



SRv6 头压缩技术方案研究

龚霞¹, 陈华南², 朱永庆¹, 伍佑明¹, 阮科¹

(1. 中国电信股份有限公司研究院, 广东 广州 510630;

2. 中国电信天翼云科技有限公司, 广东 广州 510245)

摘要: 数字化、智能化承载网络成为网络建设与运营的主要目标, 承载协议作为实现网络互联与业务承载的关键技术, 直接决定了网络规模部署能力与业务承载效率。面向一致性体验与差异化融合承载需求, IPv6 段路由 (IPv6-based segment routing, SRv6) 作为 IPv6 演进的关键技术, 成为未来网络承载协议的发展方向。基于 SRv6 技术原理, 剖析了 SRv6 头压缩需求, 并结合业界典型的 SRv6 头压缩方案分析了各方案的优劣, 为 SRv6 技术规模部署提供指引。

关键词: SRv6; 头压缩; 承载协议

中图分类号: TN919

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022282

Research on SRv6 header compression schemes

GONG Xia¹, CHEN Huanan², ZHU Yongqing¹, WU Youming¹, RUAN Ke¹

1. Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Guangzhou 510630, China

2. China Telecom Cloud Technology Co., Ltd., Guangzhou 510245, China

Abstract: Digital and intelligent carrier network have become the priorities of network construction and operation. As a key technology to realize network interconnection and service carrying, carrier protocol critically decides the network scale and traffic efficiency. Facing the service consistent experience requirements, SRv6 as the most competitive technology of IPv6 evolution, has become the development direction in the future. Combined with the principle of SRv6 technology, the requirements of SRv6 compression were analyzed. Based on the main SRv6 compression schemes in the industry, the advantages and disadvantages of each scheme were analyzed, so as to provide guidance for the large scale deployment of SRv6 technology.

Key words: SRv6, header compression, carrier protocol

0 引言

网络技术的发展以 IP/Ethernet 技术体系为基础, 通过网络架构优化及技术创新, 满足各类应用/业务的承载需求。面向 5G 与云网融合时代, 新型

业务不断涌现, 如云 VR/AR、物联网、工业互联网等。业务多样化发展的同时, 对网络实现各类用户/业务的融合承载与差异化服务等方面也提出了更高要求。双千兆接入^[1]、云网一线互联实现了网络对固、移、云多业务的融合接入^[2], 以及 toB/toC/toH



等差异化业务的一体化承载。SRv6 作为新型承载协议具备 underlay 转发、overlay 业务可编程能力^[3], 可满足网络与业务灵活编排, 具备较好的应用前景, 受到了产业界的广泛关注。

SRv6 基于源路由技术, 辅以分段标识 (segment ID, SID) 编码, 可实现业务及路径可编程。同时, 结合以太虚拟局域网 (Ethernet virtual private network, EVPN) 技术可简化网络协议, 这成为未来 IP 网络承载技术的发展趋势。然而, SRv6 在提升网络灵活性的同时, 也带来了网络承载效率降低的问题, 为此, SRv6 头压缩技术应运而生^[4]。本文对 SRv6 头压缩技术需求进行分析, 探讨业界典型 SRv6 头压缩实现方案, 并基于不同场景对各方案的承载效率进行仿真分析, 为后续 SRv6 技术的规模部署提供参考。

1 SRv6 技术基础

纵观网络技术发展历史, 网络承载技术经历了 4 个发展阶段, 分别为纯 IP 承载阶段、多协议标签交换 (multi-protocol label switching, MPLS) 承载阶段、段路由 (segment routing, SR) 承载阶段和 SRv6 承载阶段。纯 IP 承载阶段以内部网关协议 (interior gateway protocol, IGP) / 外部网关协议 (border gateway protocol, BGP) 为基础, 转发面采用 IP 流量尽力而为的转发方式。MPLS 承载阶段则增加了标签分发协议 (label distribution protocol, LDP) / 基于流量工程扩展的资源预留协议 (resource reservation protocol-traffic engineering, RSVP-TE) 等, 实现了差异化业务承载及流量工程, 进一步丰富了网络应用。随着 SR 技术的发展, 网络技术进入 SR 承载阶段, SR 转发面依然采用 MPLS 标签的转发方式, 但简化了控制面协议, 且基于源路由的承载方式可以更好地适应软件定义网络 (software defined network, SDN) 体系。而 SRv6 则是 IPv6 演进技术创新发展的产物, 控制面基于 IGP/BGP 扩展, 转发面则基于 IPv6

扩展报头实现, 进一步简化了网络承载。

1.1 SRv6 定义

SRv6 技术以 IPv6 报文头为基础, 重新定义了路由扩展报文头分段路由头 (segment routing header, SRH)^[5]封装 SRv6 SID 相关信息。SRH 中通过封装 SID 列表 (Segment List) 实现路径定制。SRv6 SID 采用 IPv6 地址格式, 可用于标识节点、接口及虚拟专用网 (virtual private network, VPN) 等信息。每个 128 bit 的 SID 可划分为 Locator、Function 和 Argument 3 个部分, 其中, Locator 为节点标识, 用于路由寻址; Function 为功能标识, 是实现 SRv6 可编程的关键字段; Argument 为参数字段, 通过携带参数信息可实现功能增强, 为可选字段。

SRv6 SID 基于上述特点, 可在业务报文中显示指定转发路径及 VPN 等业务功能, 简化了设备实现, 提升了网络灵活性。

1.2 SRv6 承载难题

SRv6 基于 SRH 实现网络编程的方式, 在一定程度上增加了报文的开销; 且随着跳数增加, 网络承载效率将大幅降低。

(1) SRv6 报文开销大

SRv6 网络中, 为实现端到端路径定制, 需要封装 SRH 及 Segment List, SRv6 报文的封装长度为: 40 byte (IPv6 头) + 8 byte (SRH 固定头) + 16 × N byte (Segment List)。由此可见, Segment List 长度越大 (即 N 越大), 报文开销越大。例如, 假定载荷为 256 byte, 当 Segment List 长度为 1 时, 开销占比为 20% (开销占比 = 开销 / (开销 + 有效载荷)); 当 Segment List 长度为 10 时, 开销占比为 44.8%。

SRv6 隧道的封装方式根据 SRv6 源节点位置不同分为两种: 封装 (Encaps) 模式和插入 (Insert) 模式。SRv6 隧道封装方式如图 1 所示。若在业务源节点封装 SRv6 报文, 可采用 Insert 模式封装; 若在网络中间节点封装 SRv6 隧道进行引流, 则通常采用 Encaps 模式。

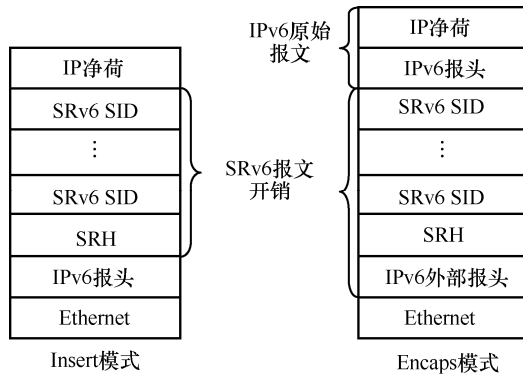


图 1 SRv6 隧道封装方式

以 4 层标签为例, 当采用 SRv6-TE (Encaps 模式)、SRv6-TE (Insert 模式) 及 SR-MPLS-TE (SR-MPLS-TE 采用 MPLS 封装, 每标签长度为 4 byte) 3 种隧道封装方式的情况下, 不同 TE 隧道封装开销占比 (4 层标签) 见表 1。

由表 1 可知, SRv6 隧道封装效率远小于 SR-MPLS 隧道封装效率, 尤其对于小字节报文, SRv6 隧道承载效率非常低。另外, 与 SR-MPLS SID 在报文转发过程中沿路径逐跳弹出标签方式不同的是, SRv6 报文转发时没有弹出操作, 对沿途所有节点压力基本一致, 加剧了对网络承载的压力。

(2) SRv6 报文硬件处理效率低

SRv6 报文转发过程需要硬件负责 SRH 的封装和解封装, 并根据 SID 类型执行对应的动作。通常, 网络处理芯片, 如网络处理器 (network processor, NP) 或专用集成电路 (application specific integrated circuit, ASIC), 处理报文时按照流水线 (pipeline) 或运行至终结 (run to completion, RTC) 方式进行, 然而芯片报文处理单元

加载长度一般为固定字长, 即预留封装空间 (通常小于 144 byte)。SRH 封装即通过此预留封装空间进行加载, 按照 144 byte 长度计算, 一次操作最多封装 6 个 SID。同理, SRH 报文头的操作与解封装也占用了原始报文空间, 需要通过预留固定字长进行处理。因此, 当报文头中压入较多 SID 时, 芯片不能在一个处理周期内完成报文头处理, 导致报文处理效率大幅下降。

(3) SRv6 报文栈深需求

按照国内运营商网络的构建方式, 跨地域长距离信息传输时, 端到端指定路径通常需要 10 跳。以新型城域网架构^[6]为例, 若采用严格路径指定方式, 需要封装 10 层标签 (城域网 3 层+骨干网 5 层+城域网 2 层), 另外, 通常还会封装 1 层业务标签 (如 VPN SID) 实现业务编程。若采用 Reduced 模式, 则 SRH 中不封装源节点的下一跳, 此时只需要封装 9 层标签。

由此可知, 指定端到端严格路径时, SRH 中封装的 Segment List 长度将超过芯片一次处理空间长度, 导致报文处理效率降低。解决设备硬件处理效率低的方法主要有如下 3 种方式。

(1) 提升硬件能力

最容易想到的方式即增加芯片内预留封装空间的大小, 以满足一个周期能完成 SRv6 报文头的处理。按照 11 层 SID 的封装长度, 所需的预留封装空间长度至少为 224 byte。然而, 芯片研发周期长、成本高, 短期内难以满足应用与部署需求。

(2) BSID 方案^[7]

捆绑 SID (binding SID, BSID) 表示一个 SRv6

表 1 不同 TE 隧道封装开销占比 (4 层标签)

隧道类型	封装开销字节/byte	典型字节长度 (有效负荷) /byte			
		256	512	1 024	1 500
SRv6-TE (Encaps 模式)	112	30.43%	17.95%	9.86%	6.95%
SRv6-TE (Insert 模式)	72	21.95%	12.33%	6.57%	4.58%
SR-MPLS-TE	16	5.88%	3.03%	1.54%	1.06%



策略 (SRv6 policy) 路径, 通过 BSID 嵌套即可减少 SRv6 报文封装的 SID 层数, 变相减少了 SRv6 报文栈深, 以提升硬件处理效率, 实现大规模组网。假定报文的转发路径为 R1-R2-R3-R4-R5, 基于 BSID 的报文封装方法如图 2 所示。

然而, BSID 需要在外层再次封装 IPv6 报头及 SRH 报头, 虽然提升了报头处理效率, 但仍存在报文传输效率问题。

(3) SRv6 头压缩方案

SRv6 头压缩方案是压缩 SRH 中 Segment List 长度以减少 SRH 长度, 从而达到提升报文处理和传输效率的目的。SRv6 头压缩方案具有良好的应用前景, 受到了产业界的广泛关注。

2 SRv6 头压缩技术

为解决报文开销大、承载效率低、硬件处理效率低等问题, 产业界提出了多种 SRv6 头压缩方案, 以满足 SRv6 技术规模部署需求。SRv6 头压缩是通过压缩 SID 长度, 从而减小 SRH 中 Segment List 的长度, 达到指定路径效果的同时, 提升信息承载效率。SRv6 头压缩作为 SRv6 规模部署关键技术, 成为产业界主要的热点方向, 国内外网络运营商、设备提供商均提出了相应的头压缩方案。

SRv6 头压缩方案应面向网络/业务部署需求,

充分利用现有网络/设备资源, 以减少实现成本与难度为目标进行设计。综合来看, SRv6 头压缩方案在提高报文承载效率的同时, 应兼顾与 SRv6/IPv6 网络的兼容性, 具备可扩展性, 以满足规模部署需求。

目前, 产业界提出了多种 SRv6 头压缩解决方案, 根据实现方案的思路差异, 主要分为共享方案和映射方案两类。共享方案是指将 SRv6 SID 中的公共前缀 (common prefix, CP) 提取出来以 Block 字段承载, 压缩 SID 仅携带差异部分; 映射方案则通过新定义较短长度的 ID (如 16 bit/32 bit), 并将其与 SRv6 SID 建立映射关系, 在报文转发路径的所有设备上存储映射表项, SRH 中则只需要携带较短的 ID 值即可。两种方案都可减少 SRH 中 Segment List 长度。

共享方案兼容 SRv6, 具有较好的扩展性, 且兼容 SRH 格式, 数据平面易于实现, 控制面只需要通过 SRv6 控制面扩展通告压缩 SID 信息即可; 映射方案压缩效率高, 但不兼容 SRv6, 数据平面也不兼容 SRH 格式, 需要定义新的路由扩展头以实现压缩 SID 的封装, 且控制平面实现复杂, 需要额外维护映射表项。目前, 采用共享方案基本已成为产业界的共识, 典型的共享头压缩方案包括 G-SRv6 压缩 (generalized SRv6 network pro-

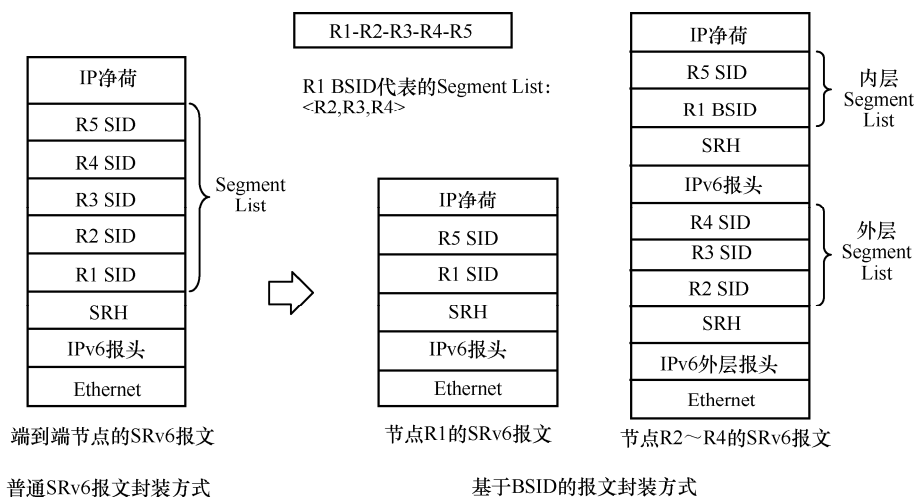


图2 基于 BSID 的报文封装方法

gramming for SRv6 compression, G-SRv6 for Cmpr) [8]和 SRv6 uSID (SRv6 micro segment) [9] 方案, 产业界讨论较多的映射方案则主要为段路由由映射到 IPv6 (segment routing mapped to IPv6, SRm6) [10]方案等。

2.1 G-SRv6 方案

G-SRv6 主要采用“共享前缀”+“差异覆盖”方式实现, 其将 128 bit 的 SRv6 SID 划分为 Block、G-SID 及参数 (Arguments) 字段。共享前缀是指将 Segment List 中每个 SID 冗余的 Common Prefix 移除, 仅携带变化的 G-SID, 大幅减少 SRv6 报头开销; 差异覆盖则指更新 IPv6 报头的目的地址 (destination address, DA) 字段时, 只需要将差异部分的 G-SID 复制到 DA 相应字段。G-SRv6 报文封装格式如图 3 所示。

在 G-SRv6 方案中, 定义了 G-SRv6 容器 (G-SRv6 Container), 标识 128 bit 的封装空间, 因此可携带一个普通 SRv6 SID 或多个压缩 SID, 从而实现 SRv6 SID 与 G-SID 混编。在 DA 字段中,

新定义 SID 索引 (SID index, SI) 为 DA 中 Arguments 字段的最低 2 bit, 标识 G-SID 在 G-SID Container 中的位置。将 SL 与 SI 字段结合, 即可实现 G-SID 定位。

2.2 uSID 方案

uSID 方案主要采用“共享前缀”+“移位出栈”方式实现, 同样将 SID 划分为 uSID Block 及 uSID 列表两部分。共享前缀同样将 Segment List 中公共前缀字段以 uSID Block 承载, 剩余空间仅携带差异的 uSID, 从而减少 SRv6 报头开销; 移位出栈则将 DA 中当前活动 uSID 后的所有比特向前移位一个 uSID 长度, 并在末尾填充 0, 从而实现报文逐跳转发。uSID 方案中 SRv6 报文的封装方式如图 4 所示。

由图 4 可知, 在 uSID 方案中, 通过定义 uSID 载体 (uSID Carrier), 同样可将 Segment List 中每 128 bit 空间进行封装, 携带一个普通 SRv6 SID 或多个压缩 uSID, 从而实现 SRv6 SID 与 uSID 混编。

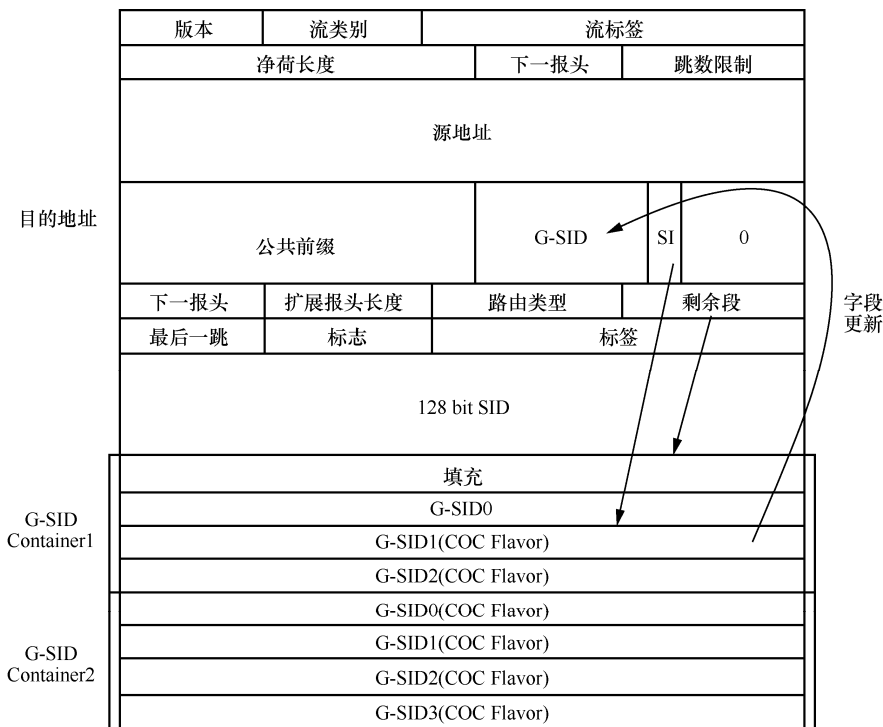


图 3 G-SRv6 报文封装格式

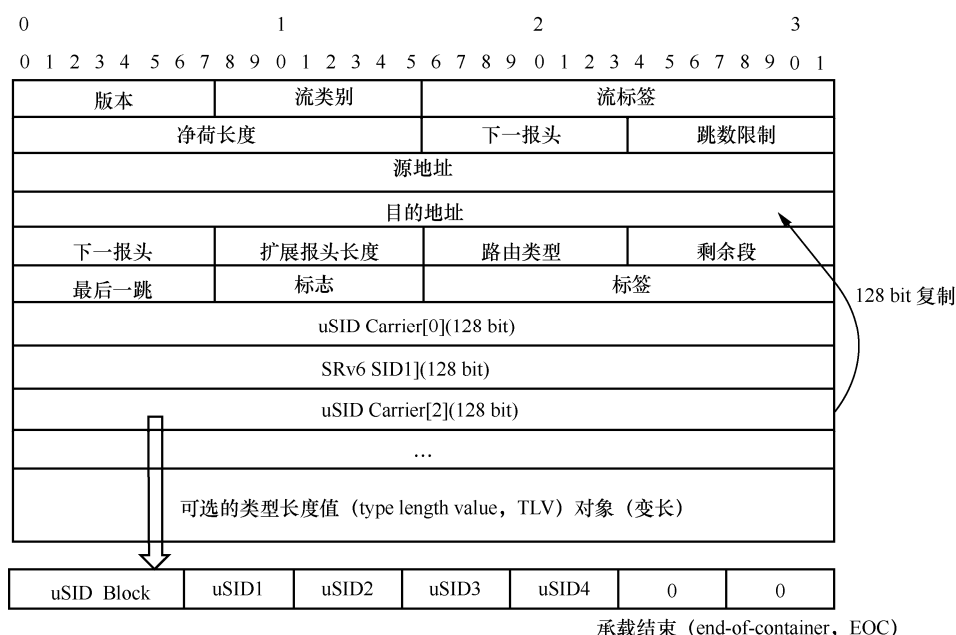


图4 uSID 方案中 SRv6 报文的封装方式

2.3 SRm6 方案

SRm6 方案则通过采用 16 bit 或 32 bit 的 SID (也称为 mSID) 代替 SRv6 中 128 bit 的 SID, 并在两者之间建立一一映射关系, 将 IPv6 地址序列的 SID 转变为更短字节的压缩 SID, 从而减小 Segment List 长度, 实现 SRv6 报文头压缩效果。SRm6 方案的 SRv6 报文封装方式如图 5 所示。

3 SRv6 头压缩方案对比分析

G-SRv6、uSID 及 SRm6 头压缩方案实现方式

各异, 在技术实现上也各具优势。上述 3 种主流 SRv6 头压缩方案对比见表 2。

在压缩效率方面, G-SRv6 方案的压缩效率与 Locator Block 规划及 G-SID 长度有关, uSID 方案的压缩效率与 Locator Block 规划及 uSID 长度有关, 而 SRm6 方案则不受地址规划影响, 只与 mSID 长度相关。上述 3 种头压缩方案基于不同的实现原理, 难以简单比较各方案压缩效率的优劣, 特别在处理跨域时, 受实际部署场景影响较大。

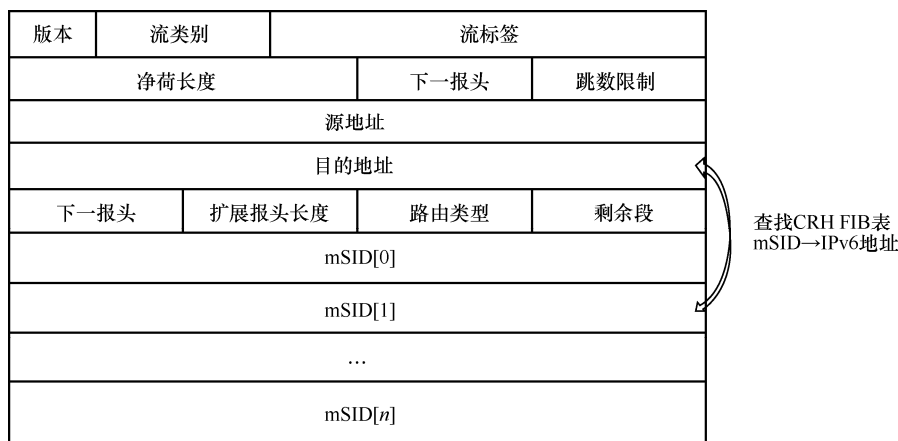


图5 SRm6 方案的 SRv6 报文封装方式

表2 主流 SRv6 头压缩方案对比

项目	G-SRv6	uSID	SRm6
SRv6/SRH 兼容性	兼容	兼容	不兼容
地址规划	需要规划一致的 Locator Block, 前缀长度灵活	需要规划一致的 Locator Block, 前缀长度灵活	与 IP 地址规划无关, 可沿用已有 IPv6 地址规划
数据平面	兼容 SRH, 但需要在 IPv6 DA 中重新定义 SI 标志位	兼容 SRH, 不改变报文格式	新定义紧凑路由报头 (compact routing header, CRH) 携带压缩 SID; 在基于段的服务指令 (per-segment service instructions, PSSI) 和基于路径的服务指令 (per-path service instructions, PPSI) 场景下, 需要新增其他扩展报头
控制平面	需要基于 SRv6 控制平面进一步扩展相关协议, 以通告节点支持 G-SRv6 能力及继续压缩属性 (continue of compression flavor, COC Flavor) 等指令信息	需要基于 SRv6 控制平面, 通告 uSID 指令信息 (如 uN/uA/uDT/uDX 等)	SRm6 引入全新的协议扩展, 通告 mSID 及其与 IPv6 地址的映射关系
SID 表项	需要为 G-SID 新增 SID 表项	需要为 uSID 新增 SID 表项	需要引入 CRH-FIB 表项存储 mSID 与 IPv6 地址映射关系
路由信息	基于 SRv6 Locator 路由, 不新增路由信息	基于 SRv6 Locator 路由, 不新增路由信息	基于 IPv6 路由表, 不新增路由信息
功能扩展	只要地址规划符合压缩条件, 支持所有类型 SID 压缩	支持 End、End.X、End.DT 系列和 End.DX 系列压缩	支持节点、邻接及绑定 SID 压缩功能, PSSI 与 PPSI 功能可用于业务功能链 (service function chain, SFC) 及 VPN 场景
硬件实现	较容易, 基于 COC 指示压缩 SID 并复制至 DA 相应字段	容易, 通过移位操作即可实现	较复杂, 需要查找本地 CRH 转发信息库 (forwarding information base, FIB), 将 mSID 映射为 IPv6 地址并复制到 DA 中

本节针对普通 SRH 封装、G-SRv6、uSID 以及 SRm6 头压缩方案封装的报文承载效率进行比较。假定原始报文长度为 448 byte (互联网流量平均字节长度), Locator Block 为 32 bit, 理想情况下 (SRH 中所有 SID 均可压缩), 压缩 SID 长度分别为 16 bit 或 32 bit 时, 对各方案的报文承载效率进行网络仿真计算, 各方案报文承载效率比较如图 6 所示。

总体来看, SRm6 映射方案的报文承载效率优于 G-SRv6 方案和 uSID 方案, 这主要是因为 SRm6 方案无须携带公共前缀 Block, 且使用了更简化的

CRH 报头格式。针对 G-SRv6 压缩方案与 uSID 压缩方案: 若压缩 SID 长度为 16 bit, uSID 方案报文承载效率稍高于 G-SRv6 压缩方案; 若压缩 SID 长度为 32 bit, SID 不超过 7 层情况下, uSID 方案的报文承载优于 G-SRv6 压缩方案, SID 超过 12 层后, G-SRv6 压缩方案更优。

上述比较只针对单 AS 域 (即公共前缀不变) 的仿真结果, 下面针对跨越多个 AS 域 (假定同一 AS 域内只经过 4 跳 Segment) 的场景, 对各方案的报文承载效率进行仿真, 跨域场景下各方案报文承载效率比较如图 7 所示。

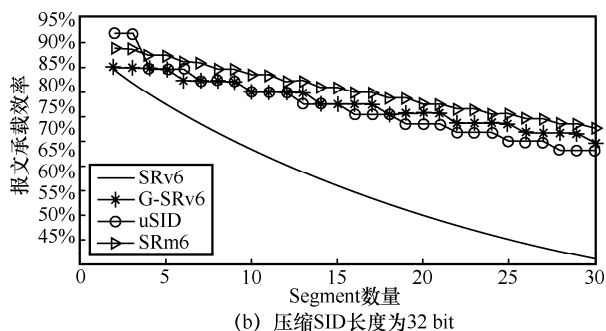
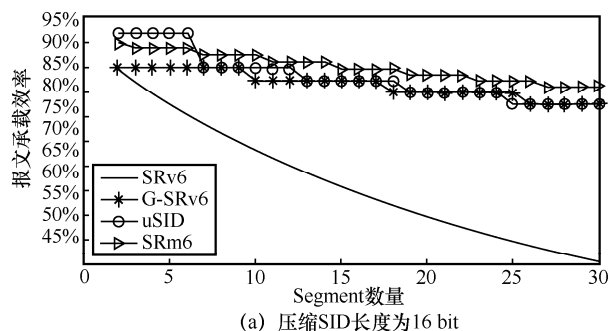


图6 各方案报文承载效率比较

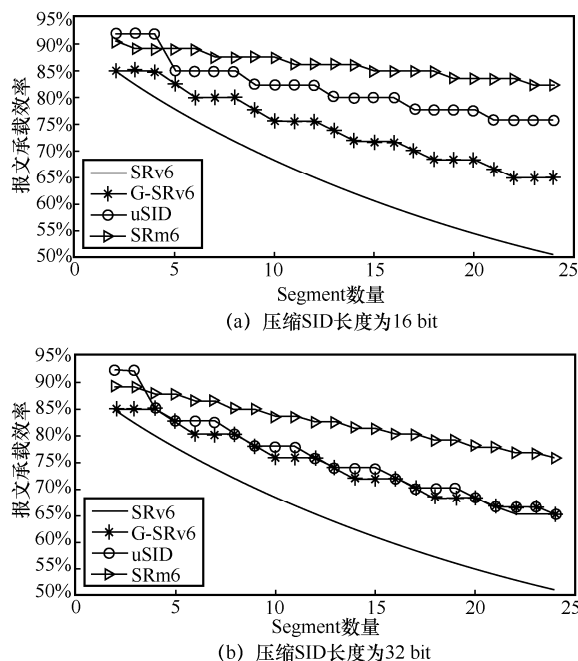


图7 跨域场景下各方案报文承载效率比较

由图7可知,在跨域场景下SRm6方案报文承载效率仍然最高,uSID方案次之,G-SRv6压缩方案报文承载效率最低。特别是当压缩SID长度为16 bit时,uSID方案相对G-SRv6方案更具优势。

4 结束语

总体而言,尽管SRm6方案报文承载效率最优,但其不兼容SRv6/SRH,且需要定义新的CRH扩展报头、引入全新的控制面协议扩展、硬件实现复杂,基本已被产业界抛弃。兼容SRv6/SRH的G-SRv6方案和uSID方案则更受产业界推崇,且两者实现原理也有相通之处。近期,标准上也提出了兼容G-SRv6和uSID的融合方案^[11],但由于其融合了两种实现机制,在控制面和转发面实现上增加了复杂性,有待产业界进一步讨论。目前,国内主流设备厂商对G-SRv6支持度更高,最终产业界会采用何种方案,还要看产业链的支持情况。

参考文献:

- [1] 金姬. 中国电信构建5G智慧生态圈 上海迈向“双千兆示范城市”[J]. 新民周刊, 2019(22): 84-85.
JIN J. China Telecom constructs 5G smart ecosystem and

Shanghai marches towards “double gigabit demonstration city”[J]. Xinmin Weekly, 2019(22): 84-85.

- [2] 王巍, 王鹏, 赵晓宇, 等. 基于SRv6的云网融合承载方案[J]. 电信科学, 2021, 37(8): 111-121.
WANG W, WANG P, ZHAO X Y, et al. Cloud-network convergence solution based on SRv6[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(8): 111-121.
- [3] LEDDY J, VOYER D, MATSUSHIMA S, et al. Segment routing over IPv6 (SRv6) network programming[R]. RFC Editor, 2021.
- [4] IETF. Compressed SRv6 SID list requirements[S]. 2022.
- [5] IETF. RFC 8754, IPv6 segment routing header (SRH)[S]. 2020.
- [6] 尹远阳, 王志中, 姜有强, 等. 面向新型城域网的UMR技术方案研究与应用[J]. 电信科学, 2022, 38(2): 149-156.
YIN Y Y, WANG Z Z, JIANG Y Q, et al. Research and application of UMR technology for new metropolitan area network[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(2): 149-156.
- [7] IETF. RFC 8986, segment routing over IPv6 (SRv6) network programming[S]. 2021.
- [8] IETF. Generalized SRv6 network programming for SRv6 compression[S]. 2022.
- [9] IETF. Network programming extension: SRv6 uSID instruction[S]. 2022.
- [10] IETF. The IPv6 compact routing header (CRH)[S]. 2022.
- [11] IETF. Compressed SRv6 segment list encoding in SRH[S]. 2022.

[作者简介]



龚霞(1991—),女,现就职于中国电信股份有限公司研究院,主要研究方向为IP网络、网络虚拟化、云网融合等。

陈华南(1981—),男,现就职于中国电信天翼云科技有限公司,主要研究方向为云网络。

朱永庆(1974—),男,中国电信股份有限公司研究院正高级工程师,主要研究方向为IP网络、云网融合和5G。

伍佑明(1968—),男,博士,中国电信股份有限公司研究院正高级工程师,主要研究方向为IP网络、IPv6+和下一代互联网。

阮科(1979—),男,现就职于中国电信股份有限公司研究院,主要研究方向为IP网络架构、IP新技术和下一代互联网。