

VxLAN技术在天地一体化网络中的应用研究

王亮¹, 曹腾飞²

(1. 青海大学信息化技术中心, 青海 西宁 810016;
2. 青海大学计算机技术与应用学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 针对天地一体化网络体系中地面互联网承载层面临的跨地域互联、多厂商设备并存和业务隔离需求, 围绕未来互联网试验设施 (future internet technology infrastructure, FITI) 中的虚拟可扩展局域网 (virtual extensible local area network, VxLAN) 异构组网适配问题开展研究。依托FITI西宁、兰州、南昌节点, 构建基于IPv6承载的VxLAN Overlay试验环境, 完成华为、华三、锐捷等多厂商设备之间的隧道建立、本地与远端媒体访问控制 (media access control, MAC) 学习及真实源地址验证相关测试。将该研究定位于天地一体化网络体系地面互联网承载层的预验证, 重点分析多厂商设备在虚拟局域网 (virtual local area network, VLAN) /VxLAN 网络标识符 (VxLAN network identifier, VNI) 映射、隧道组织方式、MAC学习机制和安全策略执行方面的差异, 并从控制面兼容性、数据面封装一致性、运维可观测性和场景适配性4个维度进行归纳。测试结果表明, VxLAN能够为跨地域业务隔离和异构设备互联提供基础Overlay支撑, 但其组网效果受设备实现路径和协同能力影响明显。本研究结果可为天地一体化网络体系地面互联网承载层的技术选型、异构互联设计与后续协同机制研究提供参考。

关键词: 天地一体化; FITI; VxLAN; IPv6; 异构组网

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.tdyt2026019

Research on the application of VxLAN technology in space-integrated-ground networks

Wang Liang¹, Cao Tengfei²

1. Information Technology Center, QingHai University, Xining 810016, China
2. School of Computer Technology and Application, QingHai University, Xining 810016, China

Abstract: Addressing the requirements for cross-regional interconnection, multi-vendor device coexistence, and service isolation within the ground internet bearer layer of integrated space-terrestrial network systems, this paper investigates the challenges of adapting VxLAN heterogeneous networking within the future internet technology infrastructure (FITI). Leveraging the FITI nodes in Xining, Lanzhou, and Nanchang, an experimental environment featuring a VxLAN Overlay built upon an IPv6 bearer network was constructed to conduct tests regarding tunnel establishment, local and remote MAC learning, and real source address validation across devices from multiple vendors—including Huawei, H3C, and Ruijie. This study positions itself as a pre-validation for the ground internet bearer layer of integrated space-terrestrial network systems, it focuses on analyzing the differences among multi-vendor devices regarding VLAN/VNI mapping, tunnel organization methods, MAC learning mechanisms, and security policy enforcement, and synthesizes these findings across four dimensions: control plane compatibility, data plane encapsulation consistency, operational observability, and scenario adaptability. Test results demonstrate that VxLAN can provide foundational Overlay support for cross-regional service isolation and heterogeneous device interconnection, but its actual networking performance is significantly influenced by specific device implementation approaches and inter-device coordination capabilities. These findings serve as a valuable reference for technology selection, heterogeneous interconnection design, and future research into collaborative mechanisms for the ground internet bearer layer of integrated space-terrestrial network systems.

Keywords: space-integrated-ground, FITI, VxLAN, IPv6, heterogeneous networking

收稿日期: 2026-02-14; 修回日期: 2026-05-01

基金项目: 青海大学青年科研基金资助项目 (No.2024-QGY-14)

Foundation Item: The Youth Scientific Research Fund Project of Qinghai University(No.2024-QGY-14)

0 引言

天地一体化网络是未来互联网体系结构演进的重要方向之一,其试验验证不仅涉及空间段与地面段的协同,也依赖地面网络(含互联网和移动通信网)的支撑,其中互联网作为各类业务的信息承载网应当实现承载层对跨地域接入、业务隔离和多厂商设备互联的稳定支撑。对于高校和科研机构而言,在真实空间段尚未全面接入之前,依托开放试验设施开展地面互联网承载层的预验证研究,是推动天地一体化网络逐步落地的现实路径。

未来互联网试验设施(future internet technology infrastructure, FITI)由清华大学等高校联合建设,以纯IPv6技术为主要支撑,覆盖全国多个区域节点,可为我国未来互联网及天地一体化网络相关研究提供开放、可编程、可扩展的试验环境。青海大学参与中国教育和科研计算机网(CERNET)相关节点建设工作,在FITI推动下,西宁节点已具备开展跨地域网络承载与异构互联验证的现实条件。

与传统园区网或数据中心承载网络相比,天地一体化网络体系下的地面互联网承载层不仅承担常规的跨地域互联任务,还需要为后续空间段接入、异构节点协同、业务动态迁移和开放试验环境下的安全接入提供基础支撑。其特殊需求主要体现在以下4个方面:一是跨地域、多节点、多厂商设备场景下,需要快速形成统一承载平面;二是卫星测控、遥感数据回传、协议仿真验证等多类业务并发存在,对业务隔离能力和弹性扩展能力提出更高要求;三是地面试验环境需为后续空间段接入和星地协同控制预留演进接口;四是在开放试验环境下,需同步关注源地址可信、跨域访问控制等安全问题。

针对上述问题,本文不将研究目标泛化为对完整天地一体化网络的全场景验证,而是将目标界定为面向天地一体化网络体系地面互联网承载层的虚拟可扩展局域网(virtual extensible local area network, VxLAN)异构组网预验证研究。本文的主要贡献如下。

(1) 构建一个面向天地一体化网络体系地面承载层的VxLAN异构组网分析框架,从控制面兼容性、数据面映射关系、运维可观测性和安全协同能力4个维度评价多厂商设备适配性。并对不同实现路径下的组网差异进行归纳。

(2) 基于FITI西宁—兰州—南昌节点搭建跨地域

IPv6 Underlay + VxLAN Overlay试验环境,完成华为、华三、锐捷3类设备在隧道建立、本地/远端媒体访问控制(media access control, MAC)学习及源地址验证场景下的可重复验证测试。

(3) 总结面向天地一体化网络地面互联网承载层的VxLAN适用边界,指出其适合作为跨地域业务隔离与基础Overlay承载场景,而不宜单独承担高动态链路编排与跨域细粒度调度功能,并提出与SRv6、P4技术协同的分层融合思路。

1 VxLAN技术基础

虚拟可扩展局域网旨在解决虚拟局域网(virtual local area network, VLAN)可扩展性受限的问题。其基本思想是采用“MAC in 用户数据报协议(user datagram protocol, UDP)”的封装方式,在三层网络之上扩展二层广播域。每个VLAN可以映射到一个24位的虚拟网络标识符(virtual network identifier, VNI),从而支持大规模逻辑隔离域。通过VxLAN技术,远程设备的MAC地址与相应的VxLAN隧道端点(VxLAN tunnel end point, VTEP)地址可以在VxLAN接口上建立关联;当目标MAC地址可达时,数据包将被封装到UDP头部中,默认目的端口号为4789。

VxLAN采用“MAC in UDP”封装方式,在数据中心与跨域承载网络中具有良好的弹性扩展能力。由于VxLAN实现了业务负载与物理网络的解耦,虚拟网络可按需扩展部署,无须频繁改动物理网络配置,并支持多租户环境下的大规模虚拟网络部署。

VxLAN典型网络包含以下5个部分。

(1) 在一台服务器上可以创建多台虚拟机(virtual machine, VM),不同的虚拟机可以属于不同的VxLAN。

(2) VTEP作为VxLAN的边缘设备,VxLAN的相关处理都在VTEP上进行;VTEP既可以是一台独立的物理设备,也可以是VM所在的服务器。

(3) 核心设备不参与VxLAN处理,仅需要根据封装后报文的目的IP地址对报文进行三层转发。

(4) VxLAN隧道为两个VTEP之间的点到点逻辑隧道。

(5) 虚拟交换实例(virtual switching instance, VSI)部署于VTEP,为单个VxLAN提供二层交换服务,未来天地一体化网络模型示意如图1所示。

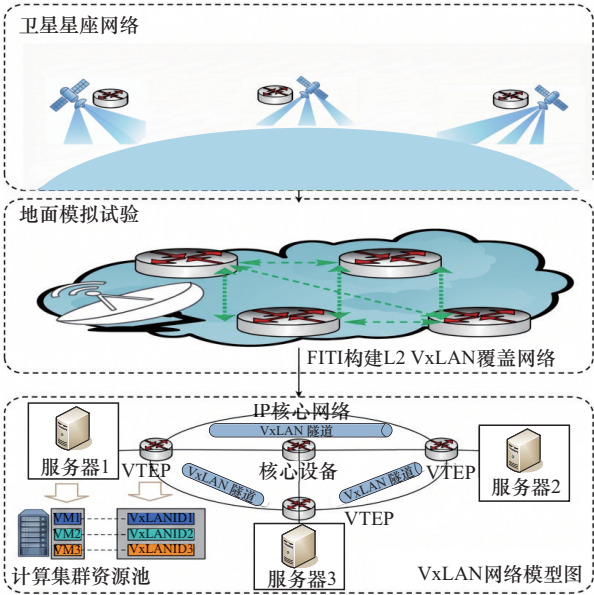


图 1 未来天地一体化网络模型示意

2 未来网络FITI试验环境

FITI是覆盖全国 35 个城市、连接 40 个试验节点的未

来互联网试验基础设施，可实现与现有网络（IPv4/IPv6）及国外试验床的互联互通，为用户提供分层试验服务，支撑不少于 4 096 个异构网络并行试验。其中，每个试验节点由核心节点和试验站点两部分组成：核心节点相互连接构成高性能主干网，为试验用户提供网络资源；试验站点基于网络资源，为用户提供虚拟化可编程试验服务。

在核心节点试验网络方面，节点通过 IPv6 接入交换机同 FITI-S、FITI-G 主干网节点设备联通，并通过逻辑子接口按需接入主干网的不同虚拟网络；在试验站点侧，可结合 P4 交换机等可编程设备实现灵活的网络功能，为移动网络、网络安全、协议验证等试验场景提供底层能力支撑。本文搭建的西宁—兰州—南昌跨地域试验环境虽然未直接接入真实空间段节点，但可通过跨地域承载、异构设备互联、多业务隔离、源地址验证等场景，完成对天地一体化试验体系中地面互联网承载层关键能力的前置验证。FITI 跨地域异构 VxLAN 试验环境代表性设备参数见表 1，FITI 西宁节点主干网拓扑如图 2 所示，其

表 1 FITI 跨地域异构 VxLAN 试验环境代表性设备参数

厂商	设备型号	软件版本	接口速率	节点位置	角色 (CE/PE/VTEP)	是否支持EVPN/ VxLAN 硬件转发
华为	CloudEngine S6730-S24X6Q-V2	V600R025C00	24×10 Gbit/s SFP+; 6×40 Gbit/s, 可升级 100 Gbit/s	西宁	CE / PE / VTEP	是
华三	S12504X-AF(S12500X-AF 系列)	Comware V7(R2719P03 分支)	40 Gbit/s/100 Gbit/s 线速接口	兰州	PE / VTEP	是
锐捷	RG-S6510-48VS8CQ	RGOS 12.5(1)B0506	48×25 Gbit/s SFP28; 8×40 Gbit/s/100 Gbit/s QSFP28	南昌	CE / PE / VTEP	是

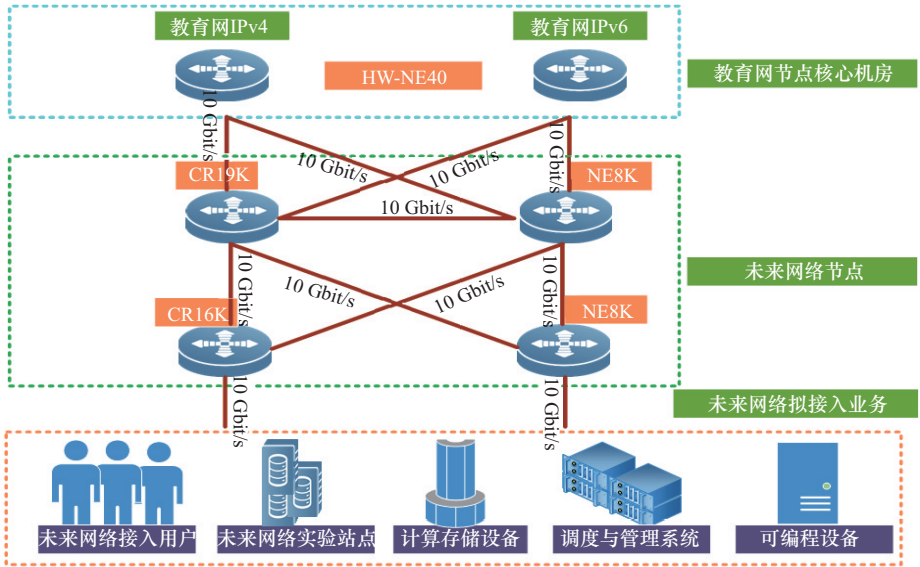


图 2 FITI 西宁节点主干网拓扑

中, EVPN指以太网虚拟专用网络, CE指用户边缘设备, PE指提供商边缘设备, SFP指小型可插拔模块, QSFP指四通道小型可插拔模块; CR16K、CR19K、NE8K、HW-NE-40均为路由器型号。

3 面向FITI试验环境的VxLAN的组网设计与实现

本文的VxLAN组网设计以校园网接入CERNET教育网为基础, 在FITI西宁节点的PE设备与兰州、南昌节点间搭建VxLAN隧道, 为FITI双链路节点建立环路保护。前期试验表明, 在不加约束地选取支持VxLAN协议的交换机作为西宁节点PE设备时, 隧道并不能稳定建立。基于此, 本文选择华为、华三、锐捷3类设备开展异构组网验证, 在不影响现网运行的条件下搭建实验环境, 并重点分析不同厂商设备在接入封装、VLAN/VNI映射及隧道组织方式上的差异。

第一种方式: 以华为交换机作为PE设备, 华三、锐捷交换机作为CE设备, 华为交换机作为PE设备创建VxLAN拓扑异构组网如图3所示。

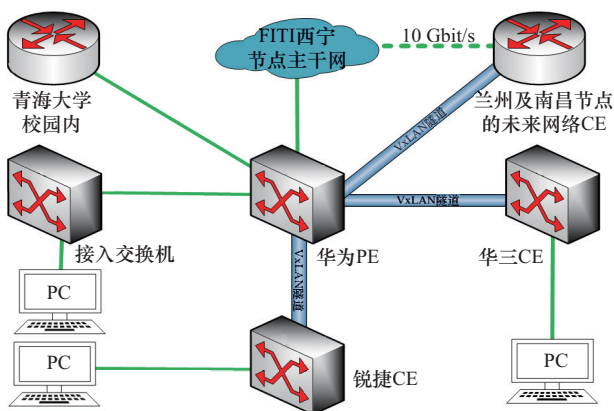


图3 华为交换机作为PE设备创建VxLAN拓扑异构组网

在实验过程中, 当华为交换机作为PE设备时, 需要连接一台接入交换机以进行VLAN封装, 在数据传输时可以方便地携带标签(tag)。否则, 数据在隧道中将无法被识别, 最终导致数据包被丢弃。当PE设备分别与兰州及南昌节点的未来网络CE设备成功建立VxLAN隧道时, 等同于实现了西宁至兰州、西宁至南昌的双链路直连, 这标志着青海大学西宁节点网络的承载能力得到了进一步完善和扩展。

第二种方式: 以华三交换机作为PE设备, 华为、锐捷交换机作为CE设备, 华三交换机作为PE设备创建Vx-

LAN拓扑异构组网如图4所示。

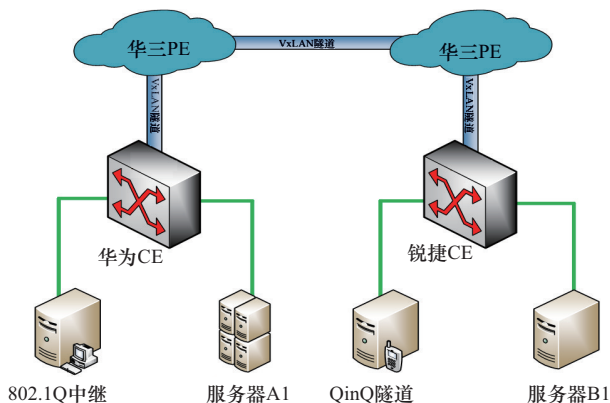


图4 华三交换机作为PE设备创建VxLAN拓扑异构组网

在实验过程中, 当华三交换机作为PE设备时, 需注意不同华三交换机在支持的VxLAN相关协议上可能有所不同。

第三种方式: 以锐捷交换机作为PE设备, 华三、华为交换机作为CE设备, 锐捷交换机作为PE设备创建Vx-LAN拓扑异构组网如图5所示。

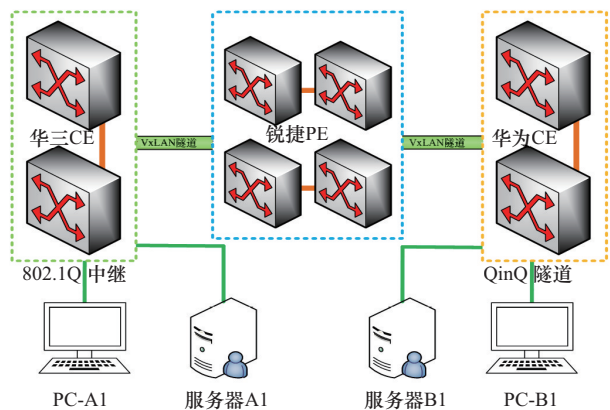


图5 锐捷交换机作为PE设备创建VxLAN拓扑异构组网

在实验过程中, 锐捷交换机作为PE设备时需注意, 在构建不同VxLAN隧道的情况下, 锐捷设备不支持同一个VLAN加入不同的VxLAN中, 该设备需与华为、华三等厂商的设备之间需要通过其他配置方式进行互联, 例如采用QinQ(即802.1ad)等技术。

第四种方式: VxLAN对本地站点MAC学习特性进行测试, VTEP针对本地站点内虚拟机的MAC地址开展学习。VTEP在接收到本地虚拟机所发送的数据帧之后, 对该数据帧所属的VSI进行判定。VxLAN-MAC地址特性拓扑如图6所示, 其中DUT指被测设备, RT指路由

器, RT4、RT5分别指4号路由器及5号路由器。

VTEP接收到本地虚拟机发送的数据帧后,判断该数据帧所属的VSI,并将数据帧中的源MAC地址添加到该VSI的MAC地址表中,该MAC地址对应的接口为接收到数据帧的接口。

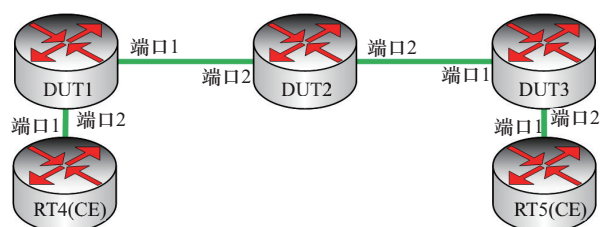


图6 VxLAN-MAC地址特性拓扑

第五种方式: VxLAN远端MAC地址学习特性实验。

(1) VTEP对远端站点内虚拟机MAC地址进行学习。其静态配置通过手工指定远端MAC地址所属的VSI,及其对应的VxLAN隧道接口。

(2) 通过报文中的源MAC地址动态学习: VTEP从VxLAN隧道上接收到远端VTEP发送的VxLAN报文后,根据VxLAN ID判断报文所属的VxLAN,对报文进行解封装,还原二层数据帧,并将数据帧中的源MAC地址添加到所属VxLAN对应VSI的MAC地址表中,该MAC地址对应的接口为VxLAN隧道接口。

3.1 组网实现与验证方法

第一种方式根据拓扑图图3所示,华为设备为PE设备,华为分别与华三、锐捷建立VxLAN隧道。实验过程中发现,华为设备不支持PC直接向VxLAN隧道发送业务报文,需在华为设备下联接入交换机,由接入交换机发送携带802.1Q标签的数据包,便于VxLAN隧道接收。华为交换机可通过二层子接口与桥接域实现VLAN与全局VNI的1:1绑定,其控制面通过静态配置网络虚拟化边缘(network virtualization edge, NVE)节点接口头端复制列表建立多点隧道。

第二种方式根据拓扑图图4所示,华三设备为PE设备,华三分别与华为、锐捷建立VxLAN隧道。华三交换机可在同一物理接口下绑定多个VxLAN隧道,但不同型号在VxLAN相关协议支持上存在差异。本文采用二层接口接入方式实现业务承载。在报文处理过程中,系统主要依赖业务实例机制匹配外部VLAN标签(S-VID),随后通过交叉连接映射至特定VSI,从而在同一物理接口下实现多条独立隧道的灵活绑定。

第三种方式根据拓扑图图5所示,锐捷设备为PE设

备,锐捷分别与华为、华三建立VxLAN隧道。锐捷设备可建立多个VxLAN隧道,但不支持将同一VLAN同时复用于不同VxLAN实例,因此在存在多个隧道时需通过不同VLAN进行业务区分,或借助QinQ(802.1ad)方式实现互通。锐捷设备在创建VxLAN时不支持子接口形式,通常通过全局VLAN接入并创建独立的Overlay隧道接口绑定VNI,其实现机制体现出较强的接入隔离约束。

第四种与第五种方式通过使用工具命令语言(tool command language, TCL)编写实验脚本来实现。验证流程如下。

(1) 在DUT1/DUT2/DUT3配置环回接口,设备之间运行开放式最短路径优先(open shortest path first, OSPF)路由协议,并发布各自环回接口(X=1、2、3),确保底层路由相互可达。

(2) 配置各个设备的子接口(X=1、3, Y=4、5),为后续业务接入做准备。

(3) DUT1、DUT3分别作为VTEP配置VxLAN业务,使能L2VPN,配置VxLAN隧道,建立在VSI的VxLAN视图中绑定VxLAN隧道,绑定服务实例和VSI(X=1、3),检查VxLAN隧道是否UP。

(4) 在设备上查看VxLAN隧道的状态,在DUT1、DUT3上依次开启VxLAN本地MAC, RT4、RT5互ping;通过DUT1、DUT3的VxLAN日志打印本地学习到的MAC地址,之后关闭打印日志功能。

3.2 真实源地址验证技术

真实源地址验证技术是新一代互联网中实现目的地址寻址和源地址认证相结合的新型互联网寻址体系结构,有望成为解决新一代互联网安全可信问题的创新性解决方案。真实IPv6源地址验证体系架构(source address validation architecture, SAVA)是在网络层提供了一种透明服务,以确保互联网转发的每一个分组都使用“真实的IP源地址”。网络地址是授权的:IP源地址必须经过互联网IP地址管理机构分配授权,不能伪造;具有唯一性:IP源地址必须全球唯一;可追溯:网络中的IP分组,可以根据其IP源地址追溯到地址所有者。通过实现真实IPv6源地址验证体系架构,所有伪造IP源地址的报文都无法被转发,这便直接解决基于源地址伪造的分布式拒绝服务(DDoS)攻击(如反射式DDoS攻击),使得互联网中的流量更容易被追踪,使得设计安全机制和网络管理更容易;可以实现基于源地址的计费、管理和测量,高质量的端到端服务,使新的互联网应用拥有更高的性能,且部署更方便,

真实 IPv6 源地址验证体系结构如图 7 所示。

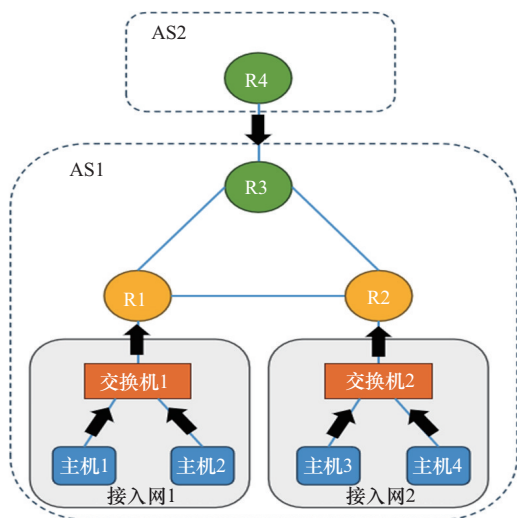


图 7 真实 IPv6 源地址验证体系结构

(1) 接入层 SAVI (SAVA-A)

部署在交换机 1 和交换机 2，绑定主机的 MAC 地址和源 IP 地址，检查来自主机的流量，防止主机使用伪造的源 IP 地址。

(2) 域内 Intra-domain SAVNET (SAVA-P)

部署在 R1 和 R2，识别直联接入网的完整源 IP 地址前缀，检查来自直联接入网的流量，防止接入网发出伪造其他网络源 IP 地址的流量。

部署在 R3，识别 AS1 的完整源 IP 地址前缀，检查来自其他自治域 (autonomous system, AS) 的流量，防止收到伪造自身内部源 IP 地址的流量。

(3) 域间 Inter-domain SAVNET (需要 AS 之间合作)

部署在 R3 和 R4，识别域间源 IP 地址前缀的流量合法流入方向，检查来自其他 AS 的流量，防止从其他 AS 收到伪造源 IP 地址的流量。

4 实验结果与分析

未来天地一体化互联网试验支持新型网络架构 (如

SDN、IPv6+、算力网络) 的试验验证。西宁节点作为西部区域核心节点，可将卫星载荷、卫星协议模拟器等专用试验装置通过光纤接入 FITI 试验环境，进行跨地域异构网络互联、多租户科研实验、高吞吐量、低时延场景测试。

核心需求：异构设备兼容华为、华三、锐捷等多厂商设备，构建统一 Overlay 网络；弹性扩展：支持动态增加/减少 VxLAN 段 (VNI) 及节点；高性能：单隧道吞吐量 ≥ 100 Gbit/s，端到端时延 < 1 ms；可靠性：Underlay 和 Overlay 双层高可用，故障收敛 < 100 ms；多租户隔离：支持高校、科研机构、企业等租户的网络隔离与资源分配，3 家厂商设备在 VxLAN 异构组网中的适配特征对比见表 2。

表 2 表明，多厂商 VxLAN 组网差异主要体现在控制面支持方式、VLAN/VNI 映射方式、接入侧封装能力和运维扩展性上。华为设备配置语义较完整，适合作为核心或汇聚节点；华三设备业务实例机制灵活，但型号和版本边界需要明确；锐捷设备能够实现基础互通，但在同一 VLAN 复用和自动发现能力方面存在明显约束，更适合作为接入或边缘节点。上述结果说明，天地一体化试验体系中的地面互联网承载层即使能够完成基础隧道建立，仍可能在节点扩展、业务迁移和运维一致性方面受到限制。

结合公开资料可进一步量化本文场景约束：FITI 官方资料显示，FITI 覆盖全国 35 个城市、连接 40 个试验节点，主干带宽达到 100 Gbit/s (部分达到 1.2 Tbit/s)，并支持 4 096 个异构网络并行试验。RFC 7348 规定 VxLAN 采用 24 位 VNI、默认 UDP 目的端口 4789；依据其封装格式，可推算在不含外层 VLAN 标签时新增封装开销约 50 B，因此在跨厂商互联中需要预留足够的最大传输单元 (maximum transmission unit, MTU) 并关注 QinQ 叠加后的报文长度。上述公开数据说明，天地一体化试验体系中的地面互联网承载层既面向大规模并行试验，也面向跨域隔离与互联，这对设备的 VxLAN 实现完整性和报文处

表 2 3 家厂商设备在 VxLAN 异构组网中的适配特征对比

适配特征	厂商		
	华为	华三	锐捷
控制面支持方式	静态 NVE + 头端复制, 配置语义完整	依赖业务实例与 VSI 映射, 不同型号差异较大	以静态 VTEP 或头端复制为主, 自动发现能力较弱
接入侧映射特征	VLAN-Bridge-domain-VNI 映射清晰	Service-instance/xconnect 映射灵活	同一 VLAN 复用受限, 需借助 QinQ 适配
运维与扩展	隧道状态可观测性较好	扩展灵活但版本边界需明确	基础互通可实现, 扩展性受接入方式限制
适用场景	适合作为核心或汇聚节点	适合作为业务汇聚节点	适合作为接入节点或边缘节点

理能力提出了更高要求，3 家厂商 SAVA 测试安全防护效果见表 3。

表 3 3 家厂商 SAVA 测试安全防护效果

攻击类型	华为拦截率	华三拦截率	锐捷拦截率
IP 地址欺骗	100%	99.90%	98%
DHCP 洪水攻击	100%	100%	95%
伪造源 IP DDoS	100%	99.80%	97%

表 3 显示，不同厂商在 SAVA 测试中的防护效果存在差异，这种差异可能与地址绑定更新、访问控制策略执行以及高负载场景下的处理能力有关。华为和华三整体拦截效果较稳定，锐捷在部分高负载和动态更新场景下出现少量漏判。该结果表明，异构环境中的 Overlay 互通并不意味着安全能力完全一致，因此在地面互联网承载层验证中，除组网互通外，还应同步关注安全策略执行的一致性。建议优先采用高性能设备为核心节点，通过控制器统一调度资源，同时推动相关设备升级以适配未来扩展需求。该技术为 FITI 的多租户安全隔离和抗攻击能力提供了可靠保障，3 家厂商性能瓶颈与解决方案见表 4。

表 4 3 家厂商性能瓶颈与解决方案

问题	华为方案	华三方案	锐捷方案
跨厂商 EVPN 互通失败	检查 EVPN instance 配置	升级至 Comware V7.1+	手动配置 VxLAN VTEP 列表
锐捷 CPU 利用率过高	无	无	启用硬件转发 VxLAN hardware
华三头端复制时延高	无	配置 EVPN headend-replication	无

表 4 表明，多厂商 VxLAN 组网中的主要问题并非单一设备性能不足，而是控制面兼容性、硬件处理能力、头端复制开销以及接入封装差异共同作用的结果。综合实验现象与公开资料可形成如下适配思路：以 IPv6 作为统一 Underlay 底座，保持环回地址、路由可达性与 MTU 配置一致；采用统一的 VLAN-VNI-业务映射表，降低跨厂商语义差异；针对同一 VLAN 无法复用于多个 VxLAN 实例等问题，在接入侧引入 802.1Q 或 QinQ 封装适配；在暂不引入跨厂商 EVPN 控制面的条件下，可优先采用静态 VTEP 或头端复制方式完成基础互通验证。进一步分析可知，VxLAN 更适合作为地面互联网承载层的基础 Overlay 技术，用于实现跨地域业务隔离与异构互联，而不宜单独承担高动态链路编排与跨域细粒度调度功能；

这一判断与 SAVA/SAVNET 强调源地址校验、分层规则生成和跨域协同的设计思路是一致的。

5 结束语

本文依托 FITI 西宁、兰州和南昌节点，对 VxLAN 在多厂商异构环境中的组网适配开展了功能验证，并结合 FITI 官方资料、RFC 7348 及厂商公开资料进行了补充分析。结果表明，在现有地面互联网承载层试验条件下，华为、华三、锐捷等设备均能够实现基本的 VxLAN 互通，但在业务接入方式、VLAN/VNI 映射机制、EVPN/VxLAN 实现路径、公开转发能力和高可用设计等方面存在明显差异。这说明 VxLAN 可作为天地一体化网络体系地面互联网承载层的基础 Overlay 技术，为跨地域业务隔离与异构互联提供支撑，但其效果仍受设备实现路径和协同能力影响。对于真实空间段节点接入、高动态星地链路以及复杂跨域调度条件下的适用性，仍需结合卫星模拟节点、链路扰动与 SAVA/SAVNET 协同机制开展进一步研究。

参考文献

- [1] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
Wu W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [2] 吴建平. 清华大学等 40 所高校联合组织互联网创新 国家未来互联网试验设施 FITI 项目推进会举行[J]. 中国教育网络, 2023(5): 8.
Wu J P. Tsinghua University and other 40 universities jointly organized the FITI project promotion meeting of the Internet Innovation Country's Future Internet Test Facility[J]. China Education Network, 2023(5): 8.
- [3] 孙兵. 基于 VxLAN 的网络分组策略研究与分析[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(1): 126-130.
Sun B. Research and analysis of network grouping policy based on VxLAN[J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(1): 126-130.
- [4] 龚乐中, 庄跃迁. 天地一体化网络融合研究及应用分析[J]. 现代传输, 2025(3): 34-42.
Gong L Z, Zhuang Y Q. Research and application analysis of network integration of heaven and earth integration[J]. Modern Transmission, 2025(3): 34-42.
- [5] 李皓, 张林杰, 张翼飞. 卫星互联网安全仿真测试技术研究[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(2): 47-54.
Li H, Zhang L J, Zhang Y F. Research on satellite Internet security simulation test technology[J]. Space-Integrated-Ground Informa-

- tion Networks, 2023, 4(2): 47-54.
- [6] 赵军. VxLAN技术在电力企业数据中心网络架构建设中的应用[J]. 长江信息通信, 2023, 36(10): 102-104.
Zhao J. Application of VxLAN technology in network architecture construction of data center in electric power enterprise[J]. Changjiang Information & Communications, 2023, 36(10): 102-104.
- [7] 李业谦. VxLAN技术下的数据中心通信网络设计及实现[J]. 无线互联科技, 2020, 17(3): 3-4.
Li Y Q. Design and implementation of data center communication network based on VxLAN technology[J]. Wireless Internet Science and Technology, 2020, 17(3): 3-4.
- [8] 白鹏, 马岚. 基于EVPN VxLAN技术实现医院分布式双活数据中心的网络架构[J]. 信息系统工程, 2022(11): 56-59.
Bai P, Ma L. Network architecture of hospital distributed active and passive data center based on EVPN VxLAN technology[J]. China CIO News, 2022(11): 56-59.
- [9] 熊丽婷, 张绍彪, 揭吁茜. 两种高吞吐量低延迟光数据中心网络架构研究[J]. 光通信研究, 2020(6): 17-20, 76.
Xiong L T, Zhang S B, Jie X H. Research of two optical data center network frameworks with high throughput and low latency[J]. Study on Optical Communications, 2020(6): 17-20, 76.
- [10] 邓伟伟, 潘家宏, 杨阳. 基于支撑网双活数据中心大二层网络架构的研究与实践[J]. 中国新通信, 2022, 24(7): 28-30.
Deng W W, Pan J H, Yang Y. Research and practice on the second floor network architecture of active-active data center based on support network[J]. China New Telecommunications, 2022, 24(7): 28-30.
- [11] 陈凤霞, 王坤. IDC新型Spine-Leaf网络架构布线方案的选择[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2021(5): 1-5.
Chen F X, Wang K. Selection of cabling solution for IDC's new spine-leaf matrix network architecture[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2021(5): 1-5.
- [12] 饶锐, 任冠桥. VxLAN专利技术综述[J]. 中国科技信息, 2021(17): 19-20.
Rao R, Ren G Q. Overview of VxLAN patent technology[J]. China Science and Technology Information, 2021(17): 19-20.
- [13] 曹焱. 关于云数据中心网络架构分析及关键技术探讨[J]. 长江信息通信, 2021, 34(7): 121-123.
CAO Y. Analysis of cloud data center network architecture and discussion on key technologies[J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34 (7): 121-123.
- [14] 徐俭. 数据中心SDN叠加虚拟化网络技术探究[J]. 网络安全和信息化, 2023(2): 89-94.
Xu J. Research on SDN overlay virtualization network technology in data center[J]. Security & Informatization, 2023(2): 89-94.
- [15] 柏东明, 李青, 董之光. 基于Overlay技术的分布式网关的园区网络实现[J]. 信息系统工程, 2021(3): 21-22.
Bai D M, Li Q, Dong Z G. Campus network implementation of distributed gateway based on overlay technology[J]. China CIO News, 2021(3): 21-22.
- [16] 孟祥成. 基于VxLAN的校园网络优化设计研究[J]. 科学技术创新, 2023(18): 90-93.
Meng X C. Optimization design and research of campus network based on VxLAN[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2023(18): 90-93.
- [17] 于捷杰, 李伟东, 郭磊, 等. 基于VxLAN协议的新型SDN架构及应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2023, 14(2): 95-100.
Yu J J, Li W D, Guo L, et al. Novel SDN architecture and application based on VxLAN protocol[J]. Command Information System and Technology, 2023, 14(2): 95-100.
- [18] 王宇翔, 胡建龙, 倡洁, 等. SDN架构和VxLAN技术在校园网建设中的研究与实践[J]. 电子技术与软件工程, 2021, 10(15): 10-11.
Wang Y X, Hu J L, Si J, et al. Research and practice of SDN architecture and VxLAN technology in campus network construction [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021, 10(15): 10-11.
- [19] Krattiger L, Kapadia S, Jansen D. VxLAN BGP VPN 数据中心构建指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2021.
Krattiger L, Kapadia S, Jansen D. Building data centers with VxLAN BGP VPN[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2021.
- [20] 李济伟, 王洋, 柳瑞春. VxLAN技术在数据中心网络中的应用[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(12): 166-168.
Li J W, Wang Y, Liu R C. Application of VxLAN technology in data center network[J]. Electronic Components and Information Technology, 2024, 8(12): 166-168.
- [21] 陈朝勇, 龚祥旭, 章晋良, 等. 基于VxLAN+EVPN实现政务云专线接入的部署方案[J]. 电信快报, 2025(4): 35-38.
Chen C Y, Gong X X, Zhang J L, et al. Deployment plan of government cloud dedicated line access based on VxLAN and EVPN[J]. Telecommunications Information, 2025(4): 35-38.

[作者简介]



王亮 (1989-), 男, 硕士, 青海大学信息化技术中心讲师, 主要研究方向为计算机网络、网络安全。



曹腾飞 (1987-), 男, 博士, 青海大学计算机技术与应用学院教授、博士生导师, 主要研究方向为网络安全、人工智能。