



综述

5G 多路冗余传输技术综述

马帅, 杨博涵, 羊峰波, 韦安妮, 郑成龙
(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 当前社会正处在科技高速发展的时代, 无线通信技术的迅猛发展不仅推动了工业、交通、医疗等领域的数字化转型, 也在不断升级无线通信网络, 试图从有线向无线化迈进。随着计算机技术和无线通信技术的不断演进, 许多应用场景要求在无线环境下实现高可靠传输。特别是面向现代工业自动化、自动驾驶等领域, 对高可靠传输的需求更为迫切。深入研究了作为当前业界最先进的无线传输技术之一的5G技术, 重点关注了5G系统内多路冗余传输技术。综述了该技术在应用背景、技术原理和技术路线方面的关键要点。在应用背景方面, 突出了5G冗余传输在现代工业自动化、自动驾驶等无线场景中的实际应用需求。在技术原理方面, 有针对性地从业务端到端多路冗余传输对有关研究进行归纳和梳理, 重点分析5G多路冗余传输的技术原理, 解释了其在提高传输可靠性方面的独特优势。在技术路线方面, 综合考虑了5G多路冗余传输技术的发展方向和各种可能的实施路径。最后, 指出5G多路冗余传输技术未来发展的困难和挑战, 并探讨其未来发展趋势, 以更好地理解5G冗余传输技术在无线通信领域的关键作用和前景。

关键词: 5G; URLLC; 多路冗余传输; 复制和消除; 确定性

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024026

Overview of 5G multi-channel redundant transmission technology

MA Shuai, YANG Bohan, YANG Fengbo, WEI Anni, ZHENG Chenglong
China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: At present, the society is in an era of rapid development of science and technology, and the rapid development of wireless communication technology has not only promoted the digital transformation of industry, transportation, medical and other fields, but also continuously upgraded wireless communication networks, trying to move from wired to wireless. With the continuous evolution of computer technology and wireless communication technology, many application scenarios require highly reliable transmission in a wireless environment. Especially in the fields of modern industrial automation and autonomous driving, the demand for highly reliable transmission is more urgent. 5G technology was delved into, which was one of the most advanced wireless transmission technologies in the industry, focusing on multi-channel redundant transmission technology within 5G systems. The key points of the technol-

收稿日期: 2023-10-13; 修回日期: 2024-02-10
通信作者: 羊峰波, yangfengbo@chinamobile.com



ogy in terms of application background, technical principles and technical route were summarized. In terms of application background, the practical application requirements of 5G redundant transmission in wireless scenarios such as modern industrial automation and autonomous driving were highlighted. In terms of technical principles, the relevant research was summarized and sorted out from the end-to-end multi-channel redundant transmission of services, the analysis of the technical principles of 5G multi-channel redundant transmission were focused on, and its unique advantages in improving transmission reliability were explained. In terms of technical routes, the development direction of 5G multi-channel redundant transmission technology and various possible implementation paths were comprehensively considered. Finally, the difficulties and challenges of the future development of 5G multi-channel redundant transmission technology were pointed out, and its future development trend was discussed, so as to better understand the key role and prospect of 5G redundant transmission technology in the field of wireless communication.

Key words: 5G, URLLC, multi-redundant transmission, copy and eliminate, deterministic

0 引言

5G通信中数据传输的可靠性衡量的是通信系统可持续稳定地提供可靠服务的能力^[1]。如在工业自动化系统中的用户设备 (user equipment, UE) 与数据网络 (data network, DN) 通信过程中^[2], 数据传输关键环节发生故障, 导致设备无法正常通信, 其影响将瞬间波及整个工业系统, 引发工业网络的瘫痪。工业化是现代化的基本前提、动力基础和核心内涵。新型工业化概念强调“以信息化带动工业化, 以工业化促进信息化”的发展道路。在这一背景下, 5G作为新一代移动通信技术的代表, 正在深刻改变各行各业的运行方式和发展模式, 新型工业化为工业界带来了前所未有的机遇和挑战。在5G从辅助生产向融入生产深入转化的过程中, 为了保障工业数据采集、工业控制等业务的精确性, 工业网络对5G的通信质量提出了更严格的要求。为了更好地应对工业领域的需求, 5G网络正全面向确定性方向进行演进, 行业内专家不断探索和创新, 提出了5G多路冗余传输技术架构, 以实现从辅助生产到融入生产并进一步改变生产的技术愿景。在车联网^[3]自动驾驶过程中, 数据传输需达到99.999%的传输成功率, 否则会导致车辆和人员安全受到威胁, 进而可能造成严重的交通事故。当今世界正经历

百年未有之大变局, 新一轮科技革命和产业变革方兴未艾, 智能汽车已成为全球汽车产业发展的战略方向。5G技术为自动驾驶提供了全面的赋能, 通过提供更高带宽、低时延和大规模连接, 加强了自动驾驶车辆对环境的实时感知和数据处理能力。其中, 5G多路冗余传输技术通过多路径传输和容错机制, 降低了通信过程中发生错误的概率, 提高了通信的可靠性。这使得自动驾驶系统能够在复杂道路环境中更准确、及时地获取并传递关键信息, 从而推动自动驾驶技术的安全性和可靠性的进一步提升。低时延和高可靠性的需求不仅体现在工业自动化和自动驾驶领域, 还广泛应用于医疗保健、AR/VR、远程控制与操作、金融交易、实时监控以及物联网等多个领域。上述典型场景强调了网络对低时延和高可靠性的迫切需求, 以满足不同行业的多元化要求, 推动各领域创新发展。超可靠超低时延通信 (ultra reliable low latency communication, URLLC) 是5G三大应用场景之一^[4], 旨在支持对时延和稳定性高度敏感的业务, 可通过多路冗余传输技术来保障业务要求的高可靠性。为了满足URLLC应用场景要求, 行业内专家从不同角度出發, 提出了多种多路冗余传输的技术。多路冗余传输技术通过在通信过程的多个子环节中应用多发选收的技术原理, 提高数据传输的可靠性。

1 多路冗余传输基本原理

5G网络可被视为整个互联网中的一个局域网，与互联网进行数据的转发。终端和外部网络之间以数据包的形式进行数据的发送和接收。为确保在5G网络的通信过程中数据包不丢失，通常采用多发选收技术进行数据的发送与接收。多发选收技术可助力5G网络高可靠运行，因此，多发选收技术的复制与消除机制被广泛研究。该机制在发送端将数据流分裂成多个成员流，并将原始流数据帧副本复制到成员流，这些成员流将通过不同的冗余路径发往目的节点。然后，在目的节点结合这些成员流，消除重复数据帧，发送重构的数据流。多发选收技术可以有效地提高网络通信可靠性，降低设备故障造成的路径规划时间。双发选收技术基本原理如图1所示。在数据通信的发送端生成序列号子参数，并将其编码到发送端的每个数据帧中，将原始数据流分裂为两个成员数据流并通过不同的传输路径分别发送，并且相同的数据包使用同样的序列号。在数据通信的接收端，接收缓存来自不同路径的数据包并按照序列号消除重复的数据帧副本。在冗余的路径上发送数据帧副本，然后使用数据帧携带的序列号在接收节点消除重复数据帧，可以有效地降

低数据帧丢失的概率，提高通信网络的可靠性。

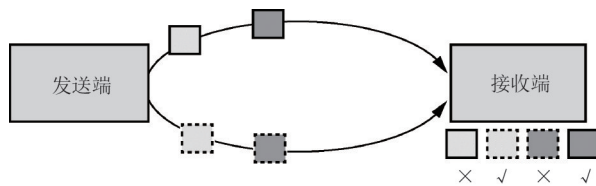


图1 双发选收技术基本原理

2 5G系统多路冗余方案总体描述

移动通信从第一代移动通信（1G）不断发展到如今的第五代移动通信（5G）^[5]，都是不断适应激增的用户或新的业务需求而产生的。经过不断的演进，现在的5G网络架构由接入网、承载网、核心网三大核心部分组成^[6]，如图2所示。

5G核心网主要由控制面网元和用户面网元分离组成，5G接入层（NG-RAN）主要由5G基站（gNB）组成^[7]。接入网基站在演进的过程中，5G将中央单元（CU）和分布单元（DU）进行了分离，网络架构对比如图3所示。4G基站内部分为基带单元（BBU）、远程无线单元（RRU）和天线3个模块，每个基站都有一套BBU，并通过BBU直接连到核心网。而到了5G时代，将RRU和天线合并成了AAU，而BBU则拆分成了DU和CU，每个站点都配有一套DU，然后多个站点共用同一个CU进行集中式管理。将CU和DU分离

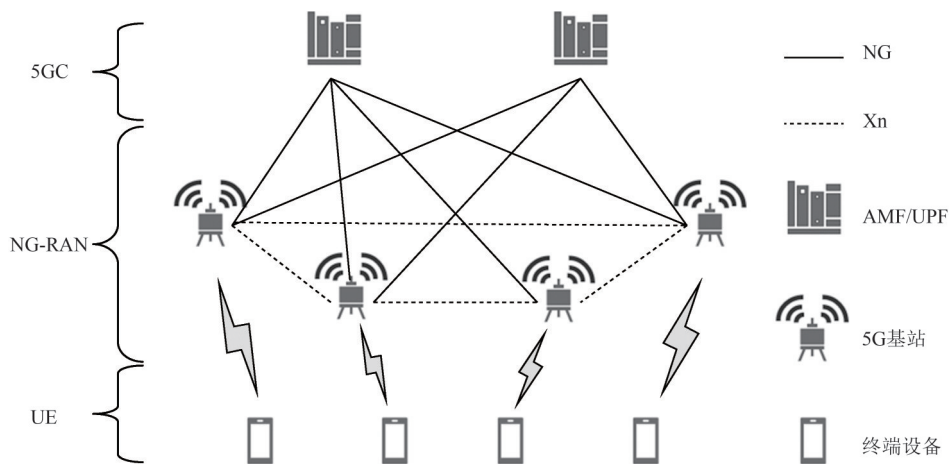


图2 5G网络架构

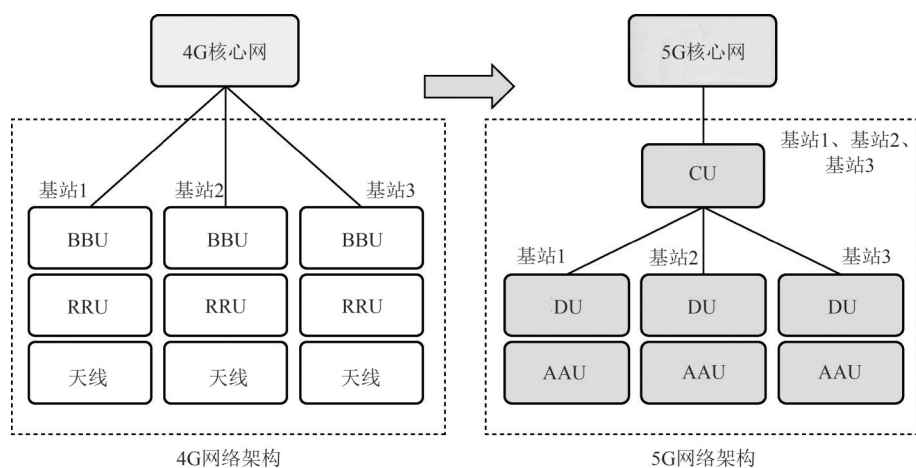


图3 网络架构对比

可使得基站能够统一管理，集中部署DU，并由CU统一调度，以实现基带资源的共享，节省基带资源。CU和DU分离还有利于实现无线接入的切片和云化^[8]，能更好地适配URLLC应用场景对网络可靠性的要求。

5G承载网在5G网络中扮演了关键的角色，它负责连接无线电接入网（RAN）和核心网，以便高效地传输数据。因为5G网络需要满足高速数据传输和低时延的需求，以支持各种应用，包括实时视频、自动驾驶、物联网设备等，为了实现这一目标，承载网通常采用光纤、高速以太网等高速传输技术，以提供高带宽和低时延的连接。光纤具有高带宽、低损耗和抗干扰能力强等特点，使其成为传输大量数据的理想选择。高速以太网提供标准化的数据传输协议，可用于连接不同类型的设备和网络。5G网络中的承载网通常采用多层次的以太网结构，以支持不同速率和协议的数据传输。承载网支持网络切片技术，通过网络切片，承载网可以根据应用的不同需求，将网络资源划分为多个虚拟网络，每个网络都具有独立的性能特征，以满足不同应用的要求。因此，5G网络可以同时支持多种应用，如增强型移动宽带、物联网、工业自动化等。承载网在5G网络中扮演了桥梁的角色，它连接了RAN和

核心网，提供高带宽、低时延、高度可靠的数据传输，同时支持网络切片等关键技术，使5G网络能够支持多样化的应用和服务，满足未来通信需求的要求。

5G核心网为满足业务处理的低时延高可靠需求，其控制面逻辑功能被进一步细分，接入与移动性管理功能（AMF）和会话管理功能（SMF）分离为两个逻辑节点，并将网络用户面进一步下沉^[9]，第三代合作伙伴计划（3GPP）5G网络架构如图4所示。控制面是网络中用于管理、控制和维护网络连接和服务的部分^[10]，它主要包括各种控制信令和协议，用于建立、修改、终止和管理通信会话。用户面也被称为数据面或转发面，它负责传输实际的用户数据，将数据从发送方传输到接收方。

为了增加用户数据传输的过程中数据交付的成功率，专家们制定了多项多路冗余传输方案。这些方案旨在通过增加冗余数据的传输，以应对信道干扰、丢包和其他通信问题，从而提高数据传输的可靠性。3GPP提供的用户平面的协议栈涉及多个关键组成部分。首先是协议数据单元（PDU）层，负责在UE和DN之间通过PDU会话传输数据，其最小单元为PDU，具体格式包括IPv4报文、IPv6报文、IPv4v6报文或以太网帧，

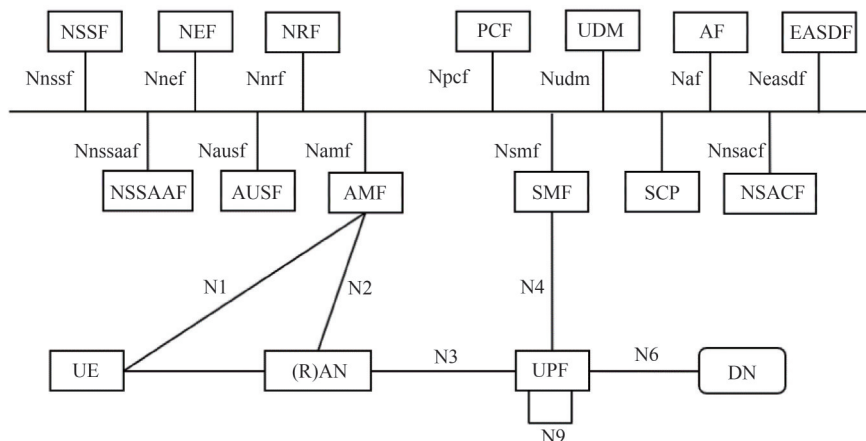


图4 3GPP 5G网络架构

取决于 PDU 会话类型。用户平面的 GPRS 隧道协议 (GTP-U), 支持通过 N3 和 N9 隧道在第五代移动通信网络的接入网络 (5G-AN) 与 UPF 之间以及不同 UPF 之间传输用户数据。在 5G-AN 协议栈中, 协议/层的具体组合依赖于 5G-AN 的类型。整个协议栈还涉及底层的 UDP/IP 协议, 作为骨干网络协议, 用于在网络中传输数据。本文将基于 3GPP 提供的多路冗余传输方案, 从用户面协议栈的接口层面对多路冗余传输技术进行详细梳理, 详尽阐述这些技术是如何增强数据传输的可靠性的。3GPP 多路冗余传输方案的实现接口主要包括 UE 和 5G-AN 之间的空口多路冗余传输 (UE↔5G-AN)、5G-AN 和用户面协议功能

(UPF) 之间的多路冗余传输 (包括 5G-AN↔UPF 和 UPF↔UPF)、UE 和 UPF 之间的多路冗余传输 (UE↔UPF) 以及 UE 和 DN 之间的多路冗余传输 (UE↔DN), 5G 网络用户面协议栈如图 5 所示。

其中, 段式多路冗余传输主要包括 UE↔5G-AN、5G-AN↔UPF 和 UPF↔UPF、UE 和 UPF、UE↔UPF。在 UE 和 5G-AN 之间的空口多路冗余传输中, 空口多路冗余传输技术发挥重要作用。通过 PDCP 层的复制增强机制, 第 15 版的 3GPP 标准 (Rel-15) 支持两条支路的 PDCP 复制, 而第 16 版的 3GPP 标准 (Rel-16) 进一步提升, 最多可具备 4 条 RLC 传输链路, 以增强数据传输的

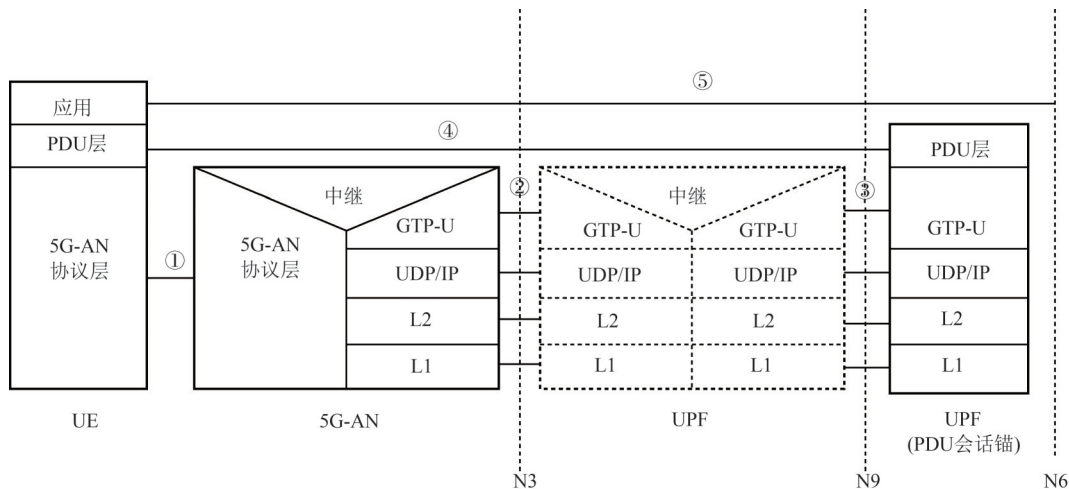


图5 5G网络用户面协议栈



可靠性。为了获得更多的分集增益, Rel-16 NR 标准引入了 multi-TRP 传输机制, 支持多种分集方式, 如空间分集、频率分集等。这些方案有效提高了信号质量、容量和可靠性, 应对无线信道中的噪声、干扰和衰落。在 5G-AN 与 UPF、UPF 与 UPF 之间的 N3/N9 接口上, 采用多隧道冗余传输, 通过帧复制和消除可靠性 (FRER) 确保数据不会丢失或重复。为提高传输效率, 专家们提出了多种改进策略, 如多级联预配置周期 (FRER-MPC)、异或网络编码 (XNC)、基于分段帧复制和消除可靠性 (S-FRER) 等, 涵盖了路径选择、网络编码和冗余路由配置等方面。通过对这些方法的比较为实际应用提供了选择冗余传输方案的指导。在 UE 和 UPF 之间的多路冗余传输中, 通过对 PDCP 和 GTP-U 协议进行增强、增加扩展协议层及引入 MPTCP 和 MPQUIC 等多路传输协议, 以支持分组复制和消除功能。在业务端到端多路冗余传输中 (UE↔DN), 为实现高可靠的 URLLC 业务, 5G 网络中的 UE 可建立两个冗余的 PDU 会话, 通过不同基站和 UPF 建立, 确保用户面路径不相交, 以消除信号干扰提高网络通信可靠性。

为全面理解多路冗余传输在不同应用场景下的应用和优势, 本文从业务端到端多路冗余传输及业务传输路径上段式多路冗余传输两方面出发, 对有关研究进行归纳和梳理。业务端到端多路冗余传输强调整个通信链路端到端的可靠性, 适用于对整个传输路径要求高可靠性的场景, 如实时通信或大规模数据传输。而业务传输路径上的段式多路冗余传输关注在传输路径的各个段上如何应用多路冗余传输技术, 这种分段的方式更灵活, 能够更好地处理不同段的特殊情况, 为在不同场景下平衡性能和资源利用提供更具体的实现和优化建议。通过深入研究这两个方面, 以提供更全面、深入的视角, 促进对多路冗余传输技术的深入理解和更有效的应用。

3 段式多路冗余传输

3.1 UE↔5G-AN, 空口多路冗余传输

在 3GPP 多路冗余传输方案中, 空口接口是连接 UE 与 5G-AN 之间的无线信道^[11]。这个接口在无线通信中起着关键作用, 它允许数据、控制信息和信令在 UE 和 5G-AN 之间进行传输。为了应对无线信道中的噪声、干扰和衰落等不可避免的问题, 3GPP 采用了多路冗余传输技术, 旨在提高在这个空口接口上的数据传输可靠性。空口多路传输主要在 PDCP 和 PHY 进行增强, 利用空口双链路对抗随机干扰, 保障空口的低时延高可靠性能。

在 5G NR 协议中, PDCP 层扮演关键角色, 具备多项关键功能, 包括数据的压缩与解压缩、数据的完整性维护、不同传输模式的支持、流量控制、IP 头部的压缩、复制发送和冗余消除等。IP 数据被传递至 PDCP 层, 然后数据会进行压缩。接着, PDCP 层为每个数据单元分配唯一的序列号, 以便维护数据的完整性和顺序。这些数据单元被传输到物理层进行无线传输。在接收端, 数据被传递到 PDCP 层, 并进行解压缩。然后, PDCP 层通过检查序列号来验证数据的完整性, 如果发现数据包丢失, 会通知发送端重传。此外, PDCP 层还具备复制增强功能, 发送端复制发送多个副本的数据, 接收端检测和删除重复的数据, 以增加数据传输的可靠性, 确保数据在 5G 网络中的高效、可靠传输。PDCP 层工作流程如图 6 所示。

为了支持 PDCP 复制增强机制, Rel-15 NR 标准支持两条支路的 PDCP 复制^[12]。PDCP 层在数据复制传输状态时, 主 RLC 实体和辅 RLC 实体在相同的 MAC 实体上, 为 CA 复制传输; 若在不同的 MAC 实体上, 为 DC 复制传输, Rel-15 NR 标准的 PDCP 数据冗余传输如图 7 所示。

为了实现更高的可靠性, Rel-16 NR 标准允

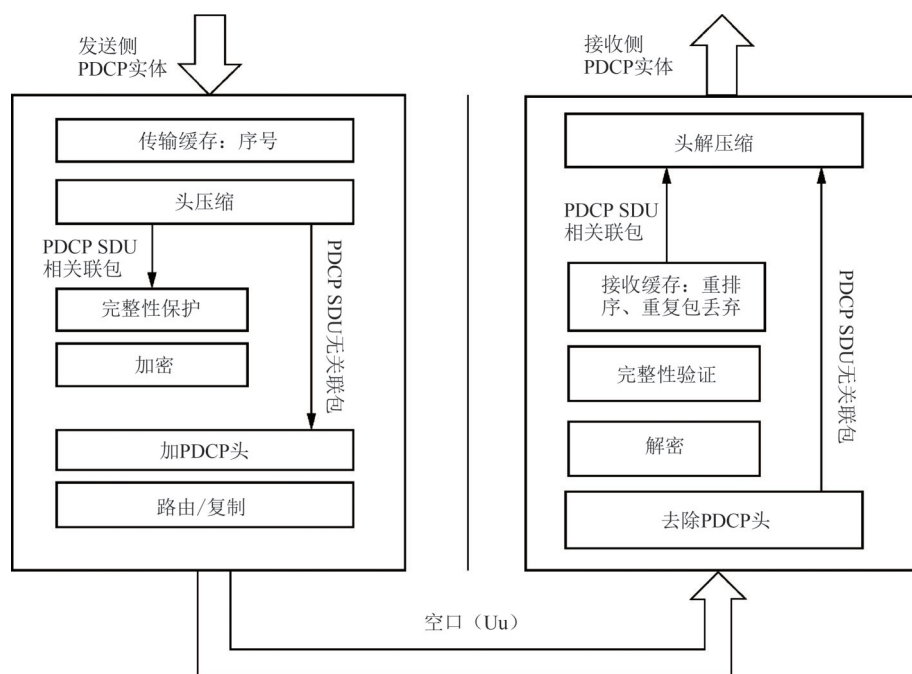


图6 PDCP层工作流程

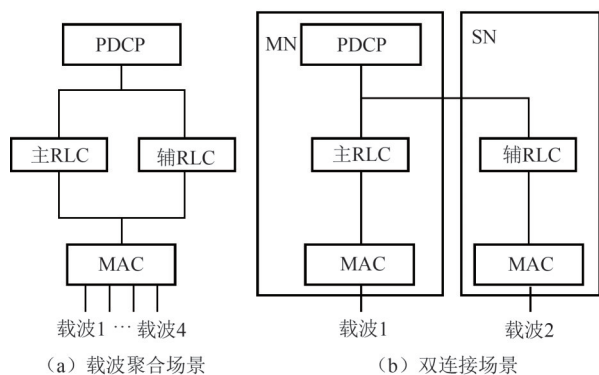


图7 Rel-15 NR标准的PDCP数据冗余传输

终端在 PDCP 复制传输激活状态下，利用多于两条 RLC 传输链路进行数据包的复制传输，如图8所示。这意味着网络最多可以配置4条 RLC 传输链路传输复制的数据包，以增强数据传输的可靠性。

为了获得更多的分集增益，在 Rel-16 中 NR 还将支持 multi-TRP 传输机制，可以从两个或多个 TRP 发送相同的数据，并在接收端消除冗余，提升数据传输的成功率^[13]。多 TRP 传输的方式包

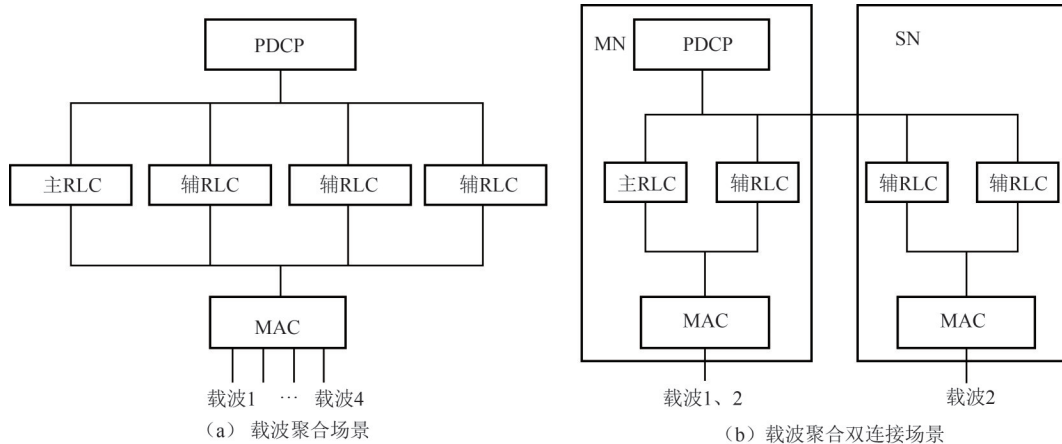


图8 Rel-16 NR标准的PDCP数据冗余传输



括空间分集 (spatial diversity)、频率分集 (frequency diversity)、时隙内时分 (intra-slot time division) 和时隙间时分 (inter-slot time division) 等方式进行传输块的冗余发送, 为了提高分集增益, 还支持上述模式的组合以及不同模式间的动态切换。

空间分集^[14]利用多个天线之间的空间差异, 以增加信号的可靠性。在发送端, 相同的数据块通过多个天线同时传输。在接收端, 由于不同的天线的信道衰落可能不同, 接收的信号也会有所不同。通过将这些不同的信号进行合并, 可以减小信号衰落的影响, 从而提高整体信号质量。空间分集对抗了信道的影响, 例如多径衰落和信号弱化, 从而增强了信号的可靠性。频率分集^[15]通过在不同的频率上进行数据传输来增加冗余。这意味着相同的数据会在多个不同的频率上传输, 使得即使某些频率上的信道受到干扰或衰落, 其他频率上的信道仍然能够提供可靠的传输。频率分集可以降低特定频率上的干扰影响, 从而提高整体信号的稳定性。在一个时隙内, 不同的天线可以分别传输不同的数据块。这种方式可以提高数据传输的效率^[16], 因为不同的天线可以同时传输不同的数据, 从而在同一时隙内传输更多的信息。这对于增加系统容量和频谱效率非常有帮助, 特别是在高负载情况下。在不同的时隙之间, 不同的天线可以交替地进行数据传输。这种方式可以进一步提高系统的容量和频谱效率, 因为不同的天线可以在不同的时隙内传输数据, 从而在时间维度上充分利用资源。这对于应对快速变化的信道条件和不同业务要求也非常有用。

这些传输方式可以单独应用, 也可以进行组合, 以实现更好的性能。系统可以根据通信场景的需求, 动态地在这些传输方式之间进行切换, 以最大限度地提高信号质量、容量和可靠性。

3.2 5G-AN ↔ UPF、UPF ↔ UPF, N3/N9接口的多隧道冗余传输

工业自动化系统和高级驾驶辅助系统等现代信息系统对数据通信的可靠性要求很高, 系统的故障可能导致高额经济损失以及对人类和环境造成危害。因此, 时间敏感网络 (TSN) 任务组不仅为标准以太网引入了实时属性, 而且还开发了一种称为帧复制和消除可靠性 (frame replication and elimination for reliability, FRER) 的新型容错机制^[17]。FRER通过复制数据帧并为其分配相同的序列号, 从而在数据传输过程中增强可靠性。这些数据包分别通过两个 N3/N9 隧道传输到 UPF, 如图9、图10所示。UPF根据相应的 GTP-U 序列号通过 FRER 来消除重复数据包, 确保数据不会丢失或重复。

尽管 FRER 提高了数据传输的可靠性, 但其复制和多路径传输机制可能降低传输效率。为此各路专家学者从不同角度出发提出 FRER 的改进策略, 在增强数据传输可靠性的同时提高数据传输的效率, 满足 URLLC 场景对低时延高可靠的性能要求。

Yao 等^[18]考虑在不同的网络拓扑和网络状态下, 在源节点和目标节点之间找到两条不相交的路径并非易事。此外, FRER 机制仅考虑最短的路径, 而不考虑链路的属性, 例如可靠性、负载和中心性。因此他们提出了一种称为多级联预配

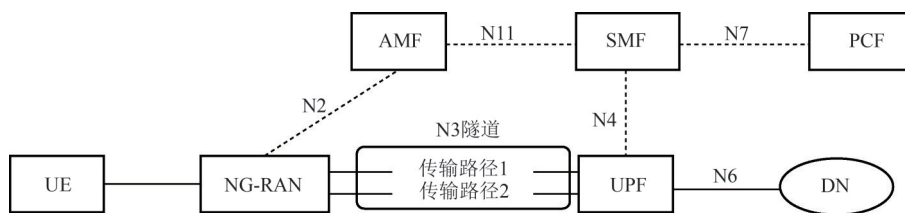


图9 基于N3接口多传输路径冗余传输

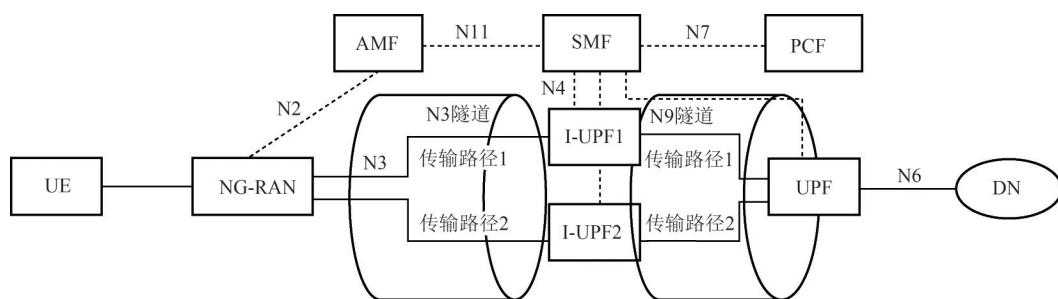


图10 基于N3/N9接口多传输路径冗余传输

置周期（FRER-MPC）的方法，为TSN中的FRER机制找到两条优化路径。FRER-MPC机制根据链路优先级模型选择工作路径，并通过多个预配置周期计算冗余路径。该方法在额外消耗带宽的情况下有效提高了路径可靠性。

FRER是TSN工具箱中唯一通过冗余路径发送相同数据包来增加容错能力的协议。虽然其核心功能由标准定义，但其有效使用主要取决于实际部署场景和路径选择策略。Ergenç等^[19]提出了可用于FRER路径选择的新策略；此外，他们还提出了对FRER的额外增强功能，可以防止独立于部署场景的意外数据包消除。在随机失效场景下，基于该策略的路径选择优于随机路径选择或最大不相交路径选择。

在FRER中，安全关键型数据通过源和目标之间的多个不相交路径传输。如果一条路径发生故障，安全关键型数据仍可以通过另一条路径传送到目的地。FRER的主要缺点是它过度利用了网络的可用带宽，减少了可调度流的数量。Syed等^[20]提出异或网络编码（XOR network coding, XNC）技术，该方法考虑了XNC和FRER的严格

时间安排传输。在这方面，开发了3种不同的动态调度和路由启发式方法，并与XNC技术集成，以增加可调度流的数量，而不会降低网络的可靠性。

FRER在源节点复制MAC帧并在目标节点消除冗余，这会造成带宽资源浪费，特别是不同链路和节点对丢包率和可靠性要求不同时资源浪费更明显。为此，Wu等^[21]专注于在有效利用资源和保证各种可靠性要求之间进行权衡，并提出了一种基于分段帧复制和消除可靠性（segment frame replication and elimination for reliability, S-FRER）的冗余路由配置。S-FRER在满足流量可靠性要求的前提下，能够有效压缩网络冗余。Feng等^[22]提出了一种有效的启发式算法，用于中断流的在线增量重新路由和重新调度。该算法是离线路由和调度算法的补充，可以与离线路由和调度算法结合使用，以实现FRER的容错，该方法能够更好地恢复系统的冗余度。

FRER及其改进方案比较见表1。

3.3 UE↔UPF，UE和UPF之间多径传输

URLLC应用场景需要超高通信可靠性作为

表1 FRER及其改进方案比较

作者	方法	优点	缺点
IEEE 802.1CB标准 ^[17]	FRER	确保数据不丢失且不重复	浪费资源，效率低
Yao ^[18]	FRER-MPC	可靠性高	冗余度高，浪费资源且效率低
Ergenç ^[19]	FRER路径选择新策略	防止数据包意外消除	复杂度高，效率低
Syed ^[20]	XNC	增加可调度流的数量且可靠性高	复杂度高，效率低
Wu ^[21]	S-FRER	可靠性高且冗余度低	复杂度高，效率低
Feng ^[22]	ORRTTF	可靠性高	冗余度高，浪费资源



技术支持,为此专家们提出在UE和UPF之间通过不同物理传输路径进行冗余传输,以提高上层服务的可靠性。通过对PDCP和GTP-U协议进行增强,以支持分组复制和消除功能。

对于QoS流,是否需要激活冗余传输可以由SMF根据DNN或S-NSSAI的本地策略来决定,也可以由PCF根据其QoS需求、UE的订阅和网络部署情况来决定。因为单个RAN节点不能为QoS流提供足够的空口可靠性,因此UPF和UE之间需要通过两个独立的N3隧道和两个RAN节点来传输冗余数据包,以提高服务的可靠性。为了确保两个N3隧道可以通过分离的传输层路径进行传输,M-RAN(master RAN)节点、SMF或UPF可以在隧道信息中提供不同的路由信息(不同的IP地址或不同的网络实例),这些路由信息将根据网络部署配置映射到不相交的传输层路径。冗余传输基于DC架构,相同的PDU通过M-

RAN和S-RAN(secondary RAN)节点进行冗余传输。对于两个不同的NG-RAN节点,在用户平面上使用不同的传输层路径进行冗余数据传输,基于N3隧道的冗余传输如图11所示。

在M-RAN/S-RAN需要通过中间UPF节点连接到UPF锚点的部署中,可以在锚点UPF和M-RAN/S-RAN节点之间分别插入一个或两个中间UPF(I-UPF),以支持一个或两个N3和N9隧道的冗余传输,基于N3隧道的冗余传输如图12所示。NG-RAN和UPF之间有两个N3和N9隧道,用于在建立的同一PDU会话的QoS流。在下行业务的情况下,UPF从DN复制QoS流的下行分组数据,并将相同的GTP-U序列号分配给它们。这些复制的包分别通过N9隧道1和N9隧道2传送到I-UPF1和I-UPF2。每个I-UPF分别通过N3隧道1和N3隧道2将从UPF接收的具有相同GTP-U列号的分组数据转发给NG-

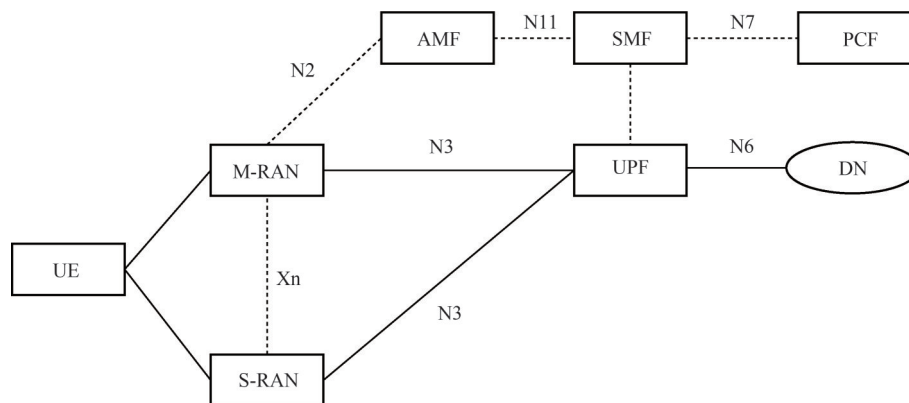


图11 基于N3隧道的冗余传输

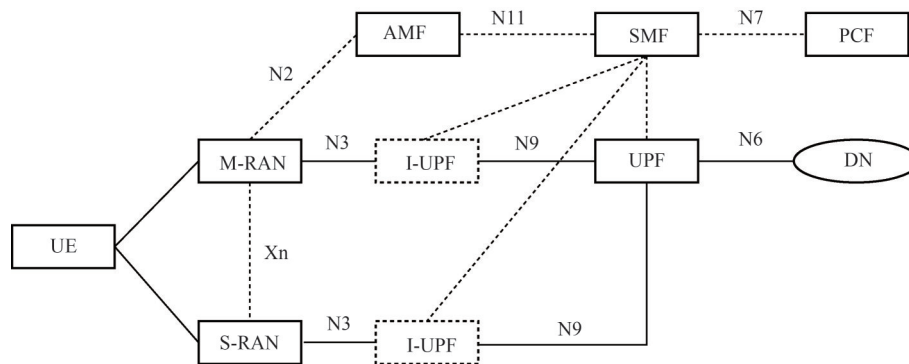


图12 基于N3和N9隧道的冗余传输

RAN。NG-RAN 根据 GTP-U 序列号消除重复包。在上行业务的情况下，NG-RAN 从 UE 复制 QoS 流的分组数据，并将相同的 GTP-U 序列号分配给它们。这些复制的包分别通过 N3 隧道 1 和 N3 隧道 2 传输到 I-UPF1 和 I-UPF2。每个 I-UPF 分别通过 N9 隧道 1 和 N9 隧道 2 将从 NG-RAN 接收的具有相同 GTP-U 序列号的分组数据转发给 UPF。UPF 根据 GTP-U 序列号消除重复的分组数据。

为了支持分组数据包的复制和消除，除了上述对 PDCP 和 GTP-U 协议增强的方法以外，还可以增加扩展协议层，HRP (high reliability protocol) 层被部署在 UE 和 UPF 上，扩展后的 5G 用户面协议栈如图 13 所示。在该方案中，对于下行业务，UPF 复制下行分组数据包并为其分配相同的 HRP 序列号以进行冗余传输。当 UE 接收 M-RAN 和 S-RAN 的副本时，根据 HRP 序列号在 HRP 层消除重复包。对于上行业务，UE 复制分组并为其分配相同的 HRP 序列号以用于冗余传输。UPF 根据 HRP 序列号删除 HRP 层的重复包。通过不连续的 CN 隧道和两个不同的 RAN 节点在锚点 UPF 和 UE 之间进行冗余传输，从而提供了高可靠性的传输机制。该方案在空口上提供了与 Rel-15 中现有的 PDCP 数据包复制功能相同的冗余级别，现有的 PDU 会话/QoS 流管理机制在该

解决方案中得到重用。

在移动通信领域，随着移动网络的不断演进和用户对于高质量服务的需求增加，网络资源的高效利用和用户体验的优化变得愈发重要。为了应对这些挑战，ATSSS (access traffic steering, switching, and splitting) 技术应运而生。3GPP 定义了 ATSSS 这种新兴的网络优化概念，结合多路传输技术和流量分流策略，旨在提升移动网络的性能、可靠性和用户体验。ATSSS 综合了多路传输技术和分流策略，通过引入 MPTCP (multi-path TCP protocol) 和 MPQUIC (multi-path QUIC protocol) 等多路传输协议，以及 ATSSS-LL 分流功能，极大地提升了网络性能和可靠性。3GPP 的 ATSSS 架构如图 14 所示。

3GPP 接入网络 (即 4G 和 5G) 与非 3GPP 接入网络 (即 Wi-Fi) 并存，使数据从一个接入网络卸载到另一个接入网络，以减轻拥塞网络的负担。多路传输技术，如 MPTCP 和 MPQUIC，是 ATSSS 的关键组成部分。3GPP 将 MPTCP 代理功能部署在 UPF 中，和 UE 侧支持的 MPTCP 功能配合，可以实现对 TCP 业务流的分流功能，也就是一条流可以同时 3GPP 接入路径和非 3GPP 接入路径上进行传输，或在实现传输过程中两条路径间的无缝切换^[23]。MPTCP 允许单个数据流同时通过多个网络路径进行传输，提高

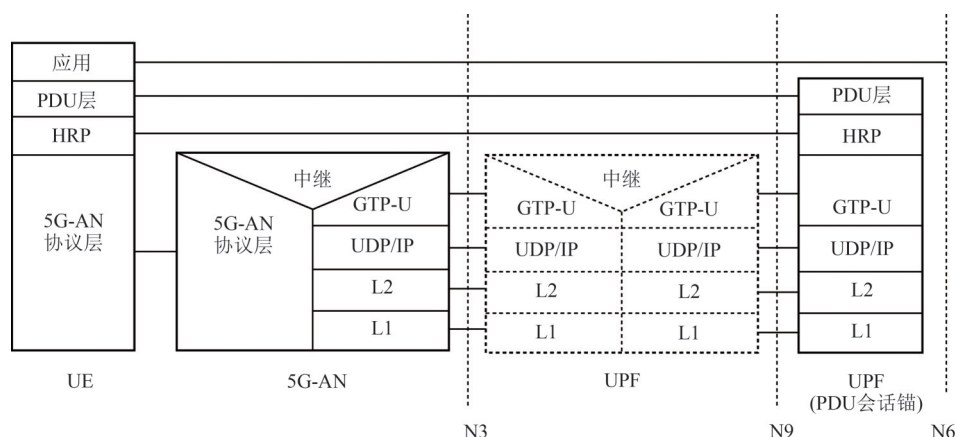


图 13 扩展后的 5G 用户面协议栈

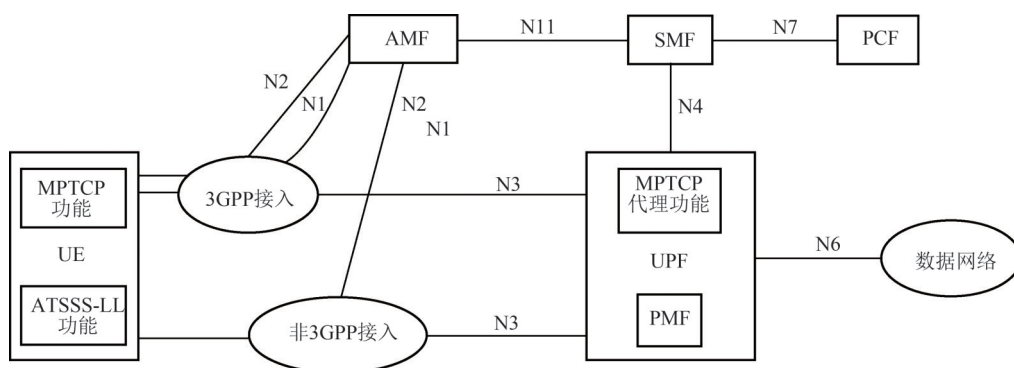


图14 ATSSS 架构

了传输的可靠性和吞吐量。MPQUIC 则是 QUIC 协议的多路径扩展，适用于 Web 应用等场景。通过在用户面协议网关（UPF）中部署 MPTCP/MPQUIC 代理，与用户设备（UE）支持的 MPTCP 功能协同工作，ATSSS 实现了流量在多条路径上传输。这样，即使在不稳定或高时延的网络条件下，数据也可以通过多条路径传输，从而提高传输效率和稳定性。

ATSSS 引入了两种分流功能，即 MPTCP/MPQUIC 分流和 ATSSS-LL 分流。

（1）MPTCP/MPQUIC 分流功能。这项功能通过 UPF 中的 MPTCP/MPQUIC 代理，实现了 TCP 业务流的分流。数据流可以在 3GPP 接入路径和非 3GPP 接入路径之间同时传输，或者在传输过程中实现路径的无缝切换。这种灵活性使得网络能够根据实时网络状况动态选择最佳路径，从而提高数据传输的可靠性和性能。

（2）ATSSS-LL 分流功能。这个功能在 UE 和 UPF 中实现，支持上行和下行业务流的分流。相比 MPTCP/MPQUIC，ATSSS-LL 分流功能更通用，适用于各种类型的业务流，包括 IP、TCP、UDP 和以太类型的流。ATSSS-LL 功能与 MPTCP 代理功能最大的区别是 ATSSS-LL 不支持单业务流（比如一个 IP 5-tuple 流）在 3GPP 和非 3GPP 接入路径上的同时传输，或者说 ATSSS-LL 不支持包粒度分流。通过智能路由选择和资

源分配，不同类型的业务流可以选择最佳路径，以满足不同的服务质量需求。

ATSSS 技术的应用为移动网络带来了广泛的优势。通过融合多路传输技术，ATSSS 能够显著提升用户体验。用户可以享受到更稳定、低时延的数据传输，从而获得更出色的移动通信服务。此外，ATSSS 的智能路径选择和流量分流机制优化了网络资源的使用，有效地预防了资源浪费和拥塞，从而全面提升了整体网络性能。ATSSS 技术紧密结合多接入路径的趋势，为不同网络路径上的数据传输提供了支持，增加了网络的弹性和可靠性。基于 ATSSS 技术的引入和其在提升移动网络性能方面所取得的显著进展，专家们在这一基础上积极展开进一步的研究，以提出更为创新和有效的改进方案。

Wu 等^[24]回顾了围绕多连接和 ATSSS 架构的 5G 背景和当前标准化活动。然后对多路径传输协议进行了深入的探讨，涵盖了 4 个核心功能，即路径管理、调度、拥塞控制和可靠传输。并且进一步讨论了将多路径传输集成到 ATSSS 中以实现 eMBB 和 URLLC 业务要求。

在 5G 系统的多接入框架中 3GPP 和非 3GPP 接入网络同时传输。该框架在 3GPP 中被命名为接入流量引导、拆分和交换（ATSSS），被认为是对于数据速率和服务连续性提出严格要求的关键推动因素之一。Cogalan 等^[25]介绍了一种增强的

ATSSS 算法 (eAT3S), 该算法不仅考虑了瞬时链路性能测量, 还考虑了网络运营商的偏好, 以优化整体网络性能。

作为 ATSSS 功能的关键推动因素, 多路径传输可以通过同时使用多个网络路径并支持无缝故障转移, 以提高通信吞吐量和弹性。因此, 需要流量调度策略来确定可以提高多路径传输性能的最佳网络路径组合。为了满足这一需求, Ba 等^[26]开发了一种基于多业务类型的传输流量调度优化策略 (MSTT), 该策略涉及 3 个步骤。首先, 用户设备 (UE) 选择数据流传输路径的数量, 考虑服务实用程序功能, 然后通过 3GPP 网络传输所有数据流或发送两个流, 一个通过 3GPP 网络, 另一个通过非 3GPP 网络。其次, 利用所提方法基于负载均衡选择各数据流的传输路径。最后制定流量调度优化算法, 使有效网络容量最大化。

多路径传输控制协议 (multipath TCP, MPTCP) 是互联网工程任务组 (Internet Engineering Task Force, IETF) 标准化的 TCP 扩展套件, 旨在支持同时通过多个网络路径传输数据^[27]。传统的 TCP 仅能在单个路径上进行通信, 而 MPTCP 允许在不同的网络路径上同时传输数据, 以提高性能、可靠性和负载均衡。MPTCP 通过传统 TCP 基础上引入 MPTCP 选项, 实现了多路径传输的机制。在建立连接时, 客户端和服务端协商支持 MPTCP, 然后数据流可以被分成多个子流, 每个子流与不同网络路径关联。数据被分割成数据段, 通过各自的路径传输, 并根据路径的性能进行动态调度和负载均衡。分布式拥塞控制算法用于每个子流, 适应多路径网络环境下的拥塞。当某条路径出现故障时, MPTCP 能够在其他路径上继续传输, 实现故障恢复。MPTCP 的协议架构如图 15 所示。

URLLC 应用场景需要可靠的高速数据传输和鲁棒性, MPTCP 是解决这些挑战的一种有效方法^[28]。为进一步应用 MPTCP 技术解决数据包

拥塞、丢包、不易扩展等问题, 专家们在 MPTCP 的基础上积极展开进一步的研究, 以提出更为有效的改进方案。

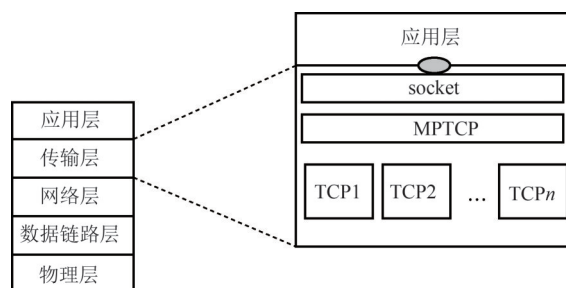


图 15 MPTCP 的协议架构

Cao 等^[29]提出了一种面向 MPTCP 的、以接收方为中心的缓冲区阻塞感知数据调度策略 (MPTCP-rec), 缓解了 MPTCP 的数据包重新排序和接收缓冲区阻塞问题, 平衡 MPTCP 发送方和接收方之间的负载。Liu 等^[30]提出了可以降低 Burstiness 的多路径 TCP (MPTCP-RB), 它将连续数据包交错在多个子流中, 而不是将连续数据包分配给单个子流, MPTCP-RB 大大地缩短了平均流程完成时间。Nguyen 等^[31]探讨了利用路径感知 (PA) 实现 MPTCP 的概念和可行性, 其中利用路径感知信息来加强 MPTCP 传输, 提出具有损失意识的 MPTCP (MPTCP-LA), MPTCP-LA 在设备上观察到的损耗达到阈值时, 将路径上的 MPTCP 传输暂时切换到待机状态来保持聚合优势正值。MPTCP-LA 在提高吞吐量和节省网络资源方面具有更好的性能。Cao 等^[32]提出了一种基于多专家学习的 MPTCP 变体 (MPTCP-meLearning), 以增强 MPTCP 针对网络攻击的性能鲁棒性。MPTCP-meLearning 引入了一种新的预测器, 从多个路径中预测出传输质量更好的路径。MPTCP-meLearning 还具备智能管理多条路径的新机制, 以缓解无序接收和接收缓冲区阻塞问题。MPTCP-meLearning 能够实现更好的传输性能和服务质量。Yang 等^[33]提出了 eMPTCP, 这是一个易于使用的框架, 可以在没有安全风险的



情况下完全扩展MPTCP, eMPTCP能够支持广泛的MPTCP扩展。Wang等^[34]提出了一组MPTCP的扩展(MPTCP-L),以提高其在时延方面的性能。MPTCP-L在两个MPTCP子流上复制时延敏感流的数据包,以主动减少丢失数据包的重传时延。此外,他们还提出了一种快速数据包重传方案,该方案可恢复MPTCP的TCP子流丢失的数据包。Yang等^[35]分析了MPTCP对短流性能下降的主要原因,然后提出了MPTCP-SF,它动态调整每个流的子流数量。他们通过实验证明,MPTCP-SF比MPTCP减少了42.64%以上的短流完成时间,MPTCP-SF在无线网络中传输长流的吞吐量比MPTCP高约11.11%。

MPTCP没有全局网络信息的随机路由和负载均衡解决方案。针对上述问题,Liu等^[36]提出了基于提供全球网络信息的SDN技术的S-MPTCP实现与网络中MPTCP连接的耦合控制。利用收集到的拓扑信息,为每个子流计算预期吞吐量,并据此改进路由和负载均衡模块。在S-MPTCP的控制下,子流的吞吐量将稳定在其预期吞吐量附近,同时可以有效缓解拥塞。实验结果表明,S-MPTCP显著提高了带宽利用率,实现了公平的资源分配,负载均衡所需的时间大大缩短。

上述MPTCP及其改进方案比较,见表2。

快速UDP互联网连接(QUIC)是由美国谷

歌公司提出的一种新型互联网传输协议,它旨在优化网络连接的性能,尤其是降低时延^[37]。QUIC在设计上将HTTP/HTTP2、TLS和UDP结合在一起,以实现更快的数据传输和更低的通信时延^[38]。传统的HTTP/HTTP2通常是基于TCP的,而TCP在建立连接时需要进行握手和慢启动等操作,这可能导致通信时延增加。QUIC通过使用UDP作为底层传输协议^[39],绕过了TCP的一些限制,并且在连接建立时就已经内置了加密和错误校验功能,从而减少了握手阶段的时间。此外,QUIC还实现了0-RTT连接恢复和数据多路复用,进一步提高性能。0-RTT连接恢复^[40]允许在重新连接时跳过部分握手过程,从而降低了重新连接的时延。数据多路复用^[41]允许在单个连接上同时发送多个请求和响应,避免了队头阻塞问题,进一步提升了效率。IETF已经成立了一个专门的工作组,致力于标准化QUIC协议^[42]。这些举措将有助于推动QUIC的广泛采用,并为互联网通信带来更好的性能和安全性。QUIC标准协议栈如图16所示。

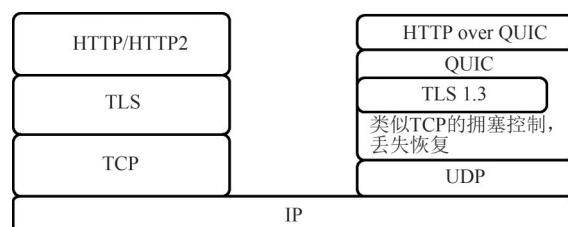


图16 QUIC标准协议栈

表2 MPTCP及其改进方案比较

作者	方法	优点	缺点
IETF标准 ^[27]	MPTCP	均衡负载,多路传输	丢包频繁,时延大
Cao ^[29]	MPTCP-rec	缓解拥塞问题,均衡负载	适用场景少,效率低
Liu ^[30]	MPTCP-RB	减轻ACK阻塞,扩展性强	复杂度及冗余度高
Nguyen ^[31]	MPTCP-LA	提高吞吐量,节省资源	网络时延大,丢包率高
Cao ^[32]	MPTCP-meLearning	可靠性高,缓解阻塞问题	冗余度高,效率低
Yang ^[33]	eMPTCP	扩展性强	丢包频繁,时延大
Wang ^[34]	MPTCP-L	降低时延	扩展性低,丢包率高
Yang ^[35]	MPTCP-SF	缩短短流完成时间,提高长流吞吐量	复杂度高
Liu ^[36]	S-MPTCP	缓解拥塞,提高带宽利用率,缩短资源分配时间	复杂度,不易扩展

多链路连接是QUIC协议的一个重要特性,通过同时处理多个数据流,它能够提升传输带宽、增强数据传输的可靠性,以及适应对可靠性要求很高的URLLC应用场景,这为QUIC在现代网络通信中的广泛应用提供了坚实的基础。QUIC多链路连接如图17所示。

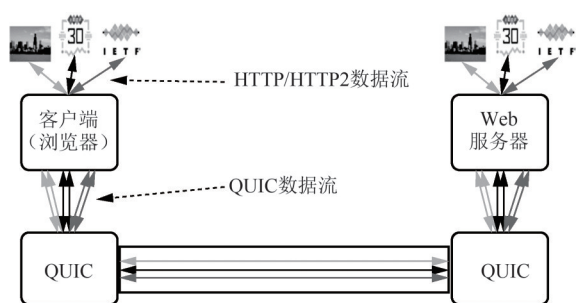


图17 QUIC多链路连接

这些创新特性使得QUIC在实时通信、移动应用以及大规模服务等领域具有巨大的潜力。但是QUIC无法通过同时使用多个数据传输接口来聚合带宽,为了使QUIC能够更好地利用资源与多个接口进行通信,并且减少通信故障,推出了多路径QUIC(MPQUIC),MPQUIC架构如图18所示。

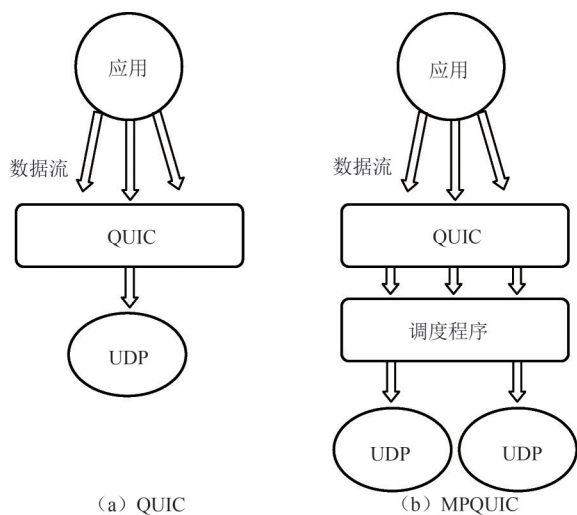


图18 MPQUIC架构

从QUIC发展到MPQUIC是网络通信领域从单一路径到多路径的演进。MPQUIC扩展了

QUIC,利用多路径提升带宽、可靠性和性能,尤其在移动网络环境中。MPQUIC不仅在技术上创新,也适应了不断变化的网络需求。MPQUIC解决了网络抖动、切换等问题,提高传输速度和稳定性。专家们从各个角度出发,持续不断地改进MPQUIC,旨在提升其性能,为通信行业提供更强大的支持和能力。

Viernickel等^[43]提出了支持多路径的QUIC(MPQUIC)来利用当今移动设备上的多个网络接口,例如Wi-Fi和LTE。在MPQUIC中,数据流被分配到不同的网络路径上进行传输。与传统的QUIC、TCP、MPTCP相比,MPQUIC提高了吞吐量。并表明MPQUIC相对于MPTCP的概念优势,有效地减少了异构环境中的线头阻塞。为进一步解决阻塞问题,Shi等^[44]提出了一种基于优先级的MPQUIC在线流调度机制(PStream),该算法根据流特征执行路径调度。还研究了不同路径异构下PStream的有效性,与MPQUIC的原始调度程序进行了比较,减少了25.4%的页面加载时间。为更进一步优化MPQUIC调度程序,缩短数据流平均完成时间,Wang等^[45]提出了一个专用于移动HTTP/HTTP2的上下文感知MPQUIC数据包调度器。为解决线头阻塞和缓冲区拥塞问题,Xing等^[46]提出了一种流感知的数据包调度器,即线头阻塞消除调度器(HBES),以提高MPQUIC在移动网络中的性能。HBES在减少数据流完成时间和缓冲占用方面优于现有的MPQUIC调度器。Wu等^[47]提出了一种基于学习的新型多路径调度器(Peekaboo),该方法能够感知异构路径的动态特征。Peekaboo能够根据网络状况和特性的变化,灵活地调整调度策略,以实现更优化的数据传输和通信效果。Peekaboo在仿真网络中的性能比其他调度程序高31.2%,在真实网络场景中的性能高达36.3%。Jonglez等^[48]提出一种新颖的流感知多路径调度算法(SRPT-ECF)。该算法在简单的网络模型中性能表现较



表3 QUIC 及其改进方案比较

作者团队	方法	优点	缺点
Google ^[37]	QUIC	高性能, 高可靠, 低时延	无法聚合多个网络接口
Viernickel ^[43]	MPQUIC	多路径传输, 减少线头阻塞, 传输性能和效率高	未考虑数据流的特性
Shi ^[44]	PStream	考虑流的特性缩短页面加载时间	复杂度高, 不易扩展
Wang ^[45]	上下文感知 MPQUIC	缩短数据流平均完成时间	复杂度高, 不易扩展
Xing ^[46]	HBES	减少线头阻塞和缓冲区过度使用	可靠性不高
Wu ^[47]	Peekaboo	灵活度高, 性能强	复杂度高, 不易扩展
Jonglez ^[48]	SRPT-ECF	传输性能和效率高	不适用于复杂度高的网络模型
Shi ^[49]	FStream	提供流优先级, 缩短时间关键流完成时间	复杂度高, 不易扩展

优, 并且在 HTTP/HTTP2 跟踪上表现出良好的属性。为提高时间关键型流的性能, Shi 等^[49]考虑传输层中的流优先级, 并提出了一种用于 Multipath-QUIC 的灵活流调度机制 (FStream), FStream 在减少时间关键流完成时间方面效果显著。

上述 QUIC 及其改进方案比较, 见表 3。

4 端到端多路冗余传输

为了支持高可靠的 URLLC 业务, UE 可以在 5G 网络中建立两个冗余的 PDU 会话^[50]。这两个 PDU 会话是通过不同的基站和 UPF 而建立的, 确保了用户面路径不相交, 以增强网络通信的可靠性。基站通过双 DU 等技术, 实现两个 PDU 会话通过不同基站传输, 相同的数据报文从两个 PDU 会话进行传输。应用层 (DN 侧) 进行数据报文的复制和消除重复报文。应用冗余时双 PDU 会话的用户面的资源配置, 即基于双连接的端到端冗余传输如图 19 所示。

服务管理功能 (SMF) 确保这两个会话的用户面路径是不相交的, 以减少单点故障的影响, 从而满足关键应用程序的通信要求, 如自动驾驶车辆和医疗设备远程控制等, 这些应用对通信的可靠性和时延要求极高。

时间敏感网络 (TSN) 在以太网的基础上提供端到端极低时延和高可靠性的数据传输^[51], 适用于时延敏感型应用, 广泛应用于自动驾驶、工业互联网等场景。根据不同的业务场景和应用需

求, 应用层可以利用不同的高层协议, 如 TSN 和 FRER, 实现端到端的数据流量分发, 通过冗余的用户数据路径来提高数据传输的可靠性。在 3GPP 中, TSN+5G 就是一个 UE 和 DN 之间多路径传输保障的经典应用, 具体实现方式如下。

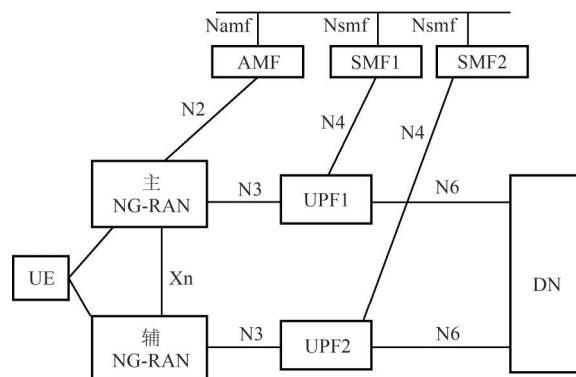


图19 基于双连接的端到端冗余传输

在上行数据传输时, 终端设备 (UE) 上的应用客户端可以复制上行数据报文, 并通过建立的两个冗余 PDU 会话将重复的上行数据报文发送到应用服务器端。应用服务器端接收到复制的冗余上行数据报文后, 会利用特定机制进行冗余数据报文的消除和数据报文的排序, 从而完成上行数据的发送和接收。

相反, 在下行数据传输时, 应用服务器端可以通过数据报文复制, 将下行数据复制到 UE 应用客户端, 然后 UE 应用客户端进行数据报文消除, 以确保数据的可靠传输。

这种冗余传输机制是在应用层实现的, 允许

根据不同的应用需求来选择合适的层协议和冗余传输方式，该方法可以增强数据传输的可靠性。为了确保建立全面冗余的端到端用户面路径^[52]，运营商在实际的网络部署中应该致力于最大限度地保障不同冗余系统之间的相互独立性，包括以下方面：

- (1) RAN 需要具备双连接能力，并在目标区域内提供足够的双连接覆盖以满足业务需求；
- (2) UE 具备双连接功能；
- (3) 核心网络侧的用户面功能（UPF）部署应与 RAN 侧的部署相协调，以支持冗余用户面路径的建立；
- (4) 底层的传输拓扑必须与 RAN 和 UPF 的部署相匹配，以确保数据转发路径是相互独立的；
- (5) 物理网络的结构和地理分布应在运营商视为必要的范围内，以支持冗余用户面路径。

5 多路冗余传输方案的网元要求和适用场景

多路冗余传输方案是一种通过多个传输路径同时传输同一数据以提高可靠性和冗余度的网络通信策略。这种方案通常在网络可用性对关键重

要性要求很高的环境中使用，以确保数据的高可用性和持续性。

多路冗余传输方案的关键要求包括需要至少两个或更多独立的传输路径，并且这些路径必须是相互独立的。此外，系统必须具备自动故障检测切换及动态负载均衡功能，以确保数据在各个路径之间平衡分配，提高性能和可用性。在此方案中数据一致性也至关重要，以防止在不同路径上传输数据时发生数据包的重排或丢失。针对实时应用，需要有效管理多个路径的时延，并确保有足够的带宽供所有路径使用，以确保数据传输不受严重时延的影响。多路冗余传输方案适用于需要高度可靠性和连续性的网络通信环境，特别是在关键基础设施、工业、自动驾驶、军事和数据中心等领域。冗余方案能够提供更高级别的通信故障容忍性，确保即使在主要传输路径出现故障时也能够维持数据的可用性。本文所述多路冗余传输方案网元要求和适用场景，见表 4。

多路冗余传输方案提供了提高网络可靠性的多种途径，但在选择时需要权衡可靠性与资源消耗。端到端多路冗余传输通常提供更高的可靠性，覆盖整个业务路径，但也需要更多的网络资源。相比之下，可以根据特定环节的需求引入段

表 4 多路冗余传输方案网元要求和适用场景

方案	网元要求	适用场景
UE↔5G-AN，空口多路冗余传输	依赖终端芯片支持，如果终端或其他网元有单点故障，即使空口多链路也会失效	适用于终端可靠性高、空口易受干扰、可靠性无法保证的场景，并且需要双频网
5G-AN ↔UPF、UPF ↔ UPF，N3/N9接口的多隧道冗余传输	需要 5G-AN 和 UPF 支持多 GTP-U 隧道能力，在会话建立过程中，SMF 需要额外给 5G-AN 和 UPF 发送多隧道的配置和关联信息	适用于提升 5G-AN 和 UPF 之间数据传输可靠性能传输的场景
UE↔ UPF，UE 和 UPF 之间多径传输	需要 UE、5G-AN 和 UPF 支持多径建立能力，在会话建立过程中，SMF 需要额外给 UE、5G-AN 和 UPF 发送多会话建立配置信息和绑定关系；需要 UE、UPF 支持 ATSSS 能力。网络支持 ATSSS 策略配置	适用于提升 UE 和 UPF 之间数据可靠性能传输的场景
UE↔DN，端到端多路冗余传输	需要将两个 PDU 会话通过两个不同基站实现冗余数据传递。如果业务不要求不同的基站进行传输，则对 5G 网络无要求；终端设备需要支持多卡/多模	适用于提升端到端数据可靠性能传输的场景



式多路冗余传输，更经济高效。根据业务需求和资源限制，可以选择合适的方案，甚至结合两者以达到最佳的可靠性和资源利用平衡。

6 技术挑战

多路冗余传输的历史可以追溯到21世纪初，正式的5G标准化工作始于20世纪10年代，首个5G标准（即3GPP Rel-15）发布于2018年。在5G标准中，多路冗余方案和其他技术被纳入了标准，以支持更高的数据速率、更低的时延和更可靠的通信。尽管目前有越来越多的学者针对多

路冗余传输及其相关问题展开研究并取得一定成果。但总体上，该项研究仍处于探索阶段，成果仍以理论研究为主，相关应用转化成果较少。特别是在考虑5G网络实际应用的标准化和互操作性、资源分配和管理以及时延和可靠性等方面仍面临诸多技术挑战，已有研究成果仍有待改善的空间，多路冗余传输所面临的技术挑战见表5。

7 展望

未来，移动通信领域将迎来多项创新和技术演进，5G多路冗余传输技术将持续改进，提供

表5 多路冗余传输所面临的技术挑战

方案	技术原理	技术挑战
UE↔5G-AN，空口多路冗余传输	PDCP: Rel-15 支持两条支路的 PDCP 复制，为了实现更高的可靠性，Rel-16 支持最多4条支路（即 RLC 实体）的 PDCP 复制 Multi-TRP: 基于空分、频分、时隙内时分和时隙间时分等方式进行传输块的冗余发送，为了提高分集增益，还支持上述模式的组合以及不同模式间的动态切换	多条支路的 PDCP 复制增强可提高可靠性，但引入时延挑战，需要平衡可靠性与时延^[53]；不同终端支持的 PDCP 复制功能差异可能引发兼容性问题^[54] 不同传输模式和冗余发送影响频谱效率，需要最大限度地利用频谱资源^[55]；多 TRP 传输方式增加硬件复杂性，在不同传输模式之间动态切换需要有效的决策算法^[56]，考虑多种因素
5G-AN ↔UPF、UPF ↔ UPF，N3/N9接口的多隧道冗余传输	FRER: 通过复制数据帧并为其分配相同的序列号，从而在数据传输过程中增强可靠性	FRER 功能需要在 NG-RAN 和 PSA UPF 之间保持协议一致性 ^[57] ；数据包的冗余传输和消除可能引入额外的传输时延。在实时通信中，需要平衡可靠性和时延
UE↔UPF，UE 和 UPF 之间多径传输	针对 N3/N9 隧道传输层可靠性的提高，建立多条传输层链路，实现传输层多路径传输 HRP: 增加扩展协议层（HRP 层）在 UE 和 UPF 上进行部署，HRP 支持分组数据包的复制和消除 ATSSS: ATSSS 综合了多路传输技术和分流策略，通过引入 MPTCP 和 MPQUIC 等多路传输协议，以及 ATSSS-LL 分流功能，极大地提升了网络性能和可靠性	在 UE 和 UPF 之间通过不同的物理传输路径进行冗余传输，需要有效管理这些路径以确保路径的稳定性、可靠性和一致性；M-RAN 节点、S-RAN 节点和传输层路径的映射以及适应不同网络场景的配置是一项挑战 引入 HRP 层增加了协议层的复杂性；复制数据包和维护 HRP 层可能会引入额外的计算和存储资源消耗；HRP 层的引入需要确保其协议一致性和与标准的兼容性 多路传输协议需要与现有的网络设备和协议互操作^[58]。确保各个网络组件能够正确理解和支持这些新协议是一个挑战；ATSSS 涉及流量分流策略，需要智能的流量管理和优化机制^[59]；如何在不同情境下合理分配带宽、路径和计算资源
UE↔DN，端到端多路冗余传输	UE 在 5G 网络中建立两个冗余的 PDU 会话	实现两个 PDU 会话通过不同基站传输需要基站之间的协同工作，确保基站能够正确地协同工作并避免干扰是一个挑战 ^[60] ；引入冗余的 PDU 会话可能会增加通信的时延 ^[61] ，需要在提高可靠性和时延之间做出权衡，以满足 URLLC 业务的性能需求

更高可靠性和性能,支持更广泛的应用领域。PDCP复制增强机制和物理层多TRP传输方式将演化为更智能、更复杂的技术,以提高通信可靠性和频谱效率。未来可以预期FRER进一步优化,以确保数据的可靠传输,并提供更好的用户体验。ATSSS技术将在移动网络中发挥关键作用,为自动驾驶、医疗保健和智能城市等领域提供更多优化。为支持高可靠性的URLLC业务,冗余传输技术将继续优化,包括更智能的决策、数据复制和消除算法。这些技术的发展将推动移动通信网络不断前进,以满足不断增长的用户需求和新的应用场景。

8 结束语

结构决定功能,多路冗余传输技术作为5G进一步规模化应用的关键瓶颈,对其研究具有重要的理论及应用价值。围绕5G通信中应用的多路冗余传输技术,本文总结了国内外相关领域专家在多路冗余传输研究方面取得的进展,分析了其面临的技术挑战和发展趋势。尽管多路冗余传输技术在过去几年取得了重大进展,但绝大多数研究成果仍为理论研究,而通信技术的快速发展与推广为多路冗余传输技术提供了丰富的应用平台。可以预见随着多路冗余传输技术的不断成熟,相关研究成果将逐步走向应用,并推动通信技术的发展。

参考文献:

- [1] TEBE P I, WEN G J, LI J, et al. 5G-enabled medical data transmission in mobile hospital systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(15): 13679-13693.
- [2] ANSARI J, ANDERSSON C, DE BRUIN P, et al. Performance of 5G trials for industrial automation[J]. *Electronics*, 2022, 11(3): 412.
- [3] YANG Y, HUA K. Emerging technologies for 5G-enabled vehicular networks[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 181117-181141.
- [4] 伏玉笋, 杨根科. 无线超可靠低时延通信: 关键设计分析与挑战[J]. *通信学报*, 2020, 41(8): 187-203.
- FU Y S, YANG G K. Wireless ultra-reliable and low-latency communication: key design analysis and challenge[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(8): 187-203.
- [5] KORZENIEWSKA E, KRAWCZYK A. 5G technology as the successive stage in the history of wireless telecommunication [C]//*Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 470-473.
- [6] 3GPP. System architecture for the 5G system; stage 2: TS 23.501[S]. 2019.
- [7] SILVEIRA L B D, DE RESENDE H C, BOTH C B, et al. Tutorial on communication between access networks and the 5G core[J]. *Computer Networks*, 2022(216): 109301.
- [8] HURTADO SÁNCHEZ J A, CASILIMAS K, CAICEDO RENDON O M. Deep reinforcement learning for resource management on network slicing: a survey[J]. *Sensors*, 2022, 22(8): 3031.
- [9] 杨峰义, 谢伟良, 张建敏. 5G无线网络及关键技术[J]. *通信学报*, 2017, 38(3): 184.
- YANG F Y, XIE W L, ZHANG J M. 5G wireless network and key technologies[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(3): 184.
- [10] 孙韶辉, 高秋彬, 杜滢, 等. 第5代移动通信系统的设计与标准化进展[J]. *北京邮电大学学报*, 2018, 41(5): 26-43.
- SUN S H, GAO Q B, DU Y, et al. Overview on the progress of design and standardization of the fifth generation of mobile communications system[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2018, 41(5): 26-43.
- [11] 裴旭明, 贾建鑫, 钱骅, 等. 5G双连接场景下的低传输时延切换机制[J]. *通信学报*, 2019, 40(4): 212-222.
- PEI X M, JIA J X, QIAN H, et al. Low latency handover scheme for 5G dual-connectivity scenario[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(4): 212-222.
- [12] 邵延峰. URLLC中PDCP数据复制传输及增强研究[J]. *移动通信*, 2021, 45(3): 44-47.
- SHAO Y F. Research on PDCP data duplication transmission and enhancement in URLLC[J]. *Mobile Communications*, 2021, 45(3): 44-47.
- [13] 黄韬, 李鹏翔. URLLC关键技术和网络适应性分析[J]. *移动通信*, 2020, 44(2): 25-29.
- HUANG T, LI P X. Analysis of URLLC key technologies and network adaptability[J]. *Mobile Communications*, 2020, 44(2): 25-29.
- [14] 黄丘林, 史小卫. MIMO系统中分集增益和空间复用增益的折衷关系[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(3): 681-685.
- HUANG Q L, SHI X W. Tradeoff between diversity gain and multiplexing gain in MIMO systems[J]. *Journal of Electronics*



- & Information Technology, 2007, 29(3): 681-685.
- [15] 王世练, 胡登鹏, 张智力, 等. MIMO 多径衰落信道下的多载波混沌键控混沌通信[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(2): 52-57.
WANG S L, HU D P, ZHANG Z L, et al. Multi-carrier chaotic shift keying chaotic communications under MIMO multipath fading channels[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(2): 52-57.
- [16] 任伟利, 樊昌信. 时分双工方式下的F-PRMA协议及其性能分析[J]. 电子学报, 1998, 26(10): 23-27.
REN W L, FAN C X. Performance analysis of frame-based PRMA protocol[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(10): 23-27.
- [17] PAHLEVAN M, OBERMAISSER R. Redundancy management for safety-critical applications with time sensitive networking[C]//Proceedings of the 2018 28th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [18] YAO Z C, CAI Y P, LI T C. Multiple cascaded preconfigured cycles for the FRER mechanism in time-sensitive networking [C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [19] ERGENÇ D, FISCHER M. On the reliability of IEEE 802.1CB FRER[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-10.
- [20] ALI SYED A, AYAZ S, LEINMÜLLER T, et al. Network coding based fault-tolerant dynamic scheduling and routing for In-vehicle networks[J]. Journal of Network and Systems Management, 2023, 31(1): 27.
- [21] WU K X, ZHANG J W, JI Y F. Redundant routing provision in a FlexE-over-WDM network based on segment frame replication and elimination[C]//Proceedings of the 2021 17th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [22] FENG Z W, GU Z H, YU H C, et al. Online rerouting and re-scheduling of time-triggered flows for fault tolerance in time-sensitive networking[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2022, 41(11): 4253-4264.
- [23] 时书锋, 于游洋. 多接入、无线、有线融合架构演进及流量调度机制[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 146-155.
SHI S F, YU Y Y. Multi-access, wireless and wired convergence architecture evolution and traffic scheduling mechanism[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 146-155.
- [24] WU H J, FERLIN S, CASO G, et al. A survey on multipath transport protocols towards 5G access traffic steering, switching and splitting[J]. IEEE Access, 2021(9): 164417-164439.
- [25] COGALAN T, KHEIRKHAH M, PATANI K, et al. Enhanced access traffic steering splitting switching with utility-based decisioning[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Piscataway: IEEE Press, 2022: 138-143.
- [26] BA X R, JIN L B, LI Z R, et al. Multiservice-based traffic scheduling for 5G access traffic steering, switching and splitting [J]. Sensors, 2022, 22(9): 3285.
- [27] CHOI H, HAN D, NA W. Research challenge on MPTCP in 5G/6G networks[C]//Proceedings of the 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 856-858.
- [28] CHAO L M, WU C, YOSHINAGA T, et al. A brief review of multipath TCP for vehicular networks[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2793.
- [29] CAO Y, LIU Q, ZUO Y, et al. Receiver-centric buffer blocking-aware multipath data distribution in MPTCP-based heterogeneous wireless networks[J]. KSII Transactions on Internet & Information Systems, 2016, 10(10): 4642-4660.
- [30] LIU S, HUANG J W, JIANG W C, et al. Reducing traffic burstiness for MPTCP in data center networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2021(192): 103169.
- [31] NGUYEN K, GOLAM KIBRIA M, ISHIZU K, et al. An approach to reinforce multipath TCP with path-aware information [J]. Sensors, 2019, 19(3): 476.
- [32] CAO Y L, JI R W, JI L J, et al. MPTCP-meLearning: a multi-expert learning-based MPTCP extension to enhance multipathing robustness against network attacks[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2021, 104(11): 1795-1804.
- [33] YANG B, SHEN D, ZHANG J X, et al. Towards the full extensibility of multipath TCP with eMPTCP[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 30th International Conference on Network Protocols (ICNP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-11.
- [34] WANG W, ZHOU L, SUN Y. Improving multipath TCP for latency sensitive flows in the cloud[C]//Proceedings of the 2016 5th IEEE International Conference on Cloud Networking (Cloudnet). Piscataway: IEEE Press, 2016: 45-50.
- [35] YANG W J, DONG P P, TANG W S, et al. A MPTCP scheduler for web transfer[J]. Computers, Materials & Continua, 2018, 57(2): 205-222.
- [36] LIU Y B, QIN X W, ZHU T, et al. Improve MPTCP with SDN: from the perspective of resource pooling[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2019, 141(C): 73-85.
- [37] TONG V, TRAN H A, SOUHI S, et al. Empirical study for Dynamic Adaptive Video Streaming Service based on Google Transport QUIC protocol[C]//Proceedings of the 2018 IEEE

- 43rd Conference on Local Computer Networks (LCN). Piscataway: IEEE Press, 2018: 343-350.
- [38] MARX R, LAMOTTE W, REYNDERS J, et al. Towards QUIC debuggability[C]//Proceedings of the Workshop on the Evolution, Performance, and Interoperability of QUIC. New York: ACM Press, 2018: 1-7.
- [39] YU A, BENSON T A. Dissecting performance of production QUIC[C]//Proceedings of the Proceedings of the Web Conference 2021. New York: ACM Press, 2021: 1157-1168.
- [40] CAO X D, ZHAO S R, ZHANG Y Q. 0-RTT attack and defense of QUIC protocol[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [41] VOLODINA E, RATHGEB E P. Flow control in the context of the multiplexed transport protocol QUIC[C]//Proceedings of the 2020 IEEE 45th Conference on Local Computer Networks (LCN). Piscataway: IEEE Press, 2020: 473-478.
- [42] CUI Y, LI T X, LIU C, et al. Innovating transport with QUIC: design approaches and research challenges[J]. IEEE Internet Computing, 2017, 21(2): 72-76.
- [43] VIERNICKEL T, FROEMMGEN A, RIZK A, et al. Multipath QUIC: a deployable multipath transport protocol[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [44] SHI X, WANG L, ZHANG F, et al. PStream: priority-based stream scheduling for heterogeneous paths in multipath-QUIC [C]//Proceedings of the 2020 29th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-8.
- [45] WANG J, GAO Y F, XU C R. A multipath QUIC scheduler for mobile HTTP/2[C]//Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Workshop on Networking. New York: ACM Press, 2019: 43-49.
- [46] XING Y, XUE K, ZHANG Y, et al. A stream-aware MPQUIC scheduler for HTTP traffic in mobile networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 22(4): 2775-2788.
- [47] WU H J, ALAY Ö, BRUNSTROM A, et al. Peekaboo: learning-based multipath scheduling for dynamic heterogeneous environments[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(10): 2295-2310.
- [48] JONGLEZ B, HEUSSE M, GAUJAL B. SRPT-ECF: challenging Round-Robin for stream-aware multipath scheduling[C]//Proceedings of the 2020 IFIP Networking Conference (Networking). Piscataway: IEEE Press, 2020: 719-724.
- [49] SHI X, WANG L, ZHANG F, et al. FStream: flexible stream scheduling and prioritizing in multipath-QUIC[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 25th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 921-924.
- [50] 梁辉, 韩潇, 李福昌. 5G URLLC 端到端关键技术分析[J]. 移动通信, 2020, 44(8): 12-16.
- LIANG H, HAN X, LI F C. Analysis on 5G URLLC end-to-end key technology[J]. Mobile Communications, 2020, 44(8): 12-16.
- [51] 许方敏, 伍丽娇, 杨帆, 等. 时间敏感网络(TSN)及无线 TSN 技术[J]. 电信科学, 2020, 36(8): 81-91.
- XU F M, WU L J, YANG F, et al. Time-sensitive networking (TSN) and wireless TSN technology[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(8): 81-91.
- [52] 任驰, 马瑞涛. 5G 核心网 uRLLC 系统架构及关键技术研究[J]. 邮电设计技术, 2020(9): 44-48.
- REN C, MA R T. Research on system architecture and key technology of uRLLC in 5G core network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(9): 44-48.
- [53] AHMED A M, PATEL A, ALI KHAN M Z. Reliability enhancement by PDCP duplication and combining for next generation networks[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [54] AIJAZ A. Packet duplication in dual connectivity enabled 5G wireless networks: overview and challenges[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2019, 3(3): 20-28.
- [55] KHOSHNEVISAN M, JAYASINGHE K, CHEN R H, et al. Enhanced reliability and capacity with multi-TRP transmission[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2022, 6(1): 13-19.
- [56] VARATHARAJAN S, GROSSMANN M, DEL GALDO G. 5G new radio physical downlink control channel reliability enhancements for multiple transmission-reception-point communications[J]. IEEE Access, 2022(10): 97394-97407.
- [57] ALI SYED A, AYAZ S, LEINMÜLLER T, et al. Fault-tolerant dynamic scheduling and routing for TSN based In-vehicle networks[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 72-75.
- [58] KANG Y, KIM C. A multi-access session management for ATSSS support in 5G network[C]//Proceedings of the 2019 25th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 409-412.
- [59] BA X R, JIN L B, LI Z, et al. Performance evaluation of multi-access based on ATSSS rules[C]//Proceedings of the 2022 International Conference on Culture-Oriented Science and Technology (CoST). Piscataway: IEEE Press, 2022: 390-394.
- [60] GINTHÖR D, GUILLAUME R, VON HOYNINGEN-HUENE J, et al. End-to-end optimized joint scheduling of converged wireless and wired time-sensitive networks[C]//Proceedings of the 2020 25th IEEE International Conference on Emerging



Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 222-229.

- [61] ROST P M, KOLDING T. Performance of integrated 3GPP 5G and IEEE TSN networks[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2022, 6(2): 51-56.

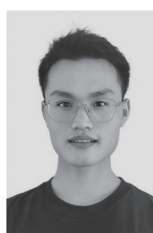
[作者简介]



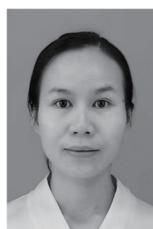
马帅 (1981-), 男, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师、物联网技术与应用研究所副所长, 主要研究方向为5G/6G、无源物联网、工业互联网、车联网、先进感知等。



杨博涵 (1990-), 男, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, CCSA工业互联网委员会5G+工业互联网子组副组长, 主要研究方向为行业通信及工业互联网。



羊峰波 (1998-), 男, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为5G、无源物联网。



韦安妮 (1984-), 女, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 主要研究方向为物联网技术和5G垂直行业解决方案。



郑成龙 (1996-), 男, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为5G、确定性网络、工业网络和5G+行业融合应用解决方案。