

广域网出口流量调度 SDN 部署研究

李国春¹, 马睿¹, 马季春², 李伯中¹, 刘惠明², 张桂玉²

(1. 国家电网有限公司信息通信分公司, 北京 100761;

2. 中讯邮电咨询设计院有限公司, 北京 100048)

摘要: 为解决广域网出口部分的流量调度问题, 提出了基于 SR Policy/EPE 的流量调度优化方法, 在运营商网络上模拟实现了互联网出口流量调度方案。所提方法通过有效操控业务流量的流向, 可实现端到端的流量分配和全网流量灵活调度, 在保证用户体验的前提下, 有效提高骨干链路的利用率, 优化网络整体结构, 极大提升了网络的可扩展性。对于各项性能指标应用 SR 性能测量功能, 可选择最优或次优链路以解决广域网出口拥塞问题, 证实了所提方案的可行性。

关键词: 广域网; 软件定义网络; SR Policy; 出口流量调度

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2020067

Research on SDN deployment practice for WAN egress traffic scheduling

LI Guochun¹, MA Rui¹, MA Jichun², Li Bozhong¹, LIU Huiming², ZHANG Guiyu²

1. Information and Communication Branch of State Grid Corporation, Beijing 100761, China

2. China Telecom Consulting and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China

Abstract: In order to solve the traffic scheduling problem of the WAN exit part, a traffic scheduling optimization method based on SR Policy/EPE was proposed, which simulated and implemented an Internet egress traffic scheduling scheme on the carrier network. The proposed method that can effectively control the flow of business traffic to achieve end-to-end traffic distribution and flexible scheduling of network-wide traffic. Under the premise of ensuring user experience, it effectively improved the utilization of backbone links, optimized the overall network structure, and greatly improved increased network scalability. Apply SR performance measurement function to various performance indicators, and choose the optimal or suboptimal link to solve the WAN exit congestion problem, which proves the feasibility of this solution.

Key words: WAN, SDN, SR Policy, egress traffic scheduling

收稿日期: 2019-12-13; 修回日期: 2020-05-28

通信作者: 刘惠明, liuhm@dimpt.com

基金项目: 国家电网科学技术项目 (5700-201952237A-0-0-00)

Foundation Item: The State Grid Science and Technology Project (5700-201952237A-0-0-00)

论文引用格式: 李国春, 马睿, 马季春, 等. 广域网出口流量调度 SDN 部署研究[J]. 网络与信息安全学报, 2020, 6(5): 148-157.

LI G C, MA J C, MA R, et al. Research on SDN deployment practice for WAN egress traffic scheduling[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2020, 6(5): 148-157.

1 引言

云计算、虚拟化、软件定义等技术在运营商网络逐步应用的实践表明, 新型网络技术只有互相结合才能产生更多正反馈。随着数据和应用向云端迁移的节奏不断加快, 混合 IT 或混合云的架构将成为业界主流^[1]。云服务商提供 IT 应用服务并依据用户需求调用运营商优质网络资源, 运营商按照“云服务”的要求提供可配置按需调用的网络资源, 用户获得良好的使用体验, 三方形成稳固的合作关系。

从 2009 年 Martin Casado 项目组创建 Openflow 协议^[2]开始, 业界掀起软件定义网络 (SDN, software defined network) 的浪潮。网络架构转控分离的思想已深入人心, OpenFlow 通过将网络设备控制面与数据面分离开来, 从而实现了网络流量的灵活控制。随着相关技术的不断演进, SDN 超越原有 Openflow 协议本身, 向着网络架构精简化、网元设备虚拟化、产品形态白盒化、底层传送可编程化、运维管理自动化等多方向同时演进。

运营商目前构建虚拟专网 (VPN, virtual private network) 基本是以多协议标签交换^[4] (MPLS, multi-protocol label switching)、分段路由^[5] (SR, segment routing) 技术为基础, 从某种意义上可看作一种 Overlay 虚拟网络形态。当前主流 Overlay 网络底层封装技术主要有虚拟扩展局域网^[6] (VXLAN, virtual extensible local area network)、MPLS/SR 等。MPLS/SR 在运营商网络接受程度较高, 以太网虚拟专用网络 (EVPN, Ethernet virtual private network) 可提供 L2、L3VPN 服务, 底层支持 VXLAN、MPLS/SR 封装。未来, 随着 SR 在数据中心接受度进一步提高, 运营商可统一使用 EVPN/SR 方案。SR 能简化网络层次, 实现底层数据传送可编程性, 具体简化网络架构如图 1 所示。和 MPLS 网络类似, SR 以标签交换为基础, 通过一组有序的标签栈来标识网络路径, 改变标签栈的内容即可改变业务的路径, 这种灵活的可编程特性与 SDN 架构无缝融合。相比传统 MPLS 网络需依靠外部协议实现标签的动态分发、流量工程等功能, SR 只对现有内

部网关协议 (IGP, internal gateway protocol) / 边界网关协议 (BGP, border gateway protocol)^[7] 进行扩展, 转发表也更简洁。在流量调度管理方面, 在分段路由流量工程^[8] (SR-TE, segment routing traffic engineering) 中, 不用维护资源预留协议 (RSVP, resource reservation protocol) 的复杂信令, 网络状态减少很多。新一代分段路由策略^[9] (SR Policy, segment routing policy) 架构相比传统的 SR-TE 占用更少的设备资源, 能够提供更灵活的流量牵引方案。

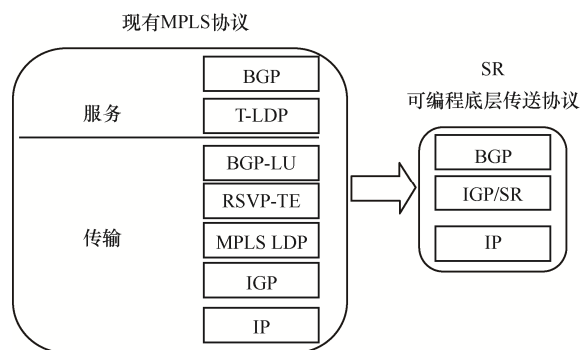


图 1 SR 简化网络架构示意
Figure 1 Simplified network architecture of SR

2 网络流量调度需求分析

高清视频、云计算的蓬勃发展带来流量持续增长, 广域网出口经常发生拥塞, 这部分的网络流量调度设计将直接影响终端客户的上网体验。传统网络工程师主要通过 BGP 策略调整解决这一问题, 这种方式实现起来不够灵活。BGP 设计的初衷是提供稳定的网络连通性, 没有考虑网络资源状况是随时变化的。理想的路由策略除了考虑网络拓扑, 还需要综合考虑带宽、时延、丢包需求、设备端口容量、性能及拥塞等因素。

通常企业用户的网络可以看作悬浮在运营商骨干互联网之上的信息岛^[10], 用户通过运营商宽带或移动互联网访问其资源。另外, 部分大型企业自建骨干网直接提供高品质私有网络服务, 削弱对传统转接通信 (transit) 和多方互联 (public peering) 流量中转模式^[11]的依赖性。而采用与运营商 Internet Access 网络高效直通方式实现 IP 洪流卸载, 企业网络与运营商网络的联系从点到点互联变成多点到多点、面到面的多出口互联模式。

同时,企业可借助自身的优势,使用重定向、新型传输控制协议(TCP, transmission control protocol)的拥塞控制算法、超文本传输协议(HTTP, hyper text transfer protocol)的自适应码流控制技术等,配合 BGP 路由策略及新型 SDN 架构,实现理想中的应用/性能感知路由调配模式,把网间互联出口变成按需使用的资源池。

广域网出口面向主要企业用户、数据中心,与其他运营商建立了大量网间外部边界网关协议^[12](EBGP, external border gateway protocol)通路。相比而言,在出口带宽调配方面是有不同侧重点的,但同时面临更多挑战,主要如下。

(1) 应用感知

企业用户希望通过流量调度保证用户体验持续改善,同时提高端口利用率。一方面,可以通过调整路由策略;另一方面,利用其他技术手段,如 HTTP 码流、TCP 协议栈改善、次优链路非平衡复杂等实现其业务目的。运营商的解决方案更关注整网流量模型优化,保证资源均衡使用、避免出现热点区域,故障发生时能保证有足够备份容量支撑业务,采用大颗粒流量调度而不关注应用细节体验。

(2) 设备松耦合、混合场景部署

广域网由于规模巨大,设备类型、出厂年代、软件版本参差不齐,对 SDN 的支持不一致。诸多新型网络协议栈如 Openflow、MPLS/SR、SR-TE/SR Policy^[13]等需对现网进行适当软硬件升级才能实现,因此在多厂家异构场景下保证方案的可实施性、兼容性、互操作性将是重点考虑之处。

(3) 可靠性、扩展性要求高

广域网拥有大量网间互联出口,EBGP peer session 数量巨大,路由表容量在不断增长,出口设备容量、链路带宽、时延参差不齐,很难通过单一策略寻找流量调配的最优或次优路径,大多时候错误参数调整反而使整个网络更加不稳定,因此,需要通过大量网络仿真才能制定相对理想的决策。

3 国内外相关工作

Google 于 2017 年对外发布了两种不同的 Peering Fabric 设计理念^[14],依此成功部署业界第

一个 SDN B4 数据中心互通网络^[15]。Google 的全新 Espresso Peering Fabric 架构如图 2 所示,采用 SDN 技术动态调整应用出口带宽,在全局及本地控制器配合下,Espresso 可比传统 BGP 路由传送更多的客户流量,同时显著提高每条链路利用率和端到端用户体验。

Espresso 要求动态感知每用户或每应用流量状况并据此进行全局出口资源调配,在提高 Peer 路由器出口链路利用率的同时,尽量避免高优先级业务拥塞。特别地,引入了全局和本地控制器实现 Peer 路由器转控分离,不仅将传统 Peer 路由器控制面(CP)集中交由自研 BGP Agent 集中处理,同时将 Peer 路由器部分转发面(DP)功能、访问控制列表/转发信息库(ACL/FIB, access control list/forward information base)功能卸载到主机 Host 实现。主机直接引导出口流量选择最优 Peer 路由器及其外部链路,实现从 Host 到 Peer 出口的精细化应用流量控制。借助 SDN “转控”分离的想法,Google 工程师解耦传统 Peer 路由器,并将其演进为 Peering Fabric (数据转发面)和服务器集群(控制面+反向代理/缓存功能)相结合的新型网络架构。

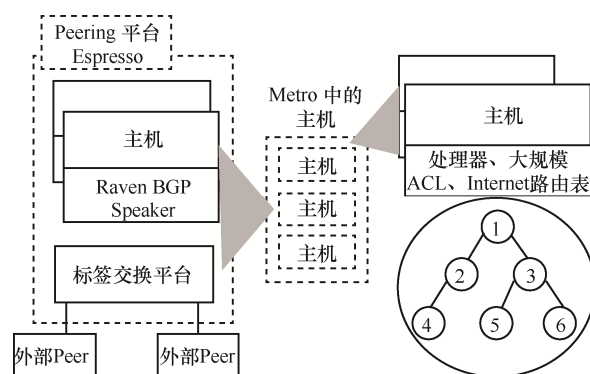


图 2 Google Espresso Peering Fabric 架构
Figure 2 Architecture of Google Espresso Peering Fabric

相比而言,Facebook Edge Fabric 架构^[16]采用 SDN Controller 集中控制方式,大量使用现有成熟或可实现技术。限制流量调度在单个入网节点(PoP, point of presence)实现,基于实时流量、拓扑、路由、策略等信息,无状态设计的 SDN 控制器每隔 30 s 生成针对应用流量的最优及次优出口,并通过调整 BGP local preference 参数来改变 Prefix 的下一跳,使用 BGP route insertion 方式指

导不同流量 (Prefix) 在多个自治系统边界路由器 (ASBR, autonomous system boundary router) 之间的均衡负载。

Facebook Edge Fabric 架构如图 3 所示, SDN 控制器的多个功能组件负责采集各种网络资源信息。BMP Collector 和多个 Peer 路由器之间建立 BMP session 搜集 Prefix/Peer 信息, Traffic Collector 利用网络数据包交换技术或简单网络管理协议 (SNMP, simple network management protocol) 搜集接口/Prefix 流量, 同时 SDN 控制器会搜集 PoP 网络拓扑及策略信息。因 BGP 不能感知应用服务质量, Edge Server 动态随机选一小部分流量做标记, 并用来测量使用最优及次优 BGP 路径的性能, 以评估主 BGP 路径拥塞或未达理想目标时是否可调配部分流量通过次优出口。当调度仍然发生在主用 Peer 路由器上, 借助 SDN 控制器, 出向拥塞的主用 Peer 路由器可以借助策略路由将部分流量重定向到非拥塞的 Peer 路由器出口上。

从图 3 可以看出, Facebook 采用业界厂商支持的主流网络协议。最早尝试 Google 的 Host Routing 方式直接选路到 Peer 路由器, 从 Host 建立到 Peer 路由器出口的通道, Host 负责标识 DSCP 值, Peer 路由器根据 DSCP 值转发到不同端口。在技术实施方面, 需考虑如合适的路由及转发软件、大量主机状态及时同步等各项问题, 最终 Facebook 选择了相对成熟的 BGP Inject@PR 方案, 这是现阶段比较适合 Facebook 的 Edge Fabric 架构方案, 未来会考虑转向 BGP 出口流量工程 (EPE, egress peering engineering) 和 SR。

4 基于 SR Policy/EPE 方式的流量调度优化方案

本节提出广域网出口流量调度的 SDN 部署

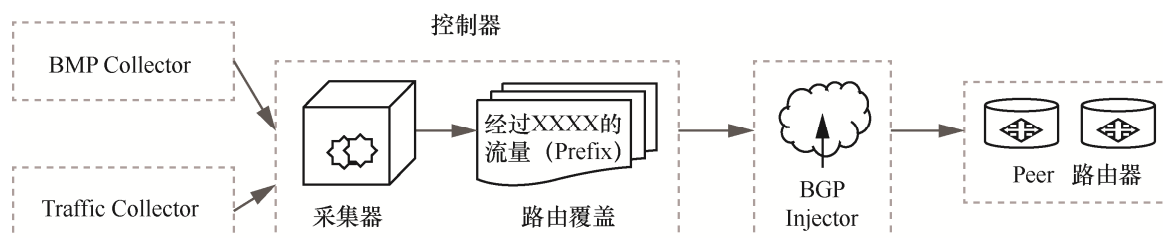


图3 Facebook Edge Fabric 架构
Figure 3 Architecture components of Facebook Edge Fabric

方案, 首先总结了广域网出口流量调度目标; 然后针对基于 SR Policy/EPE 方式的流量调度优化方法进行详细介绍; 最后对仿真验证进行说明。

4.1 广域网出口流量调度目标

广域网之间流量调度需求非常普遍。通常采用 BGP 路由策略实现, 难以有效利用次优线路资源实现多出口等价或非等价负载均衡、实现远端非直连自动引流 (AS, auto steering) 流量调度、故障情况流量切换。企业客户出于投资成本考虑, 会将自己服务器托管在运营商数据中心, 同时希望运营商提供相关网内 (省际出口)、网间 (国内三大运营商网间互联出口) 甚至网际 (国际互联网出口) 多点均衡流量调度方案。

4.2 基于 SR Policy/EPE 方式的流量调度方法及仿真验证

下面介绍利用 SR Policy/EPE 方式实现互联网出口流量调度优化方法。图 4 是一个典型广域网多出口调度场景。

网络 AS100 分别与其托管数据中心 AS300 及其他运营商 AS200 建立多条互联互通 EBG P Peer 连接通路, 每个方向通路包括多台 Peer 路由器及出口链路。正常情况下, 为保证服务质量, 会预留较多带宽, 所有方向链路聚合带宽足够满足网内及网间流量需求, 但由于 BGP 路由参数配置、设备支持能力等, 网络存在热点区域, 峰值情况下部分 EBG P 链路利用率会接近 100%, 而有些其他区域链路利用率不到 50%。因此, 优化流量调度的目的为确保在拥塞情况下运营商有足够的能力分析、调配部分流量分流去次优方向或将关键流量调往专门链路。

在该场景中, 网内客户 (AS100) 要求提供国际互联网和数据中心云访问服务。不同业务对网络的需求不同, 互联网访问提供尽力而为的服务, 数据中心 AS300 云服务访问则要求保证低时

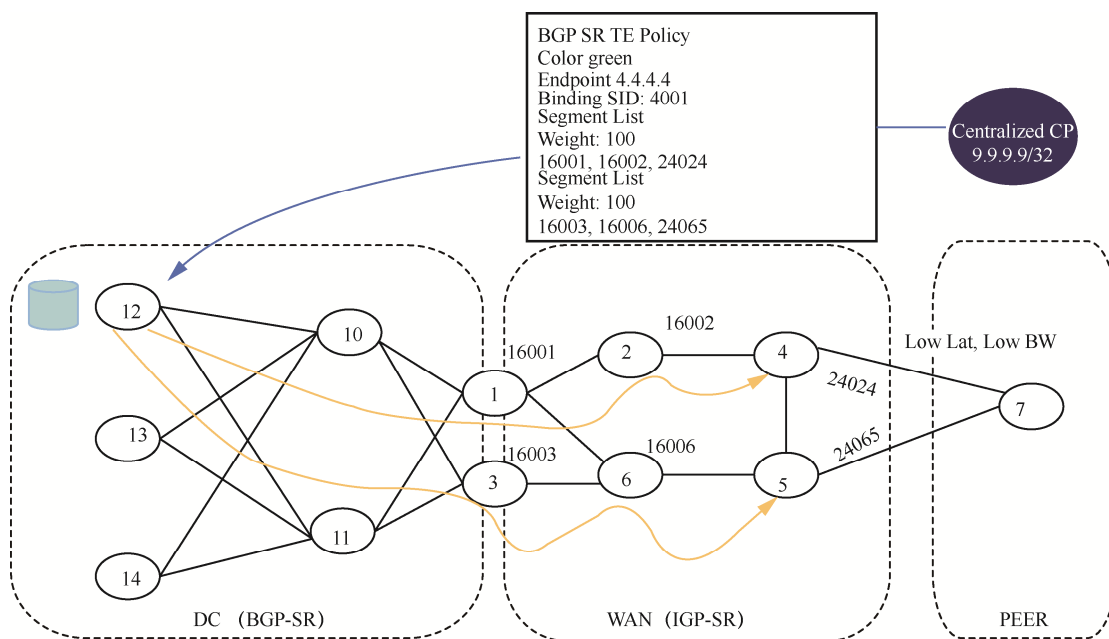


图 5 SR Policy 封装部署模型
Figure 5 Packaging and deployment model of SR policy

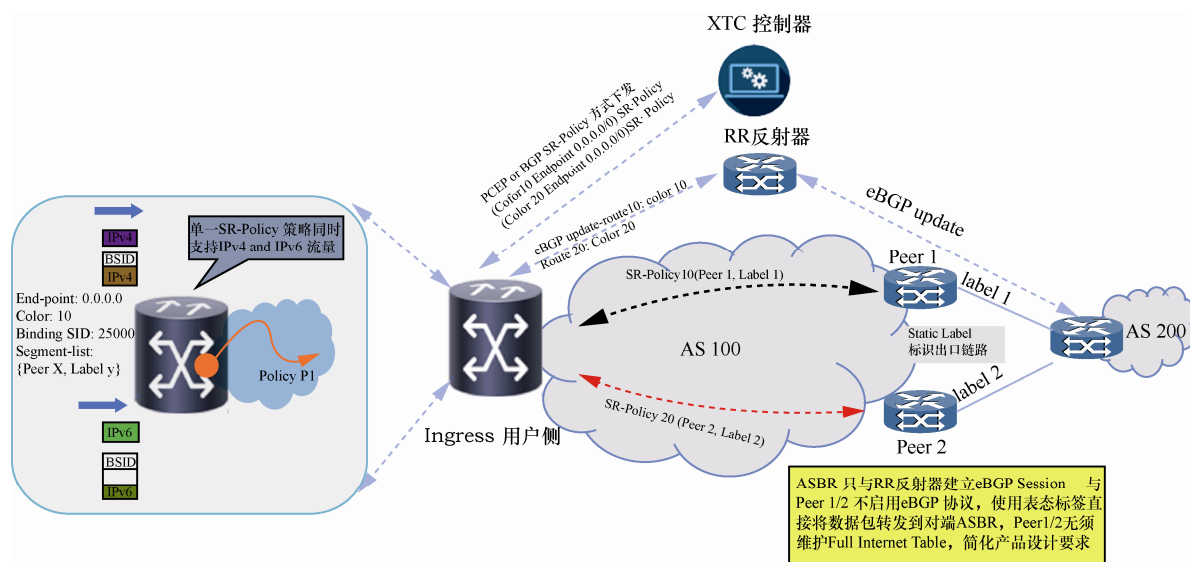


图 6 Color-only AF-agnostic Automated Steering 流量调度牵引模式
Figure 6 Traffic scheduling mode of Color-only AF-agnostic Automated Steering

于最初路由器硬件并不支持 SR 和 SR Policy 功能, 只能实现 MPLS 标签转发。为达到用户流量调度要求, 利用 BGP EPE 方式为 Peer 路由器出口链路分配标签标识, 通过 BGP 多标签 (BGP-LU, border gateway protocol labeled unicast) 强行为 Destination Prefix 压入一层 EPE 标签, 基于 BGP LU 下一跳地址, ingress 设备自动递归解析出相应 Peer 路由器的 MPLS 路径。这种

方法能够在一定程度上解决边界 Peer 出口链路流量调度问题, 但存在局限性, 即只能基于 Prefix-set 细颗粒度下发流量, 入口流量设备到 Peer 路由器只能实现尽力而为的转发, BGP LU 压标签栈方式无法提供路径检测机制, 易出现黑洞。通过适当软/硬件升级, 使设备及网络支持 SR 和 SR Policy 功能。

为仿真和验证改进后的基于 SR Policy/EPE

方式的流量调度优化方案的可行性, 采用 Mininet+OpenDayLight 网络仿真平台来搭建拓扑, Mininet 网络仿真工具版本为 2.1.0, 控制平面利用开源的 OpenDayLight SDN 控制器 0.8.0 版本, 并在其上安装 BMP 服务功能, 仿真流量调度数据流如图 7 所示。

在图 7 中, 黑、黄、橙 3 种颜色箭头分别对应不同方案 (Best Effort/ SR Policy / SR Policy + BGP EPE) 下用户流量 (1.1.1.1 color 99 和 2.2.2.2) 所要经过的完整路径。黑色箭头代表系统缺省选择的最短路径方案, 即根据 BGP 1.1.1.1/2.2.2.2 从 AS 100 R1 经 R4 到达 AS 200 R8。因所有流量缺省都经由这条线路到达 R8, 若某一阶段 R3 到 R5 中间链路出现拥塞, 则需要网络告警通知运维人工干预。

黄色箭头代表只使用 SR Policy 方案对用户流量进行调度, 借助控制器 (XTC) 北向 Restconf API 开放接口向网络发送 SR Policy 流量调整策略。本文方案采用最短时延或 TE 最短路径到达出口路由器 R5, 此时数据流流向如图 8 所示。和系统缺省方案不同, 此时 R5 向域内 (AS100) 发

布路由时, 对于 1.1.1.1/32 标记 color 99, 对于 2.2.2.2/32 不使用 color 标记。当 R3 收到 color 标记为 99 的路由时 (1.1.1.1/32), R3 向 R10 (XTC) 请求并获取 SR Policy, 在 R3 上配置针对 color 标记 99 的动态 SR Policy 并将其放在转发表后, 实现流量的引流, 按照 TE 最短路径或最低时延去往 R5。数据流验证结果表明, 从 R1 到 1.1.1.1 的流量, 在 R3 上根据 SR Policy 指定的 SRTE 路径经过 R3-R2-R7 到达 R5, 并经过 R8 (AS300) 达到 R9 (AS400)。此时, 部分流量 (1.1.1.1 color 99 黄色) 经由 R3-R4-R5 调整至 R3-R2-R7-R5。若不希望所有 (1.1.1.1 color 99 黄色) 流量都通过新的路径, 则定义这条 SR Policy 包含两条加权路径, 一条走原来的 R3-R4-R5, 一条走 R3-R2-R7-R5, 将 (1.1.1.1 color 99 黄色) 流量按一定比例在这两条路径非平衡负载。经处理之后, 原有 R3-R4-R5 拥塞链路告警消失, 所有 AS 100 访问流量 (1.1.1.1/2.2.2.2) 均通过到 AS 300 的跨域连接到达 R8, R5-R8 之间跨域链路相对使用率较高。

改进后的基于 SR Policy/EPE 方式的流量调

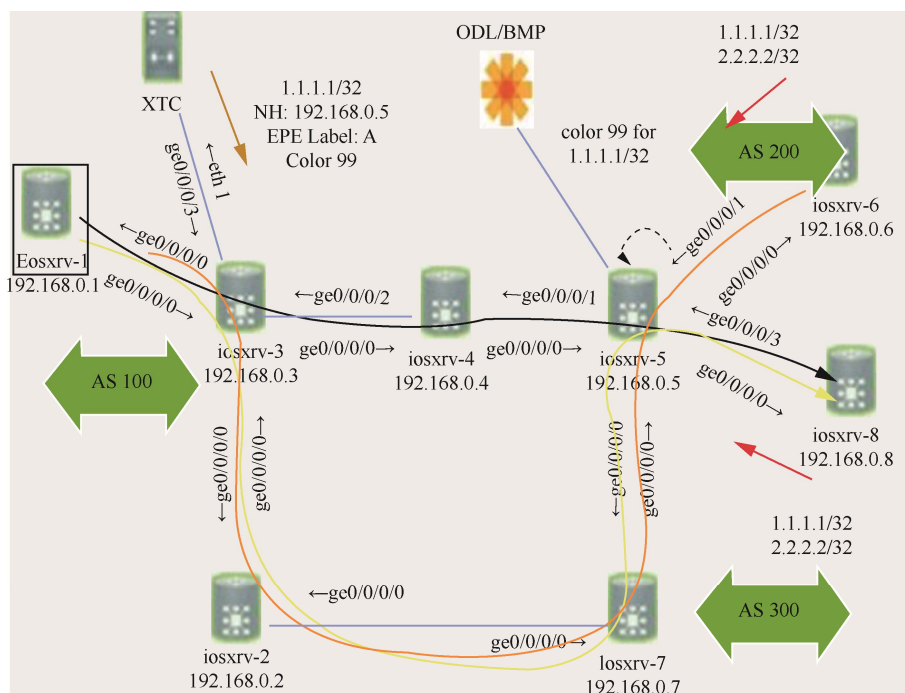


图 7 仿真流量调度数据流
Figure 7 Data flow of simulated traffic scheduling

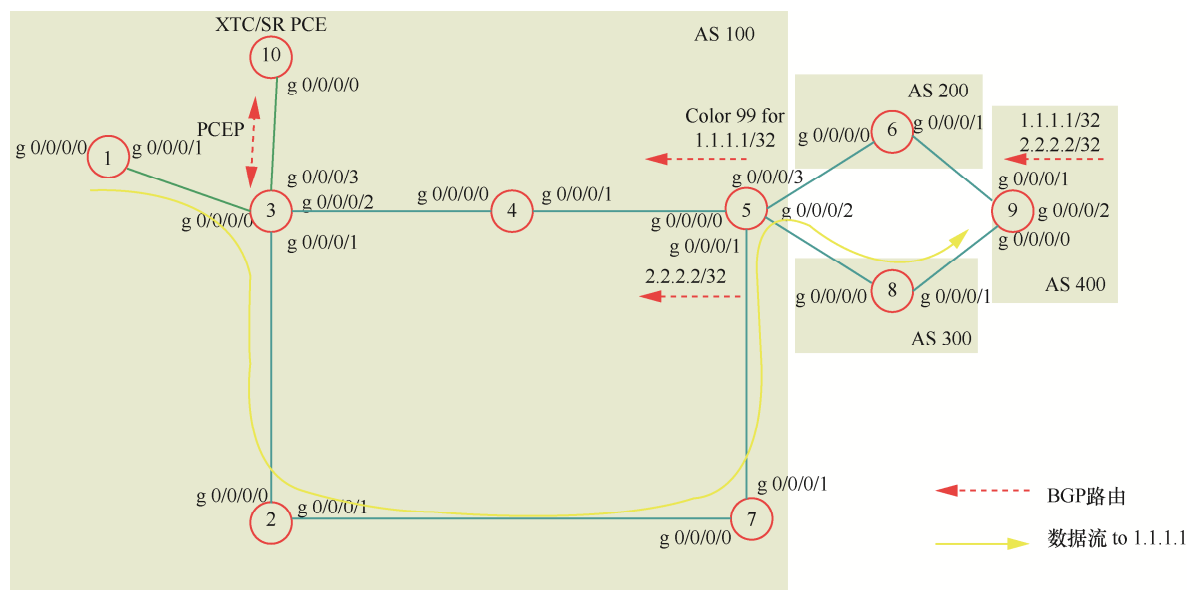


图8 基于 SR Policy 方式的数据流
Figure 8 Data flow based on SR policy

度优化方案对应图 7 中的橙色箭头指向，在 AS100 域内通过 XTC 控制器计算路径并下发 SR Policy 之后，在出口路由器 R5 上应用 EPE 功能引导跨域出口流量调度，从而合理选择下一跳经由 R6 (AS200) 去往 R9 (AS400)。利用 OpenDayLight 控制器从出口路由器 R5 收集 pre-policy and post-policy RIB 路由信息，经分析发现目标网段 (1.1.1.1 color 99) 经由 AS200 也可以到达，因为是非最优路由，在传给 R3 的 BGP update 这一部分次优路由信息被丢失。为持续改善用户体验，可尝试将部分流量经由次优路径传送并评估效果，如效果不好则回撤。具体可通过修改 (PUT) 之前下发的 SR Policy，增加下一跳 AS 200 Link EBGPEPE 标签将流量调整经由 AS 200 转发。业务低谷期间，可通过 Netflow/SNMP 等手段获取 (1.1.1.1/2.2.2.2) Flow 流量信息，如发现业务流量持续下降可通过删除 SR Policy，恢复初期最短路径路由方案，将占用的 R2-R7 的链路资源让出来。

SR Policy 提供基于流量和时延的链路优化策略，加上 EPE 对多路径负载均衡的支持后变为更加灵活的流量调配方式。该调度方式对图 4 的典型广域网多出口调度场景中托管数据中心 DC 流量 (AS 300) 调度尤为重要。DC 出互联网方向可以有两条路径 (绿色箭头指向)：直连 “AS

200” 和经由 “AS100, AS200”，前者从 BGP 路由策略的角度看为最优路径，如果此时部分流量分流绕道至相对较远的路径 (即 AS-Path 较长)，则需通过 BGP 放明细路由方法，但此时负载分担比例无法精细化调整，在应用基于 SR Policy/EPE 方式的流量调度方法后，以 SR Policy 策略加上出口流量的多路径加权负载均衡流量调度优化可提供次优路径的分析选择，以优化广域网的链路拥塞问题。

5 总结与展望

本节对基于 SR Policy/EPE 方式的流量调度优化方法的技术优势、方案创新点及后期改进方向进行总结。

5.1 方案创新点

SR Policy 将运营商最擅长的 BGP 路由置于整个体系的核心。在运营商网络的流量调度方面有以下的创新。

(1) SR Policy 以 ODN 的方式动态指定候选路径，此时所有边缘节点只需要配置少量相同的模板，不再需要预先手动配置任何全网状的互联网隧道。与原先的 RSVP 预置于网络中的大量的全网状隧道相比，SR Policy ODN 模式极大地简化了运营商网络，同时提升了网络的可扩展性。

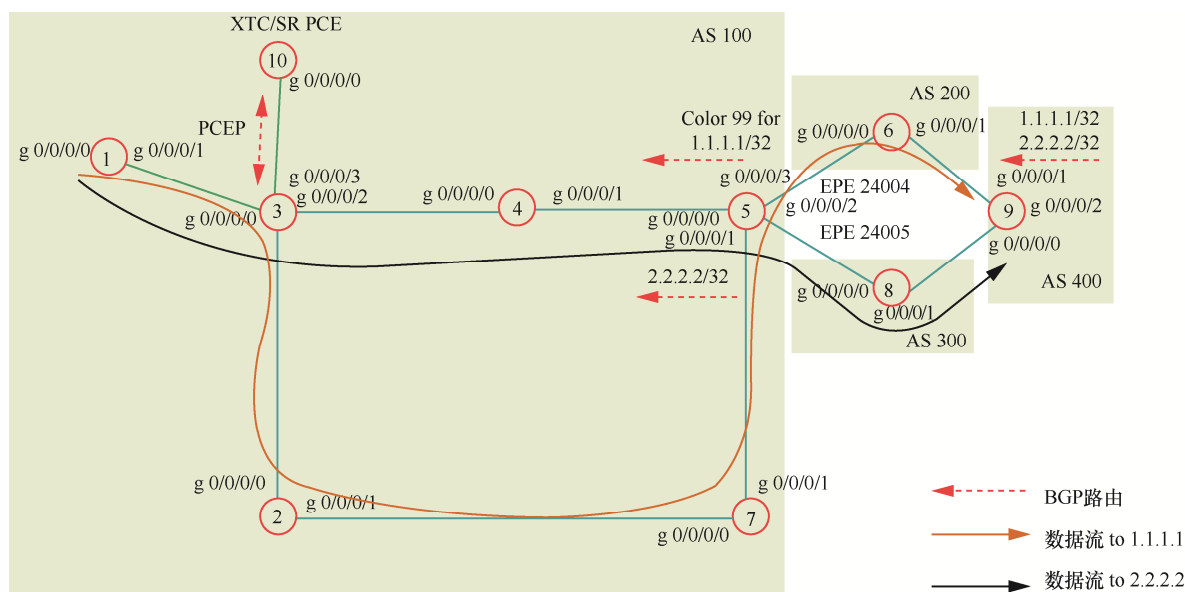


图 9 基于 SR Policy/EPE 方式的数据流
Figure 9 Data flow based on SR Policy/EPE

(2) 本文提出的基于 SR Policy/EPE 方式的流量调度方法通过 BGP 直接将 SR Policy 中的各条候选路径和路由装载到路由器的转发表上, 避免了以往运营商网络实现引流的各种复杂方式, 实现每条流的自动引流, 进一步实现运营商对网络流量的精细化控制。

(3) SR Policy 利用 <color, endpoint> 定义了端到端的备选路径。通过备选路径上应用 Weight 值可以很容易地实现不同路径之间的负载分担, 或不同路径按比例分配流量。这种端到端的流量分配与调度机制, 实现运营商全网尤其是出口流量调度的优化, 为提高骨干链路的利用率提供了适用且高效的方法。

5.2 工作展望

总体而言, 采用 SR Policy 方式实施 SDN 部署相比传统方案具备不少后发优势。初期 SR 技术通常利用标签交换, 与 MPLS LDP/RSVP-TE 有完善互操作方案, 适合运营商混合组网阶段引入。与传统 SR 架构相比, 本文所提 SR Policy/EPE 方法旨在为运营商提供更为高效的流量调控方案。其中, 网络数据采集、遥测、基于大数据的智能流量调度等没太多涉及, 这是下一阶段需要持续创新改进的地方。

受 SR 设计理念影响, 初期 SR Policy 设计没有太多考虑带宽、时延及流量优先级需求。利用

BGP-LS 采集拓扑并没有完整收集时延、端口速率、带宽等信息, 这使当前版本仅能依赖 XTC 控制器计算路径方案, 解决这一问题需借助网优建模规划软件及一些其他技术手段, 如 SR 转发计数 (SR forwarding counter)、链路时延检测及相关路径计算 (link delay performance measurement) 等。

后续改进方案会考虑引入网络流量规划设计、业务部署及中心调度方案, 同时更新升级 PCE 控制器进行路径计算优化、扩展 BGP-LS 拓扑采集信息, 实现与 SR 网络更紧密的整合。通用路径计算交由 XTC 控制器完成, 与带宽相关的应用交由网络流量规划设计工具提供类似的服务, 如带宽按需申请 (service-driven BW on demand)、网络带宽模型优化 (network tactical BW optimization)、带宽分时共享 (bandwidth calendaring) 等创新服务类型, 业务调度平台负责业务下发及整个网络方案的自动化流程管理。

6 结束语

本文介绍的广域网出口流量调度优化部署方案在 SDN 架构基础上, 将新型技术架构 SR Policy 和传统 BGP 协议相结合, 在尽量保护原有设备投资及运维体系基础上成功实现了广域网出口流量操控。随着 SDN 相关产品技术的不断完善, 流量调度方案进一步完善, 可以预见, 未来更多符合

中国运营商以及企业广域网应用场景的新方案、新技术将不断涌现。

参考文献：

- [1] 云计算开源产业联盟. 云网融合发展白皮书[R]. 2019.
Cloud Computing Open Source Industry Alliance. White paper on cloud network integration development[R]. 2019.
- [2] TOOTOONCHIAN A, GORBUNOV S, GANJALI Y, et al. On controller performance in software-defined networks[C]// Proceedings of the 2nd USENIX Conference on Hot Topics in Management of Internet, Cloud, and Enterprise Networks and Services. 2012.
- [3] JIANG X, VIOLIN J X. Virtual internetworking on overlay infrastructure[C]//International Conference on Parallel & Distributed Processing & Applications. 2004.
- [4] SHARAFAT A R, DAS S, PARULKAR G, et al. MPLS-TE and MPLS VPNs with OpenFlow[J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2011, 41(4): 452-453.
- [5] IETF. Segment Routing Architecture [EB].
- [6] CISCO. White paper on configure the cisco fabric border provider edge feature for VXLAN EVPN Fabric[R]. 2016.
- [7] HARES S, REKHTER Y, LI T. A border gateway protocol 4[M]. RFC Editor, 2006.
- [8] CISCO. BGP 动态分段路由流量工程[EB].
CISCO. BGP SR-TE[EB].
- [9] CISCO. 新一代 Segment Routing 流量工程体系-SR Policy[EB].
CISCO. A new generation of Segment Routing traffic engineering-SR Policy[EB].
- [10] 中国联通. 中国联通通信云架构白皮书[R]. 2017.
China Unicom. White paper on China Unicom communication cloud architecture[R]. 2017.
- [11] KHAN A, KIM H, KWON T T, et al. Public internet routing registries (IRR) evolution[C]//International Conference on Future Internet Technologies. 2010.
- [12] 邵宇辉. 基于 MPLS VPN 技术的 Multi-hop MP-EBGP 组网方式应用研究[J]. 科技信息, 2008(34): 220-223.
SHAO Y H. Research on Multi-hop MP-EBGP network approach of MPLS VPN[J]. Science & Technology Information, 2008(34): 220-223.
- [13] CISCO. SRv6 Network Programming [EB].
- [14] YAP K K, MOTIWALA M, RAHE J, et al. Taking the edge off with espresso: scale, reliability and programmability for global Internet peering[C]//Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. 2017.
- [15] JAIN S, KUMAR A, MANDAL S, et al. B4: experience with a globally-deployed software defined WAN[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM. 2013.
- [16] SCHLINKER B, ZENG H Y, HYOJEONG K, et al. Engineering egress with edge fabric steering oceans of content to the world[C]//

The Conference of the ACM Special Interest Group. 2017.

[作者简介]



李国春（1961—），男，四川人，国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师，主要研究方向为通信与自动化、量子保密。

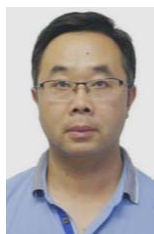


马睿（1978—），男，河南新郑人，国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师，主要研究方向为通信网络规划、建设及架构管理。

马季春（1973—），男，河南郑州人，中讯邮电咨询设计院有限公司高级工程师，主要研究方向为运营商互联网工程规划与设计。



李伯中（1977—），男，黑龙江巴彦人，国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师，主要研究方向为通信网络规划与建设管理。



刘惠明（1976—），男，湖北大悟人，中讯邮电咨询设计院有限公司高级工程师，主要研究方向为互联网规划与设计。



张桂玉（1979—），女，河南项城人，中讯邮电咨询设计院有限公司高级工程师，主要研究方向为 IP 网、互联网及 SDN。

《网络与信息安全学报》

第二届编辑委员会

主 任 委 员：方滨兴

常务副主任委员：李风华

副 主 任 委 员：李 晖 俞能海 Kui Ren[USA] 刘建伟

邹德清 杜学绘 刘华鲁

委 员：（按姓氏笔画排序）

丁 勇	马建峰	王 标	王布宏	王连海
王良民	王国胤	王明生	王美琴	牛 犇
仇洪冰	田有亮	田俊峰	史国振	付章杰
冯 涛	朱建明	延志伟	仲 盛	向 涛
刘 哲	刘 渊	刘西蒙	刘哲理	闫 峥
孙东红	杨宏宇	肖 甫	肖 亮	吴 铤
吴晓平	邱卫东	何道敬	沈 超	张小松
张云勇	张红旗	张宏莉	张建标	张振江
陆月明	陈立全	陈兴蜀	陈性元	陈雷霆
苗春雨	林 鹏	易东山	赵 波	赵琉涛
咸鹤群	禹 勇	姚志强	秦 拯	贾 焰
殷丽华	翁 健	黄欣沂	曹春杰	彭国军
蒋文保	韩伟力	韩劲松	程 光	阚海斌

David Naccache [FRA] Gang Qu [USA] Jinjun Chen [AUS]

Willy Susilo [AUS] Yier Jin [USA]