SR+EVPN 的专线网络设计应用

陈 隽[1]
CHEN Jun

摘 要 随着 5G 技术和人工智能的发展，企业信息化和数据中心建设越来越普遍，政企用户对专线网络通信的多样性、及时性、安全性的要求也越来越高，现有承载网随着通信技术的发展也需要不断更新改造，以满足用户的需求。通过介绍 SR+EVPN 技术特点及组网优势，进行 SR+EVPN 网络架构的设计，实现用户业务接入模式的应用。运营商通过对原有承载网的更新和改造，实现政企用户对专线网络业务的需求，助力科学技术的发展。

关键词 SR；EVPN；承载网；隧道技术；专线网络

doi：10.3969/j.issn.1672-9528.2024.06.039

0 引言

随着云网融合、5G 技术、人工智能的发展，大数据时代来临，专线网络应用需求更高，对运营商承载网提出了更多挑战。原来建设的运营商纯管道网络服务存在接入方式多样化、负载分摊能力不足、网络资源消耗大等问题 [1]，已经无法满足专线组网用户的需求。随着业务的转型，运营商通过对承载网的升级改造和运维管理，将现有的承载网逐步演进为在融合现有网络技术基础上，对不同应用需求的 QoS 精细化管理和差异化网络服务。

为解决上述问题，本文引入 SR+EVPN 模式，为数据承载网专线业务部署新模型。基于 EVPN 网络，以 MPLS 技术融合现有的各种网络技术，逐步演进为统一、融合的 IP/MPLS 业务网络，运营商可实现高带宽、电信级 QoS 和有保障的 SLA 能力。在演进后使用统一的 EVPN 模型时，能够满足现有网络所有二层网络（ELINE 或 ELAN）及三层 VPN 网络的无缝割接，满足目前各种专线网络传输业务应用的需求。

在进行网络规划时，IP/MPLS 现有的承载平面的 MPLS 标签分发机制，采用最新的 SR（segement routing）隧道技术，对现在的控制平面进行简化，通过 IGP 路由协议对 SR 的扩展来实现标签的分发和同步，由控制器统一负责 SR 标签的分配，并下发和同步给相关设备。

1 相关技术介绍

1.1 EVPN（以太网虚拟专用网）概述

EVPN 全称是 ethernet VPN，为以太网业务部署引入了一种新的模型，它最开始由 RFC7432 定义，是一个基于 BGP 和 MPLS 的 L2 VPN[2]，但实际上，它同样适用满足取代传统三层 VPRN 业务的承载，可满足在高带宽、复杂 QoS 和有保障的 SLA 方面多种应用的运营商承载需求。

1.2 EVPN 的优点和应用场景

EVPN 的优点就是能够使用一个 VPN 技术，同时满足了运营商需要承载的所有二层和三层业务，对两种业务而言，只有一种网络技术，不需要多种 VPN 协议。

EVPN 的最大特点是实现了转控分离，在 EVPN 中，控制平面与数据平面被抽象并隔离，多协议 BGP（MP-BGP）控制平面承载了 MAC/IP 路由信息，以 MP-BGP 作为控制平面的 L2 VPN 类业务，在学习和泛洪上提供更好的扩展性和控制能力，建立转发数据库，而且转控分离的 EVPN 也更加适合通过控制器集中部署。

同时，EVPN 继承了 VPLS 等传统网络技术的运营经验，并包含了在 L3 网络上针对业务部署的灵活性。EVPN 服务可部署在任何核心网络上，可工作于任何 IP 网络之上，实现站点间 IP 互通，为用户提供灵活的 L2 和 L3 VPN 互联。

运营商的网络对于 EVPN 而言是完全透明的，而 EVPN 拓扑对于运营商而言也是完全透明的，所能看到的仅仅是 IP 流量。在 EVPN 中的路由和 MAC/IP 通告由 PE 间的 IBGP 来控制。

1.3 SR 概述

SR 是一种源路由技术（source packet routing in networking，SPRING）。所谓源路由，指在一个 AS 网络中，数据流在源 PE 处就被确定了如何到达目标 PE 的一条路径。源 PE 根据报文匹配策略把数据包映射至该路径上，后

1. 上海市信息网络有限公司 上海 200081

续数据包沿此路径转发至目标 PE。SR 技术是一种新型的路由技术，可以提供灵活的流量工程和服务编排，在边缘源 PE 上把代表路径信息的 Segment ID（SID）序列（SR 如用在 MPLS 转发平面中的场景下，对应的 SID 就是传统 label；在 IPv6 作为转发平面下，对应的 SID 为 IPv6 地址，这些 SID 代表路由器节点或 Link）压入数据包中，然后通过中间节点 P 路由器根据 SID 进行转发 [3]。

SR 协议自带的两种隧道类型是 SR-BE 和 SR-TE。

SR-BE（best effort）隧道是将 label 通过扩展 IGP 协议扩散，动态地生成隧道，使用一个 SID 在路由器间进行最短路径转发。

SR-TE（traffic engine）隧道，是满足流量工程的隧道类型。SR-TE 隧道技术采用多个 SID 组合来实现一条转发路由，实现对转发路径的约束，满足数据传输的流量工程需求。SR-TE 隧道 SID 有三种组合方式，第一种是使用多个 Node SID 组合，第二种是使用多个 Adjacency SID（邻接 SID）组合，第三种是 Node SID 与 Adjacency SID 结合。在运营商的专线网络设计中，主要采用 SR-TE 隧道模式。

1.4 SR 的技术优势

SR 隧道技术的应用简化了 MPLS 网络的控制平面。SR 使用控制器集中算路和分发标签，不再需要 RSVP-TE、LDP 等隧道协议；SR 可以直接用于 MPLS 架构，转发平面没有变化，优化了路径选择，可以通过在数据包头部编码路径信息，实现灵活的路径选择和路径调整，根据网络状况和策略动态选择最优路径。

SR 隧道技术更具有网络容量的扩展能力。传统 MPLS TE 是一种面向连接的技术，为了维护连接状态，节点间需要发送和处理大量 Keepalive 报文，设备控制层面压力大；SR 技术则仅在头字节对报文进行标签操作即可控制业务路径，中间节点不需要维护路径信息，设备控制层面压力小，采用 SR 承载的网络业务，其可扩展性主要看源端 PE 设备的业务支持能力。

基于 SR 的隧道 LSP 可以实现中间多 IP 链路的负载均衡，实现细粒度更佳的负载均衡，而且在 SR 网络里，隧道的建立不需要在网络的中间节点（P 或出口 PE）上维护隧道的会话 / 状态信息，每个节点的 SR 模块仅需要正常地按最短路径优先的模式建立标签转发表，因此它不需要为每个隧道建立一个专门的路径，扩展性非常好，也能更好地向 SDN 网络平滑演进。SR 技术基于源路由概念而设计，通过源节点即可控制数据包在网络中的转发路径；配合集中算路模块，可灵活便捷地实现路径控制和调整；SR 同时支持传统网络和 SDN 网络，兼容现有设备，保障现有网络平滑演进到 SDN 网络。

2 SR+EVPN 的应用结构设计

2.1 网络拓扑结构和组网方式

新规划建设的承载网基于高可靠性和高可扩展性，提供高效网络负载和快速收敛的功能，采用层次化网络拓扑，总体分成核心层、汇聚层、接入层三层拓扑，节点机房选择充分利用现有网络核心、汇聚及接入点机房，便于原有网络业务平滑演进，网络结构如图 1 所示。

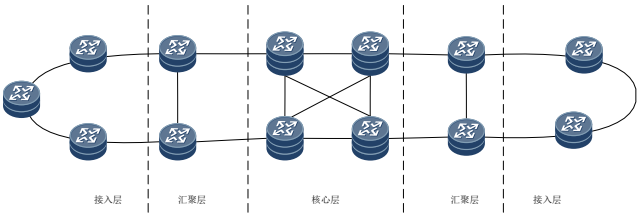

图 1 承载网络结构图

根据现有网络规模和用户需求，承载网规划核心层采用四台核心路由器 CR，全网状结构连接方式，其中两台与骨干网互联；汇聚层根据现有网络规模布放，采用双归冗余接入核心层，每台路由器分别上联两台核心路由器；接入层采用环形网络结构，根据用户需求，与汇聚层实现灵活的组网接入。

在核心层选取一对 CR 部署路由反射器 RR（Route Reflector），所有 PE 设备与反射器建立邻居关系，通过路由反射器来反射 EVPN 路由，日后网络规模扩大，可配置专用路由反射器。

承载网内部 IGP 路由采用 ISIS 路由协议，仅通告三层设备的 loopback 地址，以及设备之间的链路子网段，每台路由器上的 ISIS 链路数据库只维护网络的骨干结构，没有用户路由，链路状态数据库比较小，当某处链路故障发生后，IGP 网络路由能实现快速收敛。由于使用了 SR 技术，承载 SR 的 MPLS 标签由扩展的 ISIS 分发，汇聚和核心路由器之间无需运行 LDP 或 RSVP 作为承载隧道分发 MPLS 路径标签，减轻了设备的负荷，也简化了配置和运维。

在接入设备之间运行 MP-BGP，减少了 BGP peer 的连接数，这样每台接入设备 CE 只需要与 RR 建立 BGP peer，大大降低了网络复杂度。所有用户的路由、静态路由和配置的专线用户网段等都被注入 BGP，向路由器 RR 通告，通过 RR 实现反射通达。

2.2 SR+EVPN 的控制平面协议

SR+EVPN 控制平面采用多协议 BGP（MP-BGP）承载 MAC/IP 路由信息，构建 BGP 数据库，收集该路由器上的标签和路由信息，并通过控制器实现集中部署，使用该路由信息在 PE-PE 之间建立一个传输路由的通道来转发。以 SR-TE 隧道为例，工作原理如图 2 所示。

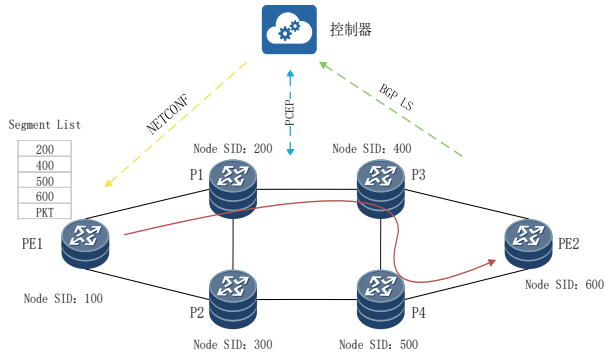

图 2 控制平面示意

（1）在 PE 节点上配置 SR 标签范围和 EVI 值。

（2）配置 isis 协议，并且通过 isis 分配 SR SID 标签。

（3）节点通过 BGP-LS 将所有邻接 SID 的标签和拓扑信息上报给控制器。

（4）控制器完成标签转发路径的计算，并下发路径。

（5）通过 NETCONF 下发隧道信息给隧道首节点，隧道首节点通过 PCEP 来将它的状态上报给控制器。

（6）首节点根据控制器下发的标签栈，生成隧道信息，建立 SR-TE 的隧道。

（7）最终在 PE1 上就可以看到标签转发表项和隧道标签栈的封装表格。

由控制器生成的 SR-TE 隧道具有以下几个优势。

（1）控制器支持带宽计算和资源预留，可以站在全局的视角计算最优路径。

（2）控制器可以和网络中的应用进行配合，由应用提出需求，控制器快速响应应用需求，然后计算符合应用需求的网络转发路径，真正做到由应用来驱动网络。

（3）控制器下发隧道配置无需大量的手工配置，更适合大规模网络。

2.3 SR+EVPN 的数据平面转发算法

在 SR+EVPN 中，数据平面转发算法如图 3 所示，以 SR-TE 隧道技术，显示的一条 Segment Routing 转发的 LSP 源路径。

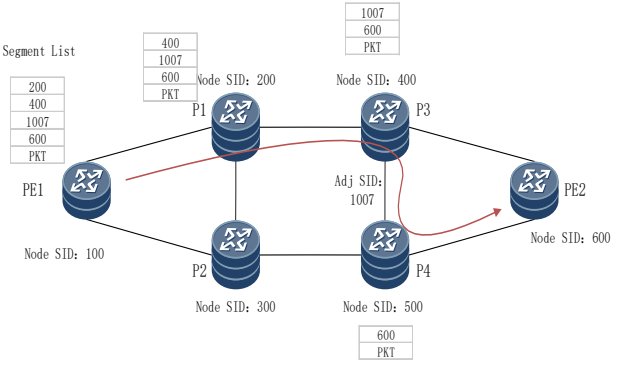

图 3 SR LSP 转发路径示意

（1）接收到业务报文以后，PE1 会根据业务配置的路由策略、隧道策略来确定隧道的封装，生成一个唯一的段标签，封装对应的标签栈，将一个 SID 序列（600，1007，400，200）压入数据包的头部，用于标识数据包应该经过的路径。

（2）PE1 根据外层标签和标签转发表来选择下一跳节点，封装 PE1 节点下一跳分配的 SR 出标签，是 SID=200，然后根据标签转发表将数据包发送给下一跳节点 P1。

（3）P1 发现外层标签 200 是自己，则弹出 200 标签，然后封装 400，判断 400 是否为邻接的 SID，将剩余的标签封装起来，根据转发表从对应的接口转发去 P3。

（4）P3 收到后同样弹出栈顶标签 400，发现交换外层标签为 SID=1007，代表 P3-P4 链路，根据外层标签和标签转发表来封装下一跳 P3 节点分配的 SR 出标签，数据包发送给 P4。

（5）P4 发现它的外层标签 1007 是自己，然后弹出 1007 标签，并封装 600，判断 600 是否为邻接的 SID，将其弹出后根据转发表对应的接口转发出去，到达 PE2。

（6）PE2 收到数据包后，根据 SID=600，则认为是发给自己的，然后弹出 600，再根据数据包里面的 IP 目的地址查找 IP FIB 进行路由表查表转发给目标设备。

根据上述可知，转发路径是根据 SR-TE 隧道对应的标签栈来对报文进行标签的操作，根据栈顶标签逐跳查找转发的出接口，来转发报文到隧道的目的地址。

通过这种方式，转发决策被推入到了数据包头部，中间节点不需要保存任何状态信息，大大降低了设备的计算和存储负载。

由于 SR+EVPN 使用了段路由的技术，可以通过修改段标签的值来实现路径保护和快速恢复。当网络中的某个链路发生故障时，源节点可以根据已经学习到的端口映射表，选择一个备用路径，并生成一个新的段标签，将数据包转发到备用路径上，实现快速恢复。

2.4 SR+EVPN 的业务接入网络设计

结合 EVPN 和 SR 技术的特点，在接入网络设计中，可以提供灵活的网络拓扑，实现 VPWS、VPLS、E-TREE 专线业务的接入 [4]，支持多路径负载均衡和快速收敛。通过使用 SR 隧道，可以实现流量工程，将数据包从源节点直接引导到目标节点，减少网络中的中间节点，提高网络性能。同时，EVPN 针对不同用户分配不同实例号，实现不同用户或组织之间的隔离和安全性。所有专线业务的部署采用扁平化设计。割接和新增的客户二层（或三层）业务直接在两个头端 PE 设备之间配置用户 EVPN 和一条端到端的 SR 业务隧道，简化了配置和运维，便于流量工程的实施，如图 4 所示。

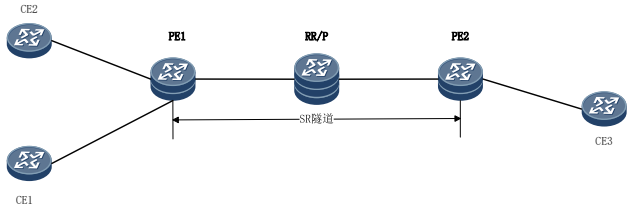

图 4 SR 隧道技术图

2.5 业务接入实例应用

对于专线业务的二层（或三层）需求直接在两个头端 PE 设备之间配置用户 EVPN 和一条端到端的 SR 业务隧道，可以实现用户间分支接入 PE 到另一个分支接入 PE，或总头 PE 到各分支接入 PE 之间的互联互通，通过配置 SR-TE 来实现。

CE 接入时采用可以提供单活、双活或一主一备冗余备份接入方式，网络侧 PE 之间可以配置多条 SR-TE 隧道负载均衡或配置成一主多备的冗余 SR-TE 隧道切换保护。

如图 5 所示，用户网络 CE3 总头要与 CE2 分点互联，CE 之间采用 SR 作为 EVPN 的承载隧道，CE 接入时可以一主一备冗余接入方式，网络侧的 PE 之间可以配置两条 SR-TE 隧道负载均衡或一主一备的冗余隧道保护方式。

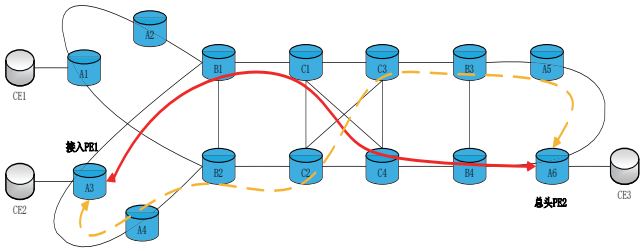

图 5 业务接入实例示意图

在 A3 和 A6 之间建立相同的 evi 100。

总头 PE2 到分点 PE1 之间可以设置两条完全不同光路的冗余备份 SR-TE 隧道：（1）红色实线 SR 隧道（SR SID list：B4, C4, C1, B1, A3）；（2）橙色虚线 SR 隧道（SR SID list：B3, C3, C2, B2, A3）。

为了避免 B2 到 A3 经过 B1 再到 A3 之间的光路，在 ISIS 路由 cost 设置时，可以有意把 B1 与 B2 以及 B3 与 B4 之间的 cost 值调大，如：每个环上 6 到 8 个接入点，每段光路 cost 设为 1，而汇聚 B1 和 B2 之间的单跳 cost 设为 10，这样就能有效避免流量在两个汇聚之间回穿。因此，通过调整 cost 值的方法，就能很好减少配置工作量，同时少压标签栈。同样调整 B3 和 B4 之间的 ISIS cost 值，运维配置时是只需简单选择主路径红色实线 SR 第一跳为 B4，备份路径橙色虚线 SR 第一条为 B3 即可。

3 新建 EVPN 网络的演进规划

对于原有网络，通过逐步的割接方式进行专线网络的演进，将原有用户逐步迁移到新建 SR+EVPN 网络上。

在完成初期承载网的建设后，通过各项指标测试确保网络整体性能达到电信级网络标准。

割接前，在预先配置好的用户 EVPN 网络案例中，在用户两端业务接入点中通过配置 CFM/Y.1731，Inline 做模拟用户业务开通测试（连通性测试、时延测试和丢包测试），在确认无误后再正式割接。

EVPN 的割接，无论是配置点对点还是点对多点业务时，用户接入端口可以是任意类型的封装形式，如 Null、VLAN、QinQ 等。EVPN 实例配置时两端的 VLAN tag 可以保留、替换、任意弹出和添加。这样，所配置的 EVPN 就能够模拟原有网络的 ELINE 和 ELAN，同时客户接入时两端的端口封装类型和 tag 均无需做任何改变，这种割接对用户是完全透明的。

割接完成后，及时确认割接成功情况，并备好回退机制。可以运行 CLI 命令用于监测和统计用户各接入端口进出两个方向的流量，或者通过专业网管软件以图形化界面方式呈现当前 EVPN 业务 CE-PE-PE-CE 端到端的业务拓扑和状态变化。

4 结论

随着专线用户的不断上线，SR+EVPN 承载网体现出良好的组网特性、便捷的运维管理、灵活的用户接入方式以及健壮的网络结构，满足多种专线业务二层和三层的组网需求，适合多场景、不同规模的组网要求，并在现有基础上具有良好的网络可扩展性。后期，将在现有基础上完善 SDN 控制器的可编程功能，实现基于路由器技术的骨干网向 SDN 化演进。

参考文献：

[1] 张龙江，邢梅，廉波，等．新型承载网 EVPN 关键技术及商业部署应用 [J]. 邮电设计技术，2022(1):24-31.

[2] 姜国春．智能城域网基于 EVPN VPWS 的固网综合业务承载实践与优化 [J]. 长江信息通信，2023(6):194-201.

[3] 洪伟．SRv6 在新型城域网中的应用实践 [J]. 江苏通信，2023(2): 64-70.

[4] 吴亚彬，张桂玉，易昕昕，等．基于 EVPN 技术的专线组网应用实践研究 [J]. 邮电设计技术，2022(4):85-89.

【作者简介】

陈隽（1973—），男，本科，工程师，研究方向：数据网络通信。

（收稿日期：2024-03-25）