

基于IPv6的虚拟以太网技术 ——EVN6



IPv6-Based Ethernet Virtual Network (EVN6)

马晨昊/MA Chenhao, 孙吉斌/SUN Jibin,
解冲锋/XIE Chongfeng

(中国电信股份有限公司研究院, 中国 北京 102209)
(China Telecom Research Institute, Beijing 102209, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202406004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241217.1409.002.html>

网络出版日期: 2024-12-17

收稿日期: 2024-10-09

摘要: 针对传统虚拟以太网组网技术的封装开销大、组网范围有限和数据面能力较弱等问题, 提出了一种新的直接基于IPv6协议承载的虚拟以太网组网方案。该方案可以使以太网帧直接封装在IPv6报文的负荷上, 通过标识映射的方式利用以太网标识和网内主机链路层地址生成IPv6地址, 并且选用IPv6地址前缀作为路由信息和站点标识, 既标识站点的逻辑位置, 又使数据包通过native IPv6的方式穿越互联网, 提升了封装效率和可运维性。现网测试验证了技术的可行性, 展现了其在业务敏捷性、覆盖范围和流量转发调度方面的优势。

关键词: IPv6; 虚拟以太网; 标识映射

Abstract: The traditional virtual ethernet networking technology has the problems of high encapsulation cost, limited network coverage, and weak data plane capability. In this paper, a new virtual ethernet networking system based on IPv6 protocol is proposed, called IPv6-based ethernet virtual network or EVN6. It can make the ethernet frame directly encapsulated on the payload of IPv6 packets, generate IPv6 address using the information of the virtual Ethernet and the host by identification mapping, and select the IPv6 prefix as the routing information and site identification, which not only identifies the logical location of the site, but also enables the packet to traverse the Internet through native IPv6. This system improves encapsulation efficiency and operability. The technical feasibility of technology is verified in the field trail test, showing the advantages of business agility, network coverage, and flow forwarding and scheduling.

Keywords: IPv6; virtual ethernet; identification mapping

引用格式: 马晨昊, 孙吉斌, 解冲锋. 基于IPv6的虚拟以太网技术——EVN6 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(6): 16-22. DOI: 10.12142/ZTETJ.202406004

Citation: MA C H, SUN J B, XIE C F. IPv6-based ethernet virtual network (EVN6) [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(6): 16-22. DOI: 10.12142/ZTETJ.202406004

随着云计算、虚拟化技术的快速发展, 虚拟以太网成为现代网络架构中的重要组成部分, 广泛应用于运营商的城域网、骨干网、企业组网、数据中心、家庭网络和软件定义广域网 (SD-WAN) 等多样化场景。虚拟以太网是一种基于虚拟化技术的网络连接方式, 它在虚拟机之间、虚拟机与物理机之间提供了高效的网络通信能力。当前虚拟以太网类技术主要包括基于多协议标签交换 (MPLS) 的二层虚拟专用网络 (VPN) (包括VPWS、VPLS)^[1]、基于IP的可扩展虚拟局域网 (VXLAN)^[2]、EVPN VPWS/VPLS over SRv6 BE等^[3]。

虚拟以太网具有众多优点: 1) 具有灵活性, 提供了灵活的网络配置能力, 使用户可以根据业务需求动态调整网络

拓扑和流量策略; 2) 具有良好的可扩展性, 通过VXLAN等技术, 可以支持大规模网络部署, 适应数据中心和云计算平台的扩展需求; 3) 通过冗余和故障转移机制, 提高了网络的可靠性和可用性; 4) 通过提高资源利用率和简化网络管理, 降低了企业的IT成本。

当前的虚拟以太网满足了二层虚拟组网的基本要求, 如在云数据中心中支持虚拟机迁移, 支持多种虚拟网络拓扑模式, 包括点到点、多点到多点等。在虚拟网之间的安全隔离, 确保租户之间数据和拓扑不可见、相互不干扰, 可为不同的租户或者网络内业务提供差异化的服务质量保障。

随着IP协议第6版 (IPv6) 的大规模部署, 网络已基本进入双协议栈运行时代^[4]。IPv6网络的覆盖范围已经延伸至

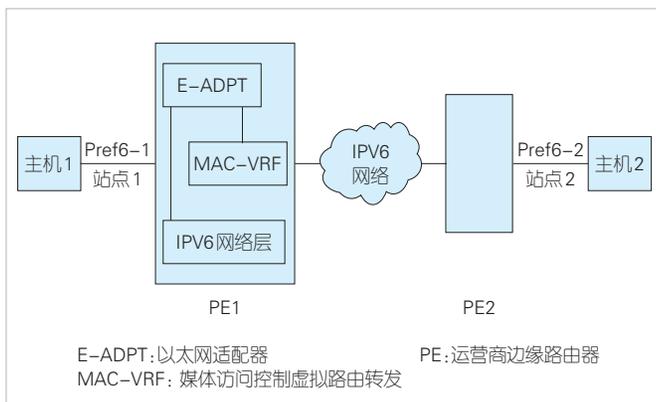
5G^[5]、固定宽带、数据中心和云等网络业务。端到端打通了整个业务流程，为新业务的应用提供了一个统一的基础承载面。同时，借助IPv6的基础和新型能力也为解决业务的需求和痛点问题提供了新的思路。但上述虚拟以太网技术并没有充分利用IPv6的优势，仅将IPv6和IPv4作为同类承载技术对待，因此在封装效率、安全或流量调度方面存在不足。

本文中我们提出了一种基于IPv6数据平面的承载多站点以太网虚拟专网技术方案EVN6（即基于IPv6的虚拟以太网），它将要传送的以太网数据帧直接封装在IPv6数据包中，能很好地满足云网融合技术快速发展带来的新要求，其技术特点有：

- 1) 网络覆盖范围广泛，支持运营商间、域间的互通和协同，不存在MPLS等底层传输技术覆盖范围方面的限制。
- 2) 在安全性方面，没有采用传统隧道的静态端点地址，避免了由显式隧道端点地址而带来的分布式拒绝服务(DDoS)攻击等风险。
- 3) 具有更高的封装效率，减少了封装的开销以及由此带来的处理开销。
- 4) 同一站点中的不同主机具有不同的外部IPv6地址，可以根据源或目的IPv6地址实现流量负载均衡。

1 EVN6技术架构

EVN6是一种在IPv6网络中承载多站点以太网虚拟专网的方案。它将要传送的以太网数据帧直接封装在IPv6数据包中，并利用媒体访问控制(MAC)地址、虚拟网标识等信息生成特有的IPv6源和目的地址，支持将以太网帧传送到目的站点。本方案可应用于企业站点互联以及数据中心等多个场景。相关的技术方案已经转化为国际互联网工程任务组(IETF)文稿，并提交至Internet Area Working Group^[6]。支持EVN6的系统架构如图1所示。



▲图1 EVN6技术架构图

EVN6在传统的路由架构下引入一个关键功能组件以太网适配器(E-ADPT)，负责处理转发面的封装和路由面的路由信息学习等关键任务。其中，MAC虚拟路由转发(MAC-VRF)是一种基于MAC的虚拟路由转发表，用来存储主机MAC地址信息、IPv6前缀等相关信息以及转发规则。E-ADPT和MAC-VRF通常在运营商边缘路由器(PE)设备上实现，部署在用户站点网络的出口，承载使用虚拟以太网的业务流量。

通常，以太网虚拟网络由分布在不同地理位置的多个站点组成，每个站点都通过IPv6网络边缘的本地PE连接到IPv6网络。为了区分不同的以太网虚拟网络实例，长度为32位的虚拟以太网标识(VEI)可进行全局识别，最多可识别42.9亿个以太网虚拟网络。E-ADPT将客户站点要传输的以太网数据帧直接封装成IPv6数据包，并发送到IPv6网络。对于接收到的发往本站点的IPv6数据包，E-ADPT会删除其数据包标头并恢复原始以太网帧。

对于一个指定的以太网虚拟网络，E-ADPT使用IPv6站点前缀，即Pref6，来标识不同的站点，因此在同一个以太网虚拟网络实例中的不同站点的Pref6是不同的。但不同的以太网虚拟网络实例中的同站点的Pref6可能是相同的。架构要求IPv6地址属于全球单播地址类型，并且可以在全局路由系统中被访问。地址可以从网络运营者的IPv6地址空间中选取，而不用再向互联网注册机构申请专用的地址块。需要注意的是，Pref6的长度可以是可灵活选择的，它可以等于或小于64位。当Pref6的长度小于64位时，Pref6通常在64位的高位，同时在低位补零。对于一个具有多个站点的以太网虚拟网络，VEI与站点前缀之间存在1:N的关系。

为了将以太网帧通过IPv6网络发送到正确的目标站点，PE中的MAC-VRF表用于存储以太网虚拟网络中所有主机的MAC地址、相应以太网的VEI和站点的Pref6。MAC-VRF应至少包含MAC地址、VEI值和相应站点的Pref6相关的信息。MAC-VRF为E-ADPT转发面的封装功能提供了必要的信息，因此E-ADPT在发送数据包之前应该接收上述信息。E-ADPT控制面提供了一种机制，在站点之间自动传递MAC地址和Pref6的映射信息。当PE接收到站点内主机发出的以太网帧时，它会使用目的MAC地址作为一个索引在MAC-VRF表格中查找相对应的Pref6和VEI的值，然后用上述信息封装数据包。

2 EVN6数据面关键技术

数据面是指实际数据包接收、处理和转发的能力集合，负责传输实际数据。EVN6针对数据包的封装和生成提出了新型技术框架，增强了数据面能力，包含编址技术、同子网

单播报文和BUM（广播、组播、未知单播报文的统称）报文转发等技术。

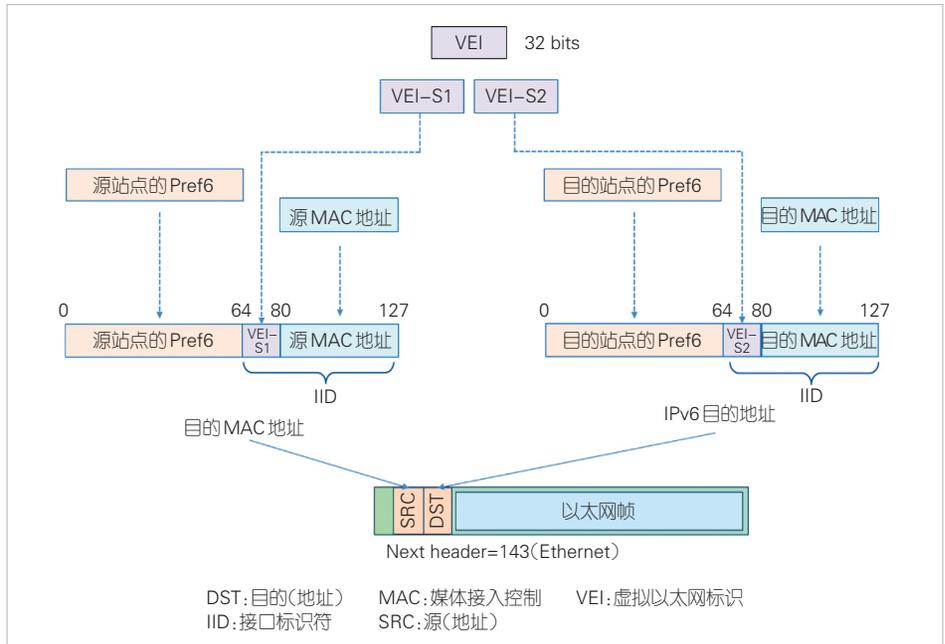
2.1 EVN6 编址技术

EVN6在编址方面所需的关键配置信息包括VEI、IPv6前缀和通信双方主机的MAC地址。其中，VEI是32位的虚拟以太网的实例标识，IPv6前缀（Pref6）标识站点在网络中的逻辑位置也代表站点的路由可达性，MAC地址是通信双方物理或虚拟形态主机的48位以太网地址。EVN6数据包的地址架构和现网中常用的全球IPv6单播地址架构保持一致，长度为128位。其中，前64位为网络前缀，后64位为接口标识符。地址具体的编址方式如图2所示，即根据隧道两端的EVN6配置和以太网数据帧中的MAC地址，生成EVN6的IPv6报文源地址和目的地址。总体来看，前缀由Pref6构成，后缀由VEI和MAC地址映射生成。对于源地址，源站点对应的Pref6作为前64位的网络前缀，VEI的前16位（VEI-S1）和源主机的48位MAC地址连接合成后64位接口标识符。而对于目的地址，目的站点对应的Pref6作为前64位的网络前缀，VEI的后16位（VEI-S2）和目的主机的48位MAC地址连接合成后64位接口标识符。IPv6报文头部中的Next head字段值设置为143，代表以太网数据帧。值得注意的是，EVN6的地址封装通过算法完成转换，无须建立地址表记录相关连接的状态，因此是一种无状态的映射方式，减少了系统实现的复杂度和运维风险。

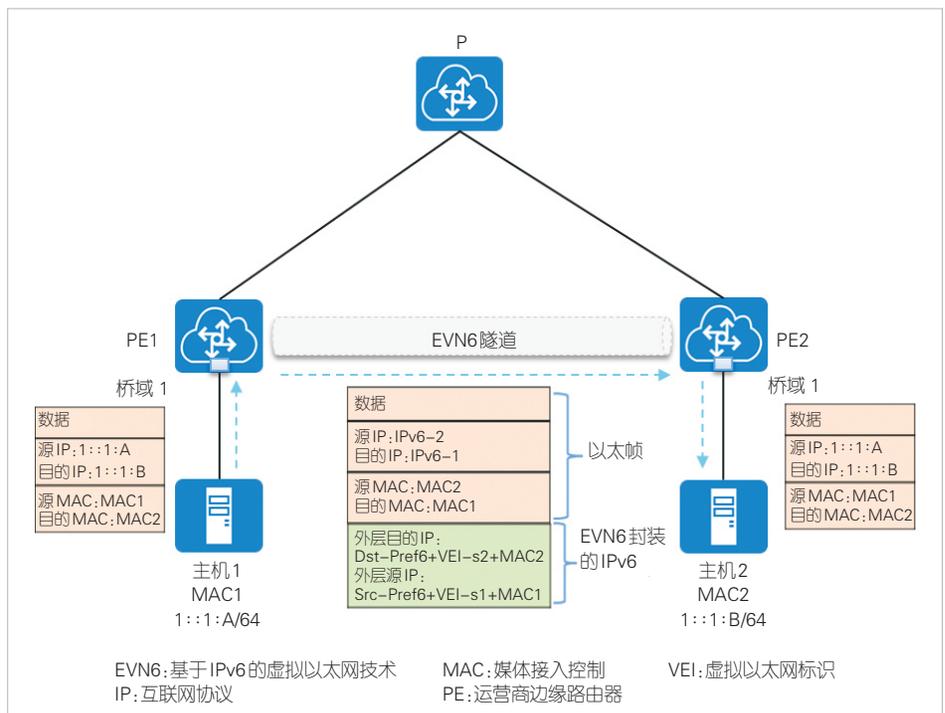
2.2 同子网单播报文转发

数据面的关键能力之一是支持同子网单播报文的转发，这也是虚拟以太网最基础的应用场景。我们以图3的网络拓扑图为例阐述其转

发过程。PE1设备和PE2设备开启了EVN6功能，形成了一个简单的单点到单点的EVN6网络，其中主机1准备向主机2发送数据包。主机1生成以本身MAC1地址为源地址和以主机2的MAC2地址为目的地址的以太网帧。当收到来自主机1的以太网数据帧时，EVN6网络PE1将根据接入端口和桥域（BD）信息获取对应的二层虚拟以太网的实例标识VEI，在



▲图2 EVN6 数据面的编址方式



▲图3 同子网单播报文转发过程示意图

该二层虚拟以太网内查找MAC-VRF表，获得目的MAC2地址所对应的站点前缀Dst-Pref6。PE1设备在获得上述信息后，根据2.1章节中的编址方法生成外部IP包的源和目的地址，进行IPv6数据包的封装。

PE2在收到IPv6数据包时，检查其目的地址前缀与PE2上的站点前缀是否匹配。若匹配则将地址中的VEI-s1和VEI-s2提取出来，组合成VEI并对该VEI值进行校验。之后再检查Next header的值是否为143。若是，则为EVN6以太帧封装，然后去掉EVN6封装，根据MAC表将以太帧转发给主机2；否则，该IPv6数据包则会按照丢弃的方式处理。

2.3 BUM报文转发

二层转发设备在转发报文时，转发类型只有4种：广播、组播、未知单播和已知单播报文。BUM报文是广播、组播、未知单播报文的统称，其MAC地址具备如下特点：MAC地址为全FF的报文则为广播流量；MAC地址第一个字节的最低位为1的报文则为组播流量；在MAC表中没有表项的单播报文为未知单播流量。

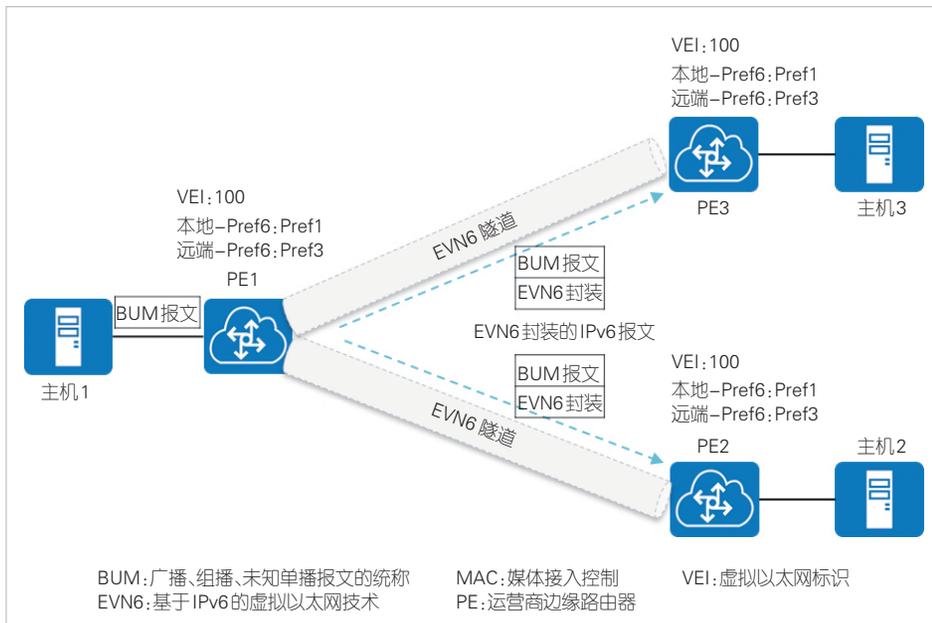
BUM报文在进行EVN6封装时，基于上述MAC地址，其目的地址映射规则如下：

广播流量：Dst-Pref6+VEI-s2+广播MAC地址（全FF）；

组播流量：Dst-Pref6+VEI-s2+组播MAC地址；

未知单播流量：Dst-Pref6+VEI-s2+单播MAC地址。

在2.2章节描述的报文转发过程是已知单播报文转发，而BUM报文的转发采用头端复制的方式，如图4所示。



▲图4 BUM报文转发过程示意图

当BUM报文进入EVN6隧道时，接入端会根据头端复制列表进行报文的EVN6封装，并将报文发送给头端复制列表中的所有出口端。这种方式可以确保BUM报文能够被正确转发到目的设备。以广播报文的转发为例，当PE1收到主机1发送的广播数据帧时，需要将该数据帧传送到所有具有相同虚拟以太网实例VEI的站点。其中，E-ADPT以VEI为索引查找MAC-VRF表中所有相关联的站点前缀，然后分别生成对应站点的报文。当PE2收到该报文时，E-ADPT提取其中的目的站点前缀和虚拟以太网实例值。若结果与本站点的Pref6和VEI值相匹配，则去掉EVN6封装并向站点内的主机转发报文。

3 EVN6控制面关键技术

控制面制定数据面策略和配置，指导数据包的操作，负责传输控制信令。控制面可实现EVN6隧道的自动创建、数据面关键信息的发现和传送等操作，降低网络部署的复杂性和扩展难度。本章将重点介绍静态隧道创建的流程，同时给出动态隧道创建方案初步设计的一些考虑。

3.1 EVN6隧道静态创建流程

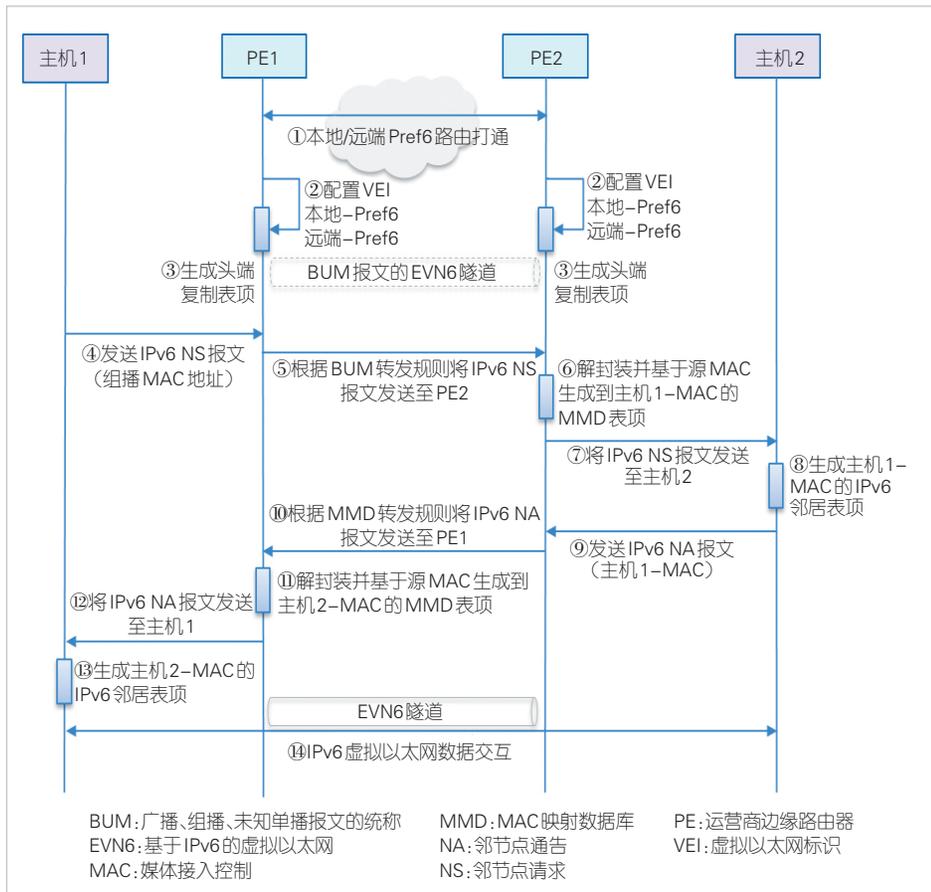
静态创建EVN6隧道就是在EVN6网络隧道两端的PE设备上手工配置站点信息、虚拟以太网信息以及两者之间的映射规则，实现端到端隧道的互通。在这种方式下，EVN6配置虚拟以太网标识VEI、本端站点的IPv6前缀和远端站点的IPv6前缀。静态配置EVN6隧道的时序图如图5所示。

关键的步骤如下：

1) 通过静态路由或者动态路由协议打通站点前缀Pref6在底层网络的路由。

2) 两端站点的PE配置VEI、本地Pref6和远端Pref6。如果到远端站点前缀的路由可达，则基于配置生成头端复制表项。头端复制表项主要用于BUM报文的封装和转发。MAC-VRF表中头端复制表项参考示例如表1所示。

3) Host之间通过IPv6 ND协议（MAC地址为组播的NS报文/单播的NA报文）互相学习主机MAC和IPv6地址，并形成各自的IPv6邻居表项，可在PE设备上启用邻居发现（ND）代理来减少邻居发现协议



▲图5 EVN6 隧道静态创建时序图

(NDP) 消息的泛洪。同时在 PE 的 MAC-VRF 表中同步生成一条主机 MAC 与 EVN6 隧道的映射关系，如表 2 的 PE1 映射表项所示。Host 之间进行以太网通信时，根据该表项进行 EVN6 封装。

3.2 EVN6 隧道动态创建方案的考虑

EVN6 隧道可以采用手工的方式静态创建，也可以采用边界网关协议 (BGP) EVPN 作为控制面动态创建。这种方

式不仅可以实现 EVN6 隧道的自动建立，从而降低网络运维的复杂度和提升网络的可扩展性，而且可以实现 IP、MAC、VEI 和主机路由信息的自动宣告，从而有效减少了 BUM 洪泛流量。

EVPN 是下一代全业务承载的 VPN 解决方案。EVPN 统一了各种 VPN 业务的控制面，利用 BGP 扩展协议来传递二层或三层的可达性信息，实现了转发面和控制面的分离。EVPN 逐渐演进为一套通用的控制面协议，而不是为了承载业务的数据面协议。因此，EVN6 拟在 EVPN 中设计新的协议类型和路由类型来承载和传递控制面中的信息，包括 L2 VPN 地址族标识 (AFI)，EVPN 子地址族标识 (SAFI) 和 EVPN 网络层可达性信息 (NLRI)。控制面的具体方案还在设计之中，不在本文中赘述^[7]。

4 EVN6 封装效率分析及现网技术验证

在 EVN6 方案中，数据包的封装方式得到了进一步简化。传送的以太网数据帧被直接放置在 IPv6 数据包的净荷中，在保障网络标识和路由能力的前提下，取消了 VXLAN 技术存在的多层封装，显著降低了封装开销和多协议层处理数据的成本。如图 6 所示，在 VXLAN 封装方式下，以太网数据帧先被分别封装在 8 字节的 VXLAN 报头、用户数据报协议 (UDP) 报头中，最后封装在 IPv6 报文之中，总共需要

▼表1 头端复制表项

VEI	IPv6 映射前缀 (本地 Pref6)	IPv6 映射前缀 (远端 Pref6)	主机 MAC	主机 IP	FLAG
100	Pref1	Pref2	00:00:00:00:00:00	—	BUM
100	Pref1	Pref3	00:00:00:00:00:00	—	BUM

BUM: 广播、组播、未知单播报文的统称 FLAG: 标志 MAC: 媒体接入控制 VEF: 虚拟以太网标识

▼表2 MAC 与 EVN6 隧道映射表项

VEI	IPv6 映射前缀 (本地 Pref6)	IPv6 映射前缀 (远端 Pref6)	主机 MAC	主机 IP	FLAG
100	Pref1	Pref2	00:00:00:00:00:00	—	BUM
100	Pref1	Pref2	主机2-MAC	主机2-IP	

BUM: 广播、组播、未知单播报文的统称 FLAG: 标志 IP: 互联网协议 MAC: 媒体接入控制 VEF: 虚拟以太网标识

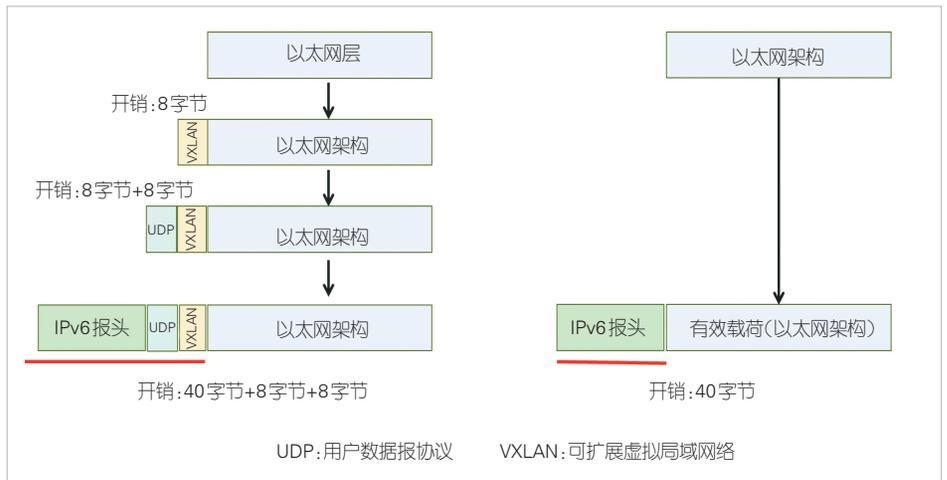
56 字节。而在 EVN6 封装方式下，以太网数据帧直接封装在 IPv6 报文中，报文长度减少了 16 字节，整体降低了 28.5% 的封装开销。

针对云间跨域互联场景，现网试验采用了静态 EVN6 方案，网络拓扑图如图 7 所示。该方案测试 EVN6 隧道的创建、EVN6 转发面封装的正确性，以及基于 EVN6 虚拟以太专网的业务互通等功能。该虚拟以太网在两个地市云资源池之间建立传输网络，需要跨越骨干网和城域网，并且要求在底层网络和云资源池全面支持 IPv6。为了建立 EVN6 网络，需要分别在两个资源池上虚拟一台主机作为网关部署 EVN6 镜像软件，另外创建两个虚拟机部署云上的应用，在试验中发起业务数据流。虚拟机要求必须支持 IPv6，两台网关配置站点 IPv6 前缀，与网关相连接的虚拟机配置同一 IPv6 子网地址。云间互连网络需要打通两个站点前缀的路由，确保业务数据能够通过 IPv6 的方式转发到对端网关。

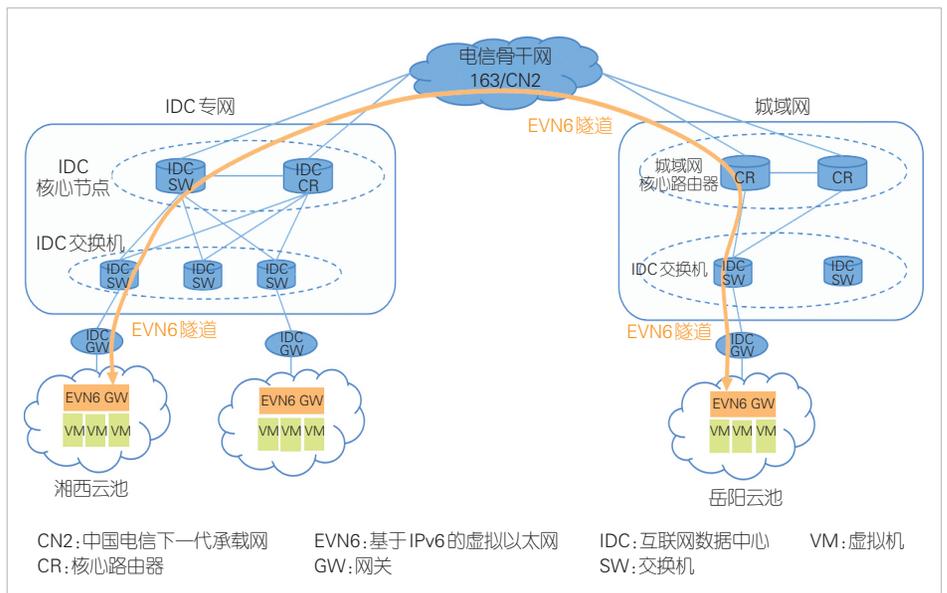
EVN6 试验系统上线后，租户网络之间实现了业务隔离，云间的虚拟机迁移等业务运行良好，满足了云间基于 IPv6 的虚拟以太网互联业务的基本需求。本次试验展现了如下 3 个方面的效果：

1) EVN6 业务可以实现快速开通。当前运营商网络基本全面支持并开启了 IPv6 协议栈，目前省内城域网到 163 骨干网有 Tbit/s 级别的预留带宽，因此整个业务发放只需要配置首尾网关两端，中间节点不需要任何重新的规划和配置改动，也不涉及跨域的设置，从而达到业务快速开通的目的。

2) EVN6 与 IPv6 网络具有良好的兼容性，可以非常方便地进入数据中心、城域网和骨干网等网络，并且可以跨越多个自治域组网，几乎不存在覆盖范围的限制。其他协议如 SRv6、MPLS 等则存在“有限域”组网方面的限制。此外，EVN6 是在 IPv6 基本报头做的技术创新，和 SRv6 等 IPv6+ 技术也是兼容的，可以结合 IPv6 的新型技术，从而充分发挥



▲图6 EVN6和VXLAN封装方式开销对比



▲图7 EVN6技术试验组网

路径编程等 IPv6 能力。

3) EVN6 利用 IPv6 海量地址空间的特性，在三层编址空间融入了二层以太网、主机等信息，提供了一个在网络层根据业务网络信息转发和调度流量的接口，可通过更简洁的方式提供流量工程和负载均衡，更好地满足智慧化运营要求。

5 结束语

EVN6 是一种基于 IPv6 的新型虚拟以太网组网技术，该技术简化了数据面的封装方式，基于 IPv6 协议直接承载虚拟以太网数据包，提高了封装效率。利用了 IPv6 海量的地址空间，在编址层面融入丰富的信息，充分发挥了 IPv6 的基础能力。EVN6 技术标准的进一步成熟和应用将会对

L2VPN 业务领域产生创新驱动作用，带动相关产业链的升级，同时也符合国家大力推动 IPv6 规模部署应用工作的要求，进一步释放 IPv6 技术潜力。未来 EVN6 有潜力作为一种简化的 L2VPN 方案广泛应用于运营商网络。

致谢

感谢清华大学李星教授、包丛笑教授对本研究的帮助！

参考文献

- [1] IETF. BGP/MPLS IP virtual private networks (VPNs): RFC 4364 [S]. 2006
- [2] IETF. Virtual extensible local area network (VXLAN): a framework for overlaying virtualized layer 2 networks over layer 3 networks: RFC 7348 [S]. 2014
- [3] IETF. BGP overlay services based on segment routing over IPv6 (SRv6): RFC 9252 [S]. 2022
- [4] 解冲锋, 李星, 李震, 等. 大规模网络向 IPv6 单栈演进的技术方案 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(1): 57-61. DOI: 10.12142/ZTETJ.202201012
- [5] 马晨昊, 解冲锋, 郑伟, 等. 5G SA 网络引入 IPv6 的思路探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(3): 43-48. DOI: 10.12142/ZTETJ.202003009
- [6] XIE C F, LI X, BAO C X, et al. EVN6: a framework of mapping of ethernet virtual network to IPv6 underlay, draft-xls-intarea-evn6-00 [Z]. 2024
- [7] XIE C F, SUN J B, LI X, et al. EVPN route types and procedures for EVN6, draft-xie-bess-evpn-extension-evn6-00 [Z]. 2024

作者简介



马晨昊，中国电信研究院网络技术研究所工程师，现任 ETSI TC INT 副主席；主要从事 IPv6、“IPv6+”、未来网络等相关技术的研究，以及协议一致性和互通性测试标准化工作；曾获得中国通信标准化协会科学技术奖一等奖等。



孙吉斌，中国电信研究院网络技术研究所工程师；主要研究领域为未来网络关键技术、IPv6、算力网络等；参与了 EVN6 相关标准研究和原型系统研发工作。



解冲锋，中国电信研究院集团级高级技术专家，教授级高工，中国通信学会会士，中国互联网协会学术委员会副主任委员，北京市 IPv6 重点实验室主任，曾在美国 UCLA 大学做政府公派访问学者一年；长期从事宽带网络架构、IPv6 下一代互联网、物联网、网络安全、云网融合等方面的研究；参与制定国家 IETF RFC 标准 6 项，曾获得 2023 年度国家科技进步奖一等奖和 2023 年度中国通信标准化协会科学技术奖一等奖，2019 年获得“政府特殊津贴”。