



基于以太网内生 TDM 的切片分组网 (SPN) 关键技术和规模应用

李晗, 韩柳燕, 张德朝, 王敏学

(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 城域网作为移动回传网络、专线、人工智能 (artificial intelligence, AI) 智算中心、泛在算力连接等重要业务的基础设施, 是全球传输技术领域的研究热点与产业竞争焦点。随着新业务从信息消费向产业应用拓展, 在网络切片有望成为信息通信服务提供的新模式背景下, 全面阐述了多维融合转发的核心理念、“以太网内生时分复用 (time division multiplexing, TDM)” 的核心转发机制、切片分组网 (slicing packet network, SPN) 的系统架构和技术体系。当前, SPN 已实现规模应用部署, 并形成系列国际标准, 成为 ITU-T 继同步数字体系 (synchronous digital hierarchy, SDH)、光传送网 (optical transport network, OTN) 之后的新一代传输网技术体系。

关键词: 时分复用; 以太网; 切片分组网; 城域传送网; 细粒度 MTN

中图分类号: TN929.5; TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2026010

Key technologies and large-scale applications of slicing packet network (SPN) based on Ethernet-native TDM

Li Han, Han Liuyan, Zhang Dechao, Wang Minxue

Research Institute of China Mobile Communications Co., Ltd., Beijing 100053, China

Abstract: The metro network serves as critical infrastructure for mobile backhaul networks, dedicated lines, artificial intelligence (AI) computing centers, and ubiquitous computing power connectivity, making it a global research focus and competitive frontier in transport technologies. As emerging applications evolve from information consumption to industrial applications, network slicing is anticipated to emerge as a novel paradigm for information communication service delivery. The core concept of multi-dimensional converged forwarding, the core forwarding mechanism of “Ethernet-native time division multiplexing (TDM)”, as well as the system architecture and technical framework of the slicing packet network (SPN) were comprehensively elaborated. At present, SPN has achieved large-scale commercial deployment and established a series of international standards, becoming the next-generation transport network technology system of International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-

T) following synchronous digital hierarchy (SDH) and optical transport network (OTN).

Key words: TDM, Ethernet, SPN, metro transport network, fine granularity MTN

0 引言

传输网是关键信息基础设施的核心组成部分, 90%以上的全球信息流量都是通过传输网接入汇聚、交换、承载和传输的^[1], 其不仅是互联网、通信网络的传送载体, 也是5G/6G、算力网络、政企专线专网等新一代信息通信设施的承载底座, 在支撑经济社会发展和安全保障方面具备战略性、基础性和先导性。

城域网既是回传网络的基础构成, 又是专线和泛在算力连接的主要接入点和汇聚枢纽, 是传输网的“交通枢纽”^[2]。随着基站规模从2G时期的全国百万站扩大到5G时期的千万站, 城域回传网络节点规模增大至万级, 覆盖范围达数百千米。在数字化转型背景下, 政企专线需求呈现数量级增长, 由早期数万线激增至数百万线, 这对传输质量、覆盖深度、传输容量等关键指标提出了更严苛的要求。同时, 内容源的深度下沉促使城域数据中心、智算中心进行分布式部署, 这些中心的基础设施规模要求也同步提升^[3]。城域网络规模显著扩大、核心地位显著提升, 成为全球传输技术和产业的竞争焦点。

传输网技术体系变革由代际业务演进原生驱动, 城域网始终面临业务承载普遍服务公平性原则和差异化服务质量保障之间的内在矛盾, 该矛盾在技术体系变革中尤为突出。技术体系变革是网络架构的范式迁移, 其本质特征是转发机制、信号封装、传输协议、网络管控四大核心领域的颠覆性重构, 从而驱动传输网络实现跨越式代际跃迁。

通信网络业务形态经历了两次重大范式变革。首次变革是在2000年前后, 从语音化范式主导到互联网协议(Internet protocol, IP)化范式y主导的转变, 驱动城域网技术体系由以电路交换

为核心的语音通信向以分组交换为核心的数据通信的重构。早期固话语音业务需求较为单一, 聚焦于高可靠和低时延的质量保障和资源专用。国际电信联盟电信标准化部门(International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)制定了准同步数字体系(plesiochronous digital hierarchy, PDH)和同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)国际标准, 该标准的核心理念是基于时分复用(time division multiplexing, TDM)电路交换提供面向连接的电信级可靠服务、丰富的操作维护管理和50 ms保护倒换能力, 构建了语音传输的TDM“轨道交通”平台, 但其刚性管道模式尚未兼顾普遍服务的公平性, 难以匹配数据业务的突发特性。随着信息化的发展, 数据和视频业务呈现宽带化、IP化及流量突发等特点, 同时业务规模开始呈现指数级增长, 这对城域网提出了既要实现大带宽、灵活高效的普遍服务, 又要满足电信级规模组网的要求。基于分组交换的数据传输网络逐渐成为主流, 典型代表技术是电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)制定的以太网和互联网工程任务组(Internet Engineering Task Force, IETF)制定的IP/多协议标签交换(multi-protocol label switching, MPLS), 其核心理念是基于分组交换提供面向非连接的尽力而为服务、高效的统计复用和灵活的选路能力。其中, IP作为L3核心交换机制, 为互联网业务提供了公平的业务流调度, 而MPLS等L2隧道化封装机制则提供了端到端的路径保障和业务质量保障, 实现了业务公平性普遍服务和差异化保障之间的技术平衡, 从而构建了数据传输的“公路交通”系统。

第二次变革是随着多种新业务从信息消费向



产业应用的拓展,业务向切片范式演进。5G网络支持增强型移动宽带(enhanced mobile broadband, eMBB)、超可靠低时延通信(ultra-reliable low-latency communication, uRLLC)和大规模机器类通信(massive machine-type communication, mMTC)三大核心场景,对网络性能提出了差异化需求,要求回传网络同时具备大带宽、低时延、高可靠的软硬隔离切片承载能力。此外,人工智能(artificial intelligence, AI)智算、工业生产控制、增强现实(augmented reality, AR)/虚拟现实(virtual reality, VR)、机器视觉、视频监测和综合信息化业务等新兴应用,进一步强化了业务需求差异化的趋势。AI智算要求满足超大带宽、无损零丢包等新需求,AR/VR、机器视觉和视频监测要求传输具备大带宽和安全隔离,而高价值专线尤其是行业生产控制类业务,则提出10 Mbit/s级小颗粒硬管道隔离和确定性低时延承载需求。新型业务指标和带宽等需求的异质化愈发明显,通过网络切片来满足业务差异化承载需求,并提供高品质保障的综合承载,有望成为信息通信服务提供的新模式。

城域网的需求从单一的高效大带宽扩展到包括可靠高品质在内的多维性能指标,这一趋势打破了原有普遍服务和差异化保障之间的动态平衡,成为传输网技术演进和全球光通信产业格局重塑的重要契机。如何实现传输切片以提供业务品质保障,打造新型“立体交通”的综合承载服务基础设施,成为新一代传输网的核心需求^[4-5]。

传统传输网技术包含基于TDM的SDH和光传送网(optical transport network, OTN)技术,以及基于分组交换的以太网和MPLS技术。面向传输切片,依靠现有技术主要有两种演进路线,一种是TDM和分组多内核叠加方案,存在复杂度高、成本高和功耗高的弊端;另一种是分组内核接口增强方案,虽然扩展了接口功能,但内核架构未变,本质仍然是尽力而为转发模式,无法

保障极致的时延、抖动性能,也无法实现硬隔离安全性。因此,面向新一代“立体交通”提供品质保障的综合承载服务,当前TDM刚性管道和分组统计复用柔性管道的两大技术制式均不能满足城域网的发展需求,城域网针对新时期业务普遍性服务和差异化保障之间的平衡尚未形成新的技术机制,究其根源是单一转发内核无法满足多维性能指标,迫切需要构建面向切片的新一代信息通信传输系统。

构建全新的传输网技术体系,本质是设计新型的数据转发机制、层次化信号封装、传输协议以及网络管控四大核心技术。本文针对多维性能指标无法用单一转发模式来保障的业界难题,提出了切片分组网(slicing packet network, SPN)系统架构,构建了“以太网内生TDM”新一代传输网技术体系,并在四大核心技术方面均提出了系统性原创机制:在转发机制方面,提出了基于66 B码块的统一交换单元,实现了全新的以太网内生TDM多维融合转发和交换,首次在以太网协议栈中实现了TDM层网络;在信号封装方面,构建了“零带宽”TDM开销空间,提出开销与净负荷分离的新型TDM容器,并设计了全新城域传送网(metro transport network, MTN)帧结构,突破了传统TDM帧结构采用的开销固定和多层叠加的强结构设计理念;在传输协议方面,发明了通过空闲(IDLE)码块替换实现操作维护管理(operation administration and maintenance, OAM)的开销附加核心机制,设计了基于码块的OAM编码机制和复帧编排方案,全面实现了兼容以太网生态的TDM层网络传输;在管控方面,提出业务驱动的多模态转发控制和AI节能机制,解决了超大规模组网下跨层融合的多模态切片和能效控制问题。SPN/MTN成为ITU-T继SDH、OTN之后的新一代传输网技术国际标准体系,基于此,在全球范围内建成了规模大、技术先进的5G传输网,并实现了广泛应用。传输网

技术体系演进如图 1 所示。

1 基于以太网内生 TDM 的 SPN 技术体系

1.1 以太网内生 TDM 多维转发机制

以“以太网内生 TDM”为核心的 SPN 系统架构如图 2 所示。该系统采用 TDM 和分组交换统一技术内核，通过设计全新的多维转发、交换和可靠性机制，解决了多维性能指标无法用单一转发模式来保障的业界难题，实现了面向 5G 切片、泛在算力等新型综合业务的高品质保障综合承载服务，SPN/MTN 成为 ITU-T 继 SDH、OTN 之后的新一代传输网技术体系，“以太网内生 TDM”成为该体系的唯一架构^[6]。

多维转发内核设计的首要问题在于，如何在破坏以太网及 IP 协议栈机制的前提下构建

TDM 层网络。基于 ITU-T G.800 TDM 层网络统一功能架构，本文通过理论论证提出以太网协议栈功能架构切分模型和内生 TDM 层网络的最优协议栈切分点。基于以太网内生 TDM 的 SPN/MTN 层网络如图 3 所示，在以太网协议栈物理编码子层（physical coding sublayer, PCS）引入 TDM 层网络。该协议栈架构通过分层部署 MTN 通道层和 MTN 段层，系统性构建了 TDM 层网络全处理流程，包括业务映射、复用、开销处理、交叉连接、保护倒换等功能，实现了以太网和 TDM 的内生融合。该协议栈架构首次在以太网协议栈中实现了 TDM 层网络，既适配了以太网的处理机制，又保障了 TDM 的传输性能，为充分利用以太网生态奠定了基础，也成为 SPN 国际标准化的核心。

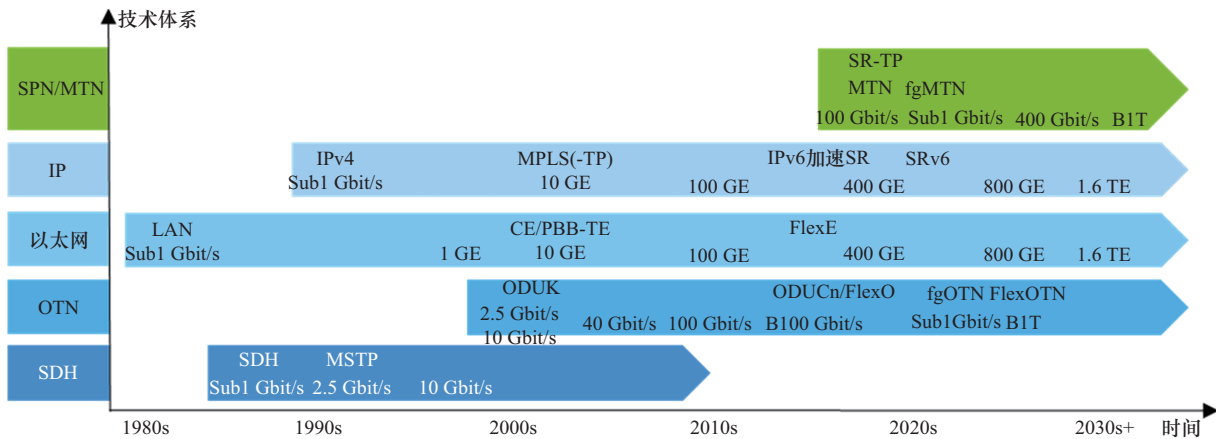


图 1 传输网技术体系演进

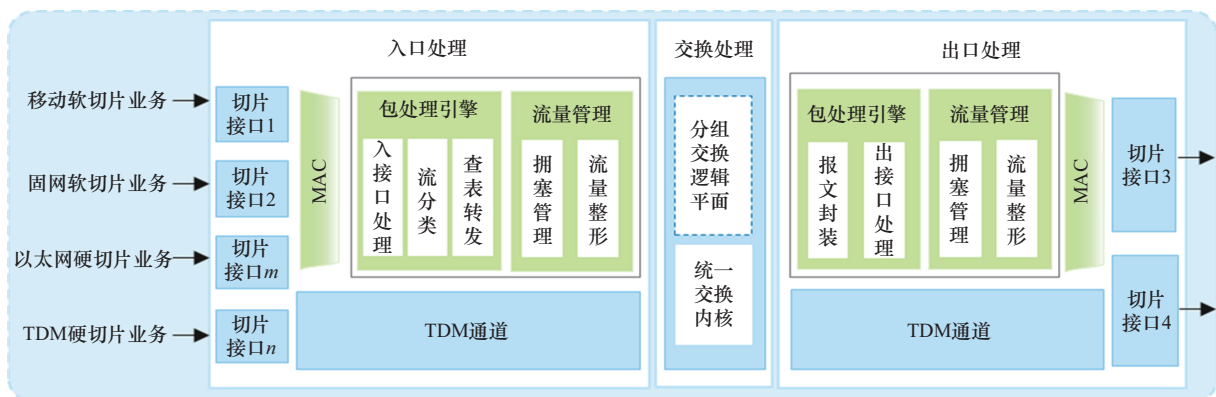


图 2 以“以太网内生 TDM”为核心的 SPN 系统架构

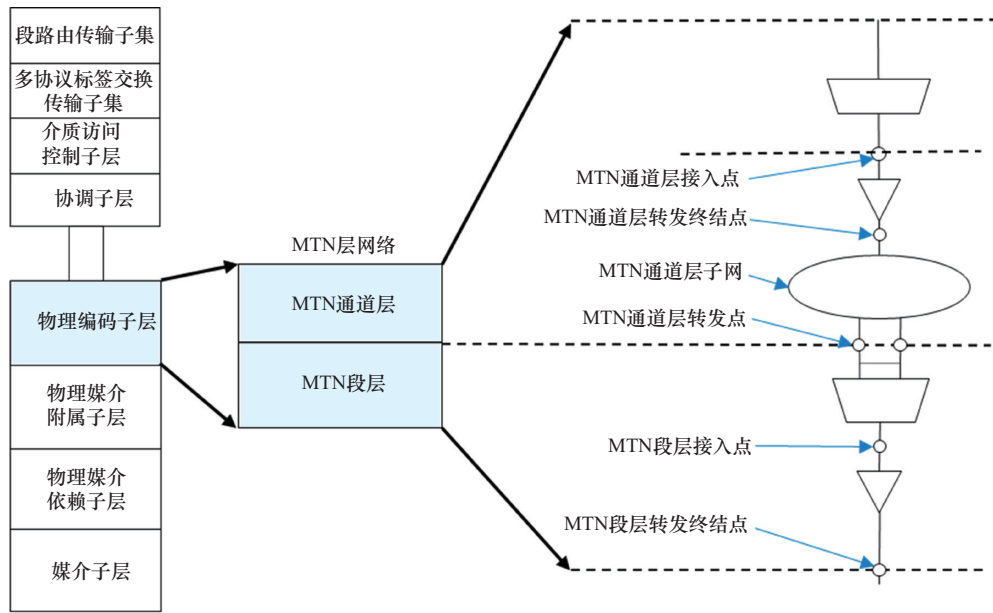


图3 基于以太网内生TDM的SPN/MTN层网络

在多维交换设计方面，首先要解决以太网变长帧和TDM定长帧如何在以太网中统一融合交换的问题。由于以太网变长帧在PCS被“分解”为变长66 B码块序列，同时内生的TDM帧设计为定长66 B码块序列，因此融合交换的“公约因子”为66 B，并在此基础上提出64 B/66 B原子码块的全新交换单元。该原子码块既是以太网帧PCS编码组成单元，又是MTN时隙交换单元，使得SPN能够同时支持5 Gbit/s MTN大颗粒度时隙和 $N \times 10$ Mbit/s细粒度MTN（fine granularity

MTN，fgMTN）时隙。此外，该交换单元向下兼容以太网物理层和光媒介层，向上兼容介质访问控制（medium access control，MAC）层及IP层的分组协议体系，最大化利用以太网产业生态，解决了以往技术革新不兼容导致需要重构生态链带来的成本高、周期长等问题^[7-8]。基于该新型交换单元，实现了融合协议栈下的“立体”交换，基于以太网内生TDM的SPN多维交换如图4所示，通过控制面进行识别和调度，不同业务进入不同的切片，分组交换业务维持原有处理机

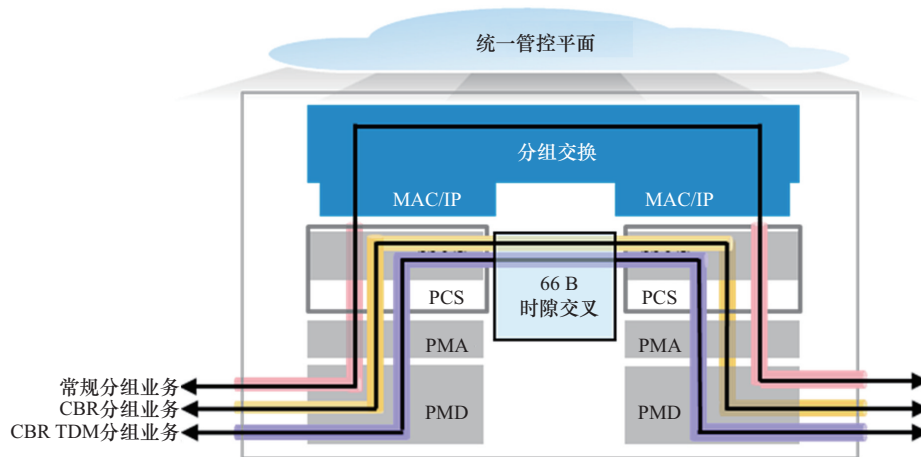


图4 基于以太网内生TDM的SPN多维交换

制, 恒定比特率 (constant bit rate, CBR) 分组业务和 TDM 业务采用基于 64 B/66 B 的时隙交叉, 在传输领域实现了基于软硬切片差异化业务的统一承载。

在多维转发可靠性方面, 本文提出两项创新方案, 旨在解决新型融合网络架构的物理层可靠性设计问题。首先在编码级可靠性层面, 在 MTN 引入并行多通道 TDM 交换的情况下, 传统以太网物理层的功能被改变了。传统以太网物理层只作接口信号适配处理, 会产生误码扩散, 从而违背了以太网的基础可靠性设计原则。若沿用现有以太网物理层编码, 在出现不可纠的前向纠错 (forward error correction, FEC) 误码时, 会导致以太网底层重要的可靠性指标平均错包接收时间 (mean time to false packet acceptance, MTTFPA) 大幅降低, 同时会导致误码随 MTN 的 TDM 时隙交换扩散并污染下游其他正常时隙。针对这两个问题, 本文提出新型时隙化接口/E/码块标识和误码扩散抑制机制, 并基于以太网物理层多通道交换 MTTFPA 理论评估模型, 将 MTN 物理层的 MTTFPA 提升 3 个数量级, 彻底解决了时隙化以太网系统物理层的可靠性问题。

在帧结构可靠性层面, TDM 层网络中 IDLE 码块的增删会导致比特交织奇偶校验码 (bit interleaved parity, BIP) 的计算域大小发生变化, 而传统的 BIP 算法在处理 IDLE 码块时, 由于自身编码的结果非 0, 接收端 BIP 校验码错误, 从而无法正常使用, 因此, 本文提出一种全新的信号转置奇偶校验算法, 利用 IDLE 码块转置后 BIP 结果为 0x00 的特点, 解决了中间节点在增删 IDLE 码块时所带来的误码检测失效问题。目前, 该算法已成为国际通用的物理层误码检测机制。

1.2 MTN “零带宽” 开销空间和帧结构

以太网内生 TDM 层网络采用全新理念设计的 TDM 封装机制, 系统性地从 MTN 帧信号结构

的设计与定位、速率适配机制、复用及映射策略、开销结构的优化与处理方式等关键环节, 对 TDM 进行了基于以太网的内生重构设计, 很好地解决了 TDM 和以太网帧结构和处理机制差异大、融合难的问题, 实现了完全兼容以太网生态的软硬切片融合承载。

为了实现以太网内生 TDM, 首先需要在不破坏以太网信号结构和速率的前提下插入 TDM 开销空间。然而, 以太网物理层采用点对点紧凑设计, 其先天特性决定了它不具备层网络扩展所需的额外带宽空间。针对在不改变以太网信号速率情况下如何引入 TDM 开销的问题, 本文提出基于以太网客户信号和报文间隙 (inter-packet gap, IPG) 机制的以太网内生 TDM 层网络开销评估模型, 如下所示:

$$\text{Bandwidth}_{\text{worstcase}} = \text{Idle}_{\text{length}} / \left(2 \times \text{Jumboframe}_{\text{length}} \right) - \text{C_Freq_offset} - 1/\text{AM_period} - 1/\text{MTN_OH_period} \quad (1)$$

其中, $\text{Idle}_{\text{length}}$ 表示空闲码块长度, 本文简化为 8 byte, $\text{Jumboframe}_{\text{length}}$ 表示巨型帧长度, 本文取电信网络中典型巨型帧长, 为 9 626 byte, C_Freq_offset 表示以太网节点间最大频率偏差, 为 200×10^{-6} , AM_period 表示 IEEE 802.3^[9] 规定的 100 GBASE-R PHY 的对齐字符 (alignment marker, AM) 插入周期, 为 16 384 个码块, MTN_OH_period 表示 MTN 段层开销插入周期, 为 20 461 个码块。

以太网内生 TDM 层信号结构如图 5 所示。本文采用极限评估方法, 推导出以太网开销裕量理论极限为 106×10^{-6} , MTN 通道层开销所需为 61×10^{-6} , 具备零开销附加的可行性理论基础, 并提出 IDLE 码块替换机制, 首次实现“零带宽”构建 TDM 开销空间, 如图 5 (a) 所示, 成为 SPN 核心的机制。

针对在不打破以太网处理机制的情况下如何

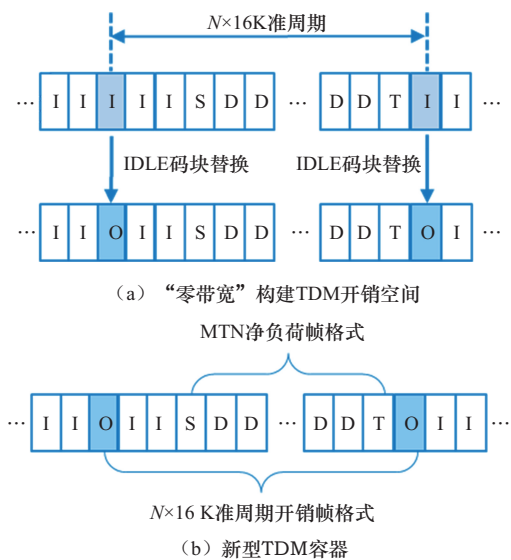


图5 以太网内生 TDM 层信号结构

实现 TDM 转发和开销处理的问题，本文提出开销与净负荷分离的新型 TDM 容器，如图 5 (b) 所示，净负荷帧沿用原有的周期性固定设计，开销帧采用基于 66B 码块的 $N \times 16K$ 准周期离散化随路设计，适配 IDLE 码块的随机特性和产生概率，打破了传统 TDM 净荷和开销固定的帧结构理念束缚，实现了上下兼容透明的层网络架构，同时打破了传统 TDM 固定开销占比设计原则，实现了动态开销占比适配不同 MTN 客户速率，如对于 5 Gbit/s/10 Gbit/s MTN 通道，可采用 16K/64K/512K 码块周期，对于 10~100 Gbit/s MTN 通道可采用 64K 码块周期，对于 100 Gbit/s 以上则可采用 512K 码块周期，实现了不同 MTN 接口速率下开销处理性能的动态平衡。综上，MTN 突破了传统 TDM 帧结构采用的开销固定和多层叠加的强结构设计，成为所有 TDM 技术中以太网业务承载效率最高的帧结构。

在此基础上，本文提出将 MTN 时隙中多个 66B 码块构成的基本码块序列流作为简化调度对象，通过码块时隙间插交织的映射结构和单级复用机制，进行精准 TDM 轮询调度，实现了不同时隙之间完全独立且互不干扰，解决了以太网高速接口采用传统 TDM 层次化容器和字节交织进

行交换时实现复杂度高的问题，显著降低了实现的复杂性，并降低了 TDM 转发时延和抖动。

1.3 MTN 层网络 OAM 和保护协议

以太网内生 TDM 层网络协议主要包括 OAM 和保护倒换两个方面。以太网内生 TDM 层网络 OAM 协议如图 6 所示。

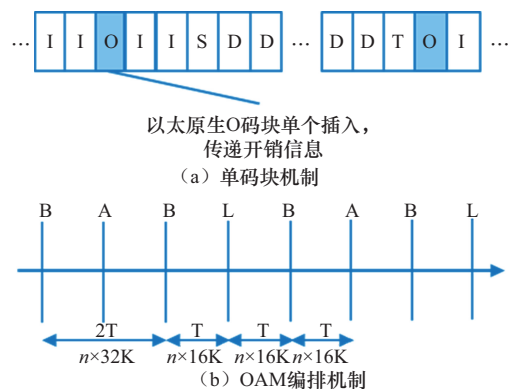


图6 以太网内生 TDM 层网络 OAM 协议

在 OAM 协议方面，通过 OAM 插入和提取、OAM 消息处理、OAM 全量功能等一系列机制，本文构建了完整的 MTN TDM 层 OAM。首先，在 OAM 插入和提取方面，一是采用插入机会最大、处理最简的 66B 单码块消息机制，提出 O 码块等效替换 IDLE 码块方法，在保留以太网速率适配功能的基础上，既实现了 OAM 开销插入和提取，又不引入额外的带宽和抖动，实现了 IDLE 码块“一码两用”，单码块机制如图 6 (a) 所示；二是提出了 4B+0xC 作为 O 码块定位标识的定帧机制，既完全兼容以太网基础转发机制，又不需要额外定义开销帧头，避免了二次封装；三是提出了 $N \times 16K$ 插入周期机制，经过理论论证和仿真检验，能同时满足定长帧和变长帧的处理要求。其次，在 OAM 消息处理和全量功能方面，为了解决单码块实现全量 TDM OAM 功能的问题，提出了 OAM 复帧排布及高效消息编码机制，定义了基础-APS-低优先级 (basic-APS-low priority, BAL) 3 种不同的 OAM 码块类型，满足不同类型 OAM 消息的处理要求。OAM 编排机制如图 6 (b)

所示, 该机制满足严格周期型、及时响应型和按需消息型 3 种差异化的 OAM 消息处理需求, 兼具周期性、功能性和扩展性的平衡, 实现了各种类型 OAM 消息处理的效率与性能最优。

在保护协议方面, 本文基于保护倒换时间依赖故障检测时间和自动保护倒换 (auto protection switching, APS) 通告时间的性能模型, 设计了严格且快速的周期性故障检测消息机制, 利用快速固定周期的 Basic 码块 3.5 帧检测方式, 加速了故障检测处理过程, 实现了高可靠性、高实时性的连通性检测。对于典型的 100 Gbit/s 通道, 连接中断的检测时间仅为 35 μ s, 相较于分组网络中 3.3 ms 快发机制下的 10 ms 检测时间, 降低了 3 个数量级。此外, 通过及时响应的 APS 消息处理机制和高可靠循环冗余校验 (cyclic redundancy check, CRC), 本文实现了 APS 通告的一帧即达, 从而将 APS 通告时间缩短为传统的 1/3。对于 100 Gbit/s 典型通道, 通告时间小于 40 μ s, 保护倒换耗时小于 1 ms, 相较于传输设备的 50 ms 电信级倒换时间, 性能提升了 2 个数量级, 达到了亚毫秒级水平。

综上, 基于以太网内生 TDM 层网络的多维转发、封装和核心协议, SPN 实现了码块级别的极低 TDM 交叉时延, 达到微秒级节点时延、百纳秒级时延抖动、纳秒级时间同步、毫秒级保护倒换时间、100% 带宽利用率, 从而提供了极致业务性能。SPN 设备性能及对比见表 1, 在单节点转发时延、时间同步精度、保护倒换时间、带宽利用率等方面, SPN 均优于 OTN 和分组传送网 (packet transport network, PTN) 技术。

1.4 跨层融合智能化管控技术

“以太网内生 TDM”为核心的 SPN 在转发面实现了 TDM 和分组交换的融合, 具备基于 MTN/fgMTN 的 TDM 硬切片与基于段路由传输子集 (segment routing-transport profile, SR-TP) 的软切片等多模态承载能力, 同时也创新性地提出了路径标签机制, 支持电信网络的双向隧道、业务端到端 OAM 和保护能力, 为基于路径的业务流级别精细化流量统计与性能监测奠定了技术基础, 实现了网络性能的突破性提升^[10]。随着 5G-Advanced/6G 通感算智融合等新业务承载需求的多样化演进, 业务流量流向和连接需求呈现较大的差异, 需要 SPN 提供业务连接的灵活建立与多模态切片的动态控制能力, 因此, 本文提出 SPN 业务驱动的多模态转发控制机制, 以实现多模态切片的快速建立与灵活转发控制。

传统 TDM 连接控制机制面向连接预配置, 无法满足连接即时建立的需求, 导致分组控制机制的连接规模受限。面向多模态切片融合控制问题, 本文提出基于业务驱动的 SPN 多模态智能化管控技术方案, 如图 7 所示。该方案以业务入口为锚点, 基于对业务流的精细化感知与智能分类识别, 驱动控制面集中控制器基于全局视图计算路径, 下发路径信息至首节点, 由首节点通过分布式信令完成 TDM 时隙/带宽的随路分配, 从而实现 TDM 与分组业务的统一控制。在协议扩展方面, 对链路层发现协议 (link layer discovery protocol, LLDP) 及路径计算单元协议链路状态 (path computation element protocol-link state,

表 1 SPN 设备性能及对比

性能指标	SPN	PTN	OTN
单节点转发时延 (100 Gbit/s 接口) / μ s	2.02	24.78	14.00
硬隔离时延抖动 (100 Gbit/s 接口) / μ s	≤ 0.05	~ 20.0	≤ 0.05
时间同步精度/ns	1.80	12.20	13.00
保护倒换时间/ms	0.66	10.10	3.60
带宽利用率 (100 GE 业务)	100%	73.68%~98.09% (64 byte~1 518 byte)	95.43%

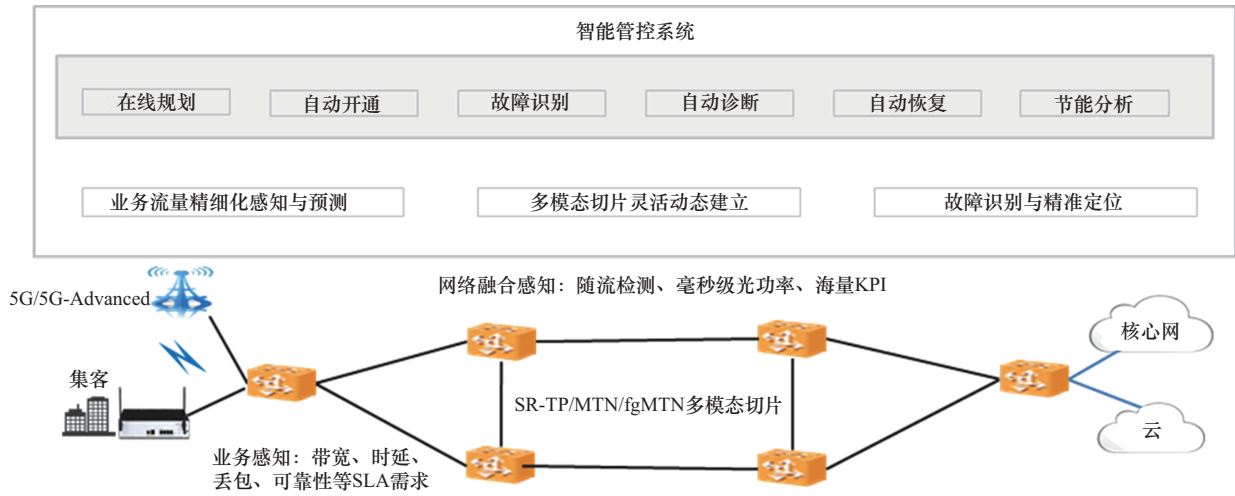


图7 SPN多模态智能化管控技术方案

PCEP-LS) 等基础协议进行了创新性增强设计, 实现了拓扑资源的实时同步, 设计了网元间分布式信令协议, 使用通道开销承载信令交互, 通过极简协议设计实现了多模态切片的快速创建。

SPN 作为城域网的核心流量枢纽, 具有接入、汇聚、核心多层次的组网结构, 承载着 5G 回传、政企专线、算力接入等关键业务, 具有显著的时变潮汐效应和方向性流量特征。以某省会城市 SPN 为例, 其核心汇聚节点日均流量波动幅度达 80%, 呈现明显的潮汐效应, 且部分接入层流量会向少数核心汇聚节点集中。这种时间和空间维度上不均衡的流量分布特性, 导致传统网络设备在全功率运行模式下的能源浪费。

随着 SPN 智能化管控技术的发展和设备级绿

色能力的逐步提升, 设备能耗可管控点逐渐增多, 使得依托网络全局视角制定节能降耗策略成为可能。同时, 智能化管控系统也逐步演进为“绿色大脑”, 能够基于业务感知提供动态灵活的控制与调度, 提高整体网络的能源使用效率。融合 AI 技术“乘数效应”, 智能化管控系统通过精准建模流量和能耗的关系实现动态均衡与优化, 在保证业务质量的同时达到节能降耗的目标, 从而解决传输能力碎片化导致的能耗浪费问题。

面向 SPN 的智能化节能技术体系核心目标是通过业务层、控制层、转发层“三层协同”机制, 构建“感知-决策-执行”的系统闭环, 实现网络资源的精准匹配与动态优化。基于 AI 管控的智慧动态节能技术架构如图 8 所示, 该技术架构

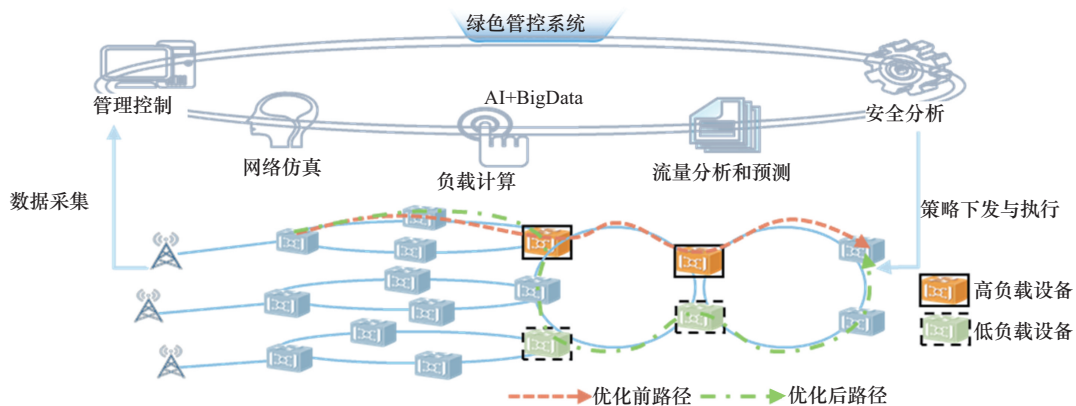


图8 基于AI管控的智慧动态节能技术架构

包含三大创新层级。一是智能流量感知技术：针对节能参数或节能维度与业务场景缺乏关联的难题，首先实现场景感知。在业务入口节点处，首先利用AI技术按照业务特征对流量进行分类，获取场景级节能意图（如节能优先、网络高度保障等），进而可以根据优先级调度管控，确保高优先级业务获得足够的资源保障，同时结合硬切片技术和资源合并策略，提升资源利用率。二是精细化时空流量预测技术：准确的流量预测是城域网智能动态节能的前提条件，管控系统集成大数据和AI算法实时监测网络状态，能够快速响应流量短期变化趋势，跟踪流量长期分布特性，减少网络设备在低负载或空闲状态下的能源浪费。结合端口、隧道有效流量数据和拓扑信息，采用时空图神经网络对未来一定周期内端口、隧道的流速进行预测，既考虑时间维度的流量变化，也考虑流量在空间上的关联，从而实现网络级流量的精细化预测。三是动态路径优化技术：基于业务流量预测的结果执行启发式算法，突破传统单一路由度量限制，构建同时考虑时延、能耗、可靠性等指标的多因子评估体系，通过搜索路径迭代找到最优值，实现动态选路，使得高负载设备资源释放，以实现整网的均衡，从而最大化网络资源利用效率。

目前SPN基于AI智慧动态节能创新技术已广泛试点实践，在不影响服务质量的前提下，可实现节能收益8.8%~16.7%，充分验证了基于AI管控的智慧动态节能技术的潜力^[11]。

2 SPN国际标准体系及规模应用

SPN国际标准体系制定工作在ITU-T SG15展开。ITU-T SG15是ITU-T下负责传输网及其接入技术标准制定的研究组，SDH和OTN标准体系在该标准组织完成制定。自1988年前后，SG15启动了SDH标准的制定工作，形成了G.803（架构）、G.707（接口）和G.783（设备）等一系

列标准；1998年前后，该研究组开启OTN标准体系的制定工作，形成了G.872（架构）、G.709（接口）和G.798（设备）等标准。SPN标准于2018年在ITU-T SG15开始制定，于2022年前后形成了完整的MTN国际标准体系。SPN/MTN ITU-T国际标准体系见表2，该体系包括G.8310（MTN架构）^[12]、G.8312（MTN接口）^[13]、G.8321（MTN设备）^[14]、G.8331（MTN保护）^[15]、G.8350（MTN管理）^[16]、G.Sup.69（MTN演进）^[17]和G.8371（MTN同步）^[18]等标准。此外，SPN小颗粒技术也完成了在ITU-T的标准化^[19]，G.8312.20（fgMTN总体）^[20]等标准也已发布。在此之前，SPN在中国通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）制定了《切片分组网络（SPN）总体技术要求》等SPN系列标准，成为ITU-T SG15制定MTN国际标准的技术基础，G.Sup.69标准中直接引用了CCSA的SPN行业标准。

表2 SPN/MTN ITU-T国际标准体系

分类	标准号	名称
接口	G.8312	城域传输网络接口
架构	G.8310	城域传输网络架构
管理	G.8350	城域传输网络管理和控制
设备	G.8321	城域传输网络设备功能块特性
保护	G.8331	城域传输网络线路保护
演进	G.Sup.69	预标准网络演进
同步	G.8371	城域传输网络同步
细粒度	G.8312.20	细粒度城域传输网络总则

SPN技术体系，已规模化实现了高品质保障的综合承载服务，在5G回传、电网、煤业、医疗、交通等行业得到广泛应用^[21-23]。在5G回传方面，中国移动现网部署SPN设备超40万端，承载基站240万站，开通切片专线2万余条，建成了全球技术领先、规模最大的5G回传和政企切片专线SPN综合承载网络。



在行业应用方面, SPN 根据不同行业业务需求提供差异化切片承载能力, 已广泛应用于“5G+垂直行业”及各行业专网数字化转型中。其中, 中国移动通过 SPN 承载的“5G+垂直行业”项目落地商用超 4 万个, 同时 SPN 凭借技术优势成为国家关键行业专网的基础技术。以智能电网为例, 根据电网业务分区隔离要求, 生产控制类业务和信息管理类业务之间需要进行硬隔离, 同一类业务内部则采用软隔离, SPN 的软硬切片技术能力恰好能够契合这一需求^[24]。南方电网、国家电网均选择 SPN 作为新型电力系统中电力城域通信网的大带宽、高灵活、低成本的主力技术之一。其中, 南方电网已规模化部署上千端 SPN 设备, 采用 SPN 承载各安全分区业务、大区间业务时隙安全隔离、切片内统计复用提高网络承载效率, 实现电力地区通信网带宽从 10 Gbit/s 升级为 100 Gbit/s, 建网成本节省 60%, 能效提升 8 倍以上。此外, 在交通领域, SPN 切片既可满足铁路新一代移动通信系统 5G-R 和铁路专用全球移动通信系统 (Global System for Mobile Communications-Railway, GSM-R) 行车控制类业务需求, 又可满足 5G-R 系统大带宽视频数据等综合业务承载服务需求^[25], 可满足铁路制式升级的差异化承载需求。在能源领域, 随着矿山智能化建设的推进, 井下业务逐渐增多, 重复建设多张网络进行业务隔离的方式存在成本过高、运维复杂等多种问题。SPN 采用硬隔离切片保障多系统硬隔离, 实现一张切片网承载多种业务系统, 助力煤矿实现数字化转型。

3 结束语

面向城域网络需要兼顾普遍化公平服务与差异化业务质量保障提供传输切片的挑战, 本文基于以太网内生 TDM 的 SPN 技术体系, 通过构建多维转发机制, 有效解决了多维性能指标难以通过单一转发模式协同保障的技术瓶颈, 实现了多

维融合转发、以太网内生 TDM 信号封装、MTN 层网络协议、跨层融合智能化管控的四大核心机制, 形成具备经济性与高效性的新型传输网技术体系。在标准方面, SPN 核心架构及关键技术已被国际标准化组织全面采纳, 成为继 SDH、OTN 之后 ITU-T 新一代传输网技术体系。在应用方面, 基于 SPN 技术体系构建了全球技术领先、规模最大的 5G 回传和政企切片专线 SPN 综合承载网络, 并已在电网、铁路等关键行业实现广泛应用。

随着 5G-Advanced、智算、未来 6G 等新技术的不断发展, SPN 技术体系匹配网络切片范式的演进, 在 6G、智算、千行百业中具有广阔的发展前景。SPN 还将不断探索和演进, 一是聚焦现网传统 SDH 业务向 SPN 平滑迁移中的全业务适配和管理协同问题, 研究 SPN 增强虚容器 (virtual container, VC) 业务承载和数据通信通道互联互通技术, 确保 SDH 全业务场景覆盖和端到端可管可控; 二是面对 SPN 小颗粒切片规模应用海量连接带来的资源配置效率、链路故障导致大量切片并发倒换等问题, 研究新一代小颗粒切片控制面技术, 实现大规模切片高效调度。三是面向未来 6G 高中低频融合组网、新业务流量增长以及通感智算融合, SPN 向 800 GE/1.6 TE 大带宽、智能化演进等需求, 研究城域光层相干等速率提升、电层灵活切片和智能感知协同等技术, 更好地服务于新型信息通信网络基础设施建设与发展。

参考文献:

- [1] 余少华, 何炜. 光纤通信技术发展综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(9): 1361-1376.
Yu S H, He W. Latest survey on optical fiber communication[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(9): 1361-1376.
- [2] 李晗, 程伟强, 韩柳燕, 等. SPN/MTN 使能 5G 切片网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2023.
Li H, Cheng W Q, Han L Y, et al. SPN/MTN enables 5G slic-

- ing network[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2023.
- [3] Li H, Han L Y, Liu S, et al. Data center interconnection resolution with metro transport network technology[C]//Proc SPIE 13104, Advanced Fiber Laser Conference (AFL2023), 2024, 13104: 1595-1603.
- [4] 李晗. 面向5G的传送网新架构及关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(1): 53-57.
Li H. The new architecture and key technologies for 5G transport network[J]. ZTE Technology Journal, 2018, 24(1): 53-57.
- [5] 韩柳燕, 李晗, 张德朝, 等. SPN原创技术助力5G能力提升[J]. 通信世界, 2021(9): 27-29.
Han L Y, Li H, Zhang D C, et al. SPN original technology helps improve 5G capability[J]. Communications World, 2021(9): 27-29.
- [6] 韩柳燕, 叶雯, 王敏学, 等. 面向5G和算力的SPN 2.0发展[J]. 通信世界, 2022(17): 33-35.
Han L Y, Ye W, Wang M X, et al. Development of SPN 2.0 for 5G and computing power[J]. Communications World, 2022(17): 33-35.
- [7] 韩柳燕, 叶雯, 王敏学, 等. SPN迈向小颗粒切片2.0时代[J]. 通信世界, 2021(14): 31-33.
Han L Y, Ye W, Wang M X, et al. SPN moves towards the era of small particle slicing 2.0[J]. Communications World, 2021(14): 31-33.
- [8] Han L Y, Li J C, Chen X Y, et al. Fine grain metro transport network technology for 5G-A/6G communication evolution[C]//Proceedings of the 2024 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-3.
- [9] IEEE 802.3-2018 IEEE standard for Ethernet[S].
- [10] Han L Y, Zhao Y, Wang M X, et al. Technology and management evolution of optical networks oriented at computing force network[C]//Proceedings of the 2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/POEM). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-3.
- [11] Chen X Y, Han L Y, Wang M X, et al. Field trial of intelligent network-level energy saving strategy over large-scale database of commercial transport networks[C]//Proceedings of the ECOC 2024; 50th European Conference on Optical Communication. VDE2024: 1615-1618.
- [12] ITU-T G.8312 Interfaces for metro transport networks[S].
- [13] ITU-T G.8310 Architecture of the metro transport network[S].
- [14] ITU-T G.8350 Management and control of metro transport networks[S].
- [15] ITU-T G.832 Characteristics of metro transport network equipment functional blocks[S].
- [16] ITU-T G.8331 Metro transport network linear protection[S].
- [17] ITU-T G. Sup. 69 Migration of a pre-standard network to a metro transport network[S].
- [18] ITU-T G.8371 Synchronization aspects of metro transport network[S].
- [19] 胡悦, 王亚男, 高凯强, 等. 电力通信骨干网细粒度业务传送技术应用分析[J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(12): 16-25.
Hu Y, Wang Y N, Gao K Q, et al. Application analysis of fine-grained service transmission technology in power communication backbone network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(12): 16-25.
- [20] ITU-T G.8312.20 Overview of fine grain MTN[S].
- [21] 赵福川, 刘爱华, 周华东. 5G确定性网络的应用和传送技术[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(5): 62-67.
Zhao F C, Liu A H, Zhou H D. Applications and transmission technology of 5G deterministic network[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(5): 62-67.
- [22] 王晓曼, 曾睿, 罗菁, 等. 5G+SPN专网技术在紧急医学救援中的创新应用[J]. 中国数字医学, 2024, 19(11): 15-18.
Wang X M, Zeng R, Luo J, et al. Innovative application of 5G+SPN private network technology in medical emergency[J]. China Digital Medicine, 2024, 19(11): 15-18.
- [23] 程广展, 赵志成, 陈鑫雄. 新一代政务网承载方案研究[J]. 广东通信技术, 2024, 44(11): 70-74.
Cheng G Z, Zhao Z C, Chen L X. Research on bearer scheme of new generation government affairs network[J]. Guangdong Communication Technology, 2024, 44(11): 70-74.
- [24] 段晓, 何宝影, 李哲, 等. SPN在电力通信网中的应用探讨[J]. 邮电设计技术, 2024(5): 68-74.
Duan X, He B Y, Li Z, et al. Discussion on application of SPN in electric power communication network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2024(5): 68-74.
- [25] 吴军, 胡锴, 李恒友, 等. 面向铁路5G-R和GSM-R系统的SPN承载方案研究与试验[J]. 中国铁路, 2024(8): 9-18.
Wu J, Hu K, Li H Y, et al. Research and testing of SPN bearer solution for railway 5G-R and GSM-R systems[J]. China Railway, 2024(8): 9-18.



[作者简介]



李晗 (1975-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院基础网络技术研究所所长、正高级工程师, 主要研究方向为SPN/PTN、前传 Open-WDM、OTN/WDM、PON 和同步等光通信领域策略、标准和技术。



张德朝 (1979-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院基础网络技术研究所副所长、正高级工程师, 主要研究方向为SPN/PTN、前传 Open-WDM、OTN/WDM、PON 和同步等光通信领域策略、标准和技术。



韩柳燕 (1982-), 女, 博士, 中国移动通信有限公司研究院基础网络技术研究所正高级工程师, 主要研究方向为PTN、SPN 和同步技术。



王敏学 (1983-), 女, 博士, 中国移动通信有限公司研究院基础网络技术研究所正高级工程师, 主要研究方向为PTN、SPN 等。