



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2501685

引用格式:赵成安,陈乐妍,翟雪婷,等.基于SRv6的传输路径优化控制[J].科学技术与工程,2025,25(21):9028-9042.

Zhao Cheng'an, Chen Leyan, Zhai Xueting, et al. SRv6-based transmission path optimization control[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(21): 9028-9042.

基于SRv6的传输路径优化控制

赵成安¹, 陈乐妍¹, 翟雪婷², 陈文龙^{2*}, 赵刚³

(1. 首都师范大学管理学院, 北京 100048; 2. 首都师范大学信息工程学院, 北京 100048;
3. 国网新疆电力有限公司信息通信公司, 乌鲁木齐 830002)

摘要 随着互联网规模扩展和拓扑结构的变化,网络管理面临巨大挑战。分段路由(segment routing,SR)协议,特别是SRv6(segment routing over IPv6),因其高可编程性和可扩展性,成为研究热点。基于SRv6的路径优化控制机制,解决多需求、多场景下特定节点规避与中转问题,以提高网络性能。提出了针对完全部署SRv6网络的路径转移方案,通过分叉路径优化减少路由开销。针对部分部署网络,定义关键路径并设计规避与中转路径转发方案,优化路径转发效率。实验结果表明,完全部署SRv6时,优化方案能有效减小段列表深度,减少路由开销;在部分部署网络中,仅少量SRv6节点即可实现接近全SRv6网络的性能,成功解决特定节点规避与中转问题。研究结果为SRv6在不同网络部署中的应用提供了有效支持。

关键词 分段路由; 域内路由; 路径控制; 段列表压缩

中图分类号 TP393; **文献标志码** A

SRv6-based Transmission Path Optimization Control

ZHAO Cheng-an¹, CHEN Le-yan¹, ZHAI Xue-ting², CHEN Wen-long^{2*}, ZHAO Gang³

(1. School Of Management, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
3. State Grid Xinjiang Power Company Limited Information and Communication Company, Urumqi 830002, China)

[Abstract] With the expansion of the Internet scale and changes in its topological structure, network management is facing huge challenges. Segment routing (SR) protocols, especially SRv6 (segment routing over IPv6), have become a research hotspot due to their high programmability and scalability. The path optimization control mechanism based on SRv6 solves the problem of avoiding and relaying specific nodes in multiple demands and scenarios to improve network performance. A path transfer scheme for fully deployed SRv6 networks was proposed, and the routing overhead was reduced through the optimization of forked paths. For some deployment networks, define the critical path and design the avoidance and relay path forwarding scheme to optimize the path forwarding efficiency. The experimental results show that when SRv6 is fully deployed, the optimization scheme can effectively reduce the depth of the segment list and the routing overhead. In some deployment networks, only a small number of SRv6 nodes can achieve performance close to that of a full SRv6 network, successfully solving the problem of evading and relaying specific nodes. The research results provide effective support for the application of SRv6 in different network deployments.

[Keywords] segment routing; intra-domain routing; routing control; segment list compression

随着互联网规模的指数级增长,网络流量过载、路径优化及安全管控等问题日益凸显。传统网络架构中基于OSPF/IS-IS协议的等价多路径路由(equal-cost multi-path routing, ECMP)存在路径灵活性不足、跨域协同复杂等问题,而多协议标签交换(multi-protocol label switching, MPLS)技术虽能实现流量工程目标,但其信令复杂性和可扩展性缺陷限制了大规模部署。软件定义网络(software defined network, SDN)与分段路由(segment routing over

IPv6, SRv6)技术的结合为网络演进提供了新范式:SRv6通过源路由机制实现路径可编程性,同时兼容IPv6数据平面,有效解决了传统网络的孤岛化问题。然而,SRv6的高开销、硬件处理瓶颈以及混合网络环境下的路径控制难题,成为制约其规模化应用的关键挑战。

传统IP网络中,链路权重优化是实现流量工程的主要手段。Fortz等^[1]提出基于启发式算法的ECMP路径优化模型,通过最小化链路成本函数提

收稿日期:2025-03-13 修订日期:2025-07-08

第一作者:赵成安(1980—),男,满族,黑龙江海林人,博士,讲师。研究方向:互联网体系结构。E-mail:zhaochengan@cnu.edu.cn。

*通信作者:陈文龙(1976—),男,汉族,江西吉安人,博士,教授。研究方向:互联网体系结构。E-mail:chenwenlong@cnu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

升负载均衡能力;Pióro 等^[2]通过动态调整权重实现链路负载再分配。然而,此类方法因 NP-hard 复杂度^[3]及路由震荡风险,难以适应动态网络环境。MPLS 协议通过显式路径(LSP 隧道)增强灵活性,但其依赖 RSVP-TE 信令机制,存在可扩展性差、不支持多路径分担等缺陷^[4-5]。

SRv6 技术凭借源路由特性成为研究热点。Chen 等^[6]提出基于深度强化学习的流量工程方案,动态调整路径分流比以缓解拥塞;Aubry 等^[7]针对故障恢复场景,设计鲁棒不相交路径算法,但未考虑段列表压缩问题。在混合网络部署方面,文献^[8-9]聚焦 SRv6 节点增量部署策略,采用贪心与强化学习算法优化链路利用率,但缺乏对链路权重协同优化的系统性研究。值得注意的是,现有工作多假设全 SRv6 部署环境,忽略传统网络向 SRv6 过渡中的异构兼容性问题。

SRv6 段列表的高开销问题引发广泛关注。Lee 等^[10]提出跳数约束的路径选择算法,但过度限制路径长度导致次优解;文献^[11]通过二维路由策略压缩段列表,但未涉及混合网络场景。在路径编码方法上,文献^[12-13]基于子路径划分策略生成段列表,而文献^[14-15]通过构建辅助图优化线性规划模型。王强等^[16]指出,SRv6 通过其灵活的段路由架构为高可靠网络传输提供了新的解决方案。此外,SRv6 在网络切片^[17]、安全认证^[18]及负载均衡^[19]等场景的应用潜力逐渐凸显,但现有工作多假设全 SRv6 部署环境,对过渡期异构网络兼容性关注不足。周淑怡等^[20]提出的 OpenTDR 方案结合二维路由与 SDN 技术,通过升级传统一维路由转发模式并利用 SDN 的集中式规划,增强了网络流量调度和服务质量控制的灵活性,有效实现了流量均衡与节能目标。

然而,当前方法在 SRv6 完全/部分部署场景下缺乏系统性的节点规避(avoid node, Anode)与中转节点(transfer node, Tnode)路径控制机制,尤其对部分部署网络的路径优化与兼容性平衡研究不足;混合网络中段列表压缩与路径优化的协同性缺失,且动态路由由框架尚未兼顾传输效率与硬件处理能力限制,制约了 SRv6 规模化应用。

现针对 SRv6 网络的完全部署与部分部署场景,提出高效的传输路径控制机制,解决以下核心问题:完全部署 SRv6 环境下的路径优化,结合 SPF 算法,设计基于段列表压缩的节点规避与中转策略,最小化段列表深度以降低传输开销。部分部署 SRv6 的混合网络路径控制,构建关键路径拓扑模型,通过动态路由决策实现传统节点与 SRv6 节点的协同

转发,确保平滑演进。段列表编码效率提升,融合启发式算法与图论方法,优化路径编码策略,兼顾带宽利用率与硬件处理能力限制。从网络架构、路径控制算法及段列表优化 3 个层次展开研究:首先,构建基于 SRv6 的域内路由控制框架;其次,针对完全/部分部署场景分别提出节点规避与中转策略;最后,设计段列表深度压缩算法。预期通过实验验证,以期为 SRv6 网络的规模化部署提供理论支撑与实践参考。

1 面向 SRv6 完全部署网络场景的路径控制机制

在域内网络中,运行着 IGP 协议,使用基于目的地址的最短路径路由传输路径优化算法需要决策网络链路的权重,从而控制网络流量的路径。路由器节点已知全网拓扑,通过最短路径优先(shortest path first, SPF)算法决策流量传输路径。通过链路权重优化来实现流量工程目标并不容易。网络管理者常因为网络流量的负载均衡、安全传输等诉求,要求某些流量必须规避节点(Anode),Anode 可能是重负载节点、低安全级别节点等。另一方面,有些流量必须经过中转节点(Tnode),Tnode 可能可以实现流量安全监控、流量清洗等。

1.1 规避特定节点的应用场景

(1)安全隔离。例如全球性企业、运营商存在高加密流量安全传输需求,域内网络包括低安全路由器设备,此设备不能承载较为敏感的流量,需要暂时在网络中进行隔离,以防止潜在的安全威胁蔓延或为网络管理者提供调查和应对的时间窗口。

(2)性能需求。域内网络中,OSPF 最短路径传输与网络高带宽需求不符合,路由器设备因硬件限制、设计缺陷或意外的高流量负载成为网络性能的瓶颈。这些节点的继续使用可能会导致高延迟、包丢失或其他服务质量问题,特别是在高带宽需求的场景下。

(3)维护升级。网络设备需要定期进行软件升级或硬件维护,在这些维护窗口期间,相关节点可能需要从网络流量传输路径中暂时移除,以避免在更新过程中影响数据传输的稳定性和安全性。

1.2 必经特定节点的应用场景

(1)流量清洗。运营商的全球数据中心互联场景中,网络管理者需确保特定的关键业务流量能够通过预定义的路径进行传输,途径清洗中心进行安全检查或数据加密等处理。对于跨国企业来说,特别是依赖于网络服务和数据中心的企业,建立一个有效的清洗流量机制是保障其全球业务连续性和

数据安全的关键措施。通过在全球范围内部署清洗中心,并利用 SRv6 技术进行精确的流量工程和控制,有效应对复杂多变的网络安全威胁。

(2)性能优化。对于实时应用(如 VoIP 或视频会议),SRv6 策略可以确保流量通过具有低延迟和高带宽的网络路径,即使这些路径不是最短路径。

(3)多云连接:SRv6 可简化多云环境下的流量管理,通过规划流量传输必经某个节点从而精确控制进出各个云服务提供商网络的流量路径,确保最优的性能和成本效率。

1.3 路径控制机制

基于上述场景模型的建立,建立规避策略机制和中转策略机制如下。

(1)规避策略机制。输入:域内网络拓扑信息,SRv6 节点部署位置,特定网络流量的入口、出口,规避节点;处理:实施节点规避策略;输出:针对规避节点路径转移得到的 SR 有序节点序列,指导数据包在网络中的传输。

(2)中转策略机制。输入:域内网络拓扑信息,SRv6 节点部署位置,特定网络流量的入口、出口,中转节点;处理:实施节点中转策略;输出:针对中转节点路径转移得到的 SR 有序节点序列,指导数据包在网络中的传输。

针对特定网络流量,如何在 SR 网络中设置段节点(segment routing node, Snode)才能实现路由路径传输呢?围绕此问题,设计了一种基于 SRv6 的传输路径优化控制机制(a transmission path control mechanism based on segment routing over IPv6, TCSR),重点关注域内路由路径控制。

1.4 研究场景与模型建立

1.4.1 研究场景

假设网络中全部节点运行 SR 协议,从而更灵活、高效地控制网络流量的路由。将支持 IP 和 IGP 协议的网络节点称为 IP 节点,将支持 SR 协议的节点称为 SR 节点。网络环境决定了从网络中获取的信息与数据的范围和质量,直接影响着可采用的网络和流量控制手段。在网络优化的关键环节,首先需要基于网络的具体信息以及网络管理者的意图和实际需求,精确地构建面临的优化问题。然后使用针对性的算法对问题进行求解,得到对应的网络配置。这些配置方案包括但不限于 OSPF 等 IGP 协议的配置、SR 协议的配置,以及其他与流量控制紧密相关的配置策略,控制网络设备的运行和各种流量需求的路由。

对于完全部署 SR 节点的网络场景,网络管理者可控的是网络中运行的协议,特别是路由协议的

配置。图 1 为完全部署 SR 节点的示意图,网络中的所有节点除了支持 IP 协议栈以外,还支持 SR 协议。图 2 中展示了来自 H1 的网络流量经路由(R1→R2→R4→R5)到达 H2(绿色曲线),由于 R3 节点路由器是流量更清晰的设备或者安全管控路由,希望来自 H1 的网络流量经节点路由器 R3 到达 H2(红色曲线)。节点路由器 R3 被称为中转节点。图 3 中,R2 节点路由器是维护节点或者低安全节点,来自 H1 的网络流量希望规避 R2 节点到达 H2(红色曲线)。

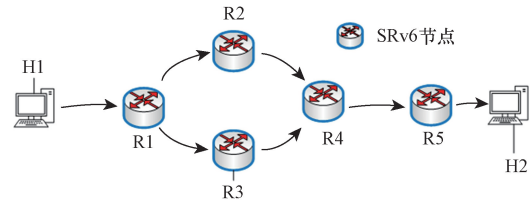


图 1 完全部署 SR 节点的网络
Fig. 1 Networks with fully deployed SR nodes

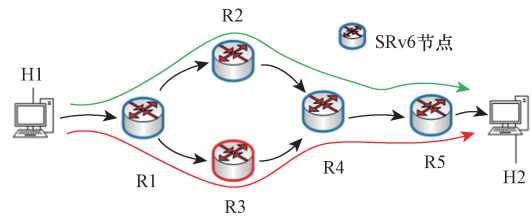


图 2 完全部署 SR 节点的网络中中转特定节点示意图
Fig. 2 Schematic diagram of transit specific nodes in a network with fully deployed SR nodes

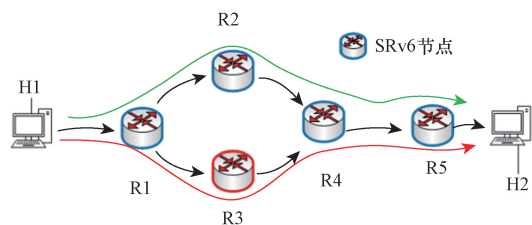


图 3 完全部署 SR 节点的网络中规避特定节点示意图
Fig. 3 Schematic of circumventing specific nodes in a network with fully deployed SR nodes

1.4.2 模型建立

最优路径选择的评价指标体系中有路径长度、时延、带宽、SR 节点开销等因素,应选择合适指标作为评价路径优劣的基准。因此,从传输路径代价、SR 开销两个因素着手分析最优路径选择的关键因素。显然,传输路径代价远大于因封装定量表列产生的开销。选用较为传统的多目标优化解法——分层序列法,将传输路径代价最小作为最重要目标,全过程路径 SRv6 段列表开销最小化作为次要目标,也就是在多条最小代价路径中选取全路

径 SRv6 的 SRH 成本最小化的路径作为最优路径。

若实施节点规避策略,令规避节点为 x , x 是 $Bpath(s, d)$ 中的节点,规避路径为 $Apath(s, d, x)$ 。

最小代价实现路由路径控制为最重要目标,表示为

$$f_1(a) = Cost[HPath(s, d, x)] \quad (1)$$

目标路径中 SRH 成本最小化为次要目标,表示为

$$f_2(a) = Cost(Snode) \quad (2)$$

首先对式(1)求最优解,并找出所有最优解结合 R_0 ,最优值为 f_1^* 。然后根据式(2)在 R_0 内求次要目标的最优解,记这时的最优解集合为 R_1 ,即为最优规避路径集合,最优值为 f_2^* 。其模型如下。

$$\begin{cases} \text{Min}f_1(a) \\ \text{s. t. } a \in \Omega \\ \Omega: \forall Apath(s, d, x) \\ \text{min}f_2(a) \\ \text{s. t. } a \in R_1 = R_0 \cap \{a | f_1(a) = f_1^*\} \end{cases} \quad (3)$$

若实施节点中转策略,令中转节点为 x ,则中转路径为 $Tpath(s, d, x)$ 。

最小代价实现路由路径控制为最重要目标,表示为

$$f_1(b) = Cost[Tpath(s, d, x)] \quad (4)$$

目标路径中 SRH 成本最小化为次要目标,表示为

$$f_2(b) = Cost(Snode) \quad (5)$$

首先根据式(4)求最优解,并找出所有最优解结合 R_0 。然后根据式(5)在 R_0 内求次要目标的最优解,记这时的最优解集合为 R_1 ,即为最优中转路径集合,最优值为 f_2^* 。其模型如下。

$$\begin{cases} \text{Min}f_1(b) \\ \text{s. t. } a \in \Omega \\ \Omega: \forall Tpath(s, d, x) \\ \text{min}f_2(b) \\ \text{s. t. } b \in R_1 = R_0 \cap \{b | f_1(b) = f_1^*\} \end{cases} \quad (6)$$

首先,分析经过中转节点。在完全部署 SRv6 网络中,图 4(a)中,域内所有节点为 SRv6 节点。来自节点 s 的流经最短路径传输到节点 d ,希望 $F_{s \rightarrow d}$ (源节点为 s 、目的节点为 d 的流)经过中转节点 Tnode 到达目的节点。显然,将 Tnode 作为段节点 Snode,中转路径包含 s 到 Tnode 以及 Tnode 到 d 的 2 段最优路径,从而实现以最小代价引导流经中转节点 Tnode 的目标。因此,全 SR 网络中的中转路径为

$$Tpath(s, d, Tnode) = \{s, Tnode, d\} \quad (7)$$

在所研究流的入口处将 Tnode 以及 d 的 SID

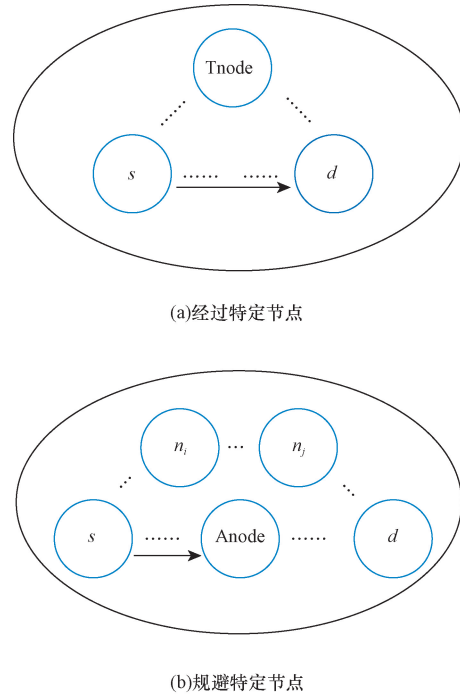
(segment ID)封装到扩展报头中,引导流从源节点 s 经最短路径传输到中转节点 Tnode,再从 Tnode 经最短路径到达目的节点 d 。域中传输路径上除 Snode 外其他节点按照正常 IPv6 报文处理流程,在以最小代价引导流的前提下尽可能段列表开销最小化,减少 SR 标签负载。

$$Apath(s, d, Anode) = \{s, \dots, n_i, \dots, n_j, \dots, d\} \quad (8)$$

显然,为实现研究目标,以最小代价实现流的传输,应当进一步优化 $Apath(s, d, Anode)$ 规避路径,尽可能利用较少的 SR 节点,减少由于 SRH 而增加的额外开销。

其次,分析绕过规避节点。在图 4(b)中,来自节点 s 的流经最短路径传输到节点 d ,希望 $F_{s \rightarrow d}$ 绕过规避节点 Anode 到达目的节点。模型思路是通过将原有网络拓扑中将目标节点即规避节点以及规避节点的直连链路去除构建新的网络拓扑,在此基础上,构建源节点 s 到目的节点 d 的最短路由路径。

设计了基于分段路由的传输路径路由控制模型,以经过中转节点或绕过规避节点。本文模型主要是处理单一节点的路由设计问题。对于多节点、单一链路、多链路的,可在所提解决方案的基础上进行扩展和实现,如图 5 所示。



黑色圆圈表示普通节点;蓝色圆圈表示 SRv6 节点;虚线表示若干链和链路(蓝色表示链路上存在 SRv6 节点)

图 4 完全部署 SRv6 网络中路径转移示意图

Fig. 4 Schematic of path transfer in a fully deployed SRv6 network

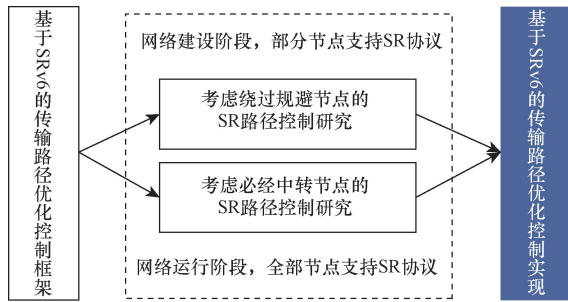


图5 基于SRv6的传输路径控制框架

Fig. 5 SRv6-based transmission path control framework

1.5 中转路径与规避路径选择策略

表1总结了所用的符号及含义。

表1 路径选择策略研究所用的符号及含义

Table 1 Symbols and meanings used in path selection strategy research

符号	含义
$C(\text{path})$	网络路径 path 对应的传输代价
$B\text{path}(m,n)$	节点 m 到 n 的最优路径
$A\text{path}(m,n,x)$	节点 m 到 n 不经过规避节点 x 的最优路径
$T\text{path}(m,n,x)$	节点 m 到 n 经过中转节点 x 的最优路径
$D\text{rt}_{m \rightarrow n}$	节点 m 与节点 n 间存在直接路径
$T\text{path}_{\text{key}}(m,n)$	节点 m 与节点 n 间存在中转关键路径
$A\text{path}_{\text{key}}(m,n)$	节点 m 与节点 n 间存在规避关键路径
$b\text{node}(m,n)$	$T\text{path}_{\text{key}}(m,n)$ 或 $A\text{path}_{\text{key}}(m,n)$ 的初节点
$e\text{node}(m,n)$	$T\text{path}_{\text{key}}(m,n)$ 或 $A\text{path}_{\text{key}}(m,n)$ 的末节点
$D\text{path}(m,n,x)$	$A\text{path}(m,n,x)$ 与 $B\text{path}(m,n)$ 路径不同的有序节点集合
$K\text{path}[b\text{node}(m,n)]$	s 到 $b\text{node}(m,n)$ 的最优路径
$K\text{path}[e\text{node}(m,n)]$	$e\text{node}(m,n)$ 到 d 的最优路径

节点 x 表示上述中转节点 $T\text{node}$ 或者规避节点 $A\text{node}$ 。此场景中,所有节点都支持段路由功能,可识别段标识符并按段节点列表转发报文。

令网络拓扑为 $G(V,E)$, V 为路由节点集合, E 为链路集合, $w(e)$ 表示每条链路 $e \in E$ 的权重,也称作这条路径的代价,以此作为衡量路径优劣的条件。令研究流的源、目的节点为 s 和 d , $s, d \in V$, 任何一条 s 到 d 路径可描述为节点集合 $\{s, N_{1-k}, d\}$ 。在不考虑任何管控策略情况下,该流 $F_{s \rightarrow d}$ 的最优路径为 $B\text{path}(s,d)$, 其传输代价最小。

定义1 在有向图 $G(V,E)$ 中,如果流 $F_{s \rightarrow d}$ 的最优路径为 $B\text{path}(s,d)$, s, d 分别是流 $F_{s \rightarrow d}$ 的入口和出口, $W(w)$ 表示 $B\text{path}(s,d)$ 所经过的链路权重之和。SRv6 有序节点集合为 $N = \{n_0, n_1, \dots, n_i\}$, 则所得最优路径为 $B\text{path}(s,d)$ 的代价为 $C(B\text{path}) = iW(w)$ 。

定义2 $A\text{path}(s,d,x)$ 表示为节点 s 到 d 经过规避节点 x 的最优路径,从 $A\text{path}(s,d,x)$ 的首尾节点 s 和 d 开始,相向查找最后一个与 $B\text{path}(s,d)$ 相

同的节点 V_1, V_2 。 $A\text{path}(s,d,x)$ 中节点 V_1 之后、节点 V_2 之前的有序节点集合记为 $D = \{V_1, \dots, V_2\}$, 则分叉路径 $D\text{path}(s,d,x) = D$ 。显然, $D\text{path}(s,d,x) \subseteq A\text{path}(s,d,x)$ 。假设 $B\text{path}(S,D) = \{S, A, B, C, E, F, D\}$, $A\text{path}(S,D,x) = \{S, A, B, F, H, I, D\}$, 则 $D\text{path}(S,D,x) = \{B, F, H, I, D\}$ 。

若实施节点中转策略,且中转节点为 x ,所有节点均支持 SR 协议,则中转路径包含 s 到 x 以及 x 到 d 的2段最优路径,表示为

$$T\text{path}(s,d,x) = \{s,x,d\} \quad (9)$$

在图6中, $B\text{path}(s,d,x) = \{S, A, B, C, D\}$, 网络流量 $F_{s \rightarrow d}$ 须经过特定中转节点 X 。此时,根据中转策略计算得到 $T\text{path}(S,D,X) = \{S, X, D\}$ 。 $F_{s \rightarrow d}$ 将沿 $\{S, A, E, X, F, C, D\}$ 的路由中转路径到达目的节点 D , 如图7所示,从而完成在全 SR 网络下以最小代价为目标的节点中转需求。

(1) 构建分叉路径。首先在原始拓扑中,计算 s 到 d 的最优路径 $B\text{path}(s,d)$ 。如图8所示, $B\text{path}(S,D) = \{S, A, B, x, C, D\}$ 。如图9所示,在去除规避节点 x 的情况下,计算 s 到 d 的最优路径,即规避路径: $A\text{path}(s,d,x)$ 。示例中 $A\text{path}(S,D,x) = \{S, A, F, G, H, I, C, D\}$ 。优化规

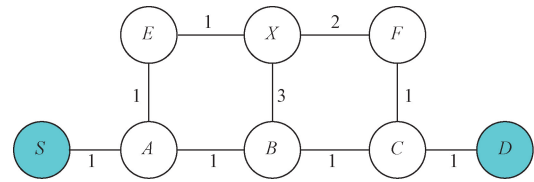


图6 完全部署SRv6节点的网络中必经中转节点X示例
Fig. 6 Example of mandatory transit node X in a network with fully deployed SRv6 nodes

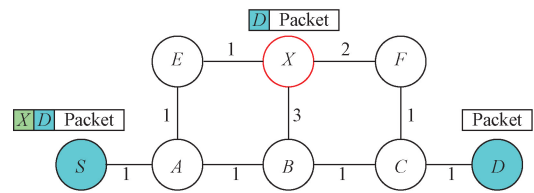


图7 流量经中转节点X进行转发
Fig. 7 Traffic is forwarded through transit node X

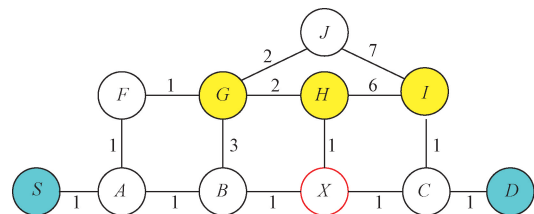


图8 完全部署SRv6节点网络场景的规避节点X示意图
Fig. 8 Schematic diagram of evasive node X for a fully deployed SRv6 node network scenario

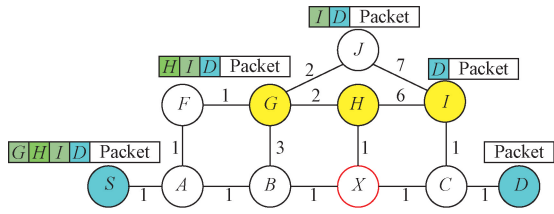


图9 流量规避特定节点 X 进行转发

Fig.9 Traffic circumvents specific node X for forwarding

避路径 $Apath(s,d,x)$, 获得分叉路径 $Dpath(s,d,x) = \{d_0, d_1, \dots, d_k\}$ 。示例中 $Dpath(S,D,x) = \{A, F, G, H, I, C\}$ 。

(2) 优化段列表深度。从 d_1 开始, 往后依次分析 s 到 d_i 的最优路径找到第一个 d_i , 它的上一跳不是 d_{i-1} 。那么, 将 d_{i-1} 加入 SR 有序节点集合。示例中, S 到 H 的最短径中, H 的上一跳不是 G , 则 G 是第 1 个 SR 节点。同理, 继续以 d_{i-1} 为起点, 分析其到 $Dpath(s,d,x)$ 后续节点的最优路径直到 d_k , 确定后续 SR 节点。示例中, 继续以 G 为起点, 分析其到 $Dpath(S,D,x)$ 后续节点的最优路径。得到 H 是第 2 个 SR 节点。重复上述步骤 2、3、4、5, 得到优化后的 $Apath(S,D,x) = \{S, G, H, I, D\}$, $Apath(S,D,x)$ 的 SR 有序节点集合为 $\{G, H, I\}$, $C[Apath(S,D,x)] = 13$ 。根据算法一, 得到 S 到 D 规避节点 x 的 SRv6 路径。

Algorithm 1: Calculation of O $Apath(s,d,x)$

```

Data: Topology, s, d, x
Result: Apath(s, d, x)
1  calculate Bpath(s, d, x);
2   $N \leftarrow s; i \leftarrow 1;$ 
3  when  $i < k$ 
4      calculate Apath(s, d, x),  $Dpath(s, d, x) = \{d_0, d_1, \dots, d_k\};$ 
5      for  $d_i$  in  $Dpath$  do
6          calculate Bpath( $N, d_i$ );
7          if ( $d_i$ .lasthop! =  $d_{i-1}$ ) // Bpath( $N, d_i$ ) 中  $d_i$  的上一跳不是  $d_{i-1}$ 
8              insert  $d_{i-1}$  into O $Apath(s, d, x)$ ;
9               $N = d_{i-1}$ ;
10             continue;
11         end
12     end
RETURN Apath(s, d, x);
    
```

1.6 真实拓扑分析

为了证明所提研究路径控制策略的实际效果, 在实验评估中, 由于解决的是域内 SRv6 的应用问题, 域内的网络连接场景相对简单, 选择以下相对简单的真实网络拓扑, 进行本研究的机制验证: 阿帕

网 (Advanced Research Projects Agency Network, ARPANET)、美国科研和教育网 (America Research and Education Network, Abilene)^[21], 设置拓扑中所有节点均支持 SRv6 协议, 网络链路的权重随机设置验证规避节点规避路径转移策略以及中转节点中转路径转移策略, 并在每个拓扑中选取所需的数量不等的流量样本, 给出相应的随机规避节点以及中转节点。不同拓扑下的每组设置特定得源节点、目的节点, 针对网络拓扑中不同流量样本策略实施后的结果, 可以得出此路径控制机制所得转移路径的代价以及 SRH 中的最小节点集。

拓扑 Abilene、ARPANET 选取实验组如表 2 所示。

实验假设所有节点均支持 SR 协议。在所选择两个网络拓扑下分别选择 10 组源节点、目的节点对, 设置 E 为中转节点, 为了使得网络流量由于某种需求需要经过中转节点 E 。如图 10、图 11 所示, 在实施完全部署 SR 节点的网络的中转节点传输路径优化策略后, 将中转节点段 SID 插入 SRH 中, 与原 OSPF 最短路径代价相比, 增加仅为原来代价的 1.2 倍, 由于托扑结构的不同, 代价开销会随着托扑结构的不同而产生不同, 但是由于 SR 协议的优越性, 仅利用一个 SR 节点便可实现必经特定节点的需求。

在所选择的 Abilene 和 ARPANET 真实拓扑上, 针对源目的节点对随机生成网络流量所需规避的特定节点, 分别统计各实验组下的路径优化后的控制开销。如图 12 所示, 对于实验组拓扑, 规避路径路径优化后, 控制开销可以减少 53% 左右, 段列表深度平均减小 25% 左右。此外, 增加另外两组真实拓扑实验, 完全部署 SR 节点的网络中的规避策略表现仍然较好。

完全部署 SRv6 节点的网络下的节点中转策略和节点规避策略合理利用 SRv6 技术的优势, 与 IGP

表 2 拓扑 Abilene、ARPANET 选取实验组
Table 2 Topology Abilene, ARPANET selected experimental groups

Abilene		ARPANET	
源节点	目的节点	源节点	目的节点
A	B	A	D
A	K	A	M
A	J	A	P
D	H	D	M
D	J	D	P
D	K	B	P
B	E	B	F
B	J	B	N
C	J	G	L
C	K	F	M

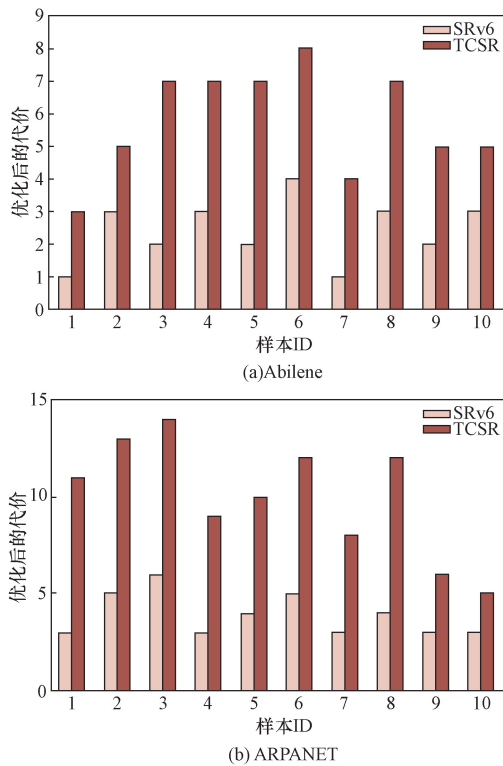


图 10 基于完全 SRv6 节点网络的中转策略实验结论
Fig. 10 Experimental conclusions on transit strategies based on a network of fully SRv6 nodes

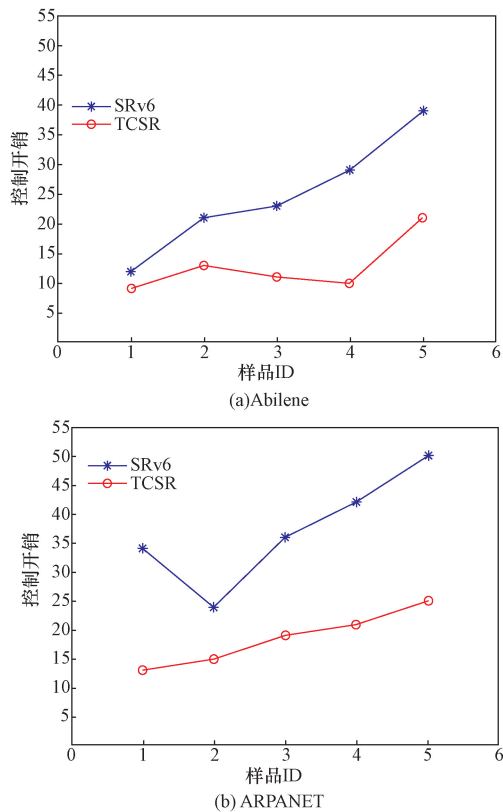


图 11 部署节点规避策略后的段列表深度优化实验结果
Fig. 11 Experimental results of segment list depth optimization after deploying node avoidance policies

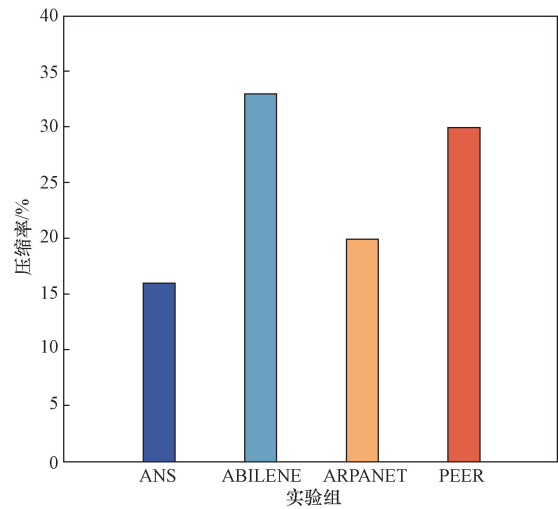


图 12 基于完全 SRv6 节点网络的规避策略实验结果
Fig. 12 Experimental results of avoidance strategies based on a network of fully SRv6 nodes

协议最短路径相结合,优化流量转发路由路径。正向逐条筛选,在段列表中插入关键 SRv6 节点,通过比对 SPF 路径和 SRv6 路径不同段计算出 SRH 最小节点集,从而优化段列表深度。实验表明,实施特定节点规避策略,在选择合适的规避传输路径后,利用较少的 SRv6 节点实现路径优化策略。

2 面向 SRv6 部分部署网络场景的路径控制机制

传统网络过渡到完全 SRv6 网络不是一蹴而就的,目前 SRv6 网络仍处于建设阶段,相关的标准化工作仍在进行中。由于技术复杂性、成本考量、现有基础的兼容性、过渡策略等方面的挑战,网络服务提供商 (internet service provider, ISP) 需要逐步合理化升级现有网络设备,确保平滑过渡且不影响现有服务的提供。在部分部署 SRv6 节点的网络中,流量使用 IGP 协议路由和使用 SR 协议路由两种情况同时存在。因此,首先介绍了 SRv6 部分部署网络场景中的流量转发方式,在分散的 SRv6 节点部署位置已知的情况下,构建必经中转节点的中转路径,在关键路径拓扑基础上构建绕过规避节点的规避路径,优化流量路径,实验分析使用多个经典拓扑验证算法性能,实验结果表明,所提出的面向部分部署 SRv6 网络场景的传输路径控制策略,在一定 SR 部署率的网络中,可以获得与 SR 完全部署网络场景相同的性能,一定程度上减少了网络开销。

2.1 研究场景与问题分析

2.1.1 研究场景

图 13 给出了部分部署 SRv6 节点的网络流量传输示例,即一种混合型 IP/SRv6 网络场景。网络中

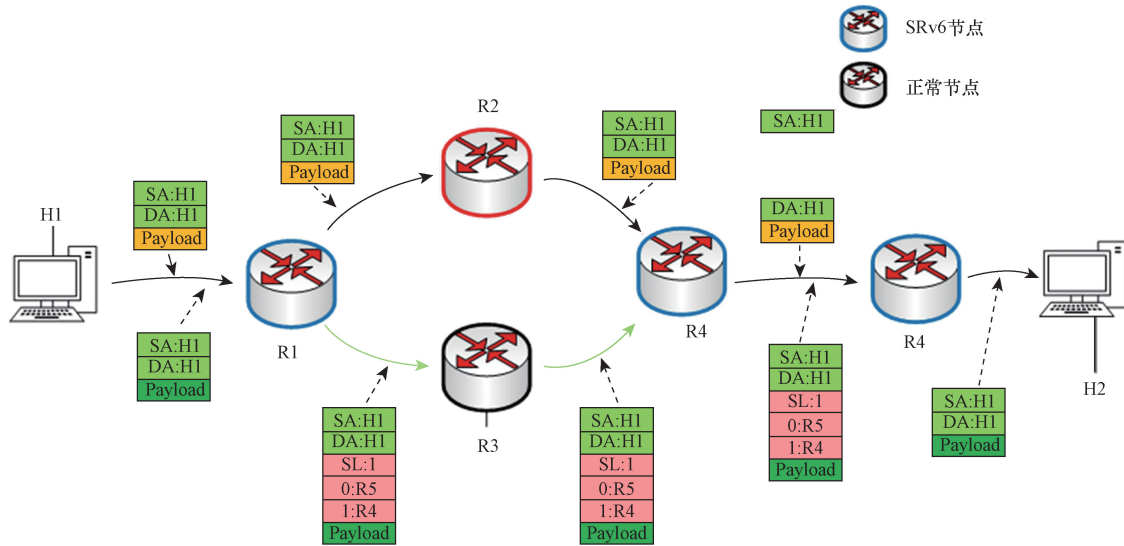


图 13 部分部署 SRv6 节点的 IPv6 网络环境示意图

Fig. 13 Schematic diagram of IPv6 network environment with some SRv6 nodes deployed

的全部节点支持原有的 IP 协议栈,只有部分节点支持 SR 协议。在此网络场景中, H1 需要向 H2 发送报文, SA 代表 IPv6 头部的源地址, DA 代表 IPv6 头部的目的地址, 节点编号用来表示分段路由头中各节点的 SID 和相应的 IPv6 地址, 图中同时给出了 IPv6 头部封装的部分 SRH 信息。节点 R1、节点 R4 和节点 R5 具备 SRv6 能力, 节点 R2 和 R3 是不支持 SRv6 协议的普通节点。来自 H1 的数据包将首先被转发到默认网关, 即 R1。路由协议将通过配置路由表在路由器上建立路由路径。R1 沿着 IGP 最短路径路由 (R1→R2→R4) 转发所有目的地址为 H2 的报文。如果 R2 出现网络故障, 也就是 IGP 最短路径路由上的节点出现网络故障, 希望来自 H1 的报文沿着路径 (R1→R3→R4) 转发。那么, 作为入口 SR 节点的 R1 会添加一个 SRH, SRH 由 3 个段列表和 1 个索引变量 SL 组成, SL 表示当前激活的段。从节点 R1 开始, 数据包使用 SRv6 协议路由。如图 13 所示, R1 将收到的数据包作为新的有效载荷 (payload), 封装在一个带有分段路由头的外层 IPv6 头中, 携带路径信息, 并且初始化剩余段字段值 (segment left, SL), 为 1。同时, 将报文的目的地址替换为 R4 的地址, 指明了段列表 <R4、R5>。随后查找节点 R1 维护的路由信息表, 数据包沿着节点 R1 和节点 R4 的 IGP 最短路由到达节点 R3。当 R3 收到报文, 由于 R3 是不支持 SRv6 协议的普通节点, 不会检查或改变分段路由头, 报文沿 R3→R4 进行转发。R4 节点收到数据包后, 先将分段路由头中的剩余段字段减 1, 再将剩余段字段值 [SL-1] 对应的值 R5 替换外层 IPv6 头中的目的地址。报文到达目的地址 R5, R5 是 SRH 中最后一个段, 因此称 R5

为出口 SR 节点。R5 将 SRH 扩展头弹出, 数据包解封装后, 数据包将会沿 IGP 协议路由路径到达目的节点 H2。上面的例子表明, SRv6 可以结合需求中已有的路由路径, 灵活地对流量进行引导。在入口节点 R1 处, 在数据包的 IPv6 头部和有效载荷中间插入一个带有清楚标志的分段路由头, 清除标志的存在致使分段路由头在节点 R5 删去, 这是封装 SRH 的另一种方式。

表 3 总结了所用的符号及含义。

定义分散式部分部署 SRv6 节点的 IPv6 网络 $G = (V, E)$ 。其中, 所有网络节点 $v \in V$, 运行 IPv6 协议和 OSPFv3 网络通信协议, 网络中部分节点支

表 3 场景研究所用的符号及含义

Table 3 Symbols and meanings used in scene research

符号	含义
$G = (V, E)$	一个网络拓扑, V 表示所有节点集合, E 表示单项链路集合
R	源节点、目的节点以及 G 中 SRv6 节点集合
R_1	节点集合 V 中任意两个节点 a 与 b 的集合
$Bpath(a, b)$	节点 a 到节点 b 的 IGP 最短路径
$Drt_{a \rightarrow b}$	节点 a 到节点 b 的直接路径
$y(v)$	代表节点 v 是否支持 SR 协议的二元变量
Tnode	中转节点
Anode	规避节点
$Tpath_{key}(a, b)$	中转关键路径
$Apath_{key}(a, b)$	规避关键路径
SeQ_D	直接路径节点序列
SeQ_T	$Tpath_{key}(a, b)$ 节点序列
SeQ_A	$Apath_{key}(a, b)$ 节点序列
$bnode_{(a,b)}$	关键路径 $Tpath_{key}(a, b)$ 的初节点
$enode_{(a,b)}$	关键路径 $Apath_{key}(a, b)$ 的初节点
$link_{(a,b)}$	节点 a 到节点 b 的虚拟链路
P	中转关键路径集合

持 SRv6 协议^[22], 二元变量 $y(v)$ 用以表示某网络节点支持 SRv6 协议与否。 E 表示链路集合, G 中链路 $e \in E$ 的权重表示为 $w(e)$ 。实际上, 这种灵活指定路由的能力意味着 SRv6 将为 SDN 带来新的网络可编程性, 但是一次性从纯 IPv6 网络过渡到完整的 SRv6 网络几乎是不可能的, 因此升级部分 IPv6 路由是可预见性的解决方法。利用 SRv6 技术, 在部分部署 SRv6 节点的网络中, 解决路由器节点单点故障问题以及经过目标节点的问题。后续仍会继续讨论在部分部署 SRv6 节点的网络中绕过某个链路、经过某个链路的拓展问题。为了更清晰地构建转发路径, 假设在 IP 协议层面禁止使用 ECMP 路径。

2.1.2 问题分析

定义 3 在有向图 $G(V, E)$ 中, R 为源节点、目的节点以及 SRv6 节点集合。若任意两个节点 $a, b \in R$, 定义 $R_1 = \{a, b\}$, $R_{\text{exp}} = R - R_1$, $\text{Bpath}(a, b) \cap R_{\text{exp}} = \varphi$, 则称节点 a 到 b 存在直接路径, 直接路径表示为 $\text{Drt}_{a \rightarrow b}$, $a \in V'$, $b \in V'$ 。直接路径 $\text{Drt}_{a \rightarrow b}$ 的路径节点序列表示为 SeQ_D 。

定义 4 若 $\text{Tnode} \in \text{Drt}_{a \rightarrow b}$, 则称直接路径 $\text{Drt}_{a \rightarrow b}$ 为中转关键路径 $\text{Tpath}_{\text{key}}(a, b)$, $\text{Tpath}_{\text{key}}(a, b)$ 的源端用初节点 $\text{bnode}(a, b)$ 表示, $\text{Tpath}_{\text{key}}(a, b)$ 的末端用末节点 $\text{enode}(a, b)$ 表示。

首先, 分析混合 IP/SR 网络下的中转路径寻找问题。在图 14 中, 部分节点支持 SRv6。来自节点 s 的流经最短路径传输到节点 d , 希望 $F_{s \rightarrow d}$ 经过中转节点 Tnode 到达目的节点。此示意图中, $V' = \{s, n_{1-k}, d\}$, 关键路径 $\text{Tpath}_{\text{key}}(a, b)$ 集合表示为 $\{n_i, n_j\}$, $\{n_p, n_q\}, \dots$ 。

其中, bnode 可能为源节点 s , enode 可能为目的节点 d , 这并不影响此模型的机制。例如, 在图 15 (a) 中, 段节点的选取可能在中转节点 Tnode 的“前面”, 且仅需一个段节点便可实现最小代价传输。在图 15 (b) 中, 段节点的选取可能在中转节点 Tnode 的“后面”, 且仅需一个段节点便可实现最小代价传

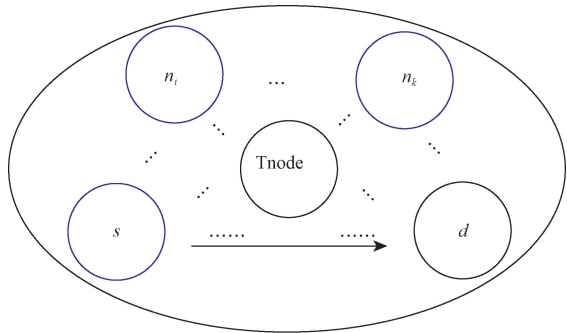
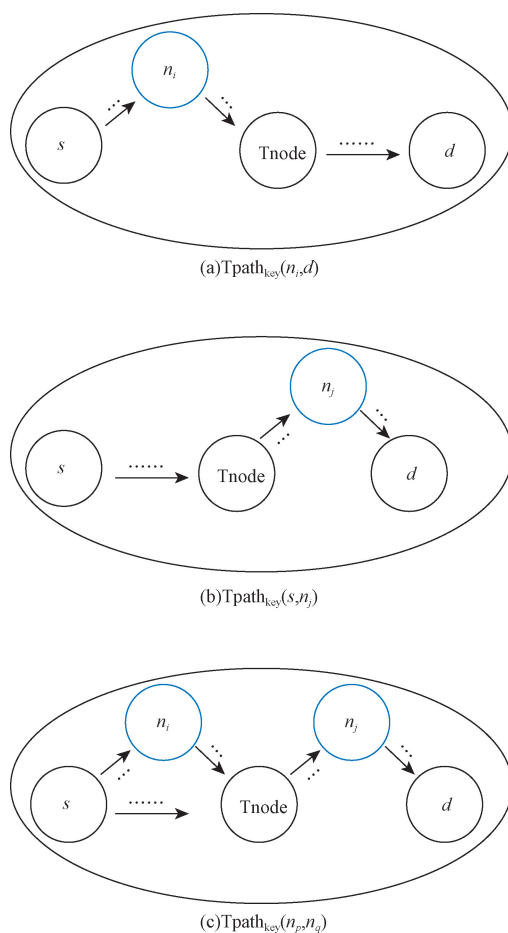


图 14 混合 IP/SR 网络下的经过中转节点示意图
Fig. 14 Schematic diagram of a passing transit node under a hybrid IP/SR network



黑色圆圈表示普通节点; 蓝色圆圈表示 SRv6 节点; 虚线表示若干节点和链路 (蓝色表示链路上存在 SRv6 节点)

图 15 关键路径的初节点和末节点选取的 3 种可能情况

Fig. 15 Three possible cases of initial and final node selection for critical paths

输。在图 15 (c) 中, 段节点的选取可能在中转节点 Tnode 的“前后”, 可表示如下。

$$\begin{aligned} & s, \dots, n_i, \dots, \text{Tnode}, \dots, d \quad \text{bnode} = n_i; \text{enode} = d; \\ & s, \dots, \text{Tnode}, \dots, n_k, \dots, d \quad \text{bnode} = s; \text{enode} = n_j; \\ & s, \dots, n_p, \dots, \text{Tnode}, \dots, n_q, \dots, d \quad \text{bnode} = n_p; \text{enode} = n_q. \end{aligned}$$

为经过中转节点 Tnode , 需要从关键路径 $\text{Tpath}_{\text{key}}$ 节点序列中选择能够实现研究目标的最优关键路径, 具体最优关键路径的选择策略在 2.2 节。在部分部署 SR 网络中, 中转路径可表示为

$$\text{Tpath}(s, d, \text{Tnode}) : s \rightarrow \text{bnode} \rightarrow \text{enode} \rightarrow d \quad (10)$$

bnode 、 enode 是最优关键路径的初、末节点。流在入口节点 s 处将 bnode 、 enode 以及 d 的 SID 封装到扩展报头中, 引导流从源节点 s 经最短路径传输到第一个 SR 节点 bnode , 再从 bnode 经最短路径转发到第二个 SR 节点 enode , 最后到达目的节点 d 。域内流传输过程中, 除节点 bnode 、 enode 外, 不论是普通节点

还是 SRv6 节点,皆按照正常 IPv6 报文处理流程。从而以最小代价引导流的前提下利用尽量少的 SR 节点,减少 SR 标签负载,实现研究目标。显然,在部分部署的 SRv6 网络中,为实现传输路径必须经过 Tnode,此模型仅需一个或两个 SR 节点。

其次,绕过规避节点。在图 16 中,域内部分节点支持 SRv6 协议。来自节点 s 的流经最短路径到达节点 d ,希望 $F_{s \rightarrow d}$ 绕过规避节点 Anode 到达目的节点。

定义 5 在网络拓扑 $G(V,E)$ 中,计算所有规避关键路径 $Apath_{key}$,其初节点集合记为 BN ,末节点集合记为 EN 。 $V' = BN \cup EN$ 。假设 $a,b \in V'$,且存在 $Apath_{key}(a,b)$,则虚拟链路 $link_{(a,b)}$ 连接 a 与 b , E' 为所有虚拟链路集合, $w(a,b)$ 表示虚拟链路 $link_{(a,b)}$ 的成本,即 $Cost[Bpath(a,b)]$,构建关键路径拓扑 $G'(V',E')$ 。

在部分部署 SRv6 网络中,首先应根据图 16 原始网络拓扑,构建关键路径拓扑,关键路径拓扑直观体现了此规避策略可利用的 SR 节点,保证所得路径必定经过规避节点 Anode。在 $G'(V',E')$ 中,与现有 Dijkstra 算法相结合,计算得到 s 到 d 的最短路由路径,从而得到 SR 节点序列。将所得 SR 节点序列封装到 SRH 中,实现在部分部署 SRv6 网络中的节点规避策略。部分部署 SRv6 网络中的节点规避路径可表示为

$$Apath(s,d,Anode):s \rightarrow \dots \rightarrow n_i \rightarrow \dots \rightarrow n_j \rightarrow d \quad (11)$$

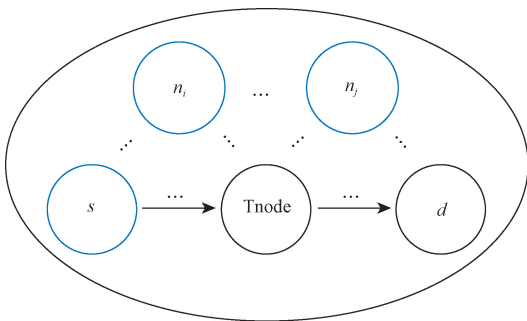


图 16 混合 IP/SR 网络下绕过规避节点示意图

Fig. 16 Schematic diagram of bypassing circumvention nodes under hybrid IP/SR network

2.2 关键路径拓扑与路径最优构建方法

2.2.1 经过中转节点的中转路径选择

在实施节点中转策略中,源节点为 s ,目的节点为 d ,令

$$w_i = w[Kpath(snode_i)] + w(p_i) + w[Kpath(enode_i)] \quad (12)$$

w_i 表示第 i 个关键路径所对应的最优中转关键路径代价, w_i 共由三部分代价构成:①源节点 s 到关

键路径 p_i 的 IGP 最短路径代价 $Kpath(snode_i)$;②源节点 s 到关键路径 p_i 的初节点 $snode_i$ 的 IGP 最短路径代价 $Kpath(snode_i)$;③关键路径 p_i 的末节点 $enode_i$ 到目的节点 d 的 IGP 最短路径代价 $Kpath(enode_i)$ 、关键路径 p_i 代价。

在分散部署 SRv6 节点的网络中,基于必经某个中转节点的问题,假设中转节点为 x ,计算转发路径。

步骤 1 计算 s 到 d 的最短路径 $Bpath(s,d)$,如果中转节点 x 支持 SRv6 协议,则 $Tpath(s,d,x) = \{s,x,d\}$,否则,进入步骤 2。

步骤 2 计算 V' 中节点的所有关键路径 $Tpath_{key}$,记关键路径集合 P 。

在图 17 示例中, $V' = \{S,SR1,SR2,SR3,D\}$ 。

直接路径集合: $\{S,SR1\}, \{S,SR2\}, \{SR1,SR2\}, \{SR1,D\}, \{SR2,SR3\}, \{SR2,D\}, \{SR3,D\}$ 。

关键路径 $Tpath_{key}$ 集合 $P: P_1 = \{SR2,D\}, P_2 = \{SR3,D\}$ 。

步骤 3 计算 s 到每条关键路径的初节点的最优路径 $Kpath(bnode)$,并计算 $Kpath(bnode)$ 的路径代价 $w[Kpath(bnode)]$ 。注意,如果初节点是 s ,则 $w[Kpath(s)] = 0$ 。

示例中,对于 $P_1, Kpath(SR2):S \rightarrow A \rightarrow SR2, w[path(SR2)] = 2$;对于 $P_2, Kpath(SR3):S \rightarrow A \rightarrow SR2 \rightarrow SR3, w[Kpath(SR3)] = 3$ 。

步骤 4 继续计算每条关键路径的末节点到 d 的最优路径 $Kpath(enode)$,并计算 $Kpath(enode)$ 的路径代价 $w[Kpath(enode)]$ 。注意,如果末节点是 d ,则 $w[Kpath(d)] = 0$ 。

示例中,对于 P_1 ,末节点是 $d, w[Kpath(D)] = 0$,同理,对于 $P_2, enode_2 = D, w[Kpath(D)] = 0$ 。

步骤 5 计算关键路径段集合 p 中各关键路径的路径代价,根据式(4),计算各关键路径的最优路径代价 w_i 。

示例中:关键路径 $P_1 = \{SR2,D\}, w_1 = w[Kpath(SR2)] + w(P_1) + w[Kpath(D)]$;关键路径 $P_2 = \{SR3,D\}, w_2 = w[Kpath(SR3)] + w(P_2) + w[Kpath(D)]$ 。

步骤 6 比较各关键路径的最优路径代价 w_i ,最小路径代价 w_{min} 对应的最优路径即为中转路径 $Tpath(s,d,x)$;示例中, $w_{min} = w_1 = 5$,因此中转路径 $Tpath(S,D,X):S \rightarrow SR2 \rightarrow D$ 。

如前文示例,为经过中转节点 X ,通过模型计算,仅需 SR2 一个 SRv6 节点,即可实现源节点 S 到目的节点 D 的最小代价传输。在一个网络拓扑中,

只需要升级部分网络节点支持 SRv6 协议,即可达到与完全部署 SRv6 节点的网络相同的性能。

根据算法二,得到 s 到 d 的中转路径 $Tpath(s, d, x)$, 满足式(6)。

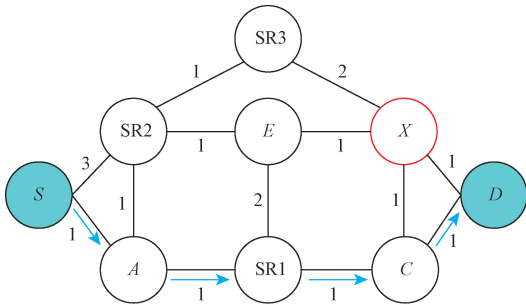


图 17 混合 IP/SR 网络中必经中转节点情况示例图
Fig. 17 Example diagram of a mandatory transit node scenario in a hybrid IP/SR network

Algorithm 2: Calculation of $Tpath(s, d, x)$

```

Data: Topology,  $s, d, x$ 
Result:  $Tpath(s, d, x)$ 
1  $w_{min} = 1\ 000$ ;
2 calculate  $Bpath(s, d, x)$ ;
3 if  $x$  in  $Bpath(s, d, x)$ 
4      $Tpath(s, d, x) = Bpath(s, d, x)$ ;
5 else
6     calculate  $Tpath\_key$  into  $P$  好
7     for  $p_i$  in  $P$  do
8         calculate  $w_i$ 
9         if  $w_i < w_{min}$ 
10             $w_{min} = w_i$ ;
11             $Tpath(s, d, x) = \{s, p_i, d\}$ ;
12        end
13    end
14 end
15 RETURN  $Tpath(s, d, x)$ ;
    
```

2.2.2 绕过规避节点的规避路径选择

在分散部署 SRv6 节点的 IPv6 网络中,为了得到需要绕过规避节点的规避路径,通过 3 个步骤计算:枚举规避关键路径;构造关键路径拓扑;求解目标最优规避路径。

定义 6 Anode 为目标规避节点, $Drt_{a \rightarrow b}$ 表示 a 到 b 存在直接路径,若 $Anode \notin Drt_{a \rightarrow b}$, 则称直接路径 $Drt_{a \rightarrow b}$ 为规避关键路径 $Apath_{key}(a, b)$, 初节点 bnode 为 a , 末节点 enode 为 b , 规避关键路径 $Apath_{key}(a, b)$ 节点序列记为 SeQ_A 。

(1) 枚举规避关键路径。在虚拟网络拓扑 $G' = (V', E')$ 中, V' 表示源节点 S 、目的节点 D 以及 V 中所有支持 SRv6 协议的节点, E' 为相关链路的集合, 且规避节点为 x 。探寻 V' 中的所有规避关键路径 $Apath_{key}$, 记关键路径集合 p , 同时记录每条规避关键

路径的代价。以图 18 示例规避关键路径的选择与关键路径拓扑的构建。在图 18(a) 中,源节点 S 到目的节点 D 的 OSPF 协议路由为 $S \rightarrow A \rightarrow SR2 \rightarrow X \rightarrow E \rightarrow D$ 。

表 4 列举了所有 V' 中任意两节点的 OSPF 路由路径,因为源节点 S 到节点 $SR1$ 的路径序列为 $S \rightarrow A \rightarrow SR1$, 不经过规避节点 X 节点以及 V' 其他中节点, 得到规避关键路径 $Apath_{key}(S, SR1)$ 。由表 4 可知, 所有规避关键路径: $Apath_{key}(S, SR1)$, $Apath_{key}(S, SR2)$, $Apath_{key}(SR1, SR2)$, $Apath_{key}(SR1, D)$ 。

(2) 构造关键路径拓扑。在已知所有规避关键路径的情况下,构造关键路径拓扑,拓扑中包含所有关键路径的初末节点、源节点、目的节点以及两节点间虚拟链路。如图 19(a) 所示, $V' = \{S, SR1, SR2, D\}$, 关键路径集合 P : $P_1 = \{S, SR1\}$, $P_2 = \{S, SR2\}$, $P_3 = \{SR1, SR2\}$, $P_4 = \{SR1, D\}$, 由此获得关键路径拓扑 $G'(V', E')$, 如图 19(b) 所示。生成规避关键路径拓扑,便于在部分部署 SRv6 的 IPv6 网络环境中的规避路径 $Apath(S, D, X)$ 的计算。如图 19(b) 所示的关键路径拓扑中, S 到 $SR1$ 存在虚拟链路,而非真实链路。如表 5 所示为规避关键路径所对应的真实路径。

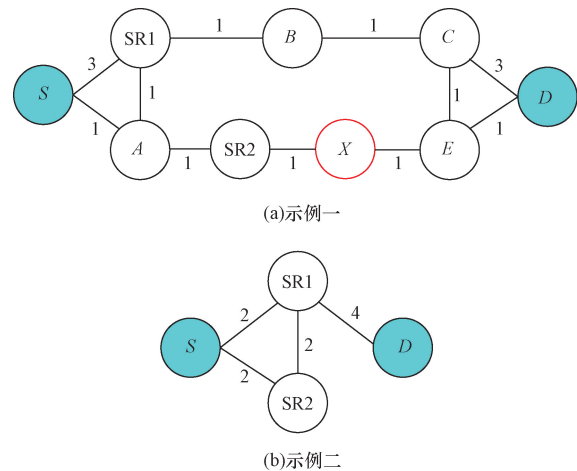


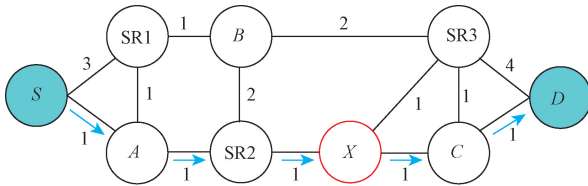
图 18 关键路径与关键路径拓扑示例
Fig. 18 Critical path and critical path topology examples

表 4 部分部署 SRv6 节点的网络中 $G'(V', E')$ 示例
Table 4 Example of $G'(V', E')$ in a network with partially

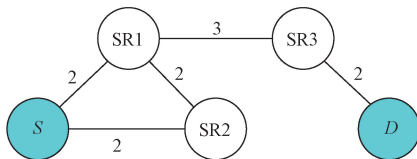
V' 中任意两节点	路径序列	是否为关键路径
$(S, SR1)$	$S \rightarrow A \rightarrow SR1$	关键路径
$(S, SR2)$	$S \rightarrow A \rightarrow SR2$	关键路径
(S, D)	$S \rightarrow A \rightarrow SR2 \rightarrow X \rightarrow E \rightarrow D$	经过 X 节点以及其他 V' 中节点
$(SR1, SR2)$	$SR1 \rightarrow A \rightarrow SR2$	关键路径
$(SR1, D)$	$SR1 \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D$	关键路径
$(SR2, D)$	$SR2 \rightarrow X \rightarrow E \rightarrow D$	经过 X 节点

表 5 规避关键路径所对应的真实路径
Table 5 Circumventing the true path corresponding to the critical path

关键路径	关键路径代价	真实路径
(S,SR1)	2	S→A→SR1
(S,SR2)	2	S→A→SR2
(SR1,SR2)	2	SR1→A→SR2
(SR1,D)	4	SR1→B→C→E→D



(a)示例一



(b)示例二

图 19 流 $F_{s \rightarrow d}$ 经最优规避路径路由过程示例

Fig. 19 Example of a flow $F_{s \rightarrow d}$ routing process via an optimal avoidance path

(3)求解目标最优规避路径在所构造的关键路径拓扑中,根据迪杰斯特拉算法决策源节点到目的节点的最优规避路径 $Apath(s,d,x)$ 。为了更好解释路由过程,给出图 19 示例。直接路径集合: $\{S, SR1\}, \{S, SR2\}, \{SR1, SR2\}, \{SR1, SR3\}, \{SR2, SR3\}, \{SR2, D\}, \{SR3, D\}$, 规避关键路径集合 $P: P_1 = \{S, SR1\}, P_2 = \{S, SR2\}, P_3 = \{SR1, SR2\}, P_4 = \{SR1, SR3\}, P_5 = \{SR3, D\}$; 由原始拓扑得到 $V' = \{S, SR1, SR2, SR3, D\}$ 。随后,计算关键路径代价: $w_1 = 2, w_2 = 2, w_3 = 2, w_4 = 3, w_5 = 4$ 。得到关键路径拓扑 $G'(V', E')$, 根据迪杰斯特拉算法计算 S 到 D 的 $Apath(S, D, X) = \{S, SR1, SR3, D\}, C[Apath(S, D, X)] = 7$ 。接下来讲解 $F_{s \rightarrow d}$ 的路由过程。流 $F_{s \rightarrow d}$ 从源节点 S 出发,并沿着节点 S 到节点 D 的 IGP 最短路径进行路径传输,因此数据包沿路径 $S \rightarrow A \rightarrow SR1$ 到达了节点 $SR1$ 。此后,数据包使用 SR 协议路由, SRv6 段列表为 $(SR1, SR3)$ 。数据包依次经过段列表,到达节点 $SR3$,随后数据包使用 IGP 协议路由到达目的节点 D 。基于混合 IP/SRv6 网络的针对特定节点的规避策略算法描述如下。

Algorithm 3: Calculation of $Apath(s,d,x)$

```

Data: Topology, s, d, x
Result: Apath(s, d, x)
1 calculate Bpath(s, d, x)
2 if x not in Bpath(s, d, x)
3     Apath(s, d, x) = Bpath(s, d, x);
4 else
5     calculate Apath_key into P;
6     calculate  $w_i$  into W;
7     calculate Apath(s, d, x) in  $G'(V', E')$  with Dijkstra
Algorithm;
8 end
9 return Apath(s, d, x);
    
```

2.3 实验分析

基于 Microsoft Visual Studio 2010 开发环境,采用 C++ 编程语言进行实验代码编写和测试,在拓扑 Abilene、ARPANET、Peer1、ANS 上进行 TCSR 策略的拓扑分析。拓扑 ANS 共有 17 个节点、22 条链路,拓扑 Abilene 共有 11 个节点、13 条链路,拓扑 Peer1 共有 16 个节点、20 条链路,拓扑 ARPANET 共有 16 个节点、18 条链路,网络链路的权重随机设置。ANS 拓扑设置 SRv6 不同部署下的节点分布情况如图 20 所示。

首先,在上述真实拓扑中验证基于混合 SR/IP 的网络环境中经过特定中转节点的路径转移策略。单一拓扑下随机选取了 3 组源节点-目的节点对,如表 6 所示。单一节点对下验证了不同部署下策略的表现情况,如图 21 所示。

其次,同样在上述真实拓扑中验证基于混合 SR/IP 的网络中绕过规避节点的规避策略。单一拓扑下随机选取了 3 组源节点-目的节点对,如表 7 所示。单一节点对下验证了不同部署下策略的表现情况,规划更优规避路径,如图 22 所示。

验证结果表明,仅部署部分 SRv6 节点便可达到与完全 SRv6 节点的 IPv6 网络同样的路径优化效果。与发生规避意图前的 IGP 最短路径长度相比,为最短路径代价的 1.6 倍左右,而随着网络中 SRv6 节点的增多,效果更好。基于上述拓扑以及源目的

表 6 中转策略下的 4 个拓扑选取实验组的源节点-目的节点对

Table 6 The four topologies under the transit strategy select the source-destination node pairs of the experimental group

ANS		ARPANET		Abilene		Peer1	
源	目的	源	目的	源	目的	源	目的
A	D	A	D	A	D	A	P
D	M	A	N	A	G	L	P
D	Q	D	N	B	K	I	P

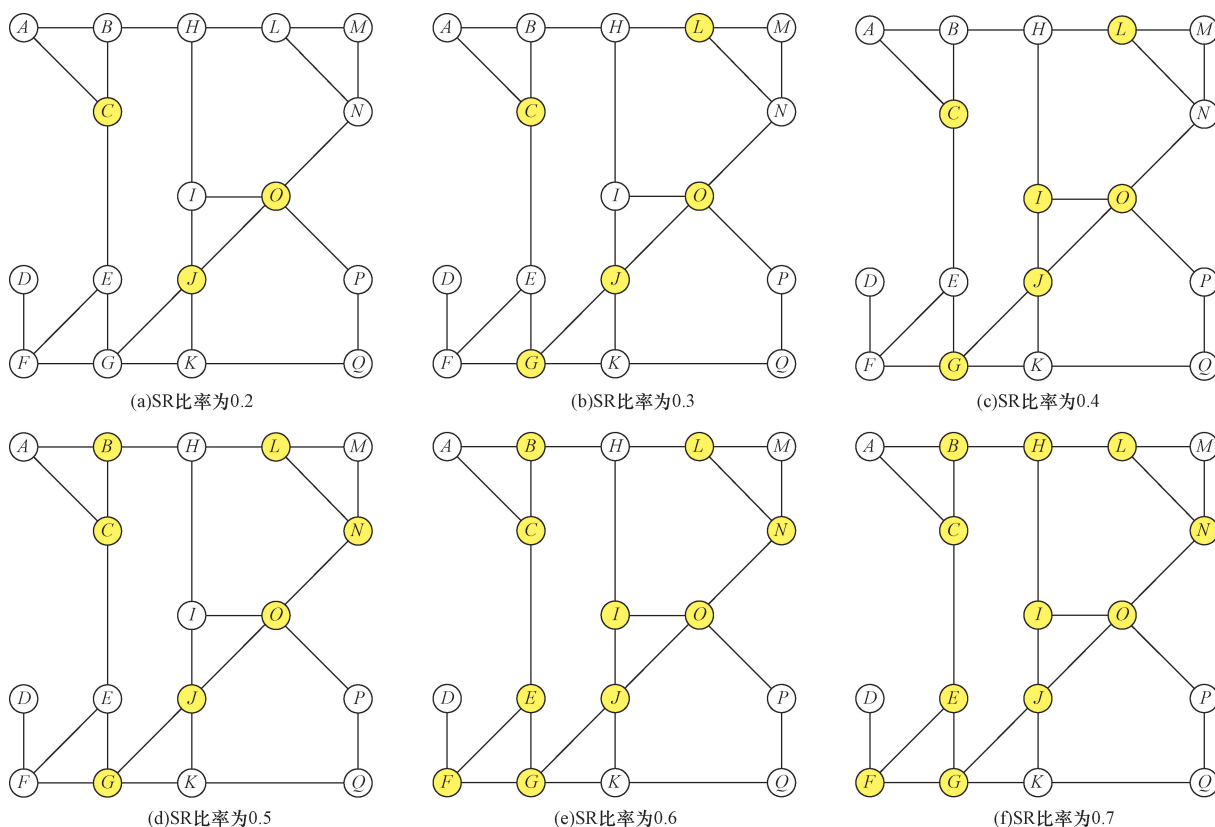


图 20 ANS 拓扑 SRv6 部署情况示例

Fig. 20 Example of an ANS topology SRv6 deployment scenario

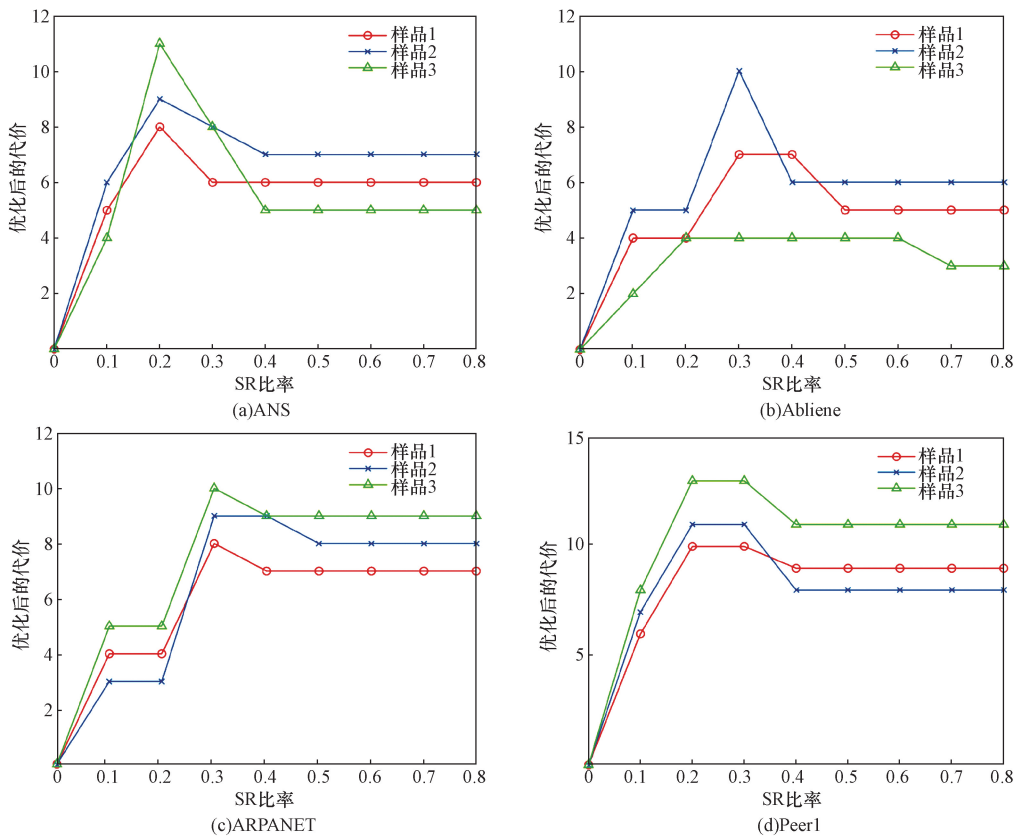


图 21 不同 SRv6 节点部署率下的中转策略表现

Fig. 21 Transit Policy Performance with Different SRv6 Node Deployment Rates

表 7 规避策略下的 4 个拓扑选取实验组的源节点-目的节点对

Table 7 The four topologies under the avoidance strategy are selected as the source-destination node pairs of the experimental group

ANS		ARPANET		Abilene		Peer1	
源	目的	源	目的	源	目的	源	目的
A	Q	A	D	A	D	A	P
D	M	A	G	A	N	A	L
D	Q	B	K	D	N	I	P

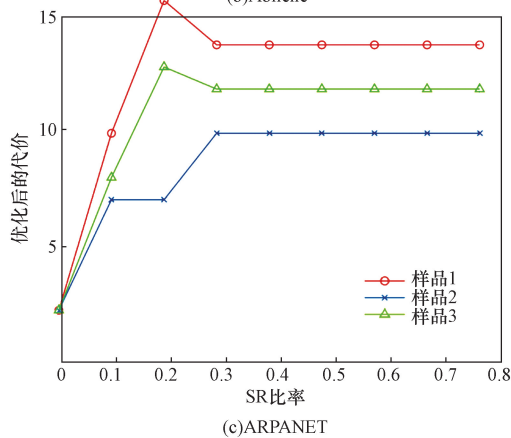
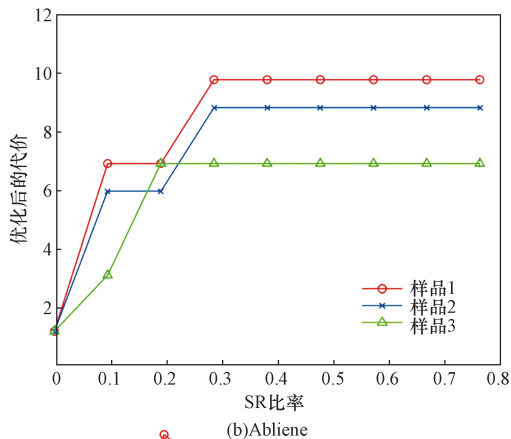
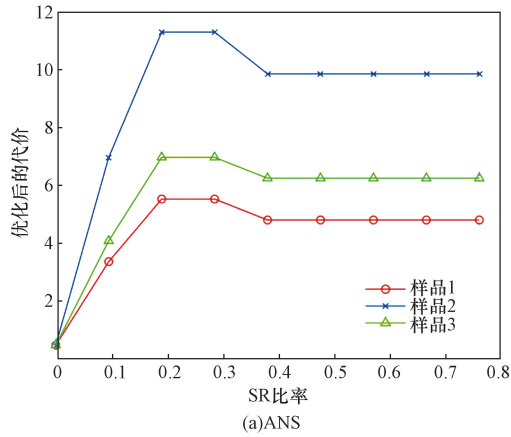


图 22 不同 SRv6 节点部署率下的规避策略表现 Fig. 22 Performance of avoidance strategies with different SRv6 node deployment rates

节对,利用较好的增量部署策略,仅利用较少的 SRv6 节点即可实现路径转移需求。因此,现有传统 IP 网络应采用合适的增量部署方案,逐步升级为部分部署 SRv6 节点的 IPv6 网络。当网络中出现故障节点等绕过规避节点的情况或者需要流量清洗等必经某个中转节点的情况时,仅需几个支持 SRv6 协议的路由器节点便可实现网络管理者意图。

3 结论

在完全部署 SRv6 节点的网络以及部分部署 SRv6 节点的网络中,为了解决由于网络故障、网络流量定向节点转发问题,合理优化 SRv6 开销,从而引导流量实现最优路径路由,提出了基于 SRv6 的路径控制机制的基本框架。针对完全部署 SRv6 节点的网络,提出了在完全部署 SRv6 节点的网络中的路由路径控制策略。该策略优化了必经中转节点的中转路径以及绕过规避节点的规避路径,在实现流量转发目标的基础上,与 OSPF 路由算法路径相结合优化 SR 段列表序列,最小化段列表深度。针对部分部署 SRv6 节点的网络,提出了部分部署 SRv6 节点的网络中路由路径控制策略。该策略通过合理构建关键路径拓扑,实现规避特定转发节点或必经特定中转节点的需求,从而实现更优路由路径选择。通过实验,证明了上述方案的有效性。

参 考 文 献

- [1] Fortz B, Thorup M. Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights[C]//Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Tel Aviv:IEEE, 2000, 2: 519-528.
- [2] Pióro M, Szentesi Á, Harmatos J, et al. On open shortest path first related network optimisation problems[J]. Performance evaluation, 2002, 48(1/4): 201-223.
- [3] Mohiuddin M A, Khan S A, Engelbrecht A P. Fuzzy particle swarm optimization algorithms for the open shortest path first weight setting problem[J]. Applied Intelligence, 2016, 45: 598-621.
- [4] Wang Z, Crowcroft J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 1996, 14(7): 1228-1234.
- [5] Guerin R A, Orda A, Williams D. QoS routing mechanisms and OSPF extensions [C]//IEEE Global Telecommunications Conference. Phoenix: IEEE, 1997, 3: 1903-1908.
- [6] Chen B, Sun P, Zhang P, et al. Traffic engineering based on deep reinforcement learning in hybrid IP/SR network[J]. China Communications, 2021, 18(10): 204-213.
- [7] Aubry F, Vissicchio S, Bonaventure O, et al. Robustly disjoint paths with segment routing[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2018: 204-216.
- [8] Ren B, Guo D, Yuan Y, et al. Optimal deployment of SRv6 to en-

- able network interconnection service[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2021, 30(1): 120-133.
- [9] Luan Z, Li Q, Jiang Y. Poster[C]//2021 IFIP Networking Conference (IFIP Networking). New York:IEEE, 2021: 1-3.
- [10] Lee M C, Sheu J P. An efficient routing algorithm based on segment routing in software-defined networking[J]. Computer Networks, 2016, 103: 44-55.
- [11] Song L, Jin Y, Wang P, et al. Multi-path routing deployment method based on SRv6[C]//2021 IEEE Conference on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking (ISPA/BDCloud/SocialCom/SustainCom). New York: IEEE, 2021: 723-730.
- [12] Giorgetti A, Castoldi P, Cugini F, et al. Path encoding in segment routing[C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). San Diego:IEEE, 2015: 1-6.
- [13] Guedrez R, Dugeon O, Lahoud S, et al. Label encoding algorithm for MPLS segment routing [C]//2016 IEEE 15th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA). Cambridge: IEEE, 2016: 113-117.
- [14] Lazzeri F, Bruno G, Nijhof J, et al. Efficient label encoding in segment-routing enabled optical networks[C]//2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM). Pisa: IEEE, 2015: 34-38.
- [15] Cianfrani A, Listanti M, Polverini M. Translating traffic engineering outcome into segment routing paths: the encoding problem [C]//2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). San Francisco: IEEE, 2016: 245-250.
- [16] 王强, 杨宏. 基于 SRv6 技术实现高可靠网络传输研究[J]. 通信技术, 2025, 58(1): 39-49.
Qiang Wang, Hong Yang. Research on realizing highly reliable network transmission based on SRv6 technology [J]. Communication Technology, 2025, 58(1): 39-49.
- [17] 智伟威, 王访, 张春明, 等. SRv6 在骨干网络切片中的研究和实现[J]. 计算机仿真, 2025, 42(1): 350-353, 376.
Zhi Wei-Wei, Wang Xiang, Zhang Chun-Ming, et al. Research and implementation of SRv6 in backbone network slicing [J]. Computer Simulation, 2025, 42(1): 350-353, 376.
- [18] 王鹏睿, 胡宇翔, 崔鹏帅, 等. 基于可编程数据平面的 SRv6 功能一致性验证机制[J/OL]. 计算机科学, 1-12[2025-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.tp.20241211.1639.018.html>.
Wang Pengrui, Hu Yuxiang, Cui Pengshuai, et al. SRv6 functional consistency verification mechanism based on programmable data plane [J/OL]. Computer Science, 1-12 [2025-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.tp.20241211.1639.018.html>.
- [19] 罗欢, 姜唯, 刘明伟, 等. 基于微服务架构的多资源负载均衡优化方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5): 1965-1971.
Luo Huan, Jang Wei, Liu Mingwei, et al. Multi resource load balancing optimization method based on microservice architecture [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5): 1965-1971.
- [20] 周淑怡, 赵成安, 王灏茗, 等. OpenTDR: 一种网络流量控制方案[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(35): 15152-15162.
Zhou Shuyi, Zhao Chengan, Wang Haoming, et al. OpenTDR: a network traffic control scheme[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(35): 15152-15162.
- [21] Knight S, Nguyen H X, Falkner N, et al. The internet topology zoo[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(9):1765-1775.
- [22] 刘威, 黄萍, 孙凤杰. 基于段路由的 IPv6 网络优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(4): 930-940.
Liu Wei, Huang Ping, Sun Fengjie. Optimization algorithm for IPv6 network based on segment routing[J]. Computer Engineering and Design, 2022, 43(4): 930-940.