

SRv6 技术在数据转发平面的应用与挑战综述^{*}

马东超¹, 赵肖河¹, 王 晨¹, 黄思恬², 马 礼¹

¹(北方工业大学 信息学院, 北京 100144)

²(中国地质大学(北京) 信息工程学院, 北京 100083)

通信作者: 马礼, E-mail: mali@ncut.edu.cn



摘 要: 基于 IPv6 的段路由 (segment routing over IPv6, SRv6) 作为下一代网络架构的关键使能技术, 通过引入灵活的段路由转发平面, 为提升网络智能化水平、拓展业务服务能力带来革新机遇. 旨在全面梳理近年来 SRv6 的演进趋势和研究现状. 首先, 系统总结 SRv6 在网络架构与性能、网络管理与运维以及新兴业务支撑等方面的应用, 凸显了 SRv6 精细调度、灵活编程、服务融合等独特优势. 与此同时, 深入剖析 SRv6 在性能与效率、可靠性与安全性、部署与演进策略这 3 个方面所面临的关键挑战, 并重点讨论当前主流的解决思路和发展趋势. 最后, 立足产业生态构建、人工智能引入、行业融合创新等视角, 对 SRv6 未来的发展方向和挑战进行前瞻性思考和展望. 研究成果将为运营商构建开放、智能、安全的新一代网络提供理论参考和实践指导.

关键词: SRv6; 软件定义网络; 网络可编程; 流量工程; 服务功能链

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 马东超, 赵肖河, 王晨, 黄思恬, 马礼. SRv6 技术在数据转发平面的应用与挑战综述. 软件学报, 2026, 37(1): 378–397.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/7422.htm>

英文引用格式: Ma DC, Zhao XH, Wang C, Huang ST, Ma L. Survey on Applications and Challenges of SRv6 Technology in Data Forwarding Plane. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2026, 37(1): 378–397 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/7422.htm>

Survey on Applications and Challenges of SRv6 Technology in Data Forwarding Plane

MA Dong-Chao¹, ZHAO Xiao-He¹, WANG Chen¹, HUANG Si-Tian², MA Li¹

¹(School of Information Technology, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

²(School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Segment routing over IPv6 (SRv6), as a key enabling technology for the next-generation network architecture, introduces a flexible segment routing forwarding plane, offering revolutionary opportunities to enhance network intelligence and expand service capabilities. This study aims to provide a comprehensive review of the evolution and research status of SRv6 in recent years. First, the study systematically summarizes the applications of SRv6 in network architecture and performance, network management and operation, and emerging service support, highlighting the unique advantages of SRv6 in fine-grained scheduling, flexible programming, and service convergence. Meanwhile, the study deeply analyzes the key challenges SRv6 faces in performance and efficiency, reliability and security, and deployment and evolution strategies, and focuses on discussing the current mainstream solutions and development trends. Finally, from the perspectives of industrial ecosystem construction, artificial intelligence integration, and industry convergence innovation, the study provides forward-looking thoughts and prospects on the future development directions and challenges of SRv6. The research findings of this study will provide theoretical references and practical guidance for operators in building open, intelligent, and secure next-generation networks.

Key words: SRv6; software defined network (SDN); network programmability; traffic engineering; service function chaining (SFC)

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划 (2024YFE0200500, 2023YFC3107804); 北京市教育委员会科学研究计划 (KM202410009003); 北京市自然科学基金 (4234083)

收稿时间: 2024-06-30; 修改时间: 2024-08-23; 采用时间: 2025-02-20; jos 在线出版时间: 2025-07-30

CNKI 网络首发时间: 2025-07-31

随着互联网业务的爆发式增长,网络流量无论是在体量还是种类上都日趋多样化.据 Cisco 预测,到 2023 年全球联网设备将达 299 亿,其中物联网设备占比 50%^[1].IDC 的报告则显示,2025 年全球连接设备数将超过 410 亿,物联网设备占比高达 75%^[2].在“人-机-物”三元世界加速融合的大背景下,以云计算、人工智能、虚拟现实等为代表的创新应用,对网络提出了更高的带宽、时延和可靠性要求.面对日益复杂的网络场景和苛刻的性能要求,传统网络架构在可扩展性、灵活性、服务质量保障等方面的不足日益凸显.SRv6 技术作为面向未来的创新网络架构,通过重塑网络转发平面,为破解网络发展瓶颈、加速网络智能进化提供了先进理念和关键使能.

SRv6 的出现并非偶然.回望互联网发展的 30 余年历程,网络技术经历了 3 次重大变革:一是 20 世纪 80 年代末期 TCP/IP 协议栈的建立,奠定了互联网的技术根基;二是 21 世纪初 IPv6、多协议标记交换 (multiprotocol label switching, MPLS) 等技术的引入,推动网络走向规模化与智能化;三是近 10 年来软件定义网络 (software defined network, SDN)、网络功能虚拟化 (network functions virtualization, NFV) 和段路由 (segment routing, SR) 等理念的兴起,加速网络的软件化转型与服务化升级.SRv6 正是在前人工作基础上,顺应时代发展而提出的下一代网络范式.秉承 IPv6 先进理念,叠加 SDN 可编程、NFV 灵活部署、SR 路径感知等关键技术优势.

SRv6 网络引入了 IPv6 编程机制,实现了网络转发面与控制面的深度解耦与敏捷协同.它允许网络运营者直接利用 IPv6 地址空间对网络服务进行灵活编程和动态控制,简化了控制平面,降低了网络运维的复杂度.同时,SRv6 为网络服务提供了端到端编排与感知能力,为服务质量保障、故障定位等问题提供了新的解决思路.尽管 SRv6 展现出诸多技术优势,但在源路由开销优化、运维管理与安全、部署策略等方面仍面临挑战.

近年来,SRv6 的标准化和产业化进程正在快速推进.IETF 的 SPRING 工作组发布了一系列 SRv6 相关的 RFC 文档^[3-12],为该领域提供了规范引导.华为、思科、Juniper 等企业推出了成熟的 SRv6 商用产品和解决方案.运营商和云服务商也积极开展 SRv6 概念验证和试点建设,如中国电信在国内率先开通了基于 SRv6 的 5G 承载网络试点,实现了跨域端到端的 5G 网络切片.这些产业实践为 SRv6 的规模商用积累了宝贵经验.

尽管 SRv6 技术在各方面取得了丰硕成果,但现有文献缺乏对该领域的全局梳理和系统总结.例如,文献 [13] 主要关注 SR 标准化进程和专利布局,难以反映 SRv6 领域的最新进展,特别是创新应用场景、关键技术优化和演进式部署演进等方面的重要成果.因此,有必要对 SRv6 相关领域的研究现状进行全面调研和梳理.本文第 1 节介绍 SRv6 技术的基本原理、关键特性和演进历程.如图 1 所示.第 2 节归纳 SRv6 在网络架构与性能、网络管理与运维、新兴业务支撑等领域的应用创新,并总结面临的技术挑战.第 3 节深入讨论 SRv6 技术自身的挑战,分析性能与效率、可靠性与安全性、部署与演进策略方面的研究进展.第 4 节总结全文并展望 SRv6 技术的发展前景.

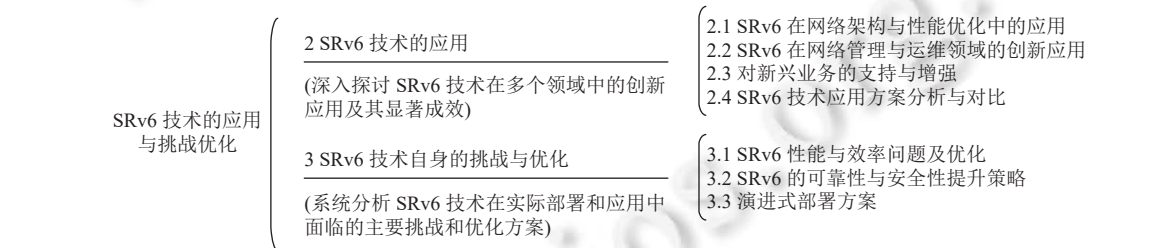


图 1 本文结构框架图

1 背景概述

1.1 SRv6 技术原理

SR 是 IETF 在源路由理念基础上提出的新型路由转发架构.SR 将端到端的转发路径分割为多个段,每个段由一个段标识符 (segment identifier, SID) 唯一标识.通过将数据包的转发信息编码在数据包头中,SR 实现了数据平面的直接路径编程和转发控制.基于 IPv6 的段路由技术 SRv6 则是 SR 理念在 IPv6 数据平面的具体实现.与传统 IPv6 网络不同,SRv6 充分利用了 IPv6 灵活的地址结构和可定义的报文头,通过引入段路由扩展头 (segment

routing header, SRH), 在 IPv6 数据平面实现了对转发路径和服务功能的直接编程控制.

SRv6 支持两种工作模式: SRv6 尽力转发模式 (segment routing IPv6 best effort, SRv6 BE) 和 SRv6 流量工程模式 (segment routing IPv6 traffic engineering, SRv6 TE). SRv6 BE 模式与 IPv6 报文格式一致, 提供了一种与传统 IPv6 网络兼容的尽力而为转发模型, 数据平面完全基于目的地址转发, 不支持显式路径编程和精细的服务质量保障. 而 SRv6 TE 模式则支持显式的端到端转发路径规划. 如图 2 所示, 源节点根据 SR Policy 信息, 通过向 IPv6 基本头中插入 SRH, 精确指定流量经由的中间 SID 节点, 实现路径的灵活编程. 转发过程中, SRv6 节点仅需解析 SRH 并执行 SID 对应的操作, 避免了传统网络中庞大转发表项的维护开销. SRv6 TE 模式为网络流量的精细化控制提供了灵活的编程原语, 在网络架构与性能、网络管理与运维、新兴业务支撑场景展现出广阔的应用前景.

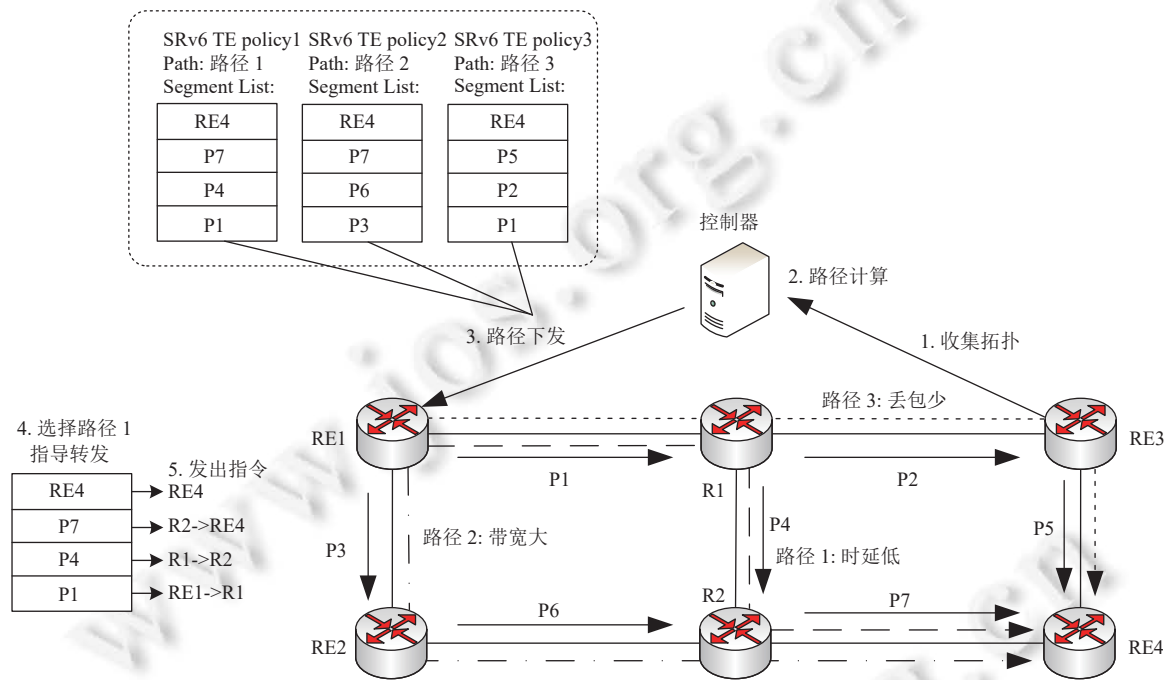


图 2 SRv6 TE 路径转发示意图

总的来看, SRv6 通过重塑传统网络“管道化”的数据平面, 将路由能力与服务语义高度融合, 使能了一种“服务化”的网络架构. 这种网络模式, 有望从路由转发、流量工程、安全可信等多个维度, 解决未来网络发展所面临的技术痛点, 推动网络向灵活智能演进.

1.2 SRv6 的发展历程

段路由 SR 理念最早可追溯到 2015 年, 当时 SPRING 工作组提出了基于 MPLS 转发平面的段路由 (segment routing over MPLS, SR-MPLS) 方案^[6], 希望通过引入全局唯一的 SID 替代传统的标签分发协议 (label distribution protocol, LDP), 以更灵活的方式实现源路由能力. SR-MPLS 一经推出便引起业界的广泛关注, 被视为 MPLS 技术的一次重要演进.

随着 SR 理念的逐步成熟, 以及 IPv6 在互联网规模应用的持续推进, 研究者开始思考 SR 与 IPv6 技术融合的可能性. 2017 年, 基于 IPv6 的段路由技术 SRv6 正式问世, SRv6 从现有 IPv6 协议栈和路由转发机制出发, 在 IPv6 扩展头选项中定义了 SRH, 将 SR 所需的转发信息巧妙地与 IPv6 数据包相融合. IPv6 原生的地址族语义则被借鉴表示为 SID. 通过这种设计, SRv6 极大简化了网络协议栈, 使 SR 转发信息处理高度融入 IPv6 转发面, 开创性地提出了网络编程的崭新思路.

SRv6 概念提出后, IETF 开始了紧锣密鼓的标准化工作. RFC 8754^[3]系统定义了 SRv6 在 IPv6 数据平面的头部结构和转发行为. RFC 8986^[4]定义了一系列基本的 SRv6 SID 函数行为, 如 End、End.X 等, 这些“原语”为实现灵活的网络编程提供了必要的语法基础. IETF 还相继发布了一系列标准文档^[5-12], 对 IGP、BGP 等路由协议作出针对性扩展, 支持了 SRv6 网络中的前缀和 SID 信息分发等. 这些标准规范的发布标志着 SRv6 网络架构的日益成熟.

与此同时, 学术界在 SRv6 原型系统研发方面也取得了重要进展^[14]. Linux 内核从 4.10 版本起原生支持 SRv6 数据平面转发, 在 5.1 版本中进一步实现了对 SRH 插入和解析的处理, 以及对“End”系列 SID 函数的支持. 这为 SRv6 相关研究提供了理想平台. 此外, 西班牙 CTTC 研究所开发的 SRPerf 工具^[15], 为评估 SRv6 网络性能提供了重要支持. SRv6 在具体应用场景中的潜力也得到了学术界的广泛关注, 尤其是在流量工程方面. 研究人员利用 SRv6 对转发路径的显式编程能力, 提出了 SRv6 TE 方案, 实现对关键性能指标的灵活优化调控, 丰富了网络运维手段.

随着 SRv6 技术生态的成熟, 商用系统也在快速发展. 思科 IOS XR^[16]和 Arrcus ArcOS^[17,18]等操作系统提供了对 SRv6 的全面支持, 包括 SRv6 TE、VPN、服务链等功能. 这些系统在性能优化、可编程性和开放接口等方面都有创新, 为 SRv6 的大规模部署和灵活应用提供了保障. 随着软件定义、服务化理念的持续渗透, SRv6 作为面向未来网络演进的关键使能技术, 有望在构建新一代网络基础设施中发挥越来越重要的作用.

1.3 SRv6 技术特点总结与分析

SRv6 作为一种创新的网络技术, 为未来网络的发展带来了诸多机遇. (1) SRv6 继承了 IPv6 的优良特性, 无需引入新的封装格式, 可直接利用 IPv6 进行端到端编程控制, 大大降低了网络部署和集成的复杂度. (2) 得益于 IPv6 广阔的地址空间, SRv6 可用 SID 数量远超 MPLS 标签, 可支持海量网络服务和应用实例的灵活映射与编排, 满足未来网络服务多样化的需求. (3) SRv6 是以 IPv6 数据平面为基础构建的网络转发架构, 对 SDN、NFV 等新兴技术具有天然的亲和力. 二者在架构理念和接口定义上高度契合, 为网络转发与服务能力的深度融合提供了技术基础. 为了更好地凸显 SRv6 技术的特点和优势, 表 1 从多个角度对 SRv6 与 SR-MPLS、SDN 技术进行了对比.

表 1 SRv6 与 SR-MPLS、SDN 技术对比

对比项	SRv6	SR-MPLS	SDN
路由协议	IPv6路由协议如IS-IS、OSPF和BGP	在MPLS控制平面协议如LDP、RSVP-TE基础上扩展	不依赖特定路由协议, 控制器直接下发转发规则
标识符	使用IPv6地址作为标识符, 兼容现有IPv6网络	使用MPLS标签作为标识符, 需与MPLS网络配合	使用多种标识如MAC、IP、VXLAN等, 由控制器分配
路由聚合能力	通过灵活定义SID语义实现高度路由聚合	通过灵活使用标签栈实现低程度路由聚合	控制器可针对流量特征进行路由聚合优化
与传统网络共存	兼容IPv6, 可与传统IPv6网络无缝互通	兼容MPLS, 可与传统MPLS网络平滑过渡	需在传统网络上叠加部署, 与传统网络互通需特殊处理
跨域部署	通过IPv6地址, 不同AS域间SRv6路径可端到端维护	不同域间需建立互信关系, 路径分段传递	多域SDN控制器间需协同, 东西向接口尚不成熟
端到端网络	从源到目的IPv6地址携带端到端语义	标签只在MPLS域内有语义, 端到端语义能力有限	控制器直接配置端到端语义, 灵活性强
网络可编程能力	SID语义可编程, 通过网络编程满足差异化需求	标签语义相对固定, 可编程能力有限	控制器高度集中, 流表规则可编程性强
网络可靠性	无中心, 路由收敛快, 支持IP及SRv6混合组网, 可靠性高	无中心, MPLS可靠性经过验证, 运维技术成熟	控制器故障影响大, 仍需进一步提升可靠性

尽管当前 IPv6 部署尚不完善, 且对硬件转发能力提出更高要求. 但这些挑战并不影响 SRv6 的长远价值. SRv6 在多个领域展现出革新性的应用实践. 在网络架构与性能领域, SRv6 通过灵活的 Segment 路径编程实现了端到端的精细化流量调度, 显著提升了链路利用率和负载均衡水平. 同时也简化了网络协议栈, 增强了网络的可扩展性, 为网络带来了可编程控制能力. 在网络管理与运维领域, 为全方位、立体化的网络性能监测提供有力工具, 助力网络运维智能化. 在新兴服务支撑领域, 通过在 IPv6 地址中嵌入服务功能语义, 实现灵活高效的服务链部署与动态

重构, 提供高性能、低时延的服务交付新途径.

2 SRv6 技术的应用

随着 5G、云计算、人工智能等新兴技术和应用的蓬勃发展, 网络服务呈现出多元异构、动态变化的新特征. 智能网络作为未来网络发展的重要方向, 旨在通过软件定义、服务化等关键使能技术, 实现网络架构和运营管理模式的智能化变革. SRv6 作为智能网络的关键支撑技术之一, 以其灵活的编程能力、精细化的路径控制、服务感知的端到端转发机制, 被广泛应用于网络的流量优化、资源配置、业务编排等多个领域, 助力网络向自动驱动、智慧内生方向演进. SRv6 通过对网络转发面的智能化改造, 在提升网络资源利用效率、优化业务服务质量等方面展现出巨大优势. 本节将重点分析 SRv6 在网络架构与性能、网络管理与运维和新兴业务支持等方面的技术创新和实践进展.

2.1 SRv6 在网络架构与性能优化中的应用

互联网技术的快速发展对网络架构提出了新的挑战, 传统架构在功能灵活性、部署成本和优化精度等方面已难以满足复杂的网络环境和业务需求. SRv6 凭借其可编程转发平面和灵活路径控制, 在网络性能优化领域展现出巨大潜力. 本节将深入探讨 SRv6 在网络架构和性能优化方面的实践应用以及面临的挑战.

SRv6 网络编程的概念最初由 RFC 8986^[4]定义, 该标准规定了一组基本的 SRv6 端点行为, 为不同厂商设备的互通奠定了基础. 这一标准化工作为灵活控制业务路径、实现网络切片等高级应用提供了技术支撑. 随后, RFC 9433^[9]进一步探讨了 SRv6 在移动网络用户面中的应用, 利用 SRv6 灵活控制业务路径的特性, 显著降低了端到端时延, 提升了用户体验. 在协议扩展方面, RFC 9252^[5]和 RFC 9514^[12]分别定义了基于 SRv6 的 BGP 服务以及 BGP-LS 协议扩展. 前者定义了支持 SRv6 数据平面的 BGP L3VPN 和 EVPN 服务, 后者则引入了 BGP-LS 扩展以传递 SRv6 段及相关属性, 为 SRv6 网络中服务路径的有效计算提供了必要支撑.

在许多对时延敏感的应用中, 如金融交易、在线游戏等, 端到端传输时延是影响服务质量的关键因素. 针对这一需求, 文献 [19] 提出了 SRv6 下层联邦 (segment routing IPv6 under-layer federation, SRUF) 分布式路由方案. 如图 3 所示, SRUF 利用互联网中普遍存在的三角不等式违背现象, 通过选择时延更优的中继路径, 实现端到端时延最小化. 在仿真实验中, SRUF 能够显著改善端到端时延性能, 且具备良好的动态自适应能力. 然而, SRUF 在大规模网络中的性能表现和对网络资源的额外消耗仍需进一步优化.

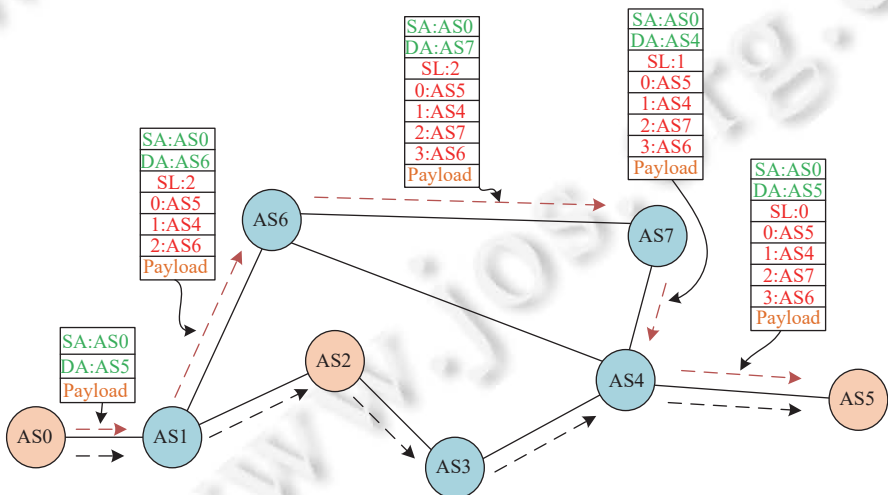


图 3 SRv6 下层联邦 (SRUF) 分布式路由方案

除端到端时延保障外, 提升网络链路负载均衡水平也是网络性能优化的重要目标. 文献 [20] 提出了基于多智能体强化学习的链路负载均衡方案 SR-LILLIC. 该方案将 SRv6 转发平面建模为多智能体系统, 并利用深度强化学

习实现分布式的路由策略优化. 每个智能体负责感知局部链路状态, 并根据全局回报函数动态调整数据包的转发路径, 将流量分担至负载较轻的链路. 在仿真实验中, SR-LILLC 表现出显著的性能改善和动态自适应能力, 但在实际大规模网络中的部署复杂性和计算开销仍需进一步评估.

为了更好地满足不同应用的服务质量需求, 文献 [21] 提出了 NetworkAPI 允许应用通过扩展的 SRv6 网络编程接口直接向网络表达服务质量需求. 文献 [22] 提出了 SNAPS 网络增强 Pub/Sub 架构. SNAPS 利用 SRv6 的网络可编程特性, 构建了跨多个管理域的高效共享数据分发树. 这些框架充分利用了 SRv6 转发语义的灵活性, 使应用能够精细控制流量的端到端转发路径, 显著提升了应用性能和网络资源利用率. 然而, 这些方案可能增加网络管理的复杂性, 且在大规模异构网络中的实际效果还需进一步验证. SRv6 技术在一些特殊网络场景中也展现出了独特的优势, 文献 [23] 重点探讨了 SRv6 在战术通信网络流量优化中的价值, 战术网络面临频繁的拓扑变化和链路中断等挑战, 对数据传输可靠性提出了极高要求. TactSR 系统利用 SRv6 编程特性, 通过控制平面预先计算备份路径, 并将流量导向更稳定的链路, 最大限度降低因链路故障导致的关键数据丢失. 此外, TactSR 还融合加权最短路径等智能路由算法, 进一步提升了网络资源利用效率和业务生存性.

内容分发网络 (content delivery network, CDN) 的优化是一个备受关注的研究方向. 对于内容提供商而言, 如何选择最优的出站路径将内容分发到多个自治域至关重要, 直接影响最终用户的服务质量. 针对这一问题, 文献 [24] 利用 SRv6 提出了面向 CDN 的细粒度链路探测方案. 在该方案中, 内容提供商通过将待评估的出口路径编码至 SRv6 的 Segment List, 将探测数据包引导至目标出口节点, 同时在数据包中携带各种性能评估参数. 通过主动探测和被动反馈相结合, 该方案可精准评估各备选路径的服务质量, 从而指导内容提供商做出最优选路决策.

时间敏感确定性网络 (time-sensitive deterministic networking, TSDN) 因其低时延、高可靠等特性, 在工业自动化、智慧电网等领域有广泛应用前景. 然而, 现有研究主要聚焦局域网络场景, 而忽视了端到端服务质量保障. 为突破这一局限, 文献 [25] 提出了 C-TSDN 端到端确定性网络新架构, 融合 SRv6、网络切片等 SDN 使能技术, 打造全新的可编程控制平面. 利用 SRv6 实现关键业务的精细化调度, 利用切片实现业务隔离, 利用集中控制优化端到端资源配置. C-TSDN 在端到端服务质量保障的同时, 极大提升了网络效率, 拓展了 TSDN 的应用边界.

在传统多播优化方面, SRv6 同样带来了创新思路. 传统 IP 多播面临组管理复杂、网络状态过重等诸多困境, 难以匹配新兴多播业务的性能需求. 文献 [26] 提出了源特定多播 (source-specific multicast, SSM) 新机制. 该机制将“端-组-端”语义引入多播, 并设计了数据包级控制模式, 通过 SRv6 路径编程使源端直接管控关键组播分发策略. 在灵活性与高效性之间取得了良好平衡.

随着网络规模的不断扩大, 跨域资源调度和优化成为一个重要挑战. 文献 [27] 针对该挑战, 设计了 SMA 多域协同优化架构. SMA 的一大创新点在于其分层异构的控制器部署. 在每个管理域内, SMA 利用 SRv6 转发机制构建了多个本地控制器, 负责域内路径编排和故障检测. 在域间层面, SMA 又引入一个全局控制器, 负责跨域资源的统一调度优化. 实验表明, 当 30% 节点部署 SMA 控制器时, 网络中已有近 80% 的流量实现 SRv6 调度, 最大链路利用率也得到显著控制.

除此之外, SRv6 技术在全球范围内得到了越来越多电信运营商和设备厂商的关注. 国内如中国电信、中国联通与华为、中兴等厂商紧密合作^[28], 在北京、上海等重点地区部署了 SRv6 试验网, 探索 SRv6 在 5G 承载、网络切片等关键场景中的应用. 力争通过 SRv6 实现网络资源的灵活调度和精细化管理, 大幅提升网络性能和运营效率. 在国外, 日本电信运营 KDDI 与思科开展了 SRv6 技术验证试验^[29], 探索利用 SRv6 简化网络架构, 提高网络灵活性和可编程性. 通过将众多网络功能融合到 SRv6 的转发平面, KDDI 希望打造一张敏捷、高效的智能网络.

SRv6 技术以其可编程性和精确路径控制为特征, 显著提升了网络性能优化的广度和深度. 它在降低端到端延迟、优化链路负载均衡、集成应用语义和增强传输可靠性等方面取得了显著进展. 然而, 性能改善往往伴随着资源开销的增加. SRv6 通过在 IPv6 扩展头中引入 SRH 来承载路径信息, 这不可避免地增加了数据平面的处理复杂度. 在细粒度流量调度场景中, 可编程路径虽然提供了灵活性, 但也可能导致额外的数据包解析开销. 因此, 在转发性能和资源利用之间寻求最优平衡成为一个关键挑战.

此外, SRv6 的规模商用仍面临诸多现实部署挑战. 它对网络设备转发性能提出了更高要求, 意味着运营商需

要进行全面的软硬件升级. 同时, 运营商还需要审慎制定演进式部署策略, 以确保在引入创新技术的同时保持业务连续性和平稳过渡. 未来, 在复杂多变的网络环境中充分发挥 SRv6 的技术潜力, 实现网络性能、资源利用和服务质量的多维度协同优化, 仍是一个亟需深入研究的重要课题. 特别是在大规模异构网络中 SRv6 的性能表现、资源开销优化以及与现有网络技术的无缝集成等方面, 都需要进行更深入的探索和实践验证.

2.2 SRv6 在网络管理与运维领域的创新应用

随着网络规模的急剧扩张和业务复杂度的持续攀升, 传统的网络性能监测和故障处置机制正面临前所未有的挑战. 如粗粒度统计、被动感知、固定阈值告警等机制局限性日益凸显, 现有方案在实时性、准确性、灵活性等方面难以满足智能网络运维需求. 在这一背景下, SRv6 技术凭借其可编程特性, 为网络监控和保障体系带来了新的可能性. 本节将聚焦研究人员在 SRv6 网络管理与运维领域的创新应用研究成果.

RFC 9259^[7]和 RFC 9487^[11]分别引入了 SRv6 OAM 机制和 IPFIX 信息元素, 极大丰富了 SRv6 网络的可观察性, 体现了 SRv6 在提升网络可视化、实现主动运维方面的优势. 上述两个标准的提出, 体现了 SRv6 在提升网络可视化、实现主动运维方面的独特优势. 然而, 值得注意的是, SRv6 的引入也带来了新的挑战. 首先, SRv6 引入的新概念和机制增加了网络管理的复杂性, 运维人员需要掌握新的技能和知识. 其次, 在现有网络中部署 SRv6 可能面临与传统设备和协议的兼容性挑战, 需要谨慎规划过渡策略.

在 5G 承载网中, 不同类型业务对网络可靠性提出了差异化要求. 传统路由保护技术难以匹配多样化的服务等级协议. 文献 [30] 针对这一痛点, 提出了 SRv6 驱动的差异化可靠路由新机制. 该机制巧妙利用 SRv6 编程特性, 在源端定制备份路径, 并将其编码封装于 SRH 中. 当发生故障时, 源端可快速切换至相应备份路径, 将业务引流至备份链路, 大大缩短业务中断时长.

针对确定性网络的严苛可靠性需求, 文献 [31] 设计了一种 SRv6 增强的共享备份带宽方案. 区别于传统专用保护, 该方案允许不同业务共享备份资源. 通过精心设计共享机制和调度策略, 既保证关键业务的资源独占, 又能在故障恢复竞争中确保公平性. 仿真结果表明, 该方案在网络流接收率、带宽占用率和网络流时延上具有明显优势.

时间敏感网络 (time-sensitive networking, TSN) 作为确定性组网的重要分支, 因其苛刻的时延抖动需求, 对故障响应提出了极高要求. 现有 TSN 故障保护方案存在响应慢、局部优化不足等问题. 文献 [32] 利用 SRv6 提出了 TSN 快速局部修复新方案. 该方案聚焦受故障影响的局部区域, 利用 SRv6 编程特性提取关键节点形成 Segment 子图, 通过局部化调整快速修复, 避免全局扰动. 此外, 该方案还优化调整了局部区域的 TSN 调度配置, 最小化端到端时延抖动. 相比全局修复, 该方案可显著缩短收敛时延, 提升网络稳定性.

面向海量物联网 (Internet of Things, IoT) 设备接入场景, 文献 [33] 构建了 SRv6 驱动的多层测试模型, 对物联网流量特征进行端到端评估. 在控制层, 该模型协调测试流程与资源管理; 在数据层, 复杂可定制的业务流被灵活编排; 待评估的物联网承载网则作为一个整体的评估对象, 该方案为物联网领域流量调度优化奠定了理论基础.

运维自动化和业务优化也亟需高效准确的网络测量作为支撑. 然而, 权衡测量性能与开销一直是业界面临的难题. 传统主动探测方式易扰动用户流量, 被动测量方式则局限于固定路径, 难以全面掌握网络状态. 被动测量与主动探测的有机融合, 是网络性能监测的重要发展趋势. 文献 [34] 提出的 SONM 方案就是一次有益尝试. SONM 最大的特色在于其结合了 SRv6 的可编程性和带内网络遥测 (in-band network telemetry, INT) 的遥测效率的新型网络测量机制, 即选择性按需网络测量机制. 网络运维人员可以灵活定义测量任务, 聚焦于当前最关键的评估指标. 在具体实施时, SONM 将待测设备映射为旅行商问题 (traveling salesman problem, TSP)^[35]并求解, 获得开销最优的主动探测路径. 而被动测量则内嵌于网元中持续运行. 实验表明, SONM 能够有效地在保持测量准确性的同时减少主动探测的开销, 对于网络性能监控和故障诊断是非常有价值的.

此外, 面向日益复杂的网络架构, 文献 [36] 提出了一种 SRv6 驱动的主动式网络遥测 (active network telemetry, ANT) 方案 SFANT. 其核心理念是让网络控制器主动发起探测, 有的放矢地分析采集必要的状态数据, 以期最小代价获得最大收益. 利用 SRv6 语义丰富的头部扩展, SFANT 将待测数据类型、期望路径等关键信息编码封装, 指导探测数据包的端到端行为, 代替被动等待的低效方式. 在仿真实验中, 相比基于 TCP/UDP 的主动探测, SFANT

将网络开销降低 2 个数量级, 且对网络性能影响可忽略不计. 然而, 上述两种方法的实际部署可能面临设备兼容性和网络资源占用的挑战, 在大规模网络中的可扩展性还需要进一步研究.

总体来看, SRv6 在网络性能监测与故障保护领域正涌现出诸多研究成果, 但也面临着不容忽视的挑战. SRv6 的可编程特性和精细的状态感知能力为网络可靠性带来了新的实现方式, 但同时也增加了故障场景的复杂性. 运维人员不仅要熟悉 IP、传输等层故障特征, 还需及时更新 SRv6 业务感知故障诊断的知识库, 以应对服务质量、业务体验下降等新型故障.

未来, 网络向自动化、智能化方向演进已成必然趋势, SRv6 原生支持的可编程能力为运维系统的智能化升级提供了理想的技术载体. 如何围绕 SRv6 构建端到端、全方位、多粒度的网络监测体系, 将成为运营商的核心诉求.

2.3 对新兴业务的支持与增强

随着 5G、物联网、云计算等新兴技术的快速演进, 网络服务呈现出异构化、个性化的新特征. 服务功能链 (service function chaining, SFC) 作为一种灵活的服务组合与交付模式, 能够根据应用需求动态地编排和调度网络服务功能, 为用户提供定制化的端到端服务保障. 如图 4 所示, 传统网络架构在支撑 SFC 部署时, 往往面临着灵活性不足、扩展性有限等挑战. SRv6 通过在 IPv6 头中引入灵活可编程的 SRH 扩展头, 极大增强了数据平面的语义处理能力, 为 SFC 的精细化调度提供了新的思路和手段. 本节将重点探讨 SRv6 技术在 SFC 优化领域的创新应用.

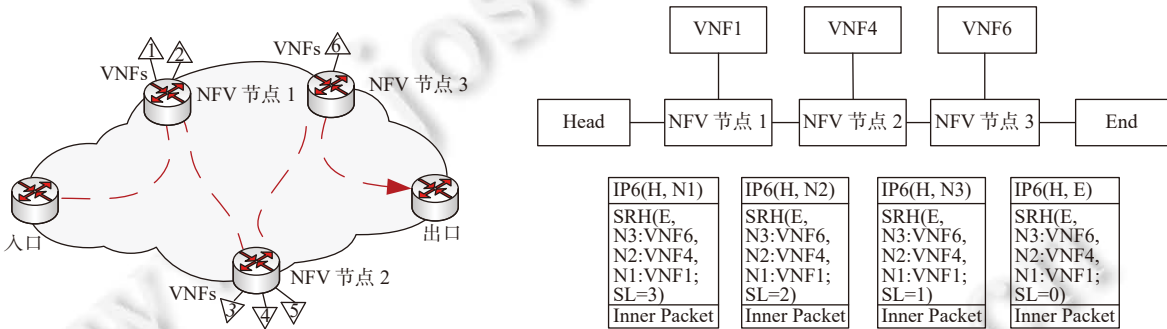


图 4 基于 SRv6 的服务功能链示意图

在多域网络环境下实现 SFC 的高效编排调度, 面临着资源协同、负载均衡、部署成本等多重挑战. 文献 [37] 提出了一种 SRv6 驱动的多域 SFC 动态协同优化方案. 该方案引入面向 5G 的 NFV 架构, 并构建了两阶段求解模型, 在满足端到端时延约束的同时, 兼顾跨域链路的负载均衡, 以期最大化网络资源利用效率. 得益于 SRv6 灵活的路径特性和 SRH 携带的丰富语义, 该方案实现了跨域 SFC 的无缝调度, 并通过仿真实验证明了其在时延、带宽利用等关键指标上的优越性. 但在实际大规模网络中的部署可能面临复杂性增加和管理难度提升的挑战.

除跨域协同外, 如何在多接入边缘计算 (multi-access edge computing, MEC) 场景下, 保障 SFC 的移动性和服务连续性, 也备受业界关注. 文献 [38] 针对该问题提出了一种基于标识/定位分离的 SFC 移动性管理方案. 该方案将服务功能实例与其托管位置解耦, 实现了用户移动过程中 SFC 的快速重定位和状态无缝迁移. 利用 SRv6 语义丰富的转发机制, 该方案在控制开销、重定位时延等关键性能指标上较传统机制有显著改善. 但这种方法可能需要对现有网络设备进行大规模升级, 实施成本和兼容性问题需要进一步评估.

提升服务功能链的交付质量是 SFC 领域的核心诉求, 面向时延敏感的 VR 应用. 文献 [39] 提出了 SRFog 优化框架. SRFog 将 SFC 与微服务理念相结合, 通过抽象 SFC 请求为一系列微服务单元. 并利用 SRv6 路径规划能力, 优化服务单元的部署位置和执行次序, 实现了 SFC 的低时延交付. 仿真结果显示, SRFog 在减少 VR 服务的平均响应时延方面表现出了显著的效果.

在提升 SFC 性能的同时, 增强其安全防护能力也至关重要. 文献 [40] 设计了一个 SRv6 驱动的网络安全服务

功能链系统. 该系统通过对入侵检测、分布式拒绝服务 (distributed denial of service, DDoS) 攻击清洗、蜜罐诱捕等安全功能进行虚拟化封装, 定义了一套完备的 SRv6 安全语义. 同时, 该系统还根据全局流量的实时特征, 动态优化安全 SFC 的执行路径, 通过及时引流和策略更新快速阻断恶意流量, 最大程度降低安全事件的影响范围. 这为提升日趋复杂的网络环境下业务系统的整体免疫力提供了新的思路.

随着网络服务的日益复杂和个性化, 传统的单路径 SFC 编排模式逐渐面临服务质量瓶颈, 难以有效平衡用户体验与网络成本. 文献 [41] 提出了一种 SRv6 驱动的多路径并行 SFC 编排方案. 该方案利用智能算法将 SFC 请求分解为若干子请求, 并基于 SRv6 实现这些子请求的多路径并行传输. 实验结果表明, 相比传统的单路径部署, 并行方案在服务时延、可靠性、能耗等多个性能指标上比其他算法更优, 并展现出良好的可扩展性. 但是, 在大规模部署时需要权衡效益和成本.

SRv6 为服务功能链优化提供了一种全新视角, 通过对网络转发面语义的革新, 有力支撑了跨域协同、移动性管理、低时延交付等关键场景下 SFC 的精细化部署和灵活调度. 此外, SRv6 在服务功能链编排中引入多路径并行传输等创新思路, 进一步释放了网络资源优化潜力. 然而, 我们也应看到 SRv6 使能的服务功能链在带来灵活编排能力的同时, 也引入了新的安全隐患. SRH 的开放性和可编程性, 使得恶意攻击者有可能通过篡改 SFC 请求, 将用户流量劫持到非法的服务功能, 造成业务中断甚至数据泄露. 未来, 如何在 SRv6 的使能下, 构建智能、高效、安全的 SFC 编排体系, 实现网络功能的按需快速部署和弹性调度, 满足差异化业务的多样化需求, 仍是网络学术和产业界进一步探索的重点方向.

2.4 SRv6 技术应用方案分析与对比

SRv6 凭借灵活开放的可编程特性和精细全面的转发控制能力, 在网络优化的诸多领域不断实现新的突破. 对 SRv6 优化方案的横向比较可以看出, 从应用目标来看, 网络架构和性能类方案聚焦提升时延性能和链路利用率, 充分挖掘资源潜力. 网络业务支撑类方案强调用户体验与成本的均衡, 而在网络管理与运维类方案中, 实时感知、快速定位、精准预测等智能化特征尤为突出. 从关键使能技术来看, SR 灵活转发、路径编程、可编程状态等能力的充分运用是各类方案的共同特点, 而主动探测、被动分析、AI 算法等工具的引入, 则进一步拓展了 SRv6 的优化广度和深度. 总的来看, 在提升网络性能、强化业务质量的同时兼顾资源利用效率, 已成为新时期网络优化的主流诉求. SRv6 以其开放灵活的架构优势和平滑演进的部署特性, 必将在未来网络智能化变革中占据重要一席. 表 2 为 SRv6 技术应用方案的对比.

表 2 SRv6 技术应用方案的对比

类别	方案应用场景	优化目标	主要贡献
网络架构和性能 ^[19-27]	通用场景	通信时延	提出SRv6下层联邦机制, 利用网络三角不等式实现跨域路径时延优化, 降低传统覆盖网络复杂性
	5G网络	负载均衡	将SRv6网络建模为多智能体强化学习系统, 通过实时优化路由策略实现链路负载均衡
	应用感知流量调度	应用性能	设计应用感知流量工程框架, 允许应用携带SRv6语义表达需求, 网络据此映射服务质量
	战术通信网络	服务可靠性	针对战术通信网络动态性, 提出智能路径规划和多路径传输方案, 最大限度降低关键数据丢失
	发布/订阅系统	性能稳定性	利用SRv6构建跨域高效数据分发树, 通过应用网络层解耦设计, 显著提升系统性能
	工业互联网	端到端性能	针对工业互联网多域环境, 提出基于SRv6的多层次分布式控制器架构, 通过全局路径优化提升端到端性能
	IP多播优化	组播分发策略	该机制将“端-组-端”语义引入多播, 并设计了数据包级控制模式, 源端直接管控关键组播分发策略
	内容分发网络	出站路径	提出内容分发网络出口路径性能评估新方法, 结合主被动测量和SRv6路径规划, 提高选路精度
	确定性网络	服务质量保障	针对确定性网络, 提出端到端服务质量保障新框架, 利用SRv6网络切片隔离关键流量, 满足确定性需求

表 2 SRv6 技术应用方案的对比 (续)

类别	方案应用场景	优化目标	主要贡献
网络管理和运维 ^[30-36]	5G承载网	快速故障恢复	针对5G承载网差异化可靠性需求, 提出SRv6编程备份路径方案, 通过快速故障检测和切换满足多样化SLA
	确定性网络	资源利用率	针对确定性网络, 提出基于SRv6全局规划备份路径资源保护方案, 在保障关键业务带宽的同时节省备份资源
	时间敏感网络	局部故障修复	提出基于SRv6的TSN局部故障快速修复方案, 通过局部化处理在最小化业务扰动的同时缩短恢复时延
	物联网流量监测	分析流量特征	提出面向物联网流量端到端测试框架, 通过分层测试和自适应建模, 实现关键流量特征精准分析
	主被动测量结合	高效测量	针对监测效率和开销矛盾, 提出按需选择性探测机制, 通过主被动测量结合实现灵活高效监测
	网络性能监测	透明状态感知	提出主动式网络遥测新框架, 控制器主动发起探测和就近分析, 实现端到端可控透明状态感知
新兴业务支撑 ^[37-41]	跨域服务编排	跨域时延	针对跨域SFC编排, 提出两阶段跨域协同优化模型, 同时考虑时延带宽因素, 降低端到端时延, 提高链路利用率
	MEC服务编排	服务移动性	针对MEC服务连续性, 提出基于定位/标识分离的移动性管理方案, 实现服务功能无缝重定位
	虚拟现实VR	服务时延	将微服务理念引入SFC设计, 通过SRv6路径编程实现服务就近快速部署, 使VR服务响应时延显著降低
	网络安全	增强防护能力	利用SRv6的路径可编程性对安全功能进行虚拟化封装, 定义了SRv6安全语义, 可以快速地阻断恶意流量
	通用场景	服务质量	提出SRv6驱动的多路径并行SFC编排模型, 通过子流粒度优化实现服务质量和网络利用率均衡

总的来说, SRv6 凭借其灵活性、可编程性和跨域能力等卓越特性, 正被业界视为未来网络技术演进的重要方向之一。然而, 作为一项颠覆性创新, SRv6 在实际落地部署过程中仍面临一些亟待解决的挑战。(1) SRH 的引入可能会增加数据平面的开销, 进而影响网络转发性能和资源利用效率。(2) SRv6 引入的新字段和选项如果被恶意篡改, 可能诱发非预期的网络行为, 甚至导致通信流量被劫持, 因此安全防护也是一个值得关注的问题。(3) 运营商需要制定周全的 SRv6 分阶段部署策略, 在不同网络层次和业务场景中平滑、渐进地引入 SRv6。(4) 业界目前尚缺乏大规模 SRv6 网络部署运维的成熟经验, 需要进一步探索和完善全生命周期管理机制。

3 SRv6 技术自身的挑战与优化

作为一项创新的网络架构技术, SRv6 凭借其独特的路径编程能力和灵活的网络功能实现, 在网络流量工程和服务质量保障方面展现出巨大优势。通过引入段路由扩展头, SRv6 实现了对数据包转发路径的精确控制。然而, SRH 需要携带完整的端到端路径信息, 导致头部长度较大, 增加了数据平面的处理负担和带宽消耗。此外, SRv6 策略的复杂配置和管理, 以及与不同网络功能和服务的协调, 也为网络维护带来了新的挑战。SRv6 细粒度的路径编程和控制机制在提供灵活性的同时, 也引入了潜在的安全风险和部署困难。本节将重点分析 SRv6 在性能与效率、可靠性与安全性和演进部署策略等关键方面存在的问题, 并综述相关研究工作提出的针对性优化方案。

3.1 SRv6 性能与效率问题及优化

SRv6 性能与效率的优化问题体现在多个应用场景。例如, 在流量工程的应用领域中, 充分利用了 SRv6 灵活编程、精细调度的独特优势, 在端到端时延优化、链路负载均衡等方面取得了显著成果。然而, 在实现这些性能改进的同时, SRv6 也引入了一些资源开销方面的挑战。SRv6 通过在 IPv6 扩展头中引入 SRH, 实现了灵活的编程转发能力。然而, SRH 的引入不可避免地导致了数据平面开销的增加, 主要体现在以下两个方面: 首先, SRH 需要携带完整的端到端转发路径信息, 导致报文头部长度显著增加。以每个 SID 占用 128 bit 计算, 当 Segment 数量为 8 时, 仅 SRH 就引入了 128 字节的开销^[3]。其次, SRH 的处理涉及复杂的解析和查找操作, 对转发平面的处理性能

提出了更高要求. 除此之外, SRv6 相比传统 IP 网络的转发行为存在显著差异, 端到端路径动态多变, 流量工程策略灵活多样. 传统监测运维技术难以直接应用于 SRv6 场景. 面对这些挑战, 研究人员从 SID 编码优化、软硬件转发加速和性能监测等层面提出了一系列优化策略, 以期在保证性能和效率的同时最小化资源消耗.

3.1.1 SID 编码优化

为了应对 SRH 带来的头部开销问题, 研究人员提出了多种 SID 编码优化方案. 这些方案主要通过压缩 SID 的长度或减少 SID 的数量, 来达到优化 SRH 头部开销的目的. 其中, G-SRv6 和基于功能解耦的 FDSRM 方案采用了紧凑编码的思路, 而 Micro SID 方案则通过引入微指令的方式实现了 SID 的极致压缩.

文献 [42] 提出了 G-SRv6, G-SRv6 通过移除 SID 列表中重复的公共前缀和参数部分实现了 32 位 SID. 理论上可以减少高达 75% 的开销. 使得大多数商用芯片组能够处理多达 10 个 SID, 而无需引入数据包重新循环, 显著缓解了 SRv6 硬件处理开销的挑战. 文献 [43] 提出 FDSRM 的机制, 它通过逻辑上解耦 SID/G-SID 的功能, 结合机器学习算法优化标签分配, 取得了比 G-SRv6 更优的效果. 文献 [44] 提出的 Micro SID 的压缩率接近 75%, 但这种极致的压缩方式损失了一定的灵活性.

除了优化 SID 编码外, 另一类 SRH 开销减小方案是基于路径语义的压缩技术. 这类方案利用 SR 路径的拓扑特性, 通过提取和编码路径的差异信息或关键节点, 在保证转发语义不变的情况下最小化 SRH 长度.

文献 [45] 提出了一种基于路径差异的 SRH 压缩算法 CARD. 如图 5 所示, 其核心思想是充分利用 SR 路径与最短路径之间的相似性, 通过编码路径之间的“差异”信息, 在保证语义不变的情况下最大限度地减小 SRH 长度. 此外, 论文还提出了简化的 CARD 算法, 适用于大型网络和长路径场景, 以及针对特定应用场景的“不精确路径”计算方法 RC-CARD, 实验表明, RC-CARD 算法可以显著降低计算开销, 提高网络的可扩展性和经济性.

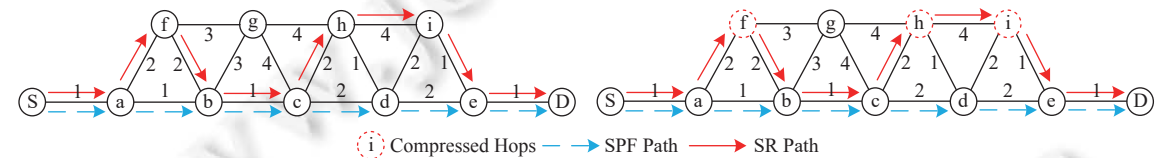


图 5 CARD 算法运行样例

另一类方案是结合多路径路由的特点, 利用路径差异和共同节点压缩技术, 进一步减少 SRH 中冗余的 SID 信息. 文献 [46] 提出了一种基于多维路由差异的 Hop 压缩算法 HCMD. 该算法在保证数据平面转发语义不变的前提下, 找出多条路径汇聚的公共节点, 仅将这些关键节点编码到 SRH 中. 通过减少冗余的 SID, HCMD 算法可以获得尽可能减小的 SRH. 这两种方法不仅具有通用性, 而且可以与其他现有的压缩方法结合使用, 以进一步提高效果.

除了上述方案外, 还有一些其他的研究工作, 从不同角度对 SRv6 路径控制进行了优化和扩展. 文献 [6,47] 则结合 SRv6 BSID 来抽象端到端网络转发路径, 形成了具有差异化特性的统一服务资源池, 服务层可以按需调度差异化服务. 这些方案为实现更灵活、高效的网络服务提供了新的思路.

3.1.2 SRv6 转发平面的软硬件加速技术

在部署 SRv6 网络时, 转发平面的性能瓶颈是一个关键挑战. SRv6 网络的核心转发性能主要取决于骨干网中的核心交换机和主机侧的 SRH 处理性能. 为了充分发挥 SRv6 的优势, 需重点关注核心交换机的硬件优化, 同时辅以主机侧软件优化措施. 以满足不断增长的网络带宽和服务质量需求. 为了应对这一挑战, 业界和学术界的研究人员分别从硬件和软件两个方面提出了优化方案.

在硬件层面, 可编程交换芯片是一种前景广阔的优化方案. 业界领先的芯片厂商如 Broadcom、Intel、Marvell 等纷纷推出了支持 SRv6 的可编程交换芯片, 如 Trident-4、Tofino-2、Prestera CX 8500 等 [48-50]. 这些芯片内置了 P4 可编程引擎, 支持灵活定义 SRv6 转发行为, 并提供了丰富的流水线资源和专用加速单元, 可显著提升 SRv6 转发性能. 例如, Tofino 2 芯片采用了 Elastic Pipe 技术, 可提供高达 12.8 Tb/s 的交换容量和 4.8 Bpps 的数据包处理能力, 足以满足未来 5G 和云数据中心等应用场景的需求.

在学术界也提出了一些 SRv6 转发芯片架构. 文献 [51] 设计了一种可编程的 SRv6 处理器架构, 引入了协议无关的 P4 指令集和对应的执行模型, 支持灵活描述和高效处理 SID 语义. 该架构集成了 SID 解析器、SRH 编辑器等专用硬件单元, 可加速 SRv6 关键操作, 并支持多种 SR 扩展, 具有较强的通用性. 文献 [52] 进一步提出了一种敏捷可定制的网络处理器架构 ChipletNP. 其采用芯粒化技术, 将内存、交换矩阵、专用加速单元等异构资源解耦为独立的芯粒, 并通过高速互联实现灵活组合, 可充分发挥成熟工艺优势, 降低设计难度和成本. 相比传统定制芯片, ChipletNP 可显著提高芯片的研发速度和性价比, 加速 SRv6 网络的更新迭代.

在软件层面, 学术界和工业界也提出了一些优化方案, 作为硬件优化的有益补充. 例如, 基于扩展伯克利包过滤器/快速数据路径 (extended Berkeley packet filter/express data path, eBPF/XDP) 技术的混合 SDN 架构 HIKE^[53], 通过在内核态实现 SRv6 转发, 避免了用户/内核态频繁切换, 降低了系统开销; 基于数据平面开发套件 (data plane development kit, DPDK) 的 SRv6 处理方案^[54]充分利用了其数据平面优化优势, 结合向量包处理 (vector packet processing, VPP) 等高性能虚拟路由器, 能够直接从网卡访问数据包, 显著提升了主机侧 SRH 处理性能.

综上所述, 硬件优化是提升 SRv6 转发平面性能的根本出路. 业界在可编程交换芯片、定制 SRv6 转发处理器等方面取得了一系列研究成果, 显著提高了 SRv6 网络的灵活性、性能和可扩展性. 尽管主机侧 SRH 处理的软件优化方案可以进一步挖掘硬件潜力, 提供灵活编程支持, 但从长远来看, 高性能、低成本、可定制的专用硬件仍将是推动 SRv6 规模化应用的核心驱动力. 未来, 持续突破硬件设计和制造工艺瓶颈, 将是加速 SRv6 网络更新发展的关键所在.

3.1.3 SRv6 性能监测

在实际部署中, SRv6 的性能和效率直接影响其实际应用效果, 高质量的性能测量能够帮助网络运营商深入了解 SRv6 的实际表现, 发现潜在瓶颈、优化网络配置、并确保服务质量. 然而, 由于 SRv6 转发平面引入了全新的 SRH, 传统的基于五元组的流量识别规则难以准确刻画 SRv6 业务语义, 导致现有性能监测手段无法直接适用. 针对这一挑战, 一些研究人员提出对主动测量协议进行 SRv6 特性化改造. 文献 [55] 引入了 STAMP 测量协议, 通过在 SRv6 扩展头中携带测量元数据, 实现了 SRv6 路径的精准时延监控. 设计并开发了 STAMP 会话发送者和会话反射器两个关键组件, 它们分别部署在网络中的不同节点上. 发送者负责发送测试数据包, 并收集由反射器反射回来的数据包中的时序信息, 以此来计算路径的延迟. 该方案保证探测包与实际业务流量的转发路径完全一致, 有效避免了路径不一致导致的测量偏差. 评估结果表明, 基于 eBPF 的方案可以实现高精度测量, 且对转发性能影响很小.

文献 [56] 进一步聚焦 SRv6 关键性能指标的准确实时评估, 提出了 EPM-SR 测量框架. 该框架结合 TWAMP-Light 主动探测和交替标记被动分析, 通过在数据包头部插入 2 bits 或更少的测量字段, 实现了时延、抖动、丢包等多个核心指标的流级统计. 同时, 该框架在数据平面充分利用 gRPC、epoll、IPset 等技术优化处理效率, 当 SID 列表长度小于 8 时使得单个探测节点可支持数百个业务流的并发监控. 仿真结果表明, EPM-SR 与其他应用程序测量结果的误差可控制在 5% 以内. 此外, 当 SRv6 路径的 SID 列表长度不超过 8 时, 该框架可满足大规模监控场景的性能需求.

此外, 文献 [15] 关注 SRv6 转发行为的性能基准测试问题, 开发了 SRPerf 测试框架. 该框架遵循 RFC 2544^[57] 定义的测试方法, 可评估 Linux/VPP 等不同转发面的吞吐量、时延等关键指标. 同时还实现了基于二分搜索的自适应算法, 以用户定义的精度估算 NDR/PDR. CloudLab 平台上的测试结果表明, VPP 能够达到所有 SRv6 端点行为的线包速率, 优于 Linux 方案. SRPerf 为 SRv6 转发性能测试提供了可扩展的通用工具集.

除了主动测量协议的改进, 构建面向 SRv6 全生命周期管理的端到端综合监测平台是另一个重点优化方向. 文献 [58] 提出的 SRv6-PM 架构从数据平面、控制平面和管理平面这 3 个层面入手, 对 SRv6 网络进行全方位性能提升. 其中, 数据平面引入 eBPF 程序在 Linux 内核中实现高效的数据包处理, 在确保数据包线速转发的同时完成时延、丢包等关键指标的实时测量; 控制平面采用 gRPC 等标准南向接口, 灵活下发各类测量任务配置, 实现网络范围内多节点测量行为的统一协调; 管理平面则融合大数据平台, 汇聚海量测量数据, 并通过机器学习算法实现网络性能的多维分析、异常诊断和趋势预测. 实验表明, SRv6-PM 能够以相对较低的时延检测丢包事件, 从而为业务质量保障提供了有力支撑.

3.1.4 性能与效率优化方案的分析与对比

通过对 SRv6 资源优化领域已有工作的系统梳理, 我们可以看到目前的研究主要聚焦于压缩 SID 编码、软硬件加速和性能监测这 3 个方面. 这些工作从不同角度入手, 以期降低 SRv6 的部署开销, 提升网络性能. 纵观这些研究, 可以得到以下几点认识. (1) SRv6 资源优化在本质上是一个多目标权衡的过程, 未来的重点在于如何从全局出发统筹设计, 协同调度不同的优化机制, 实现整体性能最优. (2) 随着网络体系结构的日益多元化, 软硬协同优化将是 SRv6 资源优化的主要方向. 一方面, 需要持续突破硬件设计和制造工艺瓶颈, 提升硬件平台的性能和灵活性; 另一方面, 也需要在软件层面加强与硬件的适配, 充分发挥软件定义的优势, 实现 SRv6 转发行为的灵活编程和实时调度. (3) 性能监测是 SRv6 资源优化不可或缺的一部分, 当前的研究主要致力于改进主动测量协议和构建综合监测平台, 以适应 SRv6 网络的特性. 未来, 性能监测应该与其他优化策略深度融合, 利用实时性能数据动态调整资源配置, 实现 SRv6 网络的整体效率和可靠性提升.

为了直观地比较不同的 SRv6 资源优化方案, 表 3 从核心思想、优化方式、方案优势与存在不足这 4 个维度对代表性的方案进行了归纳. 可以看出, SID 编码压缩、软硬件加速、性能监测这 3 类方案在侧重点上各有不同, 但都以降低资源开销、提升网络性能和效率为根本目标.

表 3 性能与效率优化方案的对比

方案	核心思想	优化方式	方案优势	存在不足
G-SRv6 ^[42]	移除SID列表中重复的公共前缀和参数部分	压缩SID长度	减少开销, 适用于硬件处理	可能干预段路由, 影响转发决策
FDSRM ^[43]	解耦SID功能, 分为寻址管理和路由实现	压缩SID长度	在G-SRv6基础上进一步优化, 压缩效果更好	实现复杂度较高
Micro SID ^[44]	在IPv6地址中编码微指令, 用uSID表示	压缩SID长度	极大地压缩头部空间	损失一定灵活性
CARD ^[45]	编码SR路径与最短路径的差异信息	减少SID数量	通用性强, 可与其他方法结合	计算开销相对较大
HCMD ^[46]	找出多条路径的公共节点, 仅编码关键节点	减少SID数量	充分利用多路径特性, 通用性强	实现复杂度较高
SRv6芯片架构 ^[51]	引入P4模型, 设计专用硬件单元	硬件优化	提高芯片灵活性和通用性	受限于芯片制造工艺和成本
ChipletNP ^[52]	采用芯粒化技术, 异构资源解耦为独立芯粒	硬件优化	提高芯片研发速度, 降低成本	互联架构复杂度高
HIKE ^[53]	引入eBPF/XDP技术, 在内核态实现SRv6转发	软件优化	避免用户态和内核态频繁切换, 降低开销	优化收益较低, 且依赖专有技术框架
DPDK ^[54]	绕过内核处理, 利用DPDK和VPP等技术	软硬协同优化	充分利用硬件加速能力, 适合高速网络	依赖于硬件的处理速度, 且部署成本较高
STAMP ^[55]	在SRv6扩展头中携带测量元数据, 实现精准时延监控	时延测量	探测包与实际业务流量转发路径一致, 避免测量偏差; 基于eBPF实现, 高精度低开销	仅关注时延指标, 监测维度相对单一
EPM-SR ^[56]	结合主动探测和被动分析, 实现多KPI流级统计	链路拥塞	支持时延、抖动、丢包等多个核心指标监测; 充分利用数据平面优化技术, 满足大规模监控需求	SID列表较长时, 性能有所下降
SRv6-PM ^[58]	从数据、控制、管理这3个层面入手, 实现全方位性能提升	业务性能	引入eBPF实现高效测量; gRPC灵活配置测量任务; 大数据和机器学习赋能智能分析	实现复杂度较高, 对设备性能要求较高
SRPerf ^[15]	遵循RFC 2544测试方法, 评估不同转发面的关键性能指标	性能监测	支持Linux/VPP等多种转发面评测; 二分搜索自适应算法高效估算NDR/PDR	测试场景相对单一, 扩展性有待提升

3.2 SRv6 的可靠性与安全性提升策略

SRv6 的特性对网络可靠性和安全性提出了新挑战. 传统故障诊断工具难以适应 SRv6 环境, 导致定位效率和

准确性下降. SRv6 也为攻击者提供可乘之机, 网络信息泄露、SRH 注入^[59]等安全威胁日益凸显. 本节将重点分析 SRv6 在提升可靠性和安全性方面的挑战和研究进展.

3.2.1 故障诊断

在 SRv6 网络故障诊断领域, 传统的定位工具如 Traceroute 和 Ping 也面临诸多挑战. 根本原因在于, SRv6 通过引入灵活的路由转发语义, 打破了原有网络体系下源到目的地址不变的假设. 这导致传统工具所依赖的 ICMP 响应机制难以正常工作. 此外, SRv6 网络中大量应用等价多路径 (equal-cost multi-path, ECMP) 路由等负载均衡技术, 导致不同探测数据包的转发路径频繁变化, 也极大增加了故障定位的难度.

针对 SRv6 故障定位问题, 文献 [60] 提出了一种增强的 IPv6 OAM 机制. 该方案巧妙利用 SRv6 的可编程特性, 为每个 SRv6 数据包分配全局唯一标识. 同时, 结合 eBPF 内核技术实现对数据包转发路径的跟踪和验证. 与传统方案相比, 该机制可精准定位到 SRv6 转发路径上的故障节点, 提高网络故障诊断的效率, 提升了 SRv6 网络的可运维性.

研究人员进一步关注到, 在 SRv6 场景下, 转发平面所面临的安全问题也给故障诊断带来了新的挑战. 其中, 文献 [61] 重点讨论了一种新型的 SRv6 黑洞攻击及其检测方法. 文献提出了 SR-BHD 检测框架. 该框架采用被动测量的思路, 通过对网络中转发节点上报的流量计数信息进行实时采集和关联分析, 构建了基于流量守恒定律的网络全局状态视图. 当发现流量异常, 即某些路由路径上出现非预期的丢包时, 即判定为疑似黑洞攻击并定位故障链路. 仿真实验结果表明, SR-BHD 算法在检测 SR 黑洞时表现出了高精度和召回率, 平均精确度达到了 97.22%. 该成果对于构建安全可信的 SRv6 转发平面, 提供了重要的理论参考和实践指导.

3.2.2 安全性分析

在 SR 架构中通过将转发面策略编程能力开放给网络中的各个节点, 打破了传统网络中转发面与控制面的界限, 并由此扩大了网络受到攻击的可能面 (即系统潜在的薄弱点). 分析 SRv6 的行为特征发现, 恶意节点可通过精心构造 SRH, 诱导其他节点泄露核心网络信息. 这些信息一旦被不法分子获取, 可用于实施有针对性的网络拓扑探测和目标流量分析, 带来严重的安全隐患. 由于 SRH 携带了从源到目的完整路径信息, 若中间节点存在安全漏洞, 则可能造成用户通信隐私泄露, 并成为流量劫持和用户画像分析的切入点^[62].

文献 [63] 分析了 SRv6 的新颖转发语义也为 DDoS 攻击提供了可乘之机. 攻击者可滥用 SRv6 的路径灵活指定能力, 轻易将受害者地址伪装成源地址, 向大量支持 SRH 的节点发送探测报文. 这些节点在收到报文后, 会严格执行 SRH 中指定的转发路径, 将海量响应数据发送给受害者, 最终导致受害者的带宽资源被恶意耗尽. 相比传统的 DDoS 反射攻击, 这种基于 SRv6 反射的新型攻击更加隐蔽, 危害性也更大. 根据测算, 当反射节点支持 SRH 处理时, 其放大效果可达 120 倍之多.

除了信息泄露和反射攻击外, SRv6 还面临 SRH 注入、SID 欺骗等诸多安全威胁. 恶意节点可通过向正常数据包中注入虚假 SRH, 劫持流量, 绕过目的地址过滤等安全策略; 上游节点也可能因无法辨别 SID 的真伪, 错将流量引入预设的恶意路径. 这些安全问题的根源在于, 单点异常难以被及时发现和管控, SRv6 架构下网络节点权责划分边界模糊. 因此, 如何在分布式的网络环境中构建行之有效的全局安全防护成为亟待破解的难题.

面对 SRv6 所特有的多样化安全威胁, 研究者们开展了卓有成效的探索. 文献 [64] 提出了一种面向 SRv6 的轻量级网络路径验证机制 SR-TPP. 它要求源节点基于既定转发路径计算一个哈希验证码, 并将其封装在 SRH 中. 转发节点通过验证已处理路径的哈希值, 即可甄别当前 SRH 的合法性, 有效防范中间节点的恶意篡改. 同时, SR-TPP 还引入了变长掩码机制, 仅在 SRH 中携带下一跳节点的完整 SID, 而将后续 SID 进行掩码隐藏. 这种方式在保护路径隐私的同时, 也避免了端到端路径信息的泄露. 仿真实验表明, SR-TPP 能够以较小代价即可获得 SRH 的完整性和隐私性保障.

文献 [65] 通过引入异常行为检测功能, 网络中的流量模式可以被实时监测, 及时发现如 DDoS 攻击等恶意行为. 这种检测机制结合了主动探测和大数据分析两种手段: 主动探测可以感知全网范围内的 SRv6 节点的异常行为, 而大数据分析则从海量实时流信息中智能提取可疑行为特征. 当检测到异常时, 系统可以采取主动防御措施, 例如通过动态调整 SR Policy, 将恶意流量引导至清洗中心, 从而最大程度地减少对正常业务的影响. 案例研究显示, 这种方案可以将 DDoS 攻击流量降低 90% 以上, 显著提升了 SRv6 网络的整体鲁棒性.

3.2.3 可靠性与安全性提升策略的分析与对比

本节分别从可靠性与安全性的视角,对 SRv6 技术的研究现状进行了系统梳理.可以看到,在可靠性方面,一方面通过扩展诊断协议语义,克服了传统诊断工具面向 SRv6 网络的局限性,提升了故障定位的精准度和实时性;另一方面,通过智能化故障检测和关联分析,实现了对 SRv6 转发平面异常的快速发现和准确定位.二者相互配合,初步形成了端到端、全维度的 SRv6 智能诊断技术框架.在面对 SRv6 所特有的安全隐患问题,以 SR-TPP 为代表的主动防御方案通过完善 SRH 验证机制,强化了 SRH 自身的鲁棒性.而以异常行为检测为代表的被动防御方案则着眼于全局,通过引入数据驱动异常分析提升了转发平面的整体免疫力.对比不同防护机制可以看出,局部和全局防护的系统协同将成为未来构建 SRv6 立体安全防御体系的关键所在.在提升防御性能的同时,资源开销的优化也至关重要.这要求未来研究在单点防护与全局协同、主动预防与快速响应、高性能与轻量化实现等方面实现更加精细的权衡.表 4 为 SRv6 的可靠性与安全性提升策略的对比.

表 4 SRv6 的可靠性与安全性提升策略的对比

方案	优化目标	核心思想	优化位置	不足
IPv6 OAM ^[60]	故障诊断	利用SRv6可编程特性,为数据包分配全局唯一标识,跟踪转发路径	精准定位SRv6转发路径上的故障节点,提高诊断效率	实现复杂度较高,引入额外的数据平面开销
SR-BHD ^[61]	黑洞路由	通过流量计数信息的实时采集和关联分析,构建全局状态视图	高精度度和召回率检测定位SR黑洞攻击;为构建安全可信SRv6转发平面提供重要参考	依赖各转发节点的协同配合,部署成本较高
SR-TPP ^[64]	SRH篡改和路径隐私泄露	哈希验证SRH合法性,变长掩码保护路径隐私	有效防范中间节点防篡改,保护用户隐私,链路低开销	引入计算和封装开销,可能影响转发效率
异常检测 ^[65]	DDoS攻击等恶意行为	主动探测和大数据分析检测异常,动态调整策略引流清洗	全网实时感知,大数据提升准确性,主动防御减少影响	算法复杂度高,依赖全局信息实时采集

3.3 演进式部署方案

SRv6 作为未来网络的重要演进方向,通过可编程转发面和精细化转发控制,为传统网络性能优化带来了革新契机.但这种革新也给 SRv6 向传统网络平滑演进带来了挑战.业界普遍认为,运营商在规划 SRv6 商用部署时,不仅要重点评估部署成本、难度、服务质量收益等因素,还要兼顾新老网络的互通和业务的平稳过渡,避免一次性全网升级带来的高额投资压力和潜在业务中断风险,如何制定 SRv6 分阶段演进部署策略已成为运营商亟需攻关的难题.对此,研究者们已经展开了富有成效的探索,提出了一些切实可行的 SRv6 演进式部署方案.

在跨域互联场景下,文献 [66] 提出了一种基于关键节点选取的 SRv6 演进部署策略.其核心思路是在网络拓扑中选取流量汇聚度高的关键节点作为 SRv6 边界路由器,替代传统的 BGP 互联设备,并利用段路由实现端到端的精细化流量调度.这种方法通过最小代价的局部 SRv6 改造,即可在互联链路上实现灵活高效的流量工程,尤其适用于地理位置分散的多数据中心组网.通过整数规划及图模型刻画了 SRv6 部署过程中的流量分配问题.实验结果表明,该方法能显著降低网络最大链路利用率,为逐步过渡到 SRv6 网络提供了理论和技术基础.

针对域内网络的 SRv6 演进部署,文献 [67] 提出了一种联合优化 OSPF 权重和 SR 转发路径的方法 WA-SRTE.该方法巧妙地利用流量调度和拓扑信息之间的内在关联,通过适当调整 OSPF 链路权重,将流量有策略地引导至已完成 SRv6 升级改造的节点和链路,进而利用这些 SRv6 节点实现灵活精细的转发路径优化,最小化网络中的最大链路利用率.此外,针对实际网络中流量需求动态变化的特点,WA-SRTE 还引入深度强化学习技术,实现了面向典型流量模式的自适应部署方案.大规模仿真结果表明,在真实网络流量下,当升级比例达到 20%–40% 时,WA-SRTE 即可获得与全网部署 SR 相媲美的流量工程性能.

除此之外,文献 [68] 提出了一种更具普适性和灵活性的演进式 SRv6 部署框架 SDRO.该方案在全 SRv6 网络上训练一次深度强化学习智能体,然后将训练好的模型应用于不同比例的 SRv6 部署场景,避免了随着 SRv6 节点增加而带来的训练成本剧增问题.SDRO 还引入了关键流量的概念,智能体只优化一部分关键流量,最终由线性规划方法完成路由优化,有效降低了路由优化问题的求解难度.与现有工作相比,SDRO 在大幅降低训练成本的同

时,能够快速生成高质量的 SRv6 部署和路由优化方案.

通过对比可以看出,跨域互联场景中的关键节点策略充分利用了流量分布的不均衡性,通过少量关键节点的升级即可实现显著的端到端性能提升,投资回报率相对较高;而域内组网场景下的联合优化方法从全局视角出发,在时延、利用率等多个性能指标之间展开均衡,对网络资源实现整体优化,但算法复杂度相对较高.而 SDRO 框架针对大规模网络提供了一种通用的演进式部署优化思路,能够以较低的训练成本快速适应不同的部署比例和流量模式.因此,实际 SRv6 部署决策需要充分考虑不同场景的差异性诉求和约束条件,在性能、成本、运维等多目标之间进行系统权衡.

在 SRv6 演进部署方面,针对跨域互联和域内组网两类典型场景,现有研究分别从边界设备升级和网络内部局部升级两个角度,提出了关键节点部署、分阶段升级等演进部署策略.这些研究成果为运营商因地制宜地制定 SRv6 升级路线图提供了重要参考.但从纵向来看,当前研究大多聚焦链路层的性能优化,对上层业务语义的感知还不够,这使得网络升级与业务发展的耦合度不高.未来研究需要进一步强化业务视角,在网络部署的实时性、灵活性方面下功夫,以支持 SRv6 网络能力与业务需求的动态匹配.表 5 为演进式部署方案的对比.

表 5 演进式部署方案的对比

方案	优化目标	核心思想	优化位置	不足
SRv6部署策略 ^[66]	跨域互联	关键节点作为SRv6边界路由器,精细化调度流量	局部改造,高投资回报率,适合多数据中心互联	未考虑性能指标,可能存在单点故障风险
WA-SRTE ^[67]	域内组网	联合优化OSPF权重和SR路径,利用升级节点优化转发	全局均衡多指标,整体优化资源,自适应生成部署方案	算法复杂,实时性和可扩展性待验证
SDRO ^[68]	部署成本	通过优化关键流量,降低了部署的训练成本和优化难度	针对SRv6网络的部署和路由优化进行优化	在实际复杂网络环境中的表现可能受限

4 总结与展望

本文全面梳理了 SRv6 技术的研究现状,聚焦 SRv6 在网络优化、技术创新、安全防护、部署策略等方面的代表性工作.研究表明,SRv6 为网络带来了灵活性和可编程性,但也面临资源开销、性能瓶颈、安全隐患等挑战.学者们从多个角度提出了切实可行的 SRv6 优化方案,在流量工程、服务链等领域展现出显著的性能优势和应用价值,彰显了 SRv6 作为未来网络关键使能技术的优异特性.然而,当前 SRv6 在标准成熟度、产业成熟度等方面仍有不足,亟需各界携手攻坚.

未来,加速 SRv6 标准完善和产业规模化至关重要.应加快推进关键标准制定,构建开放、可信的跨界产业生态,形成成熟的端到端 SRv6 系统解决方案,并在 5G 承载、车联网等场景率先商用,以点带面,促进规模普及.SRv6 将加速与人工智能、垂直行业的融合创新,机器学习、知识图谱等 AI 技术与 SRv6 结合,将优化路径和资源配置,实现故障智能诊断和自愈,提升网络智能化水平.SRv6 也将与车联网、工业互联网等深度融合,通过灵活的编程和服务链能力,提供定制化、高品质的行业应用服务.构建自愈性安全防护体系是 SRv6 持续健康发展的关键.应从架构设计之初入手,在转发平面引入主动防御、异常检测等增强机制,利用区块链、可信计算、隐私保护等新技术构建可信安全基础,并通过灵活编排实现端到端协同联动防护,全面提升 SRv6 网络免疫力.

References

[1] Cisco Public. Cisco annual Internet report (2018–2023) white paper. 2020. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>

[2] David R. IDC. How you contribute to today’s growing datasphere and its enterprise impact. 2019. <https://blogs.idc.com/?s=How+you+contribute+to+today%27s+growing+datasphere+and+its+enterprise+impact>

[3] Filsfils C, Dukes D, Previdi S, Leddy J, Matsushima S, Voyer D. IPv6 segment routing header (SRH). RFC 8754, 2020. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8754>

[4] Filsfils C, Camarillo P, Leddy J, Voyer D, Matsushima S, Li Z. Segment routing over IPv6 (SRv6) network programming. RFC 8986,

2021. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8986>
- [5] Dawra G, Talaulikar K, Raszuk R, Decraene B, Zhuang SW, Rabadan J. BGP overlay services based on segment routing over IPv6 (SRv6). RFC 9252, 2022. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9252>
 - [6] Filsfils C, Talaulikar K, Voyer D, Bogdanov A, Mattes P. Segment routing policy architecture. RFC 9256, 2022. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9256>
 - [7] Ali Z, Filsfils C, Matsushima S, Voyer D, Chen M. Operations, administration, and maintenance (OAM) in segment routing over IPv6 (SRv6). RFC 9259, 2022. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9259>
 - [8] Psenak P, Filsfils C, Bashandy A, Decraene B, Hu Z. Is-is extensions to support segment routing over the IPv6 data plane. RFC 9352, 2023. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9352>
 - [9] Filsfils C, Kohno M, Voyer D. Segment routing over IPv6 for the mobile user plane. RFC 9433, 2023. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9433>
 - [10] Li ZB, Hu ZB, Talaulikar K, Psenak P. OSPFv3 extensions for segment routing over IPv6 (SRv6). RFC 9513, 2023. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9513>
 - [11] Graf T, Claise B, Francois P. Export of segment routing over IPv6 information in IP flow information export (IPFIX). RFC 9487, 2023. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9487>
 - [12] Dawra G, Filsfils C, Talaulikar K, Chen M, Bernier D, Decraene B. Border gateway protocol-link state (BGP-LS) extensions for segment routing over IPv6 (SRv6). RFC 9514, 2023. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9514>
 - [13] Ventre PL, Salsano S, Polverini M, Cianfrani A, Abdelsalam A, Filsfils C, Camarillo P, Clad F. Segment routing: A comprehensive survey of research activities, standardization efforts, and implementation results. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 182–221. [doi: [10.1109/COMST.2020.3036826](https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3036826)]
 - [14] Lebrun D, Bonaventure O. Implementing IPv6 segment routing in the linux kernel. In: Proc. of the 2017 Applied Networking Research Workshop. Prague Czech: ACM, 2017. 35–41. [doi: [10.1145/3106328.3106329](https://doi.org/10.1145/3106328.3106329)]
 - [15] Abdelsalam A, Ventre PL, Scarpitta C, Mayer A, Salsano S, Camarillo P, Clad F, Filsfils C. SRPerf: A performance evaluation framework for IPv6 segment routing. IEEE Trans. on Network and Service Management, 2021, 18(2): 2320–2333. [doi: [10.1109/TNSM.2020.3048328](https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3048328)]
 - [16] Cisco. Release notes for cisco ASR 9000 series routers, IOS XR release 7.9.21. 2023. <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/routers/asr9000/software/asr9k-r7-9/general/release/notes/b-release-notes-asr9000-r7921.html>
 - [17] Arrcus. The ArcOS: Segment routing (SRv6). San Jose: Arrcus, 2022. https://arrcus-admin.prod.unomena.io/media/documents/Arrcus_SRv6_Solution_Brief.pdf
 - [18] Nishizawa H, Ishida W, Sone Y, Tanaka T, Kuwabara S, Inui T, Sasai T, Tomizawa M. Open whitebox architecture for smart integration of optical networking and data center technology [invited]. Journal of Optical Communications and Networking, 2021, 13(1): A78–A87. [doi: [10.1364/JOCN.403205](https://doi.org/10.1364/JOCN.403205)]
 - [19] Renl B, Guo DK, Tang GM, Wang WJ, Luo LL, Fu XM. SRUF: Low-latency path routing with SRv6 underlay federation in wide area network. In: Proc. of the 41st IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems. Washington: IEEE, 2021. 910–920. [doi: [10.1109/ICDCSS1616.2021.00091](https://doi.org/10.1109/ICDCSS1616.2021.00091)]
 - [20] Cianfrani A, Aureli D, Listanti M, Polverini M. Multi agent reinforcement learning based local routing strategy to reduce end-to-end delays in segment routing networks. In: Proc. of the 2023 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops. Hoboken: IEEE, 2023. 1–6. [doi: [10.1109/INFOCOMWKSHPSS57453.2023.10225785](https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPSS57453.2023.10225785)]
 - [21] Miyasaka T, Hei Y, Kitahara T. NetworkAPI: An in-band signalling application-aware traffic engineering using SRv6 and IP anycast. In: Proc. of the 2020 Workshop on Network Application Integration/CoDesign. New York: ACM, 2020. 8–13. [doi: [10.1145/3405672.3405805](https://doi.org/10.1145/3405672.3405805)]
 - [22] Chang H, Hao F, Kodialam M, Lakshman TV, Mukherjee S, Varvello M. Towards network-assisted publish-subscribe over wide area networks. Computer Networks, 2023, 231: 109702. [doi: [10.1016/j.comnet.2023.109702](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109702)]
 - [23] Schiller E, Feng C, Ribeiro RH, Marino F, Buck M, Stiller B. Demo: Utilizing SRv6 to optimize the routing behavior for tactical networks. In: Proc. of the 24th IEEE Int'l Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Boston: IEEE, 2023. 361–363. [doi: [10.1109/WoWMoM57956.2023.00063](https://doi.org/10.1109/WoWMoM57956.2023.00063)]
 - [24] Toyota Y, Mishima W, Kanaya K, Nakamura O. Performance aware egress path discovery for content provider with SRv6 egress peer engineering. IEICE Trans. on Information and Systems, 2023, E106.D(5): 927–939. [doi: [10.1587/transinf.2022NTP0003](https://doi.org/10.1587/transinf.2022NTP0003)]
 - [25] Huang YD, Wang S, Huang T, Liu YJ. Cycle-based time-sensitive and deterministic networks: Architecture, challenges, and open issues. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(6): 81–87. [doi: [10.1109/MCOM.001.2100865](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2100865)]

- [26] Wu WH, Liu J, Huang T. The source-multicast: A sender-initiated multicast member management mechanism in SRv6 networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2020, 153: 102505. [doi: [10.1016/j.jnca.2019.102505](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.102505)]
- [27] Wang LM, Wen F, Cheng KY, Feng X, Shen-Tu H. SMA: SRv6-based multidomain integrated architecture for industrial Internet. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2022, 18(6): 4234–4243. [doi: [10.1109/TII.2021.3131737](https://doi.org/10.1109/TII.2021.3131737)]
- [28] Yan H, Liang JS. SRv6 Overlay, a new magic for dedicated line services. Shenzhen: HUAWEI, 2019 (in Chinese). <https://www.huawei.com/cn/huaweitech/publication/winwin/network-issue-2019/b2b-china-telecom-sichuan/>
- [29] Cisco. SRv6 technology status and deployment update. 2023. <https://www.segment-routing.net/conferences/Paris23-Cisco-Clarence-Filsfils/>
- [30] Lu YG, Wang XW, Yi B, Huang M. The differentiated reliable routing mechanism for 5GB5G. In: *Proc. of the 30th IEEE/ACM Int'l Symp. on Quality of Service*. Oslo: IEEE, 2022. 1–9. [doi: [10.1109/IWQoS54832.2022.9812923](https://doi.org/10.1109/IWQoS54832.2022.9812923)]
- [31] Li SP, Fang J, Chen K. DetNet service share protection scheme based on SRv6. *Journal on Communications*, 2021, 42(10): 32–42 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2021203](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2021203)]
- [32] Nandha Kumar G, Katsalis K, Papadimitriou P, Pop P, Carle G. SRv6-based time-sensitive networks (TSN) with low-overhead rerouting. *Int'l Journal of Network Management*, 2023, 33(4): e2215. [doi: [10.1002/nem.2215](https://doi.org/10.1002/nem.2215)]
- [33] Kuri SK, Eldosouky A, Ibnkahla M. Performance measurement of IoT traffic through SRv6 network programming. In: *Proc. of the 2022 IEEE Int'l Conf. on Communications Workshops*. Seoul: IEEE, 2022. 1–6. [doi: [10.1109/ICCWshops53468.2022.9882143](https://doi.org/10.1109/ICCWshops53468.2022.9882143)]
- [34] Liu JY, Shi XJ, Huang YZ, Yang QH. Selective and on-demand network measurement with SRv6 and INT. *Computer Networks*, 2023, 234: 109914. [doi: [10.1016/j.comnet.2023.109914](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109914)]
- [35] Johnson DS. Local optimization and the traveling salesman problem. In: *Proc. of the 17th Int'l Colloquium Automata, Languages and Programming*. Warwick: Springer, 1990. 446–461. [doi: [10.1007/BFb0032050](https://doi.org/10.1007/BFb0032050)]
- [36] Liu Y, Xia Y, Zhang WT, Jia WQ, Wu JQ. SFANT: A SRv6-based flexible and active network telemetry scheme in programming data plane. *IEEE Trans. on Network Science and Engineering*, 2024, 11(3): 2415–2425. [doi: [10.1109/TNSE.2023.3277000](https://doi.org/10.1109/TNSE.2023.3277000)]
- [37] Wu YT, Zhou JH. Dynamic service function chaining orchestration in a multi-domain: A heuristic approach based on SRv6. *Sensors*, 2021, 21(19): 6563. [doi: [10.3390/s21196563](https://doi.org/10.3390/s21196563)]
- [38] Sun K, Kim Y. LISP-based integrated control plane framework for service function chaining in distributed edge clouds. *IEEE Access*, 2021, 9: 52944–52956. [doi: [10.1109/ACCESS.2021.3069974](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069974)]
- [39] Santos J, van der Hooft J, Vega MT, Wauters T, Volckaert B, De Turck F. SRFog: A flexible architecture for virtual reality content delivery through fog computing and segment routing. In: *Proc. of the 2021 IFIP/IEEE Int'l Symp. on Integrated Network Management*. Bordeaux: IEEE, 2021. 1038–1043.
- [40] Wu CW, Tseng CW, Chen WY, Wu LF, Hsu SC, Yu SW. On-demand service function chain based on IPv6 segment routing. In: *Proc. of the 22nd Asia-Pacific Network Operations and Management Symp.* Tainan: IEEE, 2021. 336–341. [doi: [10.23919/APNOMS52696.2021.9562585](https://doi.org/10.23919/APNOMS52696.2021.9562585)]
- [41] Wei SL, Zhou JH, Chen S. Delay-aware multipath parallel SFC orchestration. *IEEE Access*, 2022, 10: 120035–120055. [doi: [10.1109/ACCESS.2022.3221744](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3221744)]
- [42] Li C, Mao JW, Peng SP, Xia Y, Hu ZB, Li ZB. Application-aware G-SRv6 network enabling 5G services. In: *Proc. of the 2021 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops*. Vancouver: IEEE, 2021. 1–2. [doi: [10.1109/INFOCOMWKSHPS51825.2021.9484608](https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS51825.2021.9484608)]
- [43] Wu WH, Li SJ, Pei AB, Huang T. Behavior-decoupled labeling mechanism in generalized SRv6. In: *Proc. of the 30th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols*. Lexington: IEEE, 2022. 1–6. [doi: [10.1109/ICNP55882.2022.9940352](https://doi.org/10.1109/ICNP55882.2022.9940352)]
- [44] Tulumello A, Mayer A, Bonola M, Lungaroni P, Scarpitta C, Salsano S, Abdelsalam A, Camarillo P, Dukes D, Clad F, Filsfils C. Micro SIDs: A solution for efficient representation of segment IDs in SRv6 networks. *IEEE Trans. on Network and Service Management*, 2023, 20(1): 774–786. [doi: [10.1109/TNSM.2022.3205265](https://doi.org/10.1109/TNSM.2022.3205265)]
- [45] Ma DC, Wang PY, Song LH, Chen WL, Ma L, Xu MW, Cui LZ. A lightweight deployment of TD routing based on SD-WANs. *Computer Networks*, 2023, 220: 109486. [doi: [10.1016/j.comnet.2022.109486](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109486)]
- [46] Song LH, Jin YZ, Wang PY, Ma DC, Chen WL, Cui LZ. Multi-path routing deployment method based on SRv6. In: *Proc. of the 2021 IEEE Int'l Conf. on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking*. New York City: IEEE, 2021. 723–730. [doi: [10.1109/ISPA-BDCloud-SocialCom-SustainCom52081.2021.00104](https://doi.org/10.1109/ISPA-BDCloud-SocialCom-SustainCom52081.2021.00104)]
- [47] Tan ZL, Fu MJ, Liang XB, Huang ZJ, Lan SF, Lu Q. SRv6-based differentiated service framework for IP networks. In: *Proc. of the 2023 IEEE Int'l Conf. on Control, Electronics and Computer Technology*. Jilin: IEEE, 2023. 990–994. [doi: [10.1109/ICCECT57938.2023.10141277](https://doi.org/10.1109/ICCECT57938.2023.10141277)]

- [48] Broadcom Inc. Trident4/BCM56880 Series: High-capacity StrataXGS® trident4 ethernet switch series. 2023. <https://www.broadcom.com/products/ethernet-connectivity/switching/strataxgs/bcm56880-series>
- [49] Intel. Intel® Tofino™ 2—Building on the breakthrough performance and programmability of the previous generation. 2023. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/network-io/intelligent-fabric-processors/tofino-2.html>
- [50] Marvell. Marvell revolutionizes edge data center switching. 2019. <https://www.marvell.com/company/newsroom/marvell-revolutionizes-edge-data-center-switching.html>
- [51] Liu ZP, Lv GF, Wang JC, Yang XR. A programmable SRv6 processor for SFC. *Electronics*, 2022, 11(18): 2920. [doi: 10.3390/electronics11182920]
- [52] Li T, Yang H, Li JN, Liu RL, Sun ZG. ChipletNP: Chiplet-based agile customizable network processor architecture. *Journal of Computer Research and Development*, 2024, 61(12): 2952–2968 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7544/issn1000-1239.202220998]
- [53] Mayer A, Loreti P, Bracciale L, Lungaroni P, Salsano S, Filsfils C. Performance monitoring with H²: Hybrid kernel/eBPF data plane for SRv6 based hybrid SDN. *Computer Networks*, 2021, 185: 107705. [doi: 10.1016/j.comnet.2020.107705]
- [54] Cerrato I, Annarumma M, Risso F. Supporting fine-grained network functions through Intel DPDK. In: *Proc. of the 3rd European Workshop on Software Defined Networks*. Budapest: IEEE, 2014. 1–6. [doi: 10.1109/EWSDN.2014.33]
- [55] Scarpitta C, Sidoretto G, Mayer A, Salsano S, Abdelsalam A, Filsfils C. High performance delay monitoring for SRv6-based SD-WANs. *IEEE Trans. on Network and Service Management*, 2024, 21(1): 1067–1081. [doi: 10.1109/TNSM.2023.3300151]
- [56] Wei WT, Zhang XD, Pan SD, Liu LZ, Wang QY. EPM-SR: Efficient performance measurement framework for KPIs to support segment routing over IPv6 Network. In: *Proc. of the 22nd IEEE Int'l Conf. on Communication Technology*. Nanjing: IEEE, 2022. 1800–1805. [doi: 10.1109/ICCT56141.2022.10072658]
- [57] Bradner S, McQuaid J. Benchmarking methodology for network interconnect devices. RFC 2544, 1999. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc2544>
- [58] Loreti P, Mayer A, Lungaroni P, Lombardo F, Scarpitta C, Sidoretto G, Bracciale L, Ferrari M, Salsano S, Abdelsalam A, Gandhi R, Filsfils C. SRv6-PM: A cloud-native architecture for performance monitoring of SRv6 networks. *IEEE Trans. on Network and Service Management*, 2021, 18(1): 611–626. [doi: 10.1109/TNSM.2021.3052603]
- [59] Deng SH, Gao X, Lu ZB, Gao XP. Packet injection attack and its defense in software-defined networks. *IEEE Trans. on Information Forensics and Security*, 2018, 13(3): 695–705. [doi: 10.1109/TIFS.2017.2765506]
- [60] Shimatani S, Kashiwazaki H, Nobukazu I. SRv6 network debugging support system assigning identifiers to SRH. In: *Proc. of the 47th IEEE Annual Computers, Software, and Applications Conf. Torino*: IEEE, 2023. 518–525. [doi: 10.1109/COMPSAC57700.2023.00075]
- [61] Polverini M, Cianfrani A, Listanti M, Siano G, Lavacca FG, Campanile CC. Investigating on black holes in segment routing networks: Identification and detection. *IEEE Trans. on Network and Service Management*, 2023, 20(1): 14–29. [doi: 10.1109/TNSM.2022.3197453]
- [62] Lo Bascio D, Lombardi F. On SRv6 security. *Procedia Computer Science*, 2022, 201: 406–412. [doi: 10.1016/j.procs.2022.03.054]
- [63] Pădurean VA, Gasser O, Bush R, Feldmann A. SRv6: Is there anybody out there? In: *Proc. of the 2022 IEEE European Symp. on Security and Privacy Workshops*. Genoa: IEEE, 2022. 252–257. [doi: 10.1109/EuroSPW55150.2022.00031]
- [64] Zhou J, Li HW, Wu Q, Lai ZQ, Liu J. SR-TPP: Extending IPv6 segment routing to enable trusted and private network paths. In: *Proc. of the 2020 IEEE Symp. on Computers and Communications*. Rennes: IEEE, 2020. 1–6. [doi: 10.1109/ISCC50000.2020.9219705]
- [65] Feng AH, Francois P, Frenot S, Graf T, Du WT, Lucente P. Daisy: Practical anomaly detection in large BGP/MPLS and BGP/SRv6 VPN networks. In: *Proc. of the 2023 Applied Networking Research Workshop*. San Francisco: ACM, 2023. 8–14. [doi: 10.1145/3606464.3606470]
- [66] Ren BB, Guo DK, Yuan YL, Tang GM, Wang WJ, Fu XM. Optimal deployment of SRv6 to enable network interconnection service. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2022, 30(1): 120–133. [doi: 10.1109/TNET.2021.3105959]
- [67] Tian Y, Wang ZL, Yin X, Shi XG, Guo YY, Geng HJ, Yang JH. Traffic engineering in partially deployed segment routing over IPv6 network with deep reinforcement learning. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2020, 28(4): 1573–1586. [doi: 10.1109/TNET.2020.2987866]
- [68] Liu SY, Lu HC, Chen Y, Chong BL, Luo T. Partial SRv6 deployment and routing optimization: A deep reinforcement learning approach. In: *Proc. of the 2023 IEEE Global Communications Conf. Kuala Lumpur*: IEEE, 2023. 7133–7138. [doi: 10.1109/GLOBECOM54140.2023.10436774]

附中文参考文献

- [28] 严皓, 梁俊生. SRv6 Overlay, 专线业务新魔法. 深圳: 华为, 2019. <https://www.huawei.com/cn/huaweitech/publication/winwin/network->

[issue-2019/b2b-china-telecom-sichuan/](http://www.jos.org.cn/issue-2019/b2b-china-telecom-sichuan/)

- [31] 李硕朋, 方娟, 陈肯. 基于 SRv6 的确定性网络服务共享保护方案. 通信学报, 2021, 42(10): 32–42. [doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2021203](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2021203)]
- [52] 李韬, 杨惠, 厉俊男, 刘汝霖, 孙志刚. ChipletNP: 基于芯粒的敏捷可定制网络处理器架构. 计算机研究与发展, 2024, 61(12): 2952–2968. [doi: [10.7544/j.issn1000-1239.202220998](https://doi.org/10.7544/j.issn1000-1239.202220998)]

作者简介

马东超, 博士, 教授, 主要研究领域为下一代网络, 无线传感器网络, 嵌入式系统.

赵肖河, 硕士, 主要研究领域为天地一体化融合网络, 路由算法.

王晨, 硕士生, 主要研究领域为卫星网路由技术.

黄思恬, 硕士, 主要研究领域为路由算法, 卫星网络.

马礼, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 杰出会员, 主要研究领域为分布式系统, 物联网, 高性能计算.