., Boston: Addison-Wesley, 2003. 3–10.
- [3] Xu CQ, Zhao J, Muntean GM. Congestion control design for multipath transport protocols: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2948–2969. [doi: 10.1109/COMST.2016.2558818]
- [4] Raiciu C, Iyengar J, Bonaventure O. Recent advances in reliable transport protocols. In: Haddadi H, Bonaventure O, eds. Recent Advances in Networking. Publié: ACM SIGCOMM, 2013. 59–106.
- [5] Li M, Lukyanenko A, Ou ZH, Ylä-Jääski A, Tarkoma S, Coudron M, Secci S. Multipath transmission for the Internet: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2887–2925. [doi: 10.1109/COMST.2016.2586112]
- [6] Habib S, Qadir J, Ali A, Habib D, Li M, Sathiaselan A. The past, present, and future of transport-layer multipath. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 75: 236–258. [doi: 10.1016/j.jnca.2016.09.005]
- [7] Kimura BYL, Lima DCSF, Loureiro AAF. Packet scheduling in multipath TCP: Fundamentals, lessons, and opportunities. IEEE Systems Journal, 2021, 15(1): 1445–1457. [doi: 10.1109/JSYST.2020.2965471]
- [8] Afzal S, Testoni V, Rothenberg CE, Kolan P, Bouazizi I. A holistic survey of multipath wireless video streaming. Journal of Network and Computer Applications, 2023, 212: 103581. [doi: 10.1016/j.jnca.2022.103581]
- [9] Cerf V, Kahn R. A protocol for packet network intercommunication. IEEE Trans. on Communications, 1974, 22(5): 637–648. [doi: 10.1109/TCOM.1974.1092259]
- [10] Postel J. User datagram protocol. No. 768. In: Request for Comments. RFC Editor, 1980. [doi: 10.17487/RFC0768]
- [11] Langley A, Riddoch A, Wilk A, Vicente A, Krasic C, Zhang D, Yang F, Kouranov F, Swett I, Iyengar J, Bailey J, Dorfman J, Roskind J, Kulik J, Westin P, Tenneti R, Shade R, Hamilton R, Vasiliev V, Chang WT, Shi ZY. The QUIC transport protocol: Design and internet-scale deployment. In: Proc. of the 2017 ACM Special Interest Group on Data Communication. Los Angeles: ACM, 2017. 183–196. [doi: 10.1145/3098822.3098842]
- [12] Iyengar J, Thomson M. QUIC: A UDP-based multiplexed and secure transport. No. 9000. In: Request for Comments. RFC Editor, 2021. [doi: 10.17487/RFC9000]
- [13] Rüh J, Poeschl I, Dietzel C, Hohlfeld O. A first look at QUIC in the wild. In: Proc. of the 19th Int'l Conf. on Passive and Active Measurement. Berlin: Springer, 2018. 255–268. [doi: 10.1007/978-3-319-76481-8_19]
- [14] Bishop M. HTTP/3. No. 9114. In: Request for Comments. RFC Editor, 2022. [doi: 10.17487/RFC9114]

- [15] Mueller S, Tsang RP, Ghosal D. Multipath routing in mobile Ad Hoc networks: Issues and challenges. In: Calzarossa MC, Gelenbe E, eds. *Performance Tools and Applications to Networked Systems: Revised Tutorial Lectures*. Berlin: Springer, 2004. 209–234. [doi: [10.1007/978-3-540-24663-3_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24663-3_10)]
- [16] Wang B, Wei W, Guo Z, Towsley D. Multipath live streaming via TCP: Scheme, performance and benefits. *ACM Trans. on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 2009, 5(3): 25. [doi: [10.1145/1556134.1556142](https://doi.org/10.1145/1556134.1556142)]
- [17] Fall KR, Stevens WR. *TCP/IP Illustrated, Vol. 1: The Protocols*. 2nd ed., Boston: Addison-Wesley, 2011. 412–570.
- [18] Liu YM, Ma YF, De Coninck Q, Bonaventure O, Huitema C, Kühlewind M. Multipath extension for QUIC. 2023. <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-quic-multipath/06/>
- [19] Ford A, Raiciu C, Handley M, Bonaventure O, Paasch C. TCP extensions for multipath operation with multiple addresses. No. 8684. In: *Request for Comments*. RFC Editor, 2020. [doi: [10.17487/RFC8684](https://doi.org/10.17487/RFC8684)]
- [20] Raiciu C, Paasch C, Barre S, Ford A, Honda M, Duchene F, Bonaventure O, Handley M. How hard can it be? Designing and implementing a deployable multipath TCP. In: *Proc. of the 9th USENIX Conf. on Networked Systems Design and Implementation*. San Jose: USENIX Association, 2012. 29.
- [21] Barré S, Paasch C, Bonaventure O. MultiPath TCP: From theory to practice. In: *Proc. of the 10th Int'l IFIP TC 6 Networking Conf. (NETWORKING 2011)*. Valencia: Springer, 2011. 444–457. [doi: [10.1007/978-3-642-20757-0_35](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20757-0_35)]
- [22] Khalili R, Gast N, Popovic M, Le Boudec JY. MPTCP is not pareto-optimal: Performance issues and a possible solution. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2013, 21(5): 1651–1665. [doi: [10.1109/TNET.2013.2274462](https://doi.org/10.1109/TNET.2013.2274462)]
- [23] De Coninck Q, Bonaventure O. Multipath QUIC: Design and evaluation. In: *Proc. of the 13th Int'l Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies*. Incheon: ACM, 2017. 160–166. [doi: [10.1145/3143361.3143370](https://doi.org/10.1145/3143361.3143370)]
- [24] Viernickel T, Froemmgen A, Rizk A, Koldehofe B, Steinmetz R. Multipath QUIC: A deployable multipath transport protocol. In: *Proc. of the 2018 IEEE Int'l Conf. on Communications*. Kansas City: IEEE, 2018. 1–7. [doi: [10.1109/ICC.2018.8422951](https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422951)]
- [25] De Coninck Q, Bonaventure O. Multiflow QUIC: A generic multipath transport protocol. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(5): 108–113. [doi: [10.1109/MCOM.001.2000892](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000892)]
- [26] Zheng ZL, Ma YF, Liu YM, Yang FR, Li ZY, Zhang YB, Zhang JH, Shi W, Chen WT, Li D, An Q, Hong H, Liu HH, Zhang M. XLINK: QoE-driven multi-path QUIC transport in large-scale video services. In: *Proc. of the 2021 ACM SIGCOMM Conf.* ACM, 2021. 418–432. [doi: [10.1145/3452296.3472893](https://doi.org/10.1145/3452296.3472893)]
- [27] Stewart R, Metz C. SCTP: New transport protocol for TCP/IP. *IEEE Internet Computing*, 2001, 5(6): 64–69. [doi: [10.1109/4236.968833](https://doi.org/10.1109/4236.968833)]
- [28] Iyengar JR, Amer PD, Stewart R. Concurrent multipath transfer using SCTP multihoming over independent end-to-end paths. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2006, 14(5): 951–964. [doi: [10.1109/TNET.2006.882843](https://doi.org/10.1109/TNET.2006.882843)]
- [29] Liu SW, Lei WM, Zhang W, Li H. MPUDP: Multipath multimedia transport protocol over overlay network. In: *Proc. of the 5th Int'l Conf. on Machinery, Materials and Computing Technology*. Beijing: Atlantis Press, 2017. 731–737. [doi: [10.2991/icmmct-17.2017.148](https://doi.org/10.2991/icmmct-17.2017.148)]
- [30] Singh V, Ahsan S, Ott J. MPRTP: Multipath considerations for real-time media. In: *Proc. of the 4th ACM Multimedia Systems Conf.* Oslo: ACM, 2013. 190–201. [doi: [10.1145/2483977.2484002](https://doi.org/10.1145/2483977.2484002)]
- [31] Lu YW, Chen G, Li BJ, Tan K, Xiong YQ, Cheng P, Zhang JS, Chen EH, Moscibroda T. Multi-path transport for RDMA in datacenters. In: *Proc. of the 15th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation*. Renton: USENIX Association, 2018. 357–371.
- [32] Tian F, Feng WD, Zhang Y, Zhang ZL. A novel software-based multi-path RDMA solution for data center networks. *arXiv:2009.00243*, 2020.
- [33] Lee S, Kim Y, Woo H, Yeom I. Efficient user-level multi-path utilization in RDMA networks. *IEEE Access*, 2021, 9: 127619–127629. [doi: [10.1109/ACCESS.2021.3110840](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110840)]
- [34] Tian F, Zhang Y, Ye W, Jin C, Wu ZY, Zhang ZL. Accelerating distributed deep learning using multi-path RDMA in data center networks. In: *Proc. of the 2021 ACM SIGCOMM Symp. on SDN Research*. ACM, 2021. 88–100. [doi: [10.1145/3482898.3483363](https://doi.org/10.1145/3482898.3483363)]
- [35] Huitema C. Multi-homed TCP. 1995. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-huitema-multi-homed-01>
- [36] StreamYard. Recommended upload speeds for live streaming. 2024. <https://streamyard.com/blog/how-to-live-stream/recommended-upload-speeds-for-live-streaming>
- [37] Huang YK, Zhu YW, Qiao XQ, Tan ZJ, Bai BY. AITransfer: Progressive AI-powered transmission for real-time point cloud video streaming. In: *Proc. of the 29th ACM Int'l Conf. on Multimedia*. ACM, 2021. 3989–3997. [doi: [10.1145/3474085.3475624](https://doi.org/10.1145/3474085.3475624)]
- [38] Padhye J, Firoiu V, Towsley DF, Kurose JF. Modeling TCP reno performance: A simple model and its empirical validation. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2000, 8(2): 133–145. [doi: [10.1109/90.842137](https://doi.org/10.1109/90.842137)]

- [39] Ha S, Rhee I, Xu LS. CUBIC: A new TCP-friendly high-speed TCP variant. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2008, 42(5): 64–74. [doi: [10.1145/1400097.1400105](https://doi.org/10.1145/1400097.1400105)]
- [40] Cardwell N, Cheng Y, Gunn CS, Yeganeh SH, Jacobson V. BBR: Congestion-based congestion control: Measuring bottleneck bandwidth and round-trip propagation time. *Queue*, 2016, 14(5): 20–53. [doi: [10.1145/3012426.3022184](https://doi.org/10.1145/3012426.3022184)]
- [41] Dong M, Meng T, Zarchy D, Arslan E, Gilad Y, Godfrey PB, Schapira M. PCC vivace: Online-learning congestion control. In: *Proc. of the 15th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation*. Renton: USENIX Association, 2018. 343–356.
- [42] Raiciu C, Handley M, Wischik D. Coupled congestion control for multipath transport protocols. No. 6356. In: *Request for Comments*. RFC Editor, 2011. [doi: [10.17487/RFC6356](https://doi.org/10.17487/RFC6356)]
- [43] Chauvenne R, Libioulle T. MultiPath TCP connections: Analysis and models [MS. Thesis]. Louvain-la-Neuve: Université catholique de Louvain, 2017.
- [44] Honda M, Nishida Y, Eggert L, Sarolahti P, Tokuda H. Multipath congestion control for shared bottleneck. In: *Proc. of the PFLDNet Workshop*. 2009. 378.
- [45] Lee C, Jung J, Chung JM. DEFT: Multipath TCP for high speed low latency communications in 5G networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2021, 20(12): 3311–3323. [doi: [10.1109/TMC.2020.3000041](https://doi.org/10.1109/TMC.2020.3000041)]
- [46] Leith D, Shorten R, McCullagh G, Heffner J, Dunn L, Baker F. Delay-based AIMD congestion control. In: *Proc. of the Protocols for Fast Long Distance Networks*. 2007.
- [47] Mahmud I, Lubna T, Song YJ, Cho YZ. Coupled multipath BBR (C-MPBBR): A efficient congestion control algorithm for multipath TCP. *IEEE Access*, 2020, 8: 165497–165511. [doi: [10.1109/ACCESS.2020.3022720](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022720)]
- [48] Xu ZY, Tang J, Yin CX, Wang YZ, Xue GL. Experience-driven congestion control: When multi-path TCP meets deep reinforcement learning. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(6): 1325–1336. [doi: [10.1109/JSAC.2019.2904358](https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2904358)]
- [49] Han XQ, Han B, Li RD, Ji XL. MARS: An adaptive multi-agent DRL-based scheduler for multipath QUIC in dynamic networks. In: *Proc. of the 31st IEEE/ACM Int'l Symp. on Quality of Service (IWQoS)*. Orlando: IEEE, 2023. 1–10. [doi: [10.1109/IWQoS57198.2023.10188744](https://doi.org/10.1109/IWQoS57198.2023.10188744)]
- [50] Cao Y, Xu MW, Fu XM. Delay-based congestion control for multipath TCP. In: *Proc. of the 20th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP)*. Austin: IEEE, 2012. 1–10. [doi: [10.1109/ICNP.2012.6459978](https://doi.org/10.1109/ICNP.2012.6459978)]
- [51] Wischik D, Raiciu C, Greenhalgh A, Handley M. Design, implementation and evaluation of congestion control for multipath TCP. In: *Proc. of the 8th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation*. Boston: USENIX Association, 2011. 99–112.
- [52] Peng QY, Walid A, Hwang J, Low SH. Multipath TCP: Analysis, design, and implementation. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2016, 24(1): 596–609. [doi: [10.1109/TNET.2014.2379698](https://doi.org/10.1109/TNET.2014.2379698)]
- [53] Lubna T, Mahmud I, Cho YZ. D-LIA: Dynamic congestion control algorithm for MPTCP. *ICT Express*, 2020, 6(4): 263–268. [doi: [10.1016/j.ict.2020.03.005](https://doi.org/10.1016/j.ict.2020.03.005)]
- [54] Gilad T, Rozen-Schiff N, Godfrey PB, Raiciu C, Schapira M. MPCC: Online learning multipath transport. In: *Proc. of the 16th Int'l Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies*. Barcelona: ACM, 2020. 121–135. [doi: [10.1145/3386367.3433030](https://doi.org/10.1145/3386367.3433030)]
- [55] Thomas Y, Xylomenos G, Polyzos GC. Multipath congestion control with network assistance. *Computer Communications*, 2020, 153: 264–278. [doi: [10.1016/j.comcom.2020.01.071](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.071)]
- [56] Thomas Y, Karaliopoulos M, Xylomenos G, Polyzos GC. Low latency friendliness for multipath TCP. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2020, 28(1): 248–261. [doi: [10.1109/TNET.2019.2961759](https://doi.org/10.1109/TNET.2019.2961759)]
- [57] Ji XL, Han B, Li RD, Xu C, Li YH, Su JS. ACCeSS: Adaptive QoS-aware congestion control for multipath TCP. In: *Proc. of the 30th IEEE/ACM Int'l Symp. on Quality of Service (IWQoS)*. Oslo: IEEE, 2022. 1–10. [doi: [10.1109/IWQoS54832.2022.9812886](https://doi.org/10.1109/IWQoS54832.2022.9812886)]
- [58] Li WZ, Zhang H, Gao SH, Xue CJ, Wang XL, Lu SL. SmartCC: A reinforcement learning approach for multipath TCP congestion control in heterogeneous networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(11): 2621–2633. [doi: [10.1109/JSAC.2019.2933761](https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2933761)]
- [59] Grieco LA, Mascolo S. Performance evaluation and comparison of Westwood+, New Reno, and Vegas TCP congestion control. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2004, 34(2): 25–38. [doi: [10.1145/997150.997155](https://doi.org/10.1145/997150.997155)]
- [60] Xu LS, Harfoush K, Rhee I. Binary increase congestion control (BIC) for fast long-distance networks. In: *Proc. of the 2004 IEEE Conf. on Computer Communications*. Hong Kong: IEEE, 2004. 2514–2524. [doi: [10.1109/INFCOM.2004.1354672](https://doi.org/10.1109/INFCOM.2004.1354672)]
- [61] Liu P, Ren YM, Li J. Survey on multipath TCP congestion control. *Journal on Communications*, 2012, 33(S2): 233–238 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.3969/j.issn.1000-436x.2012.z2.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-436x.2012.z2.033)]
- [62] Du ZX, Zheng JQ, Yu HB, Kong LT, Chen GH. A unified congestion control framework for diverse application preferences and network conditions. In: *Proc. of the 17th Int'l Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies*. Munich: ACM, 2021.

- 282–296. [doi: [10.1145/3485983.3494840](https://doi.org/10.1145/3485983.3494840)]
- [63] Zhong ZR, Wang W, Shao YY, Li ZY, Pan H, Guan HT, Tyson G, Xie GG, Zheng K. Muses: Enabling lightweight learning-based congestion control for mobile devices. In: Proc. of the 2022 IEEE Conf. on Computer Communications. London: IEEE, 2022. 2208–2217. [doi: [10.1109/INFOCOM48880.2022.9796880](https://doi.org/10.1109/INFOCOM48880.2022.9796880)]
- [64] Wei WT, Gu HX, Li BC. Congestion control: A renaissance with machine learning. IEEE Network, 2021, 35(4): 262–269. [doi: [10.1109/MNET.011.2000603](https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000603)]
- [65] Huang TC, Zhou C, Jia LC, Zhang RX, Sun LF. Learned internet congestion control for short video uploading. In: Proc. of the 30th ACM Int'l Conf. on Multimedia. Lisboa: ACM, 2022. 3064–3075. [doi: [10.1145/3503161.3548436](https://doi.org/10.1145/3503161.3548436)]
- [66] Wischik D, Handley M, Braun MB. The resource pooling principle. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(5): 47–52. [doi: [10.1145/1452335.1452342](https://doi.org/10.1145/1452335.1452342)]
- [67] Brakmo LS, O'Malley SW, Peterson LL. TCP vegas: New techniques for congestion detection and avoidance. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1994, 24(4): 24–35. [doi: [10.1145/190809.190317](https://doi.org/10.1145/190809.190317)]
- [68] Choi KW, Cho YS, Aneta N, Lee JW, Cho SM, Choi J. Optimal load balancing scheduler for MPTCP-based bandwidth aggregation in heterogeneous wireless environments. Computer Communications, 2017, 112: 116–130. [doi: [10.1016/j.comcom.2017.08.018](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2017.08.018)]
- [69] Frommgen A, Erbschäuer T, Buchmann A, Zimmermann T, Wehrle K. ReMP TCP: Low latency multipath TCP. In: Proc. of the 2016 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). Kuala Lumpur: IEEE, 2016. 1–7. [doi: [10.1109/ICC.2016.7510787](https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7510787)]
- [70] Dong EH, Xu MW, Fu XM, Cao Y. A loss aware MPTCP scheduler for highly lossy networks. Computer Networks, 2019, 157: 146–158. [doi: [10.1016/j.comnet.2019.02.001](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.02.001)]
- [71] Sarwar G, Boreli R, Lochin E, Mifdaoui A, Smith G. Mitigating receiver's buffer blocking by delay aware packet scheduling in multipath data transfer. In: Proc. of the 27th Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Barcelona: IEEE, 2013. 1119–1124. [doi: [10.1109/WAINA.2013.80](https://doi.org/10.1109/WAINA.2013.80)]
- [72] Yang F, Wang Q, Amer PD. Out-of-order transmission for in-order arrival scheduling for multipath TCP. In: Proc. of the 28th Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Victoria: IEEE, 2014. 749–752. [doi: [10.1109/WAINA.2014.122](https://doi.org/10.1109/WAINA.2014.122)]
- [73] Hayes D, Secchi R, Brunstrom A, Hurtig P, Kuhn N, Islam S, Rajiullah M, Fairhurst G, Petlund A, Khademi N, Ahmed I, Markussen J, Briscoe B, De Schepper K, Bartik R. Report on prototype development and evaluation of end-system, application layer- and API mechanisms. RITE Eu FP7 Project 317700, 2015.
- [74] Ferlin S, Alay Ö, Mehani O, Boreli R. BLEST: Blocking estimation-based MPTCP scheduler for heterogeneous networks. In: Proc. of the 2016 IFIP Networking Conf. (IFIP Networking) and Workshops. Vienna: IEEE, 2016. 431–439. [doi: [10.1109/IFIPNetworking.2016.7497206](https://doi.org/10.1109/IFIPNetworking.2016.7497206)]
- [75] Lim YS, Nahum EM, Towsley D, Gibbens RJ. ECF: An MPTCP path scheduler to manage heterogeneous paths. In: Proc. of the 13th Int'l Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies. Incheon: ACM, 2017. 147–159. [doi: [10.1145/3143361.3143376](https://doi.org/10.1145/3143361.3143376)]
- [76] Guo YE, Nikraves A, Mao ZM, Qian F, Sen S. Accelerating multipath transport through balanced subflow completion. In: Proc. of the 23rd Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Snowbird: ACM, 2017. 141–153. [doi: [10.1145/3117811.3117829](https://doi.org/10.1145/3117811.3117829)]
- [77] Shi H, Cui Y, Wang X, Hu YM, Dai ML, Wang FZ, Zheng K. STMS: Improving MPTCP throughput under heterogeneous networks. In: Proc. of the 2018 USENIX Annual Technical Conf. Boston: USENIX Association, 2018. 719–730.
- [78] Xing YT, Xue KP, Zhang Y, Han JP, Li J, Liu JQ, Li RD. A low-latency MPTCP scheduler for live video streaming in mobile networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2021, 20(11): 7230–7242. [doi: [10.1109/TWC.2021.3081498](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3081498)]
- [79] Zhang H, Li WZ, Gao SH, Wang XL, Ye BL. ReLeS: A neural adaptive multipath scheduler based on deep reinforcement learning. In: Proc. of the 2019 IEEE Conf. on Computer Communications. Paris: IEEE, 2019. 1648–1656. [doi: [10.1109/INFOCOM.2019.8737649](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8737649)]
- [80] Roselló MM. Multi-path scheduling with deep reinforcement learning. In: Proc. of the 2019 European Conf. on Networks and Communications (EuCNC). Valencia: IEEE, 2019. 400–405. [doi: [10.1109/EuCNC.2019.8802063](https://doi.org/10.1109/EuCNC.2019.8802063)]
- [81] Amend M, Rakocevic V, Habermann J. Cost optimized multipath scheduling in 5G for video-on-demand traffic. In: Proc. of the 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). Nanjing: IEEE, 2021. 1–6. [doi: [10.1109/WCNC49053.2021.9417415](https://doi.org/10.1109/WCNC49053.2021.9417415)]
- [82] Wu HJ, Alay Ö, Brunstrom A, Ferlin S, Caso G. Peekaboo: Learning-based multipath scheduling for dynamic heterogeneous environments. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(10): 2295–2310. [doi: [10.1109/JSAC.2020.3000365](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000365)]
- [83] Wu HJ, Caso G, Ferlin S, Alay Ö, Brunstrom A. Multipath scheduling for 5G networks: Evaluation and outlook. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(4): 44–50. [doi: [10.1109/MCOM.001.2000881](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000881)]
- [84] Wu HJ, Alay Ö, Brunstrom A, Caso G, Ferlin S. FALCON: Fast and accurate multipath scheduling using offline and online learning.

- arXiv:2201.08969, 2022.
- [85] Rabitsch A, Hurtig P, Brunstrom A. A stream-aware multipath QUIC scheduler for heterogeneous paths. In: Proc. of the 2018 Workshop on the Evolution, Performance, and Interoperability of QUIC. Heraklion: ACM, 2018. 29–35. [doi: [10.1145/3284850.3284855](https://doi.org/10.1145/3284850.3284855)]
 - [86] Wang J, Gao YF, Xu CR. A multipath QUIC scheduler for mobile HTTP/2. In: Proc. of the 3rd Asia-Pacific Workshop on Networking. Beijing: ACM, 2019. 43–49. [doi: [10.1145/3343180.3343185](https://doi.org/10.1145/3343180.3343185)]
 - [87] Shi X, Wang L, Zhang F, Liu ZY. FStream: Flexible stream scheduling and prioritizing in multipath-QUIC. In: Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). Tianjin: IEEE, 2019. 921–924. [doi: [10.1109/ICPADS47876.2019.00136](https://doi.org/10.1109/ICPADS47876.2019.00136)]
 - [88] Shi X, Wang L, Zhang F, Zhou BY, Liu ZY. PStream: Priority-based stream scheduling for heterogeneous paths in multipath-QUIC. In: Proc. of the 29th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN). Honolulu: IEEE, 2020. 1–8. [doi: [10.1109/ICCCN49398.2020.9209682](https://doi.org/10.1109/ICCCN49398.2020.9209682)]
 - [89] Jonglez B, Heusse M, Gaujal B. SRPT-ECF: Challenging round-robin for stream-aware multipath scheduling. In: Proc. of the 2020 IFIP Networking Conf. (Networking). Paris: IEEE, 2020. 719–724.
 - [90] Kanakis ME. A learning-based approach for stream scheduling in multipath-QUIC [MS. Thesis]. Amsterdam: Vrije Universiteit Amsterdam, 2020.
 - [91] MultiPath TCP-Linux kernel implementation. <http://multipath-tcp.org/>
 - [92] Boccassi L, Fayed MM, Marina MK. Binder: A system to aggregate multiple internet gateways in community networks. In: Proc. of the 2013 ACM MobiCom Workshop on Lowest Cost Denominator Networking for Universal Access. Miami: ACM, 2013. 3–8. [doi: [10.1145/2502880.2502894](https://doi.org/10.1145/2502880.2502894)]
 - [93] Hesmans B, Detal G, Barre S, Bauduin R, Bonaventure O. SMAPP: Towards smart multipath TCP-enabled applications. In: Proc. of the 11th ACM Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies. Heidelberg: ACM, 2015. 28. [doi: [10.1145/2716281.2836113](https://doi.org/10.1145/2716281.2836113)]
 - [94] Chen M, Dreiholz T, Zhou X, Yang XL. Improvement and implementation of a multi-path management algorithm based on MPTCP. In: Proc. of the 45th IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN). Sydney: IEEE, 2020. 134–143. [doi: [10.1109/LCN48667.2020.9314778](https://doi.org/10.1109/LCN48667.2020.9314778)]
 - [95] Li WZ, Yu LF, Xue CJ, Zhang H, Lu JX, Cao RR, Lu SL. Adaptive subflow allocation for multipath data transmission in mobile edge networks. Journal of Systems Architecture, 2021, 116: 102012. [doi: [10.1016/j.sysarc.2021.102012](https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102012)]
 - [96] Chung J, Han D, Kim J, Kim CK. Machine learning based path management for mobile devices over MPTCP. In: Proc. of the 2017 IEEE Int'l Conf. on Big Data and Smart Computing (BigComp). Jeju: IEEE, 2017. 206–209. [doi: [10.1109/BIGCOMP.2017.7881739](https://doi.org/10.1109/BIGCOMP.2017.7881739)]
 - [97] Alzadjali A, Esposito F, Deogun J. A contextual Bi-armed bandit approach for MPTCP path management in heterogeneous LTE and WiFi edge networks. In: Proc. of the 2020 IEEE/ACM Symp. on Edge Computing (SEC). San Jose: IEEE, 2020. 307–316. [doi: [10.1109/SEC50012.2020.00042](https://doi.org/10.1109/SEC50012.2020.00042)]
 - [98] Xu CQ, Huang H, Zhang HK, Xiong CS, Zhu L. Multipath transmission control protocol (MPTCP) partial reliability extension. 2017. <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-xu-mptcp-prmp/04/>
 - [99] Qin JR, Xu CQ, Huang H, Zhong LJ, Muntean GM. MO-PR: Message-oriented partial-reliability MPTCP for real-time multimedia transmission in wireless networks. In: Proc. of the 14th Int'l Wireless Communications & Mobile Computing Conf. (IWCMC). Limassol: IEEE, 2018. 36–41. [doi: [10.1109/IWCMC.2018.8450509](https://doi.org/10.1109/IWCMC.2018.8450509)]
 - [100] Pauly T, Kinnear E, Schinazi D. An unreliable datagram extension to QUIC. No. 9002, RFC Editor, 2022. [doi: [10.17487/RFC9221](https://doi.org/10.17487/RFC9221)]
 - [101] Chen JP, Liu TY, Jing JX, Yu YY. An unreliable extension to QUIC. 2023. <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-chen-quic-quicu/01/>
 - [102] Cao YL, Liu QH, Luo GL, Yi YG, Huang MH. PR-MPTCP⁺: Context-aware QoE-oriented multipath TCP partial reliability extension for real-time multimedia applications. In: Proc. of the 2016 Visual Communications and Image Processing (VCIP). Chengdu: IEEE, 2016. 1–4. [doi: [10.1109/VCIP.2016.7805566](https://doi.org/10.1109/VCIP.2016.7805566)]
 - [103] Palmer M, Krüger T, Chandrasekaran B, Feldmann A. The QUIC fix for optimal video streaming. In: Proc. of the Workshop on the Evolution, Performance, and Interoperability of QUIC. Heraklion: ACM, 2018. 43–49. [doi: [10.1145/3284850.3284857](https://doi.org/10.1145/3284850.3284857)]
 - [104] Palmer M, Appel M, Spiteri K, Chandrasekaran B, Feldmann A, Sitaraman RK. VOXEL: Cross-layer optimization for video streaming with imperfect transmission. In: Proc. of the 17th Int'l Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies. Munich: ACM, 2021. 359–374. [doi: [10.1145/3485983.3494864](https://doi.org/10.1145/3485983.3494864)]
 - [105] Yin M, Ren YM, Zhang YD, Zhou X, Xu AM, Yu DL. A differentiated reliable transmission control mechanism. Frontiers of Data & Computing, 2022, 4(5): 138–151 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.11871/jfd.issn.2096-742X.2022.05.015](https://doi.org/10.11871/jfd.issn.2096-742X.2022.05.015)]
 - [106] Hsieh HY, Sivakumar S. pTCP: An end-to-end transport layer protocol for striped connections. In: Proc. of the 10th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols. Paris: IEEE, 2002. 24–33. [doi: [10.1109/ICNP.2002.1181383](https://doi.org/10.1109/ICNP.2002.1181383)]

- [107] Hwang J, Walid A, Yoo J. Fast coupled retransmission for multipath TCP in data center networks. *IEEE Systems Journal*, 2018, 12(1): 1056–1059. [doi: [10.1109/JSYST.2016.2582527](https://doi.org/10.1109/JSYST.2016.2582527)]
- [108] Iyengar JR, Amer PD, Stewart R. Retransmission policies for concurrent multipath transfer using SCTP multihoming. In: *Proc. of the 12th IEEE Int'l Conf. on Networks (ICON 2004)*. Singapore: IEEE, 2004. 713–719. [doi: [10.1109/ICON.2004.1409269](https://doi.org/10.1109/ICON.2004.1409269)]
- [109] Liu JM, Zou HX, Dou JX, Gao Y. Rethinking retransmission policy in concurrent multipath transfer. In: *Proc. of the 2008 Int'l Conf. on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*. Harbin: IEEE, 2008. 1005–1008. [doi: [10.1109/IIH-MSP.2008.181](https://doi.org/10.1109/IIH-MSP.2008.181)]
- [110] Lee Y, Park I, Choi Y. Improving TCP performance in multipath packet forwarding networks. *Journal of Communications and Networks*, 2002, 4(2): 148–157. [doi: [10.1109/JCN.2002.6596897](https://doi.org/10.1109/JCN.2002.6596897)]
- [111] Rojviboonchai K, Aida H. An evaluation of multi-path transmission control protocol (M/TCP) with robust acknowledgement schemes. *IEICE Trans. on Communications*, 2004, 87(9): 2699–2707.
- [112] Li M, Lukyanenko A, Tarkoma S, Cui Y, Ylä-Jääski A. Tolerating path heterogeneity in multipath TCP with bounded receive buffers. *Computer Networks*, 2014, 64: 1–14. [doi: [10.1016/j.comnet.2014.01.011](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.01.011)]
- [113] Ferlin S, Kucera S, Claussen H, Alay Ö. MPTCP meets FEC: Supporting latency-sensitive applications over heterogeneous networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2018, 26(5): 2005–2018. [doi: [10.1109/TNET.2018.2864192](https://doi.org/10.1109/TNET.2018.2864192)]
- [114] Marasli R, Amer PD, Conrad PT. Retransmission-based partially reliable transport service: An analytic model. In: *Proc. of the 1996 IEEE Conf. on Computer Communications*. San Francisco: IEEE, 1996. 621–629. [doi: [10.1109/INFCOM.1996.493356](https://doi.org/10.1109/INFCOM.1996.493356)]
- [115] Nawrocki M, Hiesgen R, Schmidt TC, Wählisch M. QUICsand: Quantifying QUIC reconnaissance scans and DoS flooding events. In: *Proc. of the 21st ACM Internet Measurement Conf*. ACM, 2021. 283–291. [doi: [10.1145/3487552.3487840](https://doi.org/10.1145/3487552.3487840)]
- [116] Lou WJ, Liu W, Fang YG. SPREAD: Enhancing data confidentiality in mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the 2004 IEEE Conf. on Computer Communications*. Hong Kong: IEEE, 2004. 2404–2413. [doi: [10.1109/INFCOM.2004.1354662](https://doi.org/10.1109/INFCOM.2004.1354662)]
- [117] Ye T, Veitch D, Bolot J. Improving wireless security through network diversity. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2009, 39(1): 34–44. [doi: [10.1145/1496091.1496096](https://doi.org/10.1145/1496091.1496096)]
- [118] Balfanz D, Smetters DK, Stewart P, Wong HC. Talking to strangers: Authentication in Ad-Hoc wireless networks. In: *Proc. of the Network and Distributed System Security Symp*. San Diego: The Internet Society, 2002.
- [119] Chan HW, Perrig A, Song D. Random key predistribution schemes for sensor networks. In: *Proc. of the 2003 Symp. on Security and Privacy*. Berkeley: IEEE, 2003. 197–213. [doi: [10.1109/SECPRI.2003.1199337](https://doi.org/10.1109/SECPRI.2003.1199337)]
- [120] Costea S, Choudary MO, Gucea D, Tackmann B, Raiciu C. Secure opportunistic multipath key exchange. In: *Proc. of the 2018 ACM SIGSAC Conf. on Computer and Communications Security*. Toronto: ACM, 2018. 2077–2094. [doi: [10.1145/3243734.3243791](https://doi.org/10.1145/3243734.3243791)]
- [121] Pearce C, Zeadally S. Ancillary impacts of multipath TCP on current and future network security. *IEEE Internet Computing*, 2015, 19(5): 58–65. [doi: [10.1109/MIC.2015.70](https://doi.org/10.1109/MIC.2015.70)]
- [122] Diez J, Bagnulo M, Valera F, Vidal I. Security for multipath TCP: A constructive approach. *Int'l Journal of Internet Protocol Technology*, 2011, 6(3): 146–155. [doi: [10.1504/IJIPT.2011.043675](https://doi.org/10.1504/IJIPT.2011.043675)]
- [123] Krishnan VA, Amritha PP, Sethumadhavan M. Sum chain based approach against session hijacking in MPTCP. *Procedia Computer Science*, 2017, 115: 794–803. [doi: [10.1016/j.procs.2017.09.156](https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.156)]
- [124] Chaturvedi RK, Chand S. Multipath TCP security over different attacks. *Trans. on Emerging Telecommunications Technologies*, 2020, 31(9): e4081. [doi: [10.1002/ett.4081](https://doi.org/10.1002/ett.4081)]
- [125] Kim DY, Choi HK. Efficient design for secure multipath TCP against eavesdropper in initial handshake. In: *Proc. of the 2016 Int'l Conf. on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. Jeju: IEEE, 2016. 672–677. [doi: [10.1109/ICTC.2016.7763559](https://doi.org/10.1109/ICTC.2016.7763559)]
- [126] Hamza A, Javed F, Lali MI, ud Din M. Study of MPTCP with transport layer security. In: *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Engineering & Emerging Technologies (ICEET)*. Lahore, 2016.
- [127] Fischlin M, Müller SA, Münch JP, Porth L. Multipath TLS 1.3. In: *Proc. of the 26th European Symp. on Research in Computer Security*. Darmstadt: Springer, 2021. 86–105. [doi: [10.1007/978-3-030-88428-4_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-88428-4_5)]
- [128] Jadin M, Tihon G, Pereira O, Bonaventure O. Securing multipath TCP: Design & implementation. In: *Proc. of the 2017 IEEE Conf. on Computer Communications*. Atlanta: IEEE, 2017. 1–9. [doi: [10.1109/INFOCOM.2017.8057011](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2017.8057011)]
- [129] Noh G, Park H, Roh H, Lee W. Secure and lightweight subflow establishment of multipath-TCP. *IEEE Access*, 2019, 7: 177438–177448. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2957434](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957434)]
- [130] Bittau A, Handley M, Lackey J. The final nail in WEP's coffin. In: *Proc. of the 2006 IEEE Symp. on Security and Privacy*. Oakland: IEEE, 2006. 15–40. [doi: [10.1109/SP.2006.40](https://doi.org/10.1109/SP.2006.40)]
- [131] Wong FL, Stajano F. Multichannel security protocols. *IEEE Pervasive Computing*, 2007, 6(4): 31–39. [doi: [10.1109/MPRV.2007.76](https://doi.org/10.1109/MPRV.2007.76)]
- [132] Shamir A. How to share a secret. *Communications of the ACM*, 1979, 22(11): 612–613. [doi: [10.1145/359168.359176](https://doi.org/10.1145/359168.359176)]

- [133] Bittau A, Hamburg M, Handley M, Mazières D, Boneh D. The case for ubiquitous transport-level encryption. In: Proc. of the 19th USENIX Security Symp. Washington: USENIX Association, 2010. 26.
- [134] Li M, Lukyanenko A, Tarkoma S, Ylä-Jääski A. MPTCP incast in data center networks. *China Communications*, 2014, 11(4): 25–37. [doi: [10.1109/CC.2014.6827566](https://doi.org/10.1109/CC.2014.6827566)]
- [135] Hu JB, Huang JW, Lv WJ, Zhou YT, Wang JX, He T. CAPS: Coding-based adaptive packet spraying to reduce flow completion time in data center. In: Proc. of the 2018 IEEE Conf. on Computer Communications. Honolulu: IEEE, 2018. 2294–2302. [doi: [10.1109/INFOCOM.2018.8486354](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2018.8486354)]
- [136] Raiciu C, Barre S, Pluntke C, Greenhalgh A, Wischik D, Handley M. Improving datacenter performance and robustness with multipath TCP. In: Proc. of the 2011 ACM SIGCOMM Conf. Toronto: ACM, 2011. 266–277. [doi: [10.1145/2018436.2018467](https://doi.org/10.1145/2018436.2018467)]
- [137] Agache A, Raiciu C. GRIN: Utilizing the empty half of full bisection networks. In: Proc. of the 4th USENIX Workshop on Hot Topics in Cloud Computing. Boston: USENIX Association, 2012. 7.
- [138] Huang JW, Li WH, Li Q, Zhang T, Dong PP, Wang JX. Tuning high flow concurrency for MPTCP in data center networks. *Journal of Cloud Computing*, 2020, 9(1): 13. [doi: [10.1186/s13677-020-00160-3](https://doi.org/10.1186/s13677-020-00160-3)]
- [139] Dou SS, He YC, Liu S, Wu WF, Guo ZH. RateSheriff: Multipath flow-aware and resource efficient rate limiter placement for data center networks. In: Proc. of the 31st IEEE/ACM Int'l Symp. on Quality of Service (IWQoS). Orlando: IEEE, 2023. 1–10. [doi: [10.1109/IWQoS57198.2023.10188742](https://doi.org/10.1109/IWQoS57198.2023.10188742)]
- [140] Tan LZ, Su W, Liu YW, Gao XC, Zhang W. DCQUIC: Flexible and reliable software-defined data center transport. In: Proc. of the 2021 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Vancouver: IEEE, 2021. 1–8. [doi: [10.1109/INFOCOMWKSHPS51825.2021.9484596](https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS51825.2021.9484596)]
- [141] Corbillon X, Aparicio-Pardo R, Kuhn N, Texier G, Simon G. Cross-layer scheduler for video streaming over MPTCP. In: Proc. of the 7th Int'l Conf. on Multimedia Systems. Klagenfurt: ACM, 2016. 7. [doi: [10.1145/2910017.2910594](https://doi.org/10.1145/2910017.2910594)]
- [142] Han B, Qian F, Ji LS, Gopalakrishnan V. MP-DASH: Adaptive video streaming over preference-aware multipath. In: Proc. of the 12th Int'l on Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies. Irvine: ACM, 2016. 129–143. [doi: [10.1145/2999572.2999606](https://doi.org/10.1145/2999572.2999606)]
- [143] Wu JY, Yuen C, Cheung NM, Chen JL, Chen CW. Streaming mobile cloud gaming video over TCP with adaptive source-FEC coding. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2017, 27(1): 32–48. [doi: [10.1109/TCSVT.2016.2527398](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2016.2527398)]
- [144] Chuat L, Perrig A, Hu YC. Deadline-aware multipath communication: An optimization problem. In: Proc. of the 47th Annual IEEE/IFIP Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN). Denver: IEEE, 2017. 487–498. [doi: [10.1109/DSN.2017.32](https://doi.org/10.1109/DSN.2017.32)]
- [145] Yang W, Cao J, Wu F. Adaptive video streaming with scalable video coding using multipath QUIC. In: Proc. of the 2021 IEEE Int'l Performance, Computing, and Communications Conf. (IPCCC). Austin: IEEE, 2021. 1–7. [doi: [10.1109/IPCCC51483.2021.9679445](https://doi.org/10.1109/IPCCC51483.2021.9679445)]
- [146] Wu JY, Cheng B, Wang M, Chen JL. Energy-efficient bandwidth aggregation for delay-constrained video over heterogeneous wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(1): 30–49. [doi: [10.1109/JSAC.2016.2632599](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2632599)]
- [147] Wu JY, Yuen C, Cheng B, Yang Y, Wang M, Chen JL. Bandwidth-efficient multipath transport protocol for quality-guaranteed real-time video over heterogeneous wireless networks. *IEEE Trans. on Communications*, 2016, 64(6): 2477–2493. [doi: [10.1109/TCOMM.2016.2553138](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2553138)]
- [148] Afzal S, Testoni V, de Oliveira JFF, Rothenberg CE, Kolan P, Bouazizif I. A novel scheduling strategy for MMT-based multipath video streaming. In: Proc. of the 2018 IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM). Abu Dhabi: IEEE, 2018. 206–212. [doi: [10.1109/GLOCOM.2018.8648134](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8648134)]
- [149] Silva F, Bogusevski D, Muntean GM. A MPTCP-based RTT-aware packet delivery prioritisation algorithm in AR/VR scenarios. In: Proc. of the 14th Int'l Wireless Communications & Mobile Computing Conf. (IWCMC). Limassol: IEEE, 2018. 95–100. [doi: [10.1109/IWCMC.2018.8450524](https://doi.org/10.1109/IWCMC.2018.8450524)]
- [150] Wei WJ. Research on coupled congestion control and data scheduling mechanism in MPTCP-based multi-path data transmission [Ph.D. Thesis]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.27517/d.cnki.gzjku.2020.001617](https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzjku.2020.001617)]
- [151] Williams N, Abeysekera P, Dyer N, Vu H, Armitage G. Multipath TCP in vehicular to infrastructure communications. Technical Report, 140828A, Melbourne: Centre for Advanced Internet Architectures, Swinburne University of Technology, 2014.
- [152] Zhu DY, Xu CQ, Qin JR, Zhou Z, Guan JF. Mobility-aware multimedia data transfer using multipath TCP in vehicular network. In: Proc. of the 13th Int'l Wireless Communications and Mobile Computing Conf. (IWCMC). Valencia: IEEE, 2017. 1041–1046. [doi: [10.1109/IWCMC.2017.7986429](https://doi.org/10.1109/IWCMC.2017.7986429)]
- [153] Cloud J, du Pin Calmon F, Zeng WF, Pau G, Zeger LM, Medard M. Multi-path TCP with network coding for mobile devices in heterogeneous networks. In: Proc. of the 78th IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC Fall). Las Vegas: IEEE, 2013. 1–5. [doi: [10.1109/VTC.2013.6717986](https://doi.org/10.1109/VTC.2013.6717986)]

- VTCFall.2013.6692295]
- [154] Bai YH, Xie DL, Wang SY, Zhong M. Multi-path transmission protocol in VANET. In: Proc. of the 2015 Int'l Conf. on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). Shenzhen: IEEE, 2015. 204–209. [doi: [10.1109/ICCVE.2015.25](https://doi.org/10.1109/ICCVE.2015.25)]
 - [155] Ding N, Lin T, Song CX, Tan GZ. Requirements-driven and multi-homed-based multipath TCP congestion control algorithm for vehicular network. Journal on Communications, 2016, 37(7): 96–106 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2016137](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2016137)]
 - [156] Ni YZ, Zheng ZL, Lin XS, Gao FY, Zeng X, Liu YR, Xu T, Wang H, Zhang ZD, Du SL, Yang G, Su YC, Cai D, Liu HH, Xu CR, Zhai EN, Ma YF. CellFusion: Multipath vehicle-to-cloud video streaming with network coding in the wild. In: Proc. of the 2023 ACM SIGCOMM Conf. New York: ACM, 2023. 668–683. [doi: [10.1145/3603269.3604832](https://doi.org/10.1145/3603269.3604832)]
 - [157] Chirwa RMN, Lauf AP. Performance improvement of transmission in unmanned aerial systems using multipath TCP. In: Proc. of the 2014 IEEE Int'l Symp. on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT). Noida: IEEE, 2014. 19–24. [doi: [10.1109/ISSPIT.2014.7300557](https://doi.org/10.1109/ISSPIT.2014.7300557)]
 - [158] Jung WS, Yim J, Ko YB. Adaptive offloading with MPTCP for unmanned aerial vehicle surveillance system. Annals of Telecommunications, 2018, 73(9–10): 613–626. [doi: [10.1007/s12243-018-0660-5](https://doi.org/10.1007/s12243-018-0660-5)]
 - [159] Li L, Xu K, Li T, Zheng K, Peng CY, Wang D, Wang XX, Shen M, Mijumbi R. A measurement study on multi-path TCP with multiple cellular carriers on high speed rails. In: Proc. of the 2018 Conf. of the ACM Special Interest Group on Data Communication. Budapest: ACM, 2018. 161–175. [doi: [10.1145/3230543.3230556](https://doi.org/10.1145/3230543.3230556)]
 - [160] Dong P, Du XJ, Zheng T, Zhang HK. Improving QoS on high-speed vehicle by multipath transmission based on practical experiment. In: Proc. of the 2015 IEEE Vehicular Networking Conf. (VNC). Kyoto: IEEE, 2015. 32–35. [doi: [10.1109/VNC.2015.7385543](https://doi.org/10.1109/VNC.2015.7385543)]
 - [161] Ni YZ, Qian F, Liu TD, Cheng YH, Ma ZY, Wang J, Wang ZF, Huang G, Liu XZ, Xu CR. POLYCORN: Data-driven cross-layer multipath networking for high-speed railway through composable schedulerlets. In: Proc. of the 20th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation. Boston: USENIX Association, 2023. 1325–1340.
 - [162] Aggarwal S, Saha SK, Khan I, Pathak R, Koutsonikolas D, Widmer J, MuShier: An agile multipath-TCP scheduler for dual-band 802.11ad/ac wireless LANs. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2022, 30(4): 1879–1894. [doi: [10.1109/TNET.2022.3158678](https://doi.org/10.1109/TNET.2022.3158678)]
 - [163] Touseef T, Sentosa W, Vaddiraju MK, Bhattacharjee D, Chandrasekaran B, Godfrey B, Tiwari S. Boosting application performance using heterogeneous virtual channels: Challenges and opportunities. In: Proc. of the 22nd ACM Workshop on Hot Topics in Networks. Cambridge: ACM, 2023. 139–146. [doi: [10.1145/3626111.3628193](https://doi.org/10.1145/3626111.3628193)]
 - [164] Apple Inc. Advances in networking. 2024. https://devstreaming-cdn.apple.com/videos/wwdc/2017/707h2gkb95cx11/707/707_advances_in_networking_part_1.pdf
 - [165] Tessares. MPTCP deployment options. 2024. <https://www.tessares.net/mptcp-deployment-options/>
 - [166] Lim YS, Chen YC, Nahum EM, Towsley D, Gibbens RJ. Improving energy efficiency of MPTCP for mobile devices. arXiv:1406.4463, 2014.
 - [167] Lim YS, Chen YC, Nahum EM, Towsley D, Gibbens RJ. How green is multipath TCP for mobile devices? In: Proc. of the 4th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications, & Challenges. Chicago: ACM, 2014. 3–8. [doi: [10.1145/2627585.2627596](https://doi.org/10.1145/2627585.2627596)]
 - [168] Das T, Sivalingam KM. TCP improvements for data center networks. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Communication Systems and Networks (COMSNETS). Bangalore: IEEE, 2013. 1–10. [doi: [10.1109/COMSNETS.2013.6465539](https://doi.org/10.1109/COMSNETS.2013.6465539)]
 - [169] Tang H, Gulbeden A, Zhou JY, Strathearn W, Yang T, Chu LK. The panasas ActiveScale storage cluster-delivering scalable high bandwidth storage. In: Proc. of the 2004 ACM/IEEE Conf. on Supercomputing. Pittsburgh: IEEE, 2004. 53. [doi: [10.1109/SC.2004.57](https://doi.org/10.1109/SC.2004.57)]
 - [170] Xing ZY, Qi H, Cong LG, Di XQ, Ding Q. Research on the transmission performance of QUIC in data center network. In: Proc. of the 2021 Int'l Conf. on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS). Changchun: IEEE, 2021. 183–187. [doi: [10.1109/EIECS53707.2021.9587937](https://doi.org/10.1109/EIECS53707.2021.9587937)]
 - [171] Chen JW, Xu KX, Gerla M. Multipath TCP in lossy wireless environment. In: Proc. of the 3rd IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop. Palma de Mallorca: Springer, 2004. 263–270.
 - [172] Croitoru A, Niculescu D, Raiciu C. Towards WiFi mobility without fast handover. In: Proc. of the 12th USENIX Conf. on Networked Systems Design and Implementation. Oakland: USENIX Association, 2015. 219–234.
 - [173] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS). 2017. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144>
 - [174] Alibaba. XQUIC Library released by Alibaba is a cross-platform implementation of QUIC and HTTP/3 protocol. <https://github.com/alibaba/xquic>
 - [175] Kaur K, Singh J, Ghuman NS. Mininet as software defined networking testing platform. In: Proc. of the 2014 Int'l Conf. on

- Communication, Computing & Systems. Ferozepur: SBS State Technical Campus, 2014.
- [176] Henderson TR, Lacage M, Riley GF. Network simulations with the NS-3 simulator. In: Proc. of the 2008 ACM SIGCOMM Conf. Seattle: ACM, 2008. 527.
- [177] Sheshadri RK, Koutsonikolas D. On packet loss rates in modern 802.11 networks. In: Proc. of the 2017 IEEE Conf. on Computer Communications. Atlanta: IEEE, 2017. 1–9. [doi: [10.1109/INFOCOM.2017.8057130](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2017.8057130)]
- [178] Wu HJ, Ferlin S, Caso G, Alay Ö, Brunstrom A. A survey on multipath transport protocols towards 5G access traffic steering, switching and splitting. IEEE Access, 2021, 9: 164417–164439. [doi: [10.1109/ACCESS.2021.3134261](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3134261)]
- [179] Tian H, Liao XD, Zeng CL, Zhang JX, Chen K. Spine: An efficient DRL-based congestion control with ultra-low overhead. In: Proc. of the 18th Int'l Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies. Rome: ACM, 2022. 261–275. [doi: [10.1145/3555050.3569125](https://doi.org/10.1145/3555050.3569125)]
- [180] Su JS, Zhao BK, Dai Y, Cao JJ, Wei ZL, Zhao N, Song CX, Liu YJ, Xia YS. Technology trends in large-scale high-efficiency network computing. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2022, 23(12): 1733–1746. [doi: [10.1631/FITEE.2200217](https://doi.org/10.1631/FITEE.2200217)]
- [181] Mishra D, Vegni AM, Loscri V, Natalizio E. Drone networking in the 6G era: A technology overview. IEEE Communications Standards Magazine, 2021, 5(4): 88–95. [doi: [10.1109/MCOMSTD.0001.2100016](https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.2100016)]
- [182] Pan JP, Cai L, Yan S, Shen XS. Network for AI and AI for network: Challenges and opportunities for learning-oriented networks. IEEE Network, 2021, 35(6): 270–277. [doi: [10.1109/MNET.101.2100118](https://doi.org/10.1109/MNET.101.2100118)]
- [183] Pokhrel SR, Pan L, Kumar N, Doss R, Vu HL. Multipath TCP meets transfer learning: A novel edge-based learning for industrial IoT. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(13): 10299–10307. [doi: [10.1109/JIOT.2021.3056466](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3056466)]

附中文参考文献:

- [1] 中国网络空间研究院. 世界互联网发展报告 2019. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [61] 刘佩, 任勇毛, 李俊. 多路径 TCP 拥塞控制算法研究. 通信学报, 2012, 33(S2): 233–238. [doi: [10.3969/j.issn.1000-436x.2012.z2.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-436x.2012.z2.033)]
- [105] 殷明, 任勇毛, 张运栋, 周旭, 徐安民, 于德雷. 一种差异化可靠传输控制机制. 数据与计算发展前沿, 2022, 4(5): 138–151. [doi: [10.11871/jfd.issn.2096-742X.2022.05.015](https://doi.org/10.11871/jfd.issn.2096-742X.2022.05.015)]
- [150] 魏文佳. 基于 MPTCP 的多路径传输中的耦合拥塞控制和数据调度机制研究 [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020. [doi: [10.27517/d.cnki.gzkju.2020.001617](https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2020.001617)]
- [155] 丁男, 林滔, 宋彩霞, 谭国真. 面向车联网按需驱动的多宿主多链路 TCP 拥塞控制算法. 通信学报, 2016, 37(7): 96–106. [doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2016137](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2016137)]



苏金树(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会士, 主要研究领域为网络体系结构, 网络空间安全, 智能网络.



徐草(1998—), 男, 硕士, 主要研究领域为多路径传输技术, 拥塞控制.



宋丛溪(1994—), 女, 博士生, 主要研究领域为多路径传输技术, 流媒体传输.



韩彪(1986—), 男, 博士, 副研究员, CCF 专业会员, 主要研究领域为物理层安全, 网络空间安全, 智能网络.



计晓岚(1998—), 女, 博士生, CCF 学生会员, 主要研究领域为多路径传输技术, 拥塞控制.