



专题：“IPv6+”网络技术创新体系

基于“IPv6+”的智能 IP 网络方案

王晨曦, 古锐, 肖亚群, 王卫波, 王肖飞, 刘悦
(华为技术有限公司, 北京 100095)

摘要: 随着第 4 次工业革命的到来, 人类社会正逐步迈向万物互联的智能时代。智能时代需要更加自动化、智能化的 IP 网络, 基于“IPv6+”的 SRv6、BIERv6 等技术是使能新一代 IP 网络的关键基础。全面阐述了“IPv6+”的技术内涵, 结合华为在智能 IP 网络解决方案上的创新和思考, 介绍了“IPv6+”在极简连接、SLA 保障、专网体验、质量感知和云网一体等多个解决方案场景的关键技术与典型应用, 助力 5G 与云业务发展。

关键词: SRv6; BIERv6; 网络切片; 随流检测; 电信云

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020255

IPv6+ based intelligent IP network solution

WANG Chenxi, GU Rui, XIAO Yaqu, WANG Weibo, WANG Xiaofei, LIU Yue
Huawei Technologies Co., Ltd., Beijing 100095, China

Abstract: With the advent of the fourth industrial revolution, human society is gradually marching towards the fully connected, intelligent era. The intelligent era needs more automated and intelligent IP network, and the IPv6+ technology family represented by SRv6/BIERv6 is the key foundation for enabling a new generation of IP networks. The technical connotation of IPv6+ was comprehensively described, Huawei's innovation and thinking on IPv6+ solutions were relied on, key technologies and typical applications of IPv6+ in multiple solution scenarios such as simplified connection, SLA guarantee, private network experience, quality perception, and cloud-network integration, helping 5G and cloud business development were introduced.

Key words: SRv6, BIERv6, network slicing, iFIT, Telco-Cloud

1 引言

5G 和云的兴起, 为万物互联和万物智能提供了基础设施。物联网、大数据、云计算、人工智

能等新技术的发展, 不断改变着人类的生活方式, 同时对传统行业的运营模式和生产模式产生了深刻的影响。任何人、任何物都可随时随地接入网络, 享受便捷的数字化服务。而无处不在的算力,

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-08-13

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFB1800405, No.2018YFB1800404, No.2017YFB0801701); 国家自然科学基金基金资助项目 (No.61772307)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1800405, No.2018YFB1800404, No.2017YFB0801701), The National Natural Science Program of China (No.61772307)

将为人类社会、千行百业提供强大的智慧体验。

网络是行业和社会数字化转型的基石，是物理世界与数字世界之间连接的桥梁。IP 网络经历 30 多年的发展，为人类进入智能时代打下了坚实的基础。随着各行各业数字化的蓬勃发展，不仅使网络带宽急速增长，也给网络带来百倍的增长和极致的业务体验保障要求。

多业务综合承载、海量连接、确定性的业务体验保障，为 IP 网络带来结构性的挑战。为了应对这些挑战，华为提出了智能 IP 网络的构想和理念，旨在为运营商、行业提供一张能够承载多种业务，提供海量的任意连接并且架构最优、体验最优、高度自动化和智能化的网络^[1]。

要实现高度的自动化和智能化，统一的逻辑架构、统一的数据模型、统一的模块接口必不可少。对于 IP 网络，特别关键地，还需要统一的协议使能统一的网络承载和业务布放。基于“IPv6+”的 SRv6 (segment routing IPv6, IPv6 段路由)、BIERv6 (bit index explicit replication IPv6, IPv6 位索引显式复制)、网络切片等新一代 IP 协议族为使能智能 IP 网络奠定了基础。

基于“IPv6+”的智能 IP 网络解决方案，旨在为运营商、行业提供承载多种业务、海量连接并且体验最优、高度自动化和智能化的承载网络。该解决方案涵盖了网络的各个方面，包括以下几点。

(1) 极简连接：基于 SRv6^[2]、EVPN^[3] (ethernet VPN, 以太网虚拟专用网)、BIERv6，统一、简化网络控制面、转发面协议，实现 IP 地址可达、业务可通，使能全业务快速开通和大规模网络部署。

(2) SLA (service level agreement, 服务水平协议) 保障：通过 SRv6 Policy，结合 SDN (software defined networking, 软件定义网络) 控制器，使能网络编程和调整优化，实现带宽、时延、可靠性等综合业务 SLA 指标的真正可承诺。

(3) 专网体验：通过 SRv6 与转发面资源相结

合，实现 K 级海量网络切片，为各行业应用提供泛在连接、安全隔离和确定性体验的高品质专网方案，真正使能千行百业。

(4) 质量感知：基于 iFIT (in-situ flow information telemetry, 随流检测)，使能分组丢失、时延、抖动等业务质量高精度实时检测，实现租户级业务质量的可感知可控。进一步与大数据智能分析系统相结合，实现快速故障定界定位、快速自愈的主动、闭环运维。

(5) 云网一体：通过 SRv6 的网络可编程能力，提供传统骨干网、城域网与云数据中心网络，特别是边缘云的深度结合。

本文将结合上述场景与诉求，逐一解析“IPv6+”解决方案提供的能力以及带来的价值。

2 极简连接

2.1 协议简化，全业务承载

IP 网络诞生之初主要是为传统 Internet 业务提供尽力而为的服务。随着业务的不断发展，IP 网络已经被用于进行各种业务的综合承载。当前在一张 IP 地址网络中通常并存着多种协议（如控制面协议 IGP、BGP、LDP、RSVP-TE、PIM 等），同时对 IP 转发进行增强，存在多种数据面封装（如 MPLS、VxLAN、L2TP、GRE 等）。多种协议的并存使网络复杂度越来越高，网络运维越来越困难。基于 SRv6+EVPN 的解决方案，可以充分简化网络协议，控制面协议只保留必要的 IGP 和 BGP，转发面回归 native IP 转发。

在传统 IP/MPLS 网络中，MPLS 协议通常在各个网络域内各自使能，多个网络域间的承载隧道往往是割裂的，技术的割裂带来业务部署的割裂，跨域业务需要在各个域的边界点都进行背靠背部署，导致开通一条新业务往往需要较长的时间。基于 SRv6+EVPN 的解决方案，可统一不同网络域的承载方案，跨域业务只需两端部署、中间节点无感知，新业务开通时间由原来的天级减



少到分钟级，助力 IP 网络迈向自动化、智能化。SRv6+EVPN 统一网络承载方案如图 1 所示。

随着视频业务的广泛普及，除了单播业务，多播业务的承载也亟需升级。传统的多播技术需要为每条多播流分别建立一棵多播分发树，使多播流量沿着特定的分发树进行复制，这种方式需要额外的协议，拓扑中的每一个网络节点都需要为每个多播分发树维护相关状态，可扩展性差、运维复杂、资源消耗大，出现故障时的收敛速度也慢。而 BIER (bit index explicit replication) 技术采用节点比特标识来复制多播报文，大大地简化了多播业务的协议，只需 IGP 和 BGP 扩展，不再需要用于创建多播分发树的 PIM/mLDP/RSVP-TE 等协议。BIER 采用和段路由一致的源路由思想，接收者的加入和离开由尾节点通过 BGP 信令直接通知

头节点，多播源一侧的头节点感知接收者和业务信息，将需要接收多播流的尾节点编排到 BIER 报文头的 bitstring 中，中间节点根据多播报文中携带的 bitstring 判定如何复制和转发，无须维护基于流的多播表项，实现无状态转发，如图 2 所示。

BIERv6 协议进一步采用 IPv6 替代 MPLS 作为数据转发面，利用 IPv6 扩展报文头的天然可编程能力携带多播业务信息和 BIER 转发指令，彻底摆脱了要单独分配 MPLS 标签的转发机制。

综上所述，SRv6+EVPN+BIERv6 可以实现现在 IPv6 数据面上全业务综合承载，简化网络协议，为任意连接打下坚实的基础。

2.2 SRv6 更适用于大规模组网

跨越多个 IP/MPLS 域部署业务一直是运营商面临的一个难题。为了实现跨域部署，运营商不

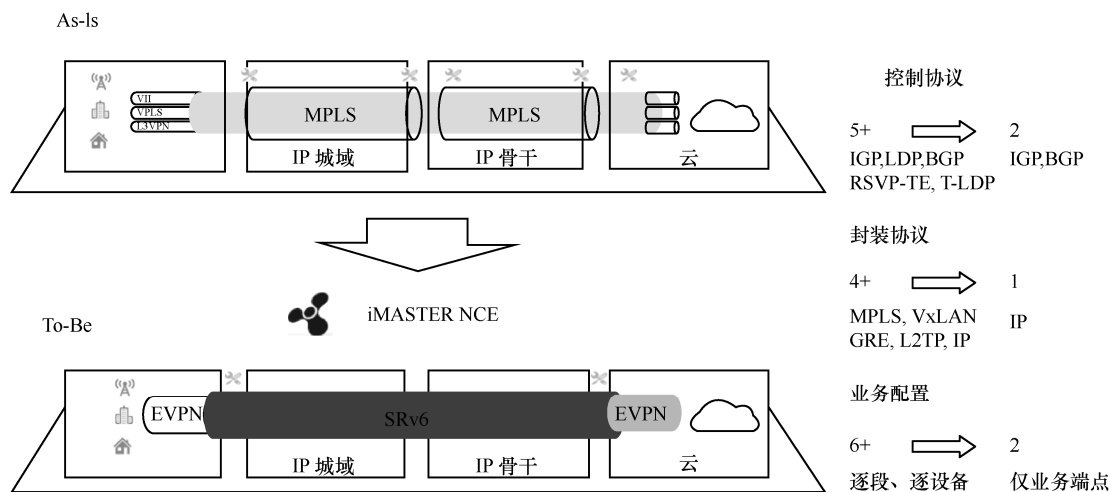


图 1 SRv6+EVPN 统一网络承载方案

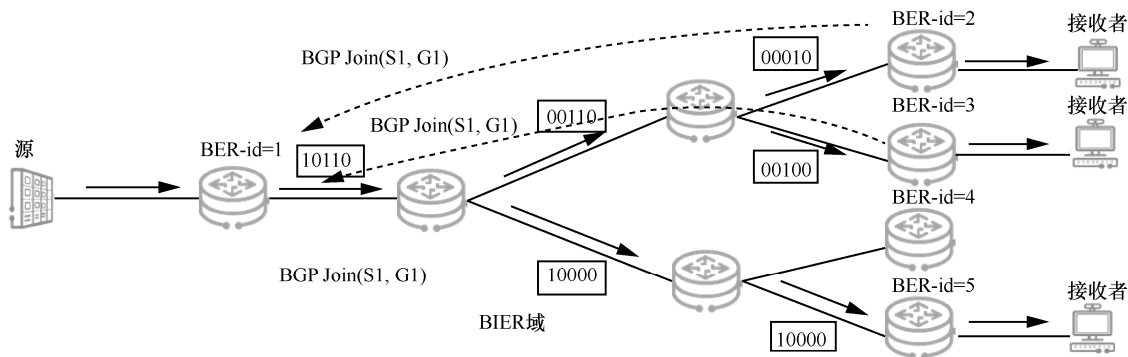


图 2 BIER 转发原理

得不采用各种 MPLS VPN 跨域技术。这些技术中,如采用 option A 方式跨域,则部署复杂,业务开通缓慢。如采用 seamless MPLS 方式跨域,则可扩展性差。由于 MPLS 标签自身不含有可达性信息,必须与可路由的 IP 地址进行绑定,在跨域场景中,32 位主机路由与标签的绑定关系必须跨域传播。随着网络规模的变大,网络中的路由数量也会越来越多,太多的路由数量会加大网络中设备的压力,尤其会对边缘设备的能力有较高的要求。同时 32 位主机路由的全网发布也会影响网络的稳定性,任何路由震荡都会在全网范围内扩散。

借助 native IPv6 的路由聚合能力,使 SRv6 理论上可以拥有近乎无限的扩展能力,支持大规模的网络组网能力,提供无处不在的任意连接,如图 3 所示。

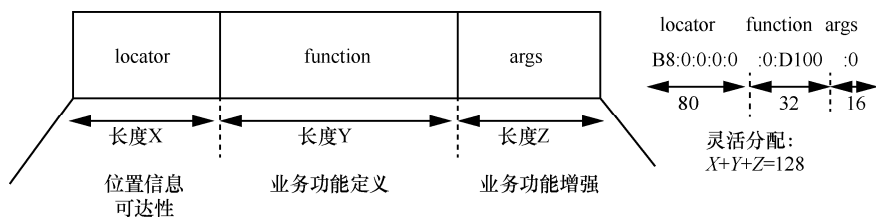
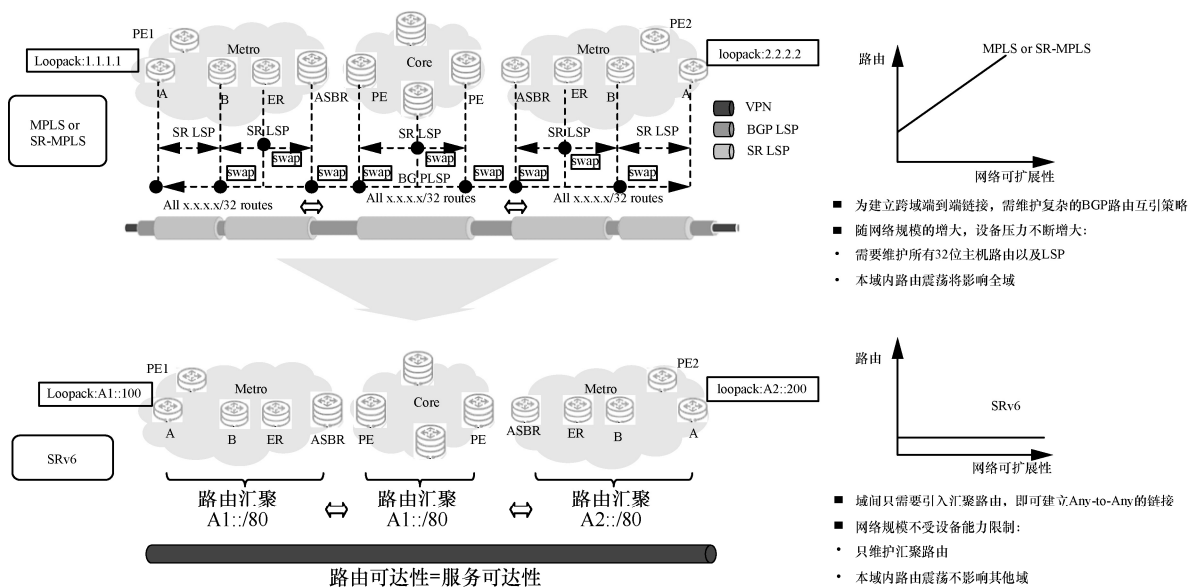
SRv6 拥有 native IPv6 特质,SRv6 SID 本身就是 IPv6 地址^[2],利用 IP 地址的天然可达性,实现业

务即通。经过合理的逐级 IPv6 地址规划和分配,在不同的域间只需发布聚合后的 IPv6 路由,就可以实现域间业务连通,同时路由汇聚可以维持网络稳定自治,其他网络的故障或扩容不会对本网络造成压力。

2.3 SRv6 VPN 快速业务开通

VPN (virtual private network, 虚拟专用网) 是网络中最重要的应用之一,在 MPLS VPN 架构中,PE 节点上的 VPN 实例由本地唯一的 VPN 标签来标识,PE 本身的可达性则由外层 MPLS 隧道提供,如 LDP、RSVP-TE、SR-MPLS^[4]等。SRv6 VPN 则使用 SRv6 segment ID (SID) 同时标识 PE 的可达信息与 VPN 信息。

SRv6 SID 结构如图 4 所示,SRv6 SID 是一个 128 位的 IPv6 地址,可灵活编排为 locator、function 以及 args^[2]。其中,locator 表示到达该节点的路由信息,通常在 SRv6 域内唯一,用于指示





其他节点如何到达分配 SID 的节点。function 用于定义节点本地需要执行的功能，可以标识设备的任何功能，例如某个转发行为，或者某种 VPN 业务等。args 是可选的，作为对 function 的补充。

SRv6 VPN^[5]快速业务开通如图 5 所示，在一个 SRv6 VPN 业务中，egress 节点的 locator 与标识 VPN 业务的 function 组合生成 VPN SID，并在向邻居发布 VPN 路由信息时携带。ingress 节点接收到路由以及 VPN SID 后，将其安装到对应 VPN 的转发表中。

ingress 节点从连接 CE 的接口收到私网报文后，查找对应 VPN 转发表，并根据转发表中的 VPN SID 信息进行 SRv6 封装：在业务报文外封装 IPv6 头，目的地址填充为 egress 节点的 VPN SID。完成业务报文封装后，ingress 节点将封装后的报文转发至出接口。中间所有节点都将报文作为普通的 IPv6 报文，按照目的地址寻址转发，直至到达 locator 标识的 egress 节点。egress 节点匹配 local SID 表，弹出外层 IPv6 报文头，在该 VPN 中查表转发。

通过 SRv6 可以在 native IPv6 网络中提供 VPN 业务。只需要升级边缘节点支持 SRv6，中间网络支持 IPv6 转发，即可部署 SRv6 VPN 业务，从而实现业务快速开通，IP 可达即业务可达。

3 SLA 保障

3.1 新一代的流量工程——SRv6 Policy

SRv6 Policy^[6]利用 SR 的源路由机制，通过在头节点封装一个有序的指令列表指导报文穿越网络。SRv6 Policy 是一种将用户意图（SLA、业务链）映射为网络实现的机制，是“IPv6+”时代实现流量工程的重要手段。

SRv6 Policy 使用<headend, color, endpoint>三元组作为 key，全局唯一标识一个 SRv6 Policy。

(1) 头节点（headend）：标识 SRv6 Policy 的头节点。headend 可以将流量导入一个 SRv6 Policy 中。

(2) 颜色（color）：标识指定头节点和目的节点的不同 SRv6 Policy，可与一系列业务属性相关联，比如低时延、高带宽等，可理解为业务需求模板 ID。color 提供了一种业务和 SRv6 Policy 的关联机制。

(3) 目的节点（endpoint）：标识 SRv6 Policy 的目的地址。

一个 SRv6 Policy 可以有多个候选路径（candidate path）。每个 candidate path 附带优先级（preference）。存在多个 candidate path 时，选择优先级最高的 candidate path 作为主路径。candidate

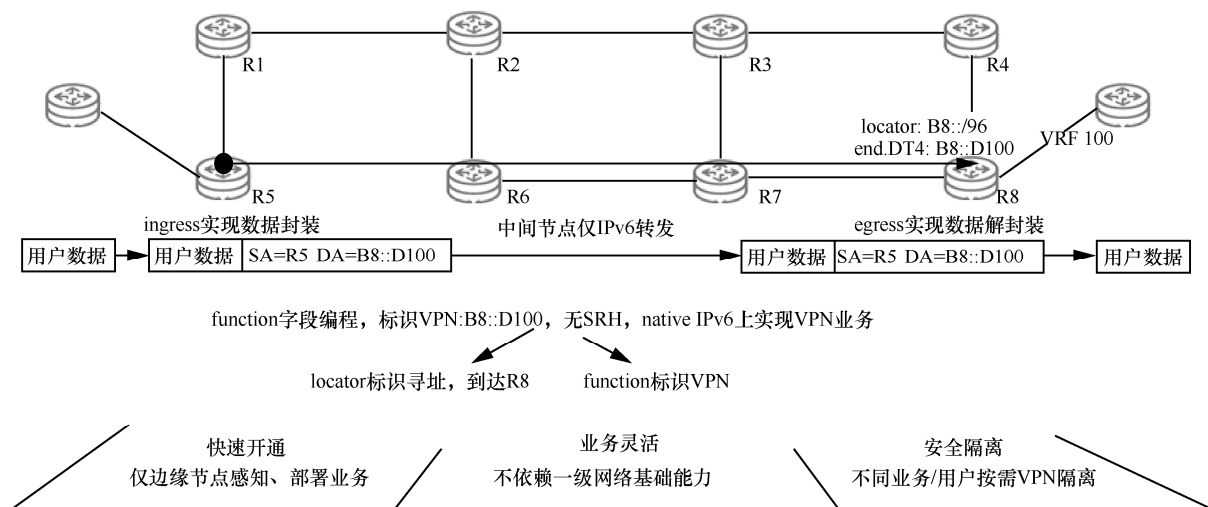


图 5 SRv6 VPN 快速业务开通

path 可以通过 BGP SRv6 Policy/PCEP (path computation element protocol, 路径计算单元通信协议)/Netconf (network configuration protocol, 网络配置协议) 等协议向头端下发, 也可以由头结点本地算路生成。

一个 candidate path 可以关联多个 segment list, segment list 标识通过 SRv6 Policy 向 endpoint 发送流量的源路由路径。通过 segment list 附带的权重属性 (weight) 来控制流量在多个 SR 路径中的负载比例, 从而实现 ECMP/UCMP。

SRv6 Policy 是面向业务设计的, color 描述的是满足业务体验对网络的要求, 例如时延、带宽、可靠性等。这种设计模式可以带来如下好处:

- 通过路由/QoS 优先级等与 color 的配合, 可以灵活地为不同诉求的业务提供不同质量的服务;
- 灵活实现路径的备份和负载分担, 通过多 candidate path 实现备份, 通过多 segment list 实现负载分担;
- 对业务屏蔽内部细节, 业务只需要关注自身的需求即可。

3.2 基于 SLA 约束的路径编程

网络中承载了海量的业务, 不同业务对网络有不同的诉求, 例如要求大带宽的上网业务, 要求低时延的语音通话、视频会议等。SRv6 通过灵

活的 SID list 编排实现灵活的业务路径控制, 可以实现业务驱动的网络路径选择, 结合 SDN 控制器, 可以保障业务始终运行在最佳的承载网络。

SDN 控制器通过 BGP_LS/SNMP/Telemetry 等协议实时收集和维护当前网络的状态和信息, 如拓扑、时延、带宽、实时流量等, 并通过大数据和人工智能等技术实现网络信息的还原和可视化。当有新的业务需求时, 如某业务需要时延小于 50 ms 和 100 Mbit/s 带宽, 控制器可以基于当前的网络状态进行多因子约束算路, 根据业务对时延、分组丢失、亲和属性等要求, 计算满足业务 SLA 要求的约束路径, 将编排后的路径通过 BGP SR-Policy 协议下发到头节点, 指导业务在网络中的转发。

在业务路径部署完成后, 控制器通过 iFIT (in-situ flow information telemetry, 随流检测)^[7]、TWAMP (two-way active measurement protocol, 双向主动测量协议)、Y.1731 等手段持续监控业务质量, 当业务质量劣化时, 重新执行最优路径计算过程, 为用户提供一张高质量的网络连接, 保障业务体验不受损。SRv6 路径编程如图 6 所示。

SRv6 通过灵活的业务路径控制, 结合网络状态信息感知和采集能力, 实现业务质量的实时保障, 提升用户业务体验。

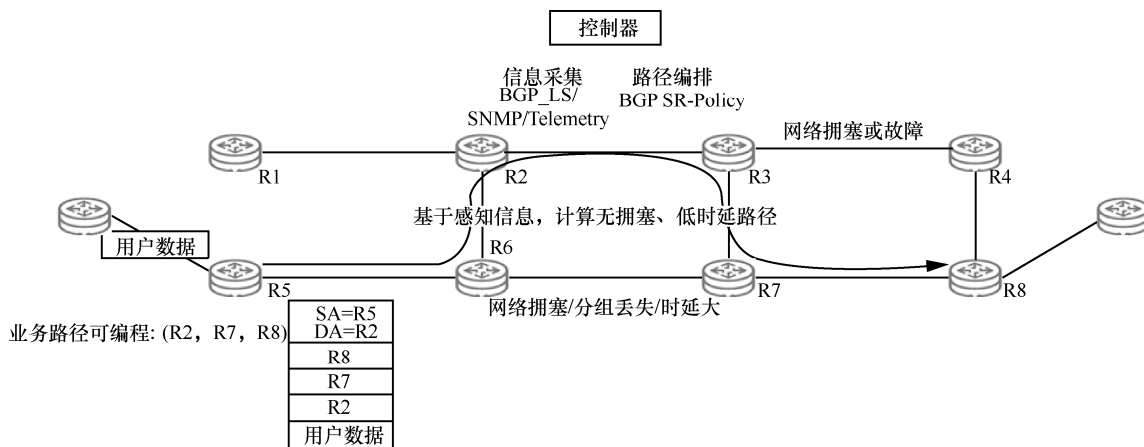


图 6 SRv6 路径编程



3.3 灵活的业务引流方式

通过 SRv6 Policy 路径编程提供满足业务 SLA 要求的隧道后, 需要提供灵活的引流策略实现业务流与 SRv6 Policy 承载隧道的匹配, 如图 7 所示。

SRv6 Policy 可以根据业务流的不同特征应用不同的引流策略, 从而提供精细化、差异化的服务。

(1) 基于目的地址 + color 引流

SRv6 Policy 引入了 color 机制, color 可以作为 BGP 路由的扩展团体属性携带, 因此在将业务引流到 SRv6 Policy 时, 可以精确到每路由前缀粒度。尾节点根据不同的业务 IP 地址, 对路由前缀进行染色, 头节点则根据路由前缀携带的 color 与 SRv6 Policy 进行映射, 将流量导入满足不同 SLA 要求的 SRv6 Policy。

(2) 基于目的地址+QoS 优先级引流

SRv6 Policy 可以基于目的地址+ QoS 优先级引流, 对去往相同目的、但是不同来源的业务进行细分。头尾节点之间可创建多个 SRv6 Policy 隧道, 对应不同的 SLA 要求, 并将业务的 DSCP 与

SRv6 Policy 的 color 分别进行映射。到达相同目的 IP 地址的业务流, 根据其携带的 DSCP 优先级不同, 也可以引流到差异化 SLA 的中。

(3) 基于复杂 N 元组引流

当还需要更细分粒度地引流策略时, 可以基于 N 元组引流。头节点根据 L2/L3/L4 多维度信息进行复杂流分类策略, 之后将对应业务流重定向到 SRv6 Policy 隧道。

(4) 基于 BGP FlowSpec 灵活引流

通过 BGP FlowSpec 可以实现更精细化、自动化的引流策略, BGP FlowSpec 支持更丰富的匹配规则, 包括基于目的 IP 地址、目的 AS、源 IP 地址、源 AS、五元组等, 通过将 BGP Flowspec 路由的动作设置为重定向到 endpoint+color, 则可以将命中匹配规则的报文引入对应的 SRv6 Policy 中。通过 BGP Flowspec 灵活流入 SRv6 Policy 有如下优点: 首先是规则丰富, 其次是通过 BGP Flowspec 下发规则, 可以不用更改现网配置, 避免与已有部署发生冲突, 同时与控制器配合更紧密, 实现引流策略的自动化部署。

值得一提的是, 在下一阶段, 应用感知网络

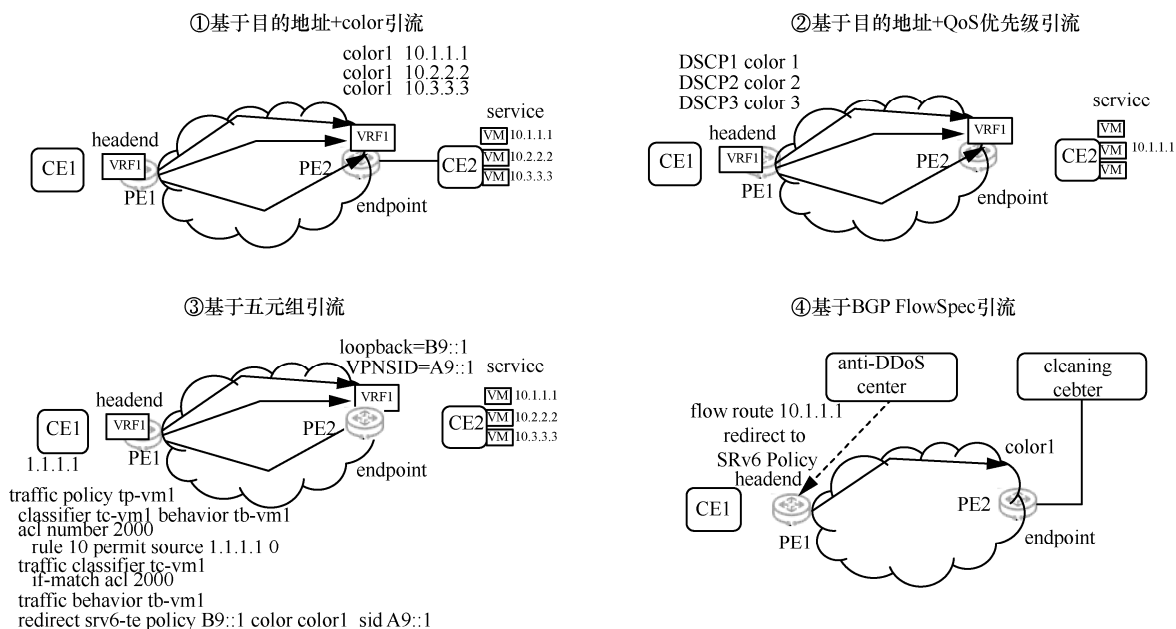


图 7 SRv6 Policy 灵活引流

的 IPv6 网络 (application-aware IPv6 networking, APN6), 可以根据 IPv6 报文中的应用信息 application ID 引入不同质量的 SRv6 Policy, 从而实现更加智能化的网络服务。

3.4 超高可靠, 业务永久在线

高质量的网络连接一方面需要网络具备可编程性, 另外一方面也需要网络具备高可靠性。可以在网络故障场景下, 将业务快速切换到备选路径, 避免因网络故障带来业务中断, 影响最终用户的业务体验。

传统 MPLS 网络中依赖 BFD (bidirectional forwarding detection, 双向转发检测) 等主动检测技术保证端到端的业务可靠性。BFD 依赖主动发分组检测连通性, 无法满足 50 ms 保护倒换。随着网络规模的增大, 基于隧道或者业务的 BFD 检测的数量也不断增大, 而设备的 BFD 规格却无法随之提升, 导致无法满足大规模网络下海量业务的可靠性诉求。

SRv6 继承了 SR 的 TI-LFA (topology-independent loop-free alternate FRR, 拓扑无关的无环替换路径快速重路由)^[8]机制, TI-LFA 结合 SRv6 mirror SID 尾节点保护, 无需部署端到端主动检测, 使 SRv6 的可靠性技术均可基于本地保护, 快速感知, 快速恢复, 真正实现 100%拓扑、海量业

务场景下、任意故障 50 ms 快速倒换, 保障用户业务体验。

对于需要保障严格的 SLA 的业务, TI-LFA 等本地保护手段通常会导致业务流量绕行到其他节点, 引起时延增大、流量拥塞等结果。SRv6 同时也支持在头端通过 BFD 等主动检测技术进行故障感知, 并切换到已经规划好的满足 SLA 要求的备份路径, 而在 BFD 检测到故障之前, 业务流量依然可以进行本地保护, 从而实现业务快速恢复与 SLA 保障之间的平衡。

4 专网体验

4.1 基于 SRv6 的大规模网络切片

4G 改变生活, 5G 改变社会。5G 打破了传统移动网络的服务边界, 使能更多的垂直行业场景, 为了满足 5G 时代垂直行业对差异化 SLA 和不同等级的网络隔离诉求, 构筑运营商在 5G 和云时代差异化竞争力, 运营商可以通过切片的资源预留技术对网络资源实现精细化管理, 为用户提供差异化 SLA 保障的专网级承载服务, 从带宽运营向体验运营转型, 提升网络资源变现水平。

同时政企行业等高价值专线业务, 出于安全性的考虑, 要求其业务与公众业务相隔离, 实现

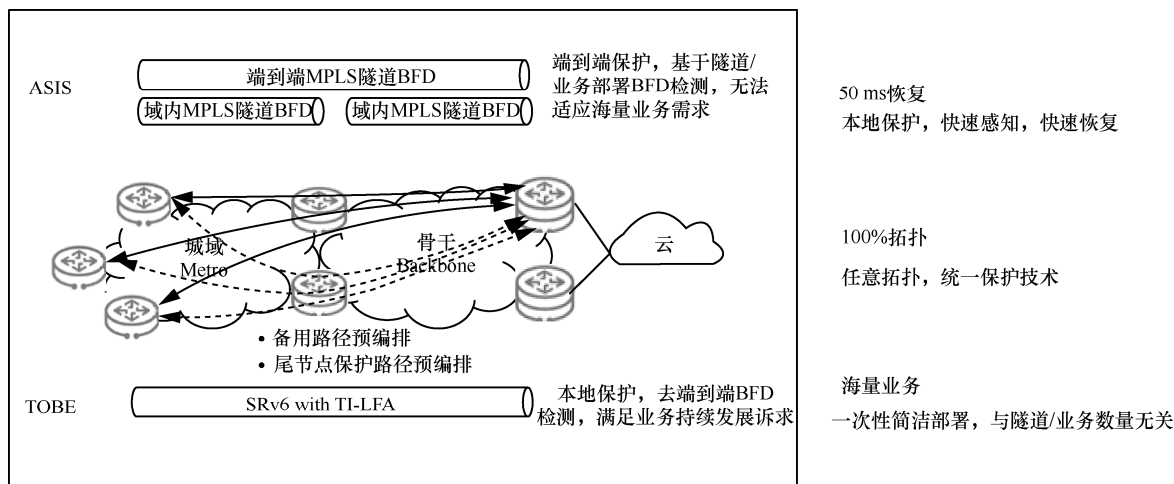


图8 SRv6 高可靠性提供海量业务、100%拓扑和 50 ms 保护



资源独享。IP 承载网络在提供低成本、大带宽、敏捷灵活的任意连接的同时，也需要能够提供资源隔离、SLA 可承诺可保障的高品质承载体验，满足政府、大客户等行业的专线、专网诉求。

为了实现在同一张物理网络中同时满足各种各样类型业务的差异化需求，网络切片成为 IP 承载网的关键技术。网络切片可为不同要求的业务提供定制化的网络拓扑和连接，以及差异化且可保证的服务质量。网络切片需要为不同业务预留独立资源，IP 承载网通过在同一个物理接口上划分不同的逻辑 FlexE (flexible ethernet, 灵活以太) 接口/FlexE 子接口，在 IP 统计复用的基础上为高价值业务提供确定性的低时延和带宽保障，其他业务的突发不会引起切片业务 SLA 的降低，确保高价值业务的专网体验^[9]。

基于控制面分配不同资源标识切片的传统方案，不论是基于亲和属性，还是基于多拓扑，多 Flex-Algo (flexible algorithm, 灵活算法) 为了在转发上将流量导入切片的逻辑接口，都需要为该逻辑接口分配独立的控制面资源，例如为不同的

网络切片逻辑接口配置不同的 IP 地址，分配不同的 segment ID，并运行 IGP 实现分发，之后在头节点上进行切片内的路径编排，从而实现业务流量在网络中的每一跳都可以在指定的逻辑通道上转发。

这种实现方式每新增一个切片业务，都需要大量的配置工作，而且由于不同切片必须拥有独立的 IP 地址，IGP 的负担随着切片数量的增加而呈指数增长，网络设备压力大，限制了切片的规模部署。

基于 SRv6 slice ID 的切片方案，使用 SRv6 SID 标识网络节点或物理链路，slice ID 标识具体切片，所有切片共享基础网络的 IP 地址和 SID。报文转发时在 IPv6 报文头中携带切片标识 slice ID，设备转发时通过 SRv6 SID 和 slice ID 共同识别切片，根据 SRv6 SID 查找物理转发资源，通过 slice ID 查找切片逻辑转发资源，从而实现业务流量在网络中的每一跳都可以在指定的逻辑通道上转发。网络切片方案从控制面编程向转发面编程演进如图 9 所示。

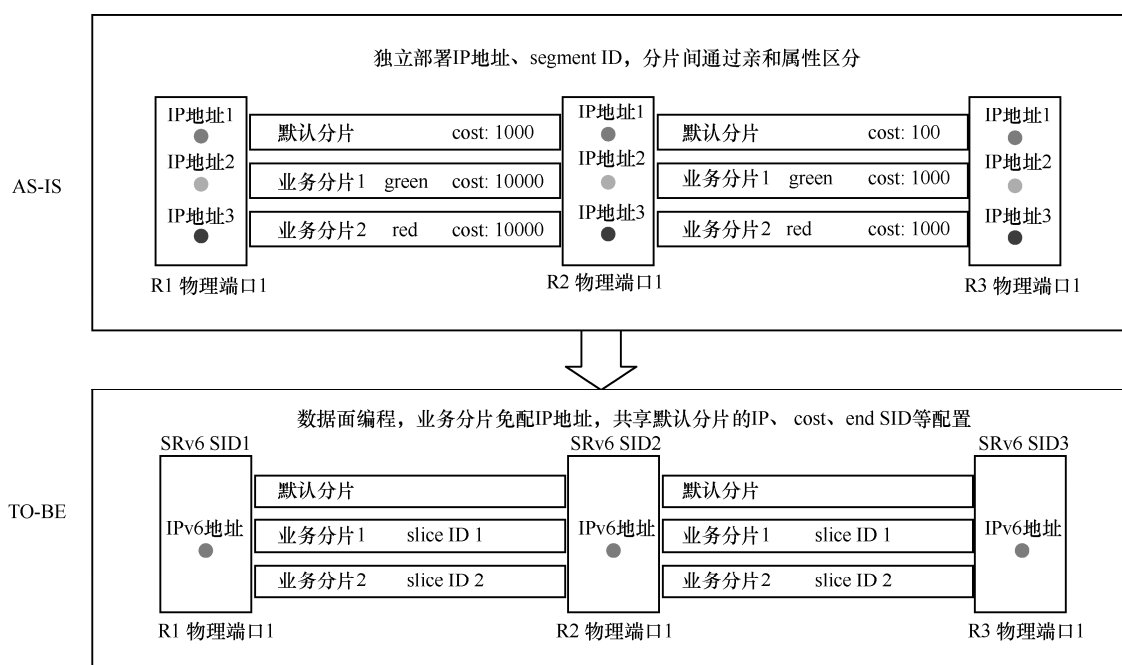


图9 网络切片方案从控制面编程向转发面编程演进

通过 SRv6 网络的可编程能力,实现数据面和控制面的解耦,使切片规模进入 K 数量级,不再依赖 IGP 规模,满足未来日益丰富的切片需求。

5 质量感知

5G 时代的到来,加速了千行百业的全面数字化转型,同时各行业应用也对承载网络的业务质量保障诉求都提升到了新的高度,例如 uRLLC (ultra-reliable low-latency communication, 超高可靠性超低时延通信)的 V2X(vehicle to everything, 车联网)业务分配给 IP 承载网时延不超过 1 ms;智能电网业务对承载网的时延诉求为不超过 2 ms。而网络只能提供 50 ms 的可靠保护能力,因此必须依赖业务级的质量测量技术,实现业务质量的主动检测和精准感知^[10]。

通过引入 SRv6 iFIT 技术,可以实现业务 SLA 的主动测量和实时感知,主动识别业务故障,支撑承载网络自证清白和业务故障的自动定界;通过业务自愈流程,实现对低时延、高可用性业务的 SLA 保障,构建 SLA 可承诺的 IP 网络。基于 iFIT (in-situ flow information telemetry) 业务级质量感知的主动运维方案如图 10 所示。

以 TWAMP 为代表的传统业务质量检测手段,存在以下不足。

- 检测报文与业务报文的优先级不同,无法真实测量业务报文的 SLA: RFC7750 规定 TWAMP 报文可以指定 DSCP,但实际商用时无法灵活覆盖全业务流的优先级。
- 检测报文周期性发送(最小周期 10 ms),即抽样性检测,无法完整反映业务故障。
- 负载分担场景下检测报文只能检测其中部分链路,无法实现所有路径检测。
- 只支持端到端 SLA 测量,无法实现 SLA 劣化后的故障定界。

iFIT 是华为推出全新一代网络检测解决方案。基于随流检测原理, iFIT 可以提供业务流的端到端及逐跳的 SLA (分组丢失、流量、时延、抖动等) 测量能力,可快速感知网络级故障(链路/节点故障)和网络转发故障(拥塞分组丢失、偶发性分组丢失等),并支持基于逐跳 SLA 检测,实现业务级故障的精准定界。

相比传统检测技术如 TWAMP、Y.1731 等, iFIT 在组网灵活性、SLA 精准性、故障快速定界能力上具备更大优势,是未来 IP 承载网络运维的重要手段,可以有效地解决传统检测方式的不足, iFIT 在 SRv6/IPv6 场景中的应用如图 11 所示,具有以下优点。

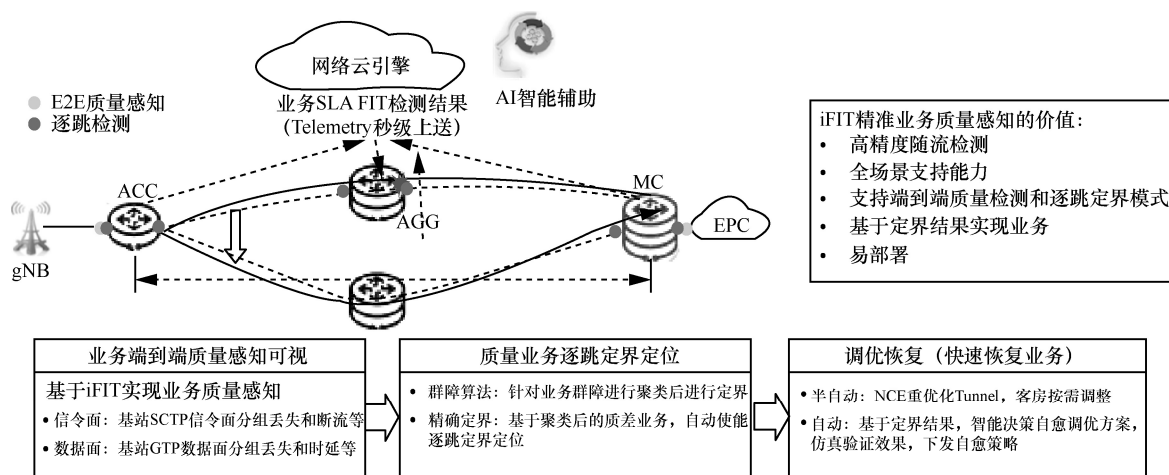


图 10 基于 iFIT 业务级质量感知的主动运维方案

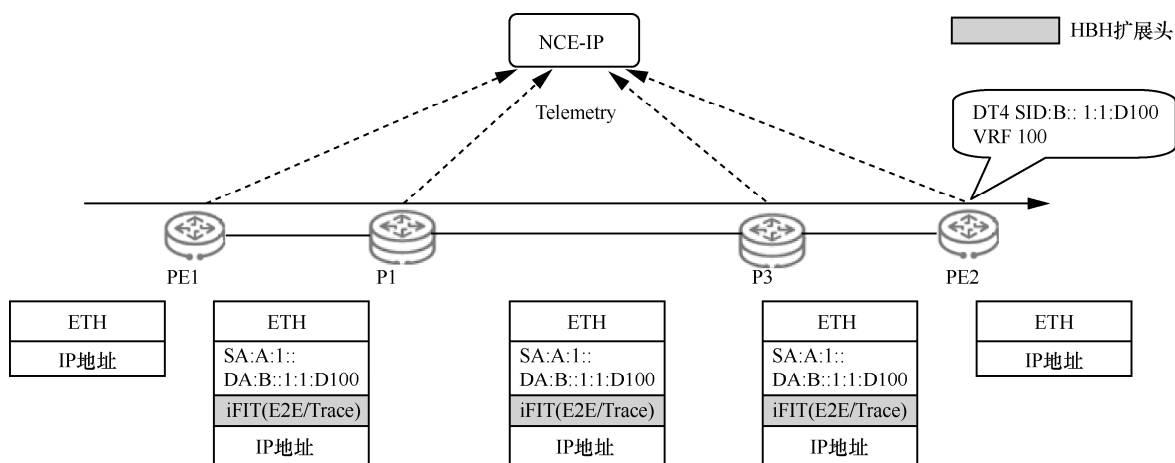


图 11 iFIT 随流检测在 SRv6/IPv6 场景中的应用

- 随流&高精度：基于真实业务流的随路测量，实现全路径、全报文检测。
- 全场景支持能力：支持 IPv6/SRv6/SR MPLS/MPLS VPN 各场景下 L2、L3 等各种业务。
- 支持端到端和逐跳检测模式：实时进行端到端质量检测，保证业务质量实时测量；在业务质量劣化后，自动使能逐跳检测，完成业务质差的故障定位；联动智能运维系统，实现业务级自愈保障能力。
- 易部署：头节点按需定制检测，中间/尾节点在初始阶段全局使能 iFIT 能力即可；双向检测场景，只需在少量核心层节点部署头节点检测，通过在 iFIT 报文中携带反向流检测信息，驱动接入层节点自动创建回程检测，大大减少部署工作量。
- 兼容：中间节点不支持 iFIT 时，默认透传转发；尾节点同时剥除 SRH 和 iFIT 头。

iFIT 支持的检测能力：端到端检测支持时延和分组丢失检测；逐跳检测时延和分组丢失检测以及路径还原。

- 分组丢失检测：通过周期性的报文着色^[1]，通过首节点、中间节点/尾节点按照着色周期进行报文统计，给出业务分组丢失率。iFIT 可以实现业务全量报文的分组丢失检测。

- 时延检测：首节点通过在 iFIT 中接收时间戳，在中间节点和尾节点等节点根据接收时间戳计算业务时延。每个节点统计该业务流的最大、最小和平均转发时延信息，只将统计分析结果上送分析器，以降低上送报文数量和分析器计算资源占用。
- 路径还原：基于每节点上报信息，呈现业务的真实转发路径。

此外，iFIT 不仅作为下一代的业务 SLA 检测技术提供业务质量感知，同时还为智能运维系统提供了实时的业务 SLA 大数据，以支撑智能运维系统对其他运行数据的自动标注，提升机器学习的有效性，构建智能运维系统的自动学习能力。

6 云网一体

6.1 BSID 使能网络能力开放，实现企业灵活上云

随着云计算的蓬勃发展，百万企业上云成为趋势，到 2025 年，预计所有企业信息技术解决方案都会云化，85%以上企业应用会部署到云上。仅满足于上云业务快速开通已经无法满足日益增长的高价值应用需求（如垂直行业生产类业务、视频会议等应用），需要承载网络提供更高质量的服务（如低时延、高可用），而对于普通业务（如上网、E-mail 等），则需要承载网络提供更优惠的服务（如大带宽）。

企业自身的差异化业务对IP承载提出网络即服务的诉求,网络需要开放其能力,企业可根据自身业务需求灵活调用。

云骨干网提供差异化SRv6 Policy承载隧道,为每条隧道分配BSID,并上送到骨干网的控制器。骨干网控制器将BSID以及对应的网络服务(金/银/铜),通过北向接口通知协同器以及企业CPE控制器。当企业用户需要针对应用进行流量调度时,CPE控制器则可下发SRv6 Policy,segment list中包含骨干网隧道的BSID,即需要调用的网络服务。

SRv6 BSID是一个128位的IPv6地址,CPE到云骨干的网络只需要IPv6可达,业务即可顺利转发到云骨干的PE上,因此无论是5G接入,移动回传直接接入,还是园区/城域网接入,基于SRv6 BSID的网络能力开放均可灵活适应,如图12所示。

SRv6的可编程能力以及native IP属性,使能网络能力开放,释放网络潜能,为上云专线、SD-WAN、5G 2B等场景提供助力。

6.2 SRv6在电信云中的应用

随着NFV技术的发展,运营商的电信云建设

逐步深入。通常运营商会建立central DC和regional DC,分别部署控制平面NFV网元和数据平面NFV网元。随着业务需求的发展,运营商建立更多的edge DC和mini edge DC、MEC,将部分业务网关下沉到边缘节点,从而提供更好的用户体验,运营商云化业务分层部署如图13所示。

当前主流的中心云,DC内采用VxLAN,DC与WAN网络背靠背对接。随着MEC与边缘云建设的启动与发展,中心电信云的背靠背承载方案在支持边缘电信云时会出现一些关键挑战。边缘云有以下新的特点。

- 边缘云规模较小,相比CDC/RDC,EDC数量多,DC数量上千,需要考虑EDC与城域网融合,提高部署效率。
- 需要支持E2E的网络切片和低时延承载方案,EDC与MEC承载业务要求极低时延,并且需要支持网络切片的承载。

通过SRv6 + EVPN的技术支撑IPv4/IPv6双栈业务能力,同时为5G、企业和MEC等提供业务能力支撑。

云网一体的关键技术如图14所示,边缘云网一体承载网络设计的关键优势表现在如下几个方面。

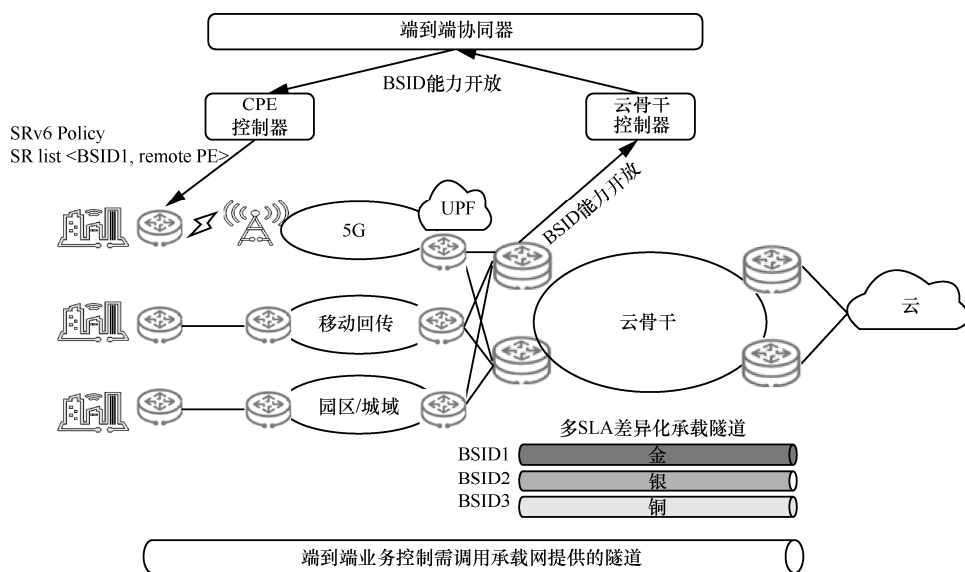


图12 网络即服务, SRv6 BSID 开放网络能力

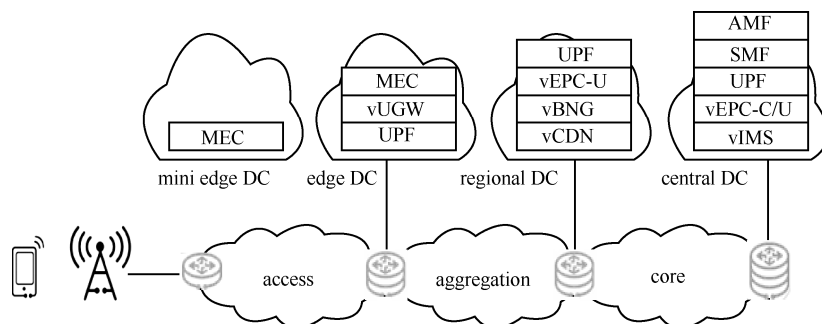


图 13 运营商云化业务分层部署

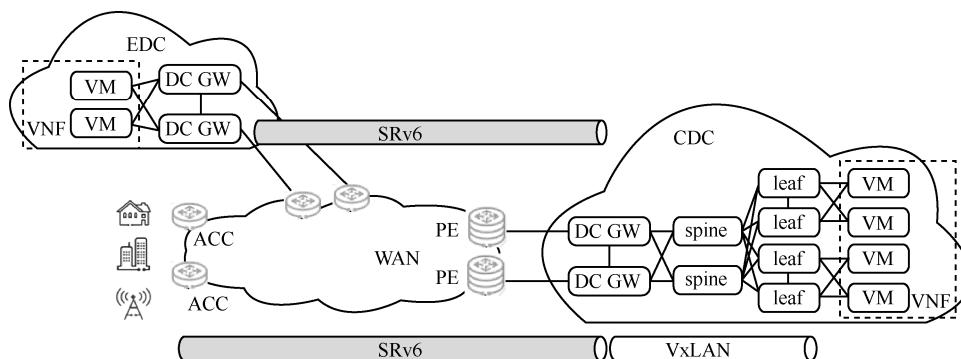


图 14 云网一体的关键技术

- 协议简化：统一 DCN 和 WAN 承载方案，简化了承载协议。
- 端到端业务能力：通过 E2E 统一的 SRv6 BE/TE，基于 SRv6 强大的可编程能力提供端到端的路径调优、网络切片能力。
- 简化运维：承载在 E2E 的 SRv6 BE/TE 上的 VPN 技术消除了背靠背的 DC-GW 和 PE 间的跨域 VPN option A 的业务配置点，并且能够提供端到端的 OAM 能力。
- 简化网络层级：统一了 DCN 和 WAN 承载网络，不需要再独立设置 DC-GW、

spine、leaf 等多层角色，将原来多层设备归并在一起由一层设备复用完成，减少了建网成本。

6.3 SRv6 在 SFC 中的应用

SRv6 另一个重要应用是 SFC(service function chaining, 业务链)^[12]。SFC 通常指一组 SF(service function, 服务功能)节点组成的序列。为满足特定的商业、网络安全等级保护等需求，对于指定的业务流，通常要求在转发时，经过指定 SF 网络服务序列的处理，即穿越一个 SFC。业务链 SFC 架构如图 15 所示。

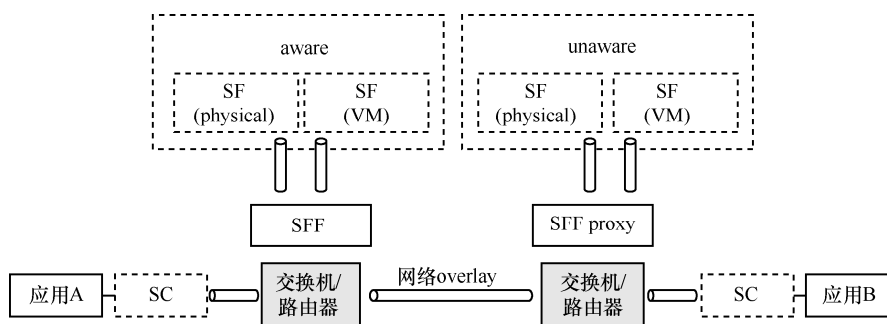


图 15 业务链 SFC 架构

- SF (service function) 业务功能节点：即增值服务功能，包括防火墙、负载均衡设备 LB 等设备。
- SC (service classifier) 业务分类节点：实现业务流识别，设置业务标识，封装业务报文头。
- SFF (service function forwarder) 业务转发节点：连接 SF 业务功能节点的交换机，可以识别业务流信息，并根据 SF 业务流信息进行转发。

在网络中，SFC 主要应用在需要对不同用户提供差异增值服务的场景中，比如移动承载网络的 Gi-LAN、多租户云数据中心的不同租户等。在 SRv6 网络中，可以通过 SID 的组合来实现转发路径的编程，通过编程的路径依次穿过指定的 SF，实现了 SFC。SRv6 SFC 方案架构如图 16 所示。

当然，SRv6 SFC 也面临一些挑战，比如当 SF 数目过多时，segment list 中 SID 数目比较多，SRv6 报文头开销相对较大。当前大部分 SF 还不支持 SRv6，所以需要部署 SRv6 proxy，这在一定程度上增加了部署 SFC 的难度。随着 SRv6 的发展，许多 VAS 厂商已经计划支持 SRv6，有利于该问题的解决。

7 结束语

IP 网络经历 30 多年的发展，历经 native IPv4、

MPLS 两代协议，当前正在向着“IPv6+”时代迈进。面对 5G 和云业务的兴起，华为全系列路由器产品均支持 SRv6，已经在跨域业务开通、综合 SLA 保障、业务调度调优、网络切片、精准业务质量感知、主动运维、电信云和业务链多方面进行了广泛的联合创新，并在全球 20 个以上的局点完成部署。

华为与产业伙伴共同积极推进与“IPv6+”相关技术的标准化工作。在国际标准化组织 IETF, SRv6 SRH 标准 RFC8754 已正式发布；网络切片、随流检测和 SFC 的标准化进展较快，已经有多篇工作组草案；华为积极创新，在业界率先提出 APN6 概念，并携手运营商和垂直行业伙伴，共同探索 APN6 的商业价值及技术特性设计，积极助力客户商业成功。在国内标准化组织 CCSA，华为联合国内运营商共同完成 5 个“IPv6+”标准项目立项。

2019 年 11 月，华为参加了由中国推进 IPv6 规模部署专家委员会组织的“IPv6+”互通测试。与天融信、思博伦等厂商设备实现互通。在 EANTC 成功与业界主流设备和测试仪厂商开展了“IPv6+”互通测试。

华为致力于与运营商和行业伙伴一道，引领基于“IPv6+”的 SRv6/EVPN/BIERv6/网络切片/iFIT 等技术的智能 IP 网络解决方案创新设计、实现与应用。与各运营商和行业伙伴展开全

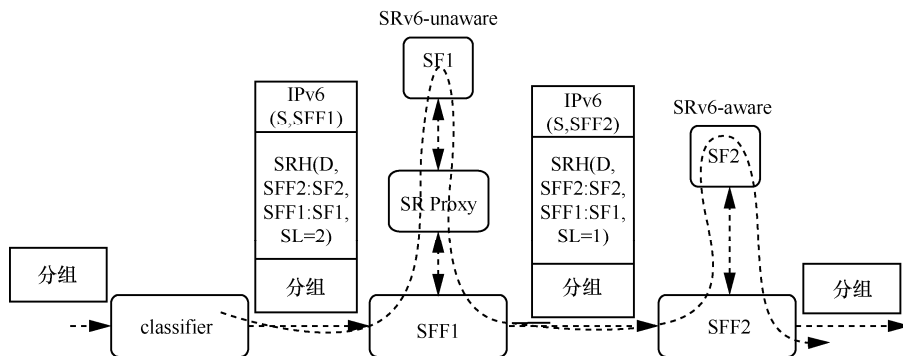


图 16 SRv6 SFC 方案架构



面合作,分析新场景、设计新方案、开发新标准、落地新技术、使能新应用。通过联合创新,实现标准、方案、技术和应用的协同发展,营造“IPv6+”产业生态,推动各行各业的数字化、信息化进程,为构建万物互联的智能时代奠定网络基础。

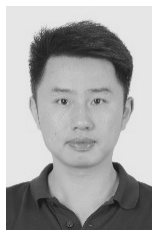
参考文献:

- [1] 华为技术有限公司. 智能 IP 解决方案-SRv6/EVPN/ BIERv6[R]. 2020.
Huawei Technologies Co., Ltd. Intelligent IP solutions: SRv6/EVPN/BIERv6[R]. 2020.
- [2] FILSFILS C, DUKES D, PREVIDI S, et al. IPv6 segment routing header (SRH): RFC8754[S]. 2020.
- [3] SAJASSI A, AGGARWAL R, BITAR N, et al. BGP MPLS-based Ethernet VPN: RFC7432[S]. 2020.
- [4] FILSFILS C, PREVIDI S, GINSBERG L, et al. Segment routing architecture: RFC8402[S]. 2018.
- [5] FILSFILS C, CAMARILLO P, LEDDY J, et al. SRv6 network programming: draft-ietf-spring-srv6-network-programming-05[R]. 2020.
- [6] FILSFILS C, SIVABALAN S, VOYER D, et al. Segment Routing Policy Architecture: draft-ietf-spring-segment-routing-policy-06[R]. 2020.
- [7] SONG H, LI Z, ZHOU T, et al. In-situ flow information telemetry framework: draft-song-opsawg-ifit-framework-11[R]. 2020.
- [8] LITKOWSKI S, BASHANDY A, FILSFILS C, et al. Topology independent fast reroute using segment routing: draft-ietf-rtgwg-segment-routing-ti-lfa-01[R]. 2020.
- [9] DONG J, BRYANT S, LI Z, et al. A framework for enhanced virtual private networks (VPN+) services: draft-ietf-teas-enhanced-vpn-05[R]. 2020.
- [10] 华为技术有限公司. 智能 IP 解决方案-SDN/AI[R]. 2020.
Huawei Technologies Co., Ltd. Intelligent IP solutions: SDN/AI[R]. 2020.
- [11] ZHOU T, LI Z, LEE S, et al. Enhanced alternate marking method: draft-zhou-ippm-enhanced-alternate-marking-04[R]. 2020.
- [12] GUICHARD J, SONG H, TANTSURA J, et al. Network service header (NSH) and segment routing integration for service function chaining (SFC): draft-ietf-spring-nsh-sr-01[R]. 2020.

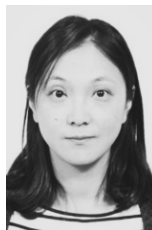
[作者简介]



王晨曦(1978-),男,华为技术有限公司数据通信产品线副总裁,主要从事数据通信产业和规划方向的工作。



古锐(1981-),男,华为技术有限公司数据通信解决方案首席架构师,主要从事下一代目标网络架构和 IPv6+、网络自动驾驶相关领域研究工作。



肖亚群(1984-),女,华为技术有限公司数据通信解决方案高级架构师,主要从事 IPv6/SRv6/网络切片等协议研究工作。



王卫波(1982-),男,华为技术有限公司数据通信解决方案高级架构师,主要从事 SDN/NFV、电信云、业务链、APN6 等方向的研究工作。



王肖飞(1979-),男,华为技术有限公司数据通信解决方案高级架构师,主要从事城域网网络架构、SDN&NFV、网络自动化及智能化等方向的研究工作。

刘悦(1981-),女,现就职于华为技术有限公司,主要从事与“IPv6+”相关的工作。