基于 VxLAN over 5G 的矿山多协议设备接入方法设计与研究*

刘湘昱[1,2]，王西涛[1,3]，谭一帆[1,4]，李富伟[1,2,5]，黄源[1,3]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.金属矿山安全技术国家重点实验室， 湖南 长沙 410012；
3.战略性稀有金属矿产高效开发国家技术创新中心， 湖南 长沙 410012；
4.国家金属采矿工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012；
5.深部金属矿安全智能开采国家矿山安全监察局重点实验室， 湖南 长沙 410012）

摘要：针对智能矿山井下设备协议异构、通信环境恶劣导致的多协议无线接入难的问题，本文从矿山井下特殊信道约束与5G专网传输技术基础出发，提出一种适配矿山场景的VxLAN over 5G多协议透明接入方案，在5G网络上构建统一二层虚拟隧道，将EtherCAT、PROFINET等主流工业协议的原始以太网帧直接封装传输，无需对原有矿山设备的协议栈进行二次改造，大幅降低了井下通信网络升级改造的成本。通过搭建模拟矿山井下5G专网试验平台开展实测验证。研究结果表明，EtherCAT协议数据的端到端平均时延22.508 ms，最大时延44.794 ms；PROFINET协议数据平均时延21.007 ms，最大时延44.477 ms，两类协议数据时延均可稳定满足矿山井下固定设备状态监控（时延≤100 ms）、辅助作业机器人的常规远程控制（时延≤50 ms）等场景的实时性要求；但对于采掘工作面等需要毫秒级同步精度的强实时控制场景（时延≤1 ms），当前方案尚无法支持，需结合5G URLLC增强特性进一步优化。研究结果可为非煤矿山井下多协议异构设备的无线接入提供一种低改造成本、高通用性的可行技术路径，为智能矿山5G专网的精细化业务承载提供工程参考。

关键词：智能矿山；VxLAN over 5G；多协议透明接入；端到端时延；5G专网

中图分类号：TD65+5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)09-0266-08

Design and Research of Mine Multi-Protocol Equipment Access Method Based on VxLAN over 5G

Liu Xiangyu[1,2], *Wang Xitao*[1,3], *Tan Yifan*[1,4], *Li Fuwei*[1,2,5], *Huang Yuan*[1,3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan, 410012, China;
3.National Technology Innovation Center for Efficient Development of Strategic Rare Metal Mineral Resources, Changsha, Hunan 410012, China;
4.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan, 410012, China;
5.Key Laboratory of National Mine Safety Administration for Safe and Intelligent Mining of Deep Metal Mines, Changsha, Hunan, 410012, China)

Abstract: Aiming at the problem of difficult multi-protocol wireless access caused by the heterogeneous protocols of underground intelligent mine equipment and the harsh communication environments, a VxLAN over 5G multi-protocol transparent access scheme suitable for mine scenarios was proposed based on the special channel constraints and 5G private network transmission technology in underground mines. A unified two-layer virtual tunnel was constructed over the 5G network to directly encapsulate and transmit raw Ethernet frames of mainstream industrial protocols such as EtherCAT and PROFINET, without secondary modification to the protocol stacks of existing mine equipment, which greatly reduces the cost of upgrading and reconstructing underground communication networks. The actual verification was carried out by building a simulated mine underground 5G private network test platform. The results show that the end-to-end average latency of EtherCAT protocol data is 22.508 ms, and the maximum latency is 44.794 ms. The average latency of PROFINET protocol data is 21.007 ms and the maximum latency is 44.477 ms. The latency of both protocol data can stably meet the real-time requirements for scenarios such as condition monitoring of fixed underground mine equipment (latency≤100 ms) and conventional remote control of auxiliary operation robots (latency≤50 ms). However, for strong real-time control scenarios

* **收稿日期**：2026-04-27
基金项目：金属矿山安全技术国家重点实验室资助项目(2025GZKJ05)；应急管理部重点科技计划项目(2025EMST080101)
作者简介：刘湘昱(2000—)，女，湖南长沙人，硕士，主要从事矿山机电设备的研究与开发工作。E-mail：lxy0331@163.com

such as mining faces that require millisecond-level synchronization accuracy (latency≤1 ms), the current scheme cannot support it, and needs to be further optimized in combination with 5G URLLC enhancement features. The research results can provide a feasible technical path with low transformation cost and high versatility for the wireless access of multi-protocol heterogeneous equipment in non-coal mines, and provide engineering reference for the refined service bearer of 5G private network in intelligent mines.

Key words: Intelligent mine, VxLAN over 5G, Multi-protocol transparent access, End-to-end latency, 5G private network

0 引言

随着工业 4.0 理念[1]向采矿行业的纵深渗透，矿山智能化已成为行业转型升级的必然选择。井下采掘、运输、通风、排水等各生产环节的自动化控制与远程运维依赖于一张覆盖井下全域、连接各类设备的高速通信网络，5G 无线通信技术凭借其高带宽、低延迟和大连接的特性[2]，成为矿山无线通信技术的重要选择。

然而，井下设备类型繁多，铲运机、装载机、矿用卡车、破碎机、提升机等矿山关键生产装备分别采用 EtherCAT、PROFINET、Modbus 乃至各类私有协议，这些协议在物理层与数据链路层虽遵循统一的以太网规范，却在应用层形成了互不兼容的协议体系，不利于复杂通信场景下的实时数据交换及资源的统一调度、使用与管理。

Xu 等[3]深入分析了 Modbus 和 5G 协议的数据包格式和通信时序的特点，提出了 Modbus 与 5G 协议栈适配的协议解析转换方案。Wang 等[4]提出了一种 5G 和 EtherCAT 协议适配方案，EtherCAT 服务流数据被重新封装为 5G 协议数据单元，通过 5G 协议栈逐层封装后发送。

若采用上述协议转换方案，解析出工业协议载荷后重新封装为 IP 包，意味着对每一个工业协议均需要开发专用的解析器，在多协议场景中开发周期长，因此需要更通用的解决方案。

针对上述问题，本研究提出将 VxLAN 技术作为矿山多协议设备数据在 5G 网络中传输的一种通用解决方案。该方案在不改变工业协议数据格式的前提下，使各类工业协议的原始以太网帧得以不经修改地在 5G 网络中“透明”传输，并通过试验验证了其可行性，以期为矿山多设备、多协议的无线接入提供一种可行的技术路径。

1 相关技术基础

1.1 VxLAN 技术原理

VxLAN 通过网络虚拟化技术在底层物理网络之上创建一张或多张相互独立的逻辑网络，实现跨主机的透明互联与安全隔离[5]。底层网络是指物理网络基础设施，采用传统的 IP 路由协议负责数据包在网络中的转发和路由，上层的虚拟化网络则通常利用底层网络提供的基础设施实现数据包的封装和转发。

VxLAN 的工作依赖于 VxLAN 隧道端点(VxLAN Tunnel Endpoint，VTEP)。VTEP 作为网络虚拟化架构中的关键设备，通常部署在虚拟化主机的网络接口上，它可以是软件实现或者硬件支持，主要负责 VxLAN 隧道中数据包的封装与解封装操作。在 VxLAN 通信过程中，封装后的报文在其外层 IP 头部携带源 VTEP 和目的 VTEP 的 IP 地址，从而实现基于 IP 网络的转发。经过封装的数据帧可在物理网络层中透明传输，确保不同逻辑网络之间的互联与隔离[6]。VxLAN 网络标识符大小为 24 bit，可以支持多达 1 677 万个虚拟网络。

1.2 5G 网络结构

5G 网络主要包括接入网与核心网，其结构如图 1 所示。

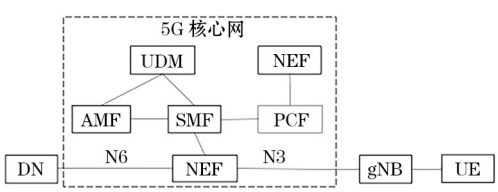


图 1 5G 网络结构

Fig.1 5G network architecture

5G 核心网是 5G 移动通信网络的关键组成部分，包括接入和移动性管理功能(AMF)、会话管理功能(SMF)、用户面功能(UPF)等。5G 核心网将网络功能以微服务形式实现，各功能模块通过服务化接口(如 N1、N2、N4、N6 等)进行互联与通信。其中，N6 接口连接 UPF 与外部数据网络(DN)，用于传输用户侧的数据流。N6 接口基于 IP 协议与路由机制实现与 DN 网络的通信，用户可通过 DN 接入 UPF 向 5G 网络传输业务数据，UPF 的主要职责包括数据包的路由与转发、流量统计及计费管理、服务质量执行、数据包检测和策略执行等，N3 接口使用 GPRS 隧道协议用户平面(GTP-U)协议与基站进行通信。UDM、PCF、NEF 分别为统一数据管

理、策略控制功能和网络开放功能。

5G 基站和 5G UE 在 5G 网络中属于接入网部分。5G 基站称为 gNB,其架构有利于集中部署与边缘计算结合[7],提高资源利用率与灵活性。5G UE 是指任何能够接入 5G 网络的设备,5G UE 通过无线接口连接到 5G 基站,并与网络中的其他设备进行通信。

2 矿山井下信道场景的通信约束

地下矿井机电产品的无线通信面临着与地面环境截然不同的物理挑战。电磁波在地层围岩与巷道空腔构成的复合边界条件下传播,要实现采煤机、运输机等机电设备的协同,必须克服由受限空间和密集设备带来的链路预算、信道容量和可靠性边界等约束。本节从通信原理的基本视角出发,系统分析地下矿山特殊环境对无线通信系统的约束机制。

2.1 链路预算分析

由于巷道壁对电磁波有吸收作用,且不同频段信号的衰减特性不同(例如 5G 等高频信号的穿透性较弱),信号在传播过程中会发生剧烈的路径损耗,可使用对数距离路径损耗模型量化这一约束:

$$PL(d)=PL(d_0)+10n\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)+X_\sigma \quad (1)$$

式中:$PL(d_0)$为参考距离 d_0(通常取 1 m)处的路径损耗;n 为路径损耗指数;X_σ 为均值为零、标准差为 σ 的正态随机变量,表征阴影衰落。

矿山巷道本质上构成了一个矩形或拱形介质波导结构。电磁波在巷道中传播时,当工作频率高于隧道截止频率时,信号以波导模式传播,损耗相对较低;反之则快速衰减。实际矿山通信系统多工作在特高频(UHF, 300 MHz~3 GHz)甚至更高频段,远高于截止频率,因此波导效应显著。

不同矿山场景下的路径损耗指数 n 差异显著。表 1 总结了典型场景的 n 值范围。

表 1 不同矿山场景下的路径损耗指数

Table 1 Path loss exponents in different mine scenarios

矿山场景	路径损耗指数 n
自由空间(理论)	2.0
直巷视距(宽>4 m)	1.5~2.0
直巷视距(窄<3 m)	2.0~2.5
弯曲巷道	3.0~4.0
急弯/阻挡/岔口	4.0~7.0

在直巷中,波导效应可显著降低传播损耗,路径损耗指数 n 通常在 1.5~2.0 之间,甚至优于自由空间传播条件。然而,当巷道弯曲、分支或遇到断面突变时,波导模式被破坏,损耗急剧增加。

在直巷视距场景中,得益于波导模式的能量汇聚效应,路径损耗呈现较低的梯度增长;相比之下,在急弯或强遮挡的非视距场景下,由于巷道几何边界条件的突变,衍射与散射损耗占据主导地位,导致路径损耗在极短距离内发生数十个分贝量级的跃升,这对通信系统的链路预算储备提出了极高的容错要求。

链路预算是评估无线通信系统能否在给定信道条件下正常工作的基本工具[8]。对于矿山机电产品的无线通信链路,接收端功率必须满足接收机灵敏度要求,并留有足够的衰落余量以应对信道的时间变化特性[9]。链路预算方程为:

$$P_{rx}=P_{tx}+G_{tx}-L_{tx}-PL(d)-L_{margin}+G_{rx} \quad (2)$$

式中:P_{rx}为接收端收到的信号功率;P_{tx}为发射功率;G_{tx}和G_{rx}分别为发射和接收天线增益;L_{tx}为发射端馈线损耗;L_{margin}为系统衰落余量(含快衰落、阴影衰落、干扰余量等)。

P_{rx}必须大于接收机灵敏度P_{sens},即:

$$P_{rx}\geqslant P_{sens}=kTB\cdot NF\cdot SNR_{min} \quad (3)$$

式中:k 为玻尔兹曼常数,$k=1.38\times10^{-23}$ J/K;T 为开尔文温度;B 为系统带宽;NF 为接收机噪声系数;SNR_{min}为满足目标误码率所需的最小信噪比。

计算典型矿山场景下的链路预算:设 $P_{tx}=20$ dBm,$G_{tx}=G_{rx}=3$ dBi,$B=20$ MHz,$NF=8$ dB,$SNR_{min}=10$ dB,$L_{margin}=15$ dB,则在直巷场景($n=1.8$)下,有效通信距离可达 200~300 m;而在弯曲巷道($n=3.5$)中,有效通信距离急剧缩短至 30~50 m。这意味着矿山机电产品的无线通信系统必须根据具体部署场景选择合适的工作频率和发射功率[10],或通过中继/无线网状网络(Mesh)组网以扩展覆盖范围。

2.2 噪声环境与信道容量约束

地下矿山的电磁噪声环境远比地面复杂,其主要噪声源包括热噪声、人为噪声和脉冲噪声[11]。热噪声由接收机前端电路与环境温度决定,构成了系统灵敏度的基本下限;人为噪声来源于大功率电机、变频器、变压器及电缆辐射等工业设备,属于宽带电磁辐射,其强度在低频段(<100 MHz)尤为突出,并随频率升高而逐渐降低;脉冲噪声则源于电气设备的开关操作、电机电刷火花等瞬态过程,表现为高峰值功率的窄脉冲,具有宽频谱特征,可能导致突发性误码[12]。

矿山环境的总噪声功率谱密度 N 可表示为:

$$N=kT+NF+I_{\text{man}} \tag{4}$$

式中：$kT=-174$ dBm/Hz(室温 $T=290$ K 下的热噪声谱密度)；I_{man}为人为噪声增量。

在矿山井下，I_{man}通常在 10～30 dB 范围内变化，取决于机电设备的密集程度和工作状态。这意味着实际噪声基底可能达到－156～－136 dBm/Hz，显著高于地面环境的噪声水平。

根据香农信道容量定理[13]，加性高斯白噪声(AWGN)信道下，系统的最大可达信道容量 C 为：

$$C=B\log_2\left(1+\frac{S}{N}\right)=B\log_2\left(1+\frac{P_{\text{rx}}}{N_0B}\right) \tag{5}$$

式中：S 为接收端收到的有用信号的平均功率；N_0表示单位带宽内的噪声功率。

将式(2)的链路预算方程代入式(5)，可得到给定距离下的信道容量约束[14]。设发射功率$P_{\text{tx}}=20$ dBm，$B=20$ MHz，$I_{\text{man}}=20$ dB，则不同矿山场景下的信道容量 C 随通信距离 d 的变化曲线如图 2 所示。

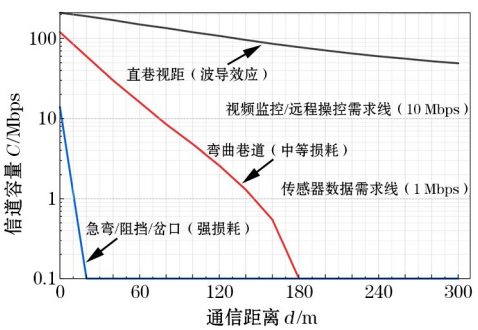


图 2 不同巷道的信道容量随通信距离变化曲线

Fig.2 Variation curves of channel capacity with communication distance in different roadways

分析图 2 可知，在直巷视距场景中，140 m 范围内信道容量可达 100 Mbps 以上，足以支持视频监控和高清图像传输；在弯曲巷道中，信道容量在 75 m 处即降至约 10 Mbps，仅能支持中等速率的传感器数据和控制指令[15]；在急弯/阻挡/岔口场景下，有效通信距离不足 20 m，信道容量急剧下降。

现场实时传输的工业协议数据帧(如 EtherCAT、PROFINET 等)的单帧长度通常在 64～1 500字节之间[16]，瞬时数据速率通常不超过 10 Mbps，远低于 5G 网络可提供的信道容量。

2.3 矿山井下 5G＋Mesh 混合组网适配

矿山井下巷道弯折多、金属框架密集、环境湿度高，单一 5G 基站难以实现全巷道连续覆盖。针对该问题，辽宁移动提出了 5G＋Mesh 混合组网方案，通过将无线快速自组网 Mesh 设备接入 700 MHz 远距离覆盖 5G 网络，实现了井下复杂矿道 20 跳无线延伸覆盖，末端设备可稳定获得 10 Mbit/s 带宽[17]。该方案在井下纵向 400 m、横向最远约 2 km 的作业面实现了无线网快速组网覆盖。

本方案所提出的 VxLAN over 5G 架构可与上述 5G＋Mesh 混合组网形成有效适配：VTEP 部署于 5G 核心网侧与 5G UE 侧，Mesh 设备作为 5G 信号的延伸中继，在巷道弯折、信号衰减区域提供多跳无线回传通道。VxLAN 封装后的 UDP 数据包经由 5G 接入网接入 Mesh 中继链路，在 Mesh 各跳节点间以 IP 路由方式转发[18]，最终到达目标 UE 侧 VTEP 完成解封装。该适配架构的核心优势在于：VxLAN 隧道对底层物理链路的变化透明——无论数据包经由 5G 直连还是 Mesh 多跳转发，VTEP 均无需感知底层路由变化，从而在复杂巷道环境下保持协议数据的稳定传输。

3 基于 VxLAN over 5G 的多协议设备接入架构设计

3.1 协议转换原理

以 EtherCAT 协议为例，为了使数据帧能够在 5G 网络中传输，VxLAN 技术构建出一张虚拟的逻辑网络，采用隧道封装机制，数据包具体的封装步骤如下。

(1) VTEP 接收来自 EtherCAT 主站的原始以太网帧，EtherCAT 数据帧中包含以太网帧头及数据部分。数据部分包含实际传输的数据(如输入、输出数据)，包括可编程逻辑控制器(PLC)控制命令、反馈信号、传感器数据等。

(2) 在 VxLAN 隧道中，隧道端点会在原始 EtherCAT 帧前添加一个 VxLAN 头部，完成封装操作。通过 VNI 字段实现多用户环境下的逻辑隔离。VxLAN 头通常会被插入到原始以太网帧和外层 IP 头之间。

(3) VxLAN 将封装后的帧进一步封装在 UDP 包中，UDP 包通过 IP 网络进行传输。UDP 头使用了特定的端口(通常为 4789 端口)，以确保数据包能够正确地被路由到目标 VTEP。

(4) VTEP 负责将数据流进行封装，将原始以太网帧嵌入 VxLAN 隧道中，并通过外部 IP 网络发送。

EtherCAT 数据帧经过上述处理后成为带有 IP 头的 UDP 数据包。

在5G网络中,UDP数据包的传输涉及多个协议层,数据包在各协议层中逐层处理,直至被传输至核心网,并依赖于GTP-U协议承载用户数据[19]。GTP-U协议将UDP数据包的IP数据包作为负载封装在GTP-U头部之后,再发送至5G基站(gNB),gNB通过无线网络将数据包传输至UE[20]。

VxLAN数据在PLC侧的传输流程如图3所示。

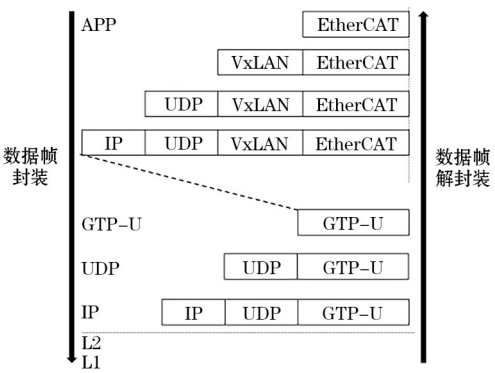


图3 PLC侧数据帧封装与解封装流程

Fig.3 Encapsulation and decapsulation process of PLC-side data frame

VxLAN数据在5G UE侧的传输流程如图4所示,数据包经过无线信道到达用户设备后,物理层负责接收无线信号并将其转换为比特流[21],经过链路层等数据层的处理,最终数据包到达UE的传输层。同样,在5G UE侧接收到的UDP数据包会由目标VTEP进行解封装。

(1) VTEP负责将接收到的VxLAN数据帧进行解封装,首先去除UDP头,并提取出原始的VxLAN数据帧。

(2) 目标VTEP去除VxLAN头,提取出原始的EtherCAT数据帧。

(3) 解封装后的EtherCAT数据帧被转发到与5G UE连接的EtherCAT从站。

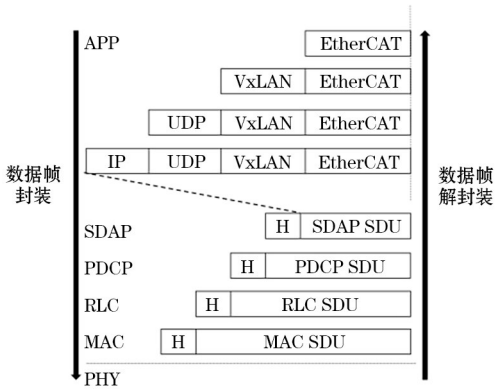


图4 5G UE侧数据帧封装与解封装流程

Fig.4 Encapsulation and decapsulation process of 5G UE-side data frame

3.2 架构设计

VxLAN通过封装数据包,在5G UPF和外部数据网络之间构建灵活、可扩展的隧道,每个隧道端点均有一个唯一的VTEP IP地址,用于标识VTEP。

5G核心网的N6接口支持大规模5G网络扩展,而UPF本身可能是一个容器化或虚拟化的组件,直接绑定物理网卡可能带来管理上的困难。虚拟网桥可以桥接UPF虚拟接口与物理网卡,实现透明转发,支持多种网络封装,方便跨数据中心连接。因此,在数据发送端及接收端分别建立起虚拟网桥,用于连通UPF接口与物理网卡,将封装后的数据包发送至5G网络。基于VxLAN技术的5G-EtherCAT协议通信架构如图5所示。

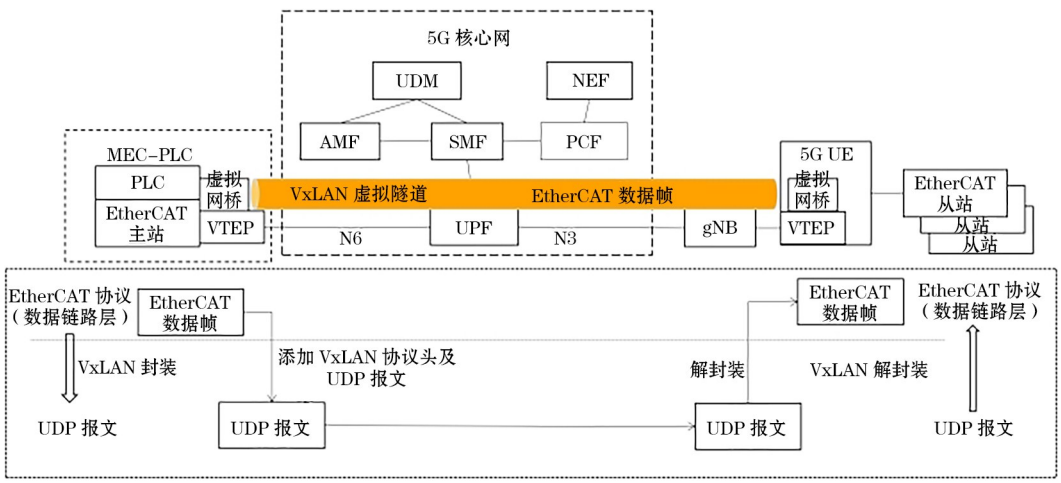


图5 基于VxLAN技术的5G-EtherCAT协议通信架构

Fig.5 5G-EtherCAT protocol communication architecture based on VxLAN

基于上述分析，在本方案中，PLC 和 EtherCAT 主站部署在 5G 核心网侧，EtherCAT 数据帧下发至 VTEP，由 VTEP 封装为 UDP 数据包，通过虚拟网桥桥接 5G 核心网 UPF 虚拟接口与设备的物理网卡，形成 VxLAN 虚拟隧道，实现 UDP 数据包在 5G 网络的透明转发。

在 5G UE 端，UDP 数据包到达 VTEP 后，由 VTEP 对其进行解封装工作，还原出 EtherCAT 数据帧，再通过 5G UE 设备将数据帧下发至 EtherCAT 从站，实现运动控制。

4　试验验证

为验证所提方案在实际矿山环境中的可行性，依托构建的模拟矿山井下 5G 专网试验平台开展实测验证，巷道断面尺寸约为 4.5 m×3.5 m，直巷长度约 800 m，存在两处弯道和一处岔口，矿井内典型机电设备包括铲运机、破碎机、皮带运输机等，其控制系统分别采用 EtherCAT 和 PROFINET 协议。试验目的在于测试 VxLAN over 5G 架构下，上述两种协议数据在井下无线传输的端到端时延[22]，为实际部署提供数据支撑。

通信系统的端到端时延由 4 个基本分量构成：

$$T_{\text{end-to-end}} = T_{\text{send}} + T_{\text{prop}} + T_{\text{proc}} + T_{\text{queue}} \quad (6)$$

式中：T_{send} 为发送时延；T_{prop} 为传播时延；T_{proc} 为协议数据的封装、解析与处理时延；T_{queue} 为网络节点中的排队等待时延。

在试验环境中，5G 网络由 5G 多网元一体机、5G 扩展单元和 5G 射频单元构成，工作于 n78 频段(3.5 GHz)，信道带宽配置为 100 MHz。PLC 的运行环境及 VTEP 均部署在 5G 多网元一体机的多接入边缘计算服务中。5G UE 设备采用搭载 5G 模组的树莓派，树莓派中部署了 PLC 运行平台以及 VTEP，通过网线与伺服电机连接，实现运动控制。

在一体机终端使用 Wireshark 软件进行数据包捕获，通过分别读取 EtherCAT 数据帧和 PROFINET 数据帧的端到端时延，记录 1 500 组端到端时延数据，如图 6 和图 7 所示。

通过 VxLAN 封装后的 EtherCAT 数据包在 5G 网络端到端时延的平均值为 22.508 ms，最小值为 8.662 ms，最大值为 44.794 ms，集中在 11.262～26.862 ms 区间。

通过 VxLAN 封装后的 PROFINET 数据包在 5G 网络端到端时延的平均值为 21.007 ms，最小值为 9.374 ms，最大值为 44.477 ms，集中在 11.474～24.074 ms 区间。

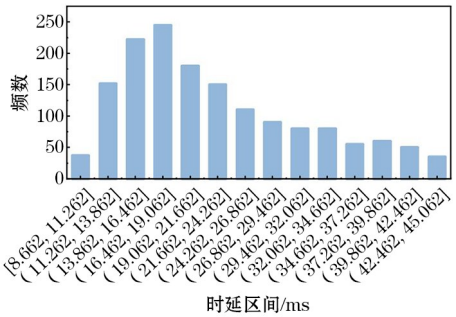


图 6　EtherCAT 协议数据端到端时延分布

Fig.6　End-to-end latency distribution of EtherCAT protocol data

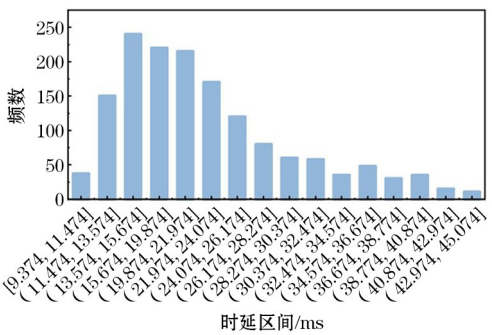


图 7　PROFINET 协议数据端到端时延分布

Fig.7　End-to-end latency distribution of PROFINET protocol data

试验结果表明，两种协议的端到端最大时延均能稳定在 45 ms 以内，平均时延约 20 ms，满足设备监控、数据采集与上传及常规远程控制等场景的响应要求。对于运动控制类应用，虽然 EtherCAT、PROFINET 对亚毫秒级同步有原生要求，但本方案通过 VxLAN 透明承载，避免了协议转换引入的额外解析延迟。在弯道和岔口区域，由于信号衰减略有增加，时延出现少量抖动，但未出现连接中断现象，说明方案在典型井下环境具有较好的鲁棒性。总体而言，该方案能够基本实现矿山设备的实时控制，尤其适用于对时延不苛刻的监控和运维场景。

5　结论

(1) 本文提出并验证了一种基于 VxLAN over 5G 的多协议设备接入方法。该方法利用 VxLAN 的隧道封装机制，将 EtherCAT、PROFINET 等工业协议的原始以太网帧透明承载于 5G 网络，无需为每种协议开发专用解析转换器，具有通用性强、部

署便捷的显著优势。这一思路突破了传统协议转换模式在异构环境中的适配瓶颈,为矿山多协议融合提供了一种轻量级、可扩展的网络架构。

(2) 试验数据显示,EtherCAT 和 PROFINET 协议数据的端到端平均时延分别为 22.508 ms 和 21.007 ms,最大时延分别为 44.794 ms 和 44.477 ms,时延分布主要集中在 11.262～26.862 ms 和 11.474～24.074 ms 区间,波动范围小。该实时性能可稳定满足矿山井下固定设备状态监控(时延≤100 ms)、数据采集与上传、常规远程操作(时延≤50 ms)等场景;对于辅助作业机器人的常规远程控制(时延≤50 ms),亦可满足其时延阈值要求。但对于采掘工作面液压支架与采煤机协同控制等高精度伺服同步或高速插补运动等毫秒级强实时场景(时延≤1 ms),当前时延尚无法满足,需结合边缘计算、网络切片或 5G URLLC 增强特性进一步优化。

参考文献(References):

[1] Ying Jeffrey, Hsieh Jackie, Hou Dennis, et al. Edge-enabled cloud computing management platform for smart manufacturing[C]// 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd 4.0 & IoT), 2021: 682-686.

[2] 杨怀宇.5G 技术在工业控制网络中的应用与实践[J].网络安全技术与应用,2023(11):100-101.
Yang Huaiyu. Application and practice of 5G technology in industrial control networks [J]. Network Security Technology & Application,2023(11):100-101.

[3] Xu Chi, Du Xinyi, Li Xinchun, et al. 5G-based industrial wireless controller: protocol adaptation, prototype development, and experimental evaluation[J]. Actuators, 2023,12(2):49.

[4] Wang Heng, Bing Qunzhi, Deng Anhua. A protocol translation scheme between EtherCAT field network and IPv6-based industrial backbone network[C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC),2020:813-818.

[5] 张届新,傅志仁,吴志明,等.VxLAN 在云数据中心组网的应用[J].电信科学,2015,31(9):170-176.
Zhang Jiexin, Fu Zhiren, Wu Zhiming, et al. VxLAN application in cloud datacenter network[J]. Telecommunications Science,2015,31(9):170-176.

[6] 卢志刚,姜政伟,刘宝旭.一种基于 VxLAN 的虚拟网络访问控制方法[J].计算机工程,2014,40(8):86-90+95.
Lu Zhigang, Jiang Zhengwei, Liu Baoxu. A virtual network access control method based on VxLAN [J]. Computer Engineering,2014,40(8):86-90+95.

[7] 冯毅雄,杨晨,胡炳涛,等.基于 5G 多接入边缘计算的云化 PLC 系统架构设计与应用[J].计算机辅助设计与图形学学报,2024,36(1):33.
Feng Yixiong, Yang Chen, Hu Bingtao, et al. Architecture design and application of cloud PLC system based on 5G multi-access edge computing[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics,2024,36(1):33.

[8] 王春琦,崔成华,单亮亮,等.6 GHz 频段 5G 低空专网通信链路预算研究[J].中国无线电,2026(6):52-55.
Wang Chunqi, Cui Chenghua, Shan Liangliang, et al. Research on communication link budget of 5G low-altitude private network in 6 GHz frequency band[J]. China Radio, 2026(6):52-55.

[9] 易舟维,朱劼昊,朱荚,等.随机量化驱动的 DAC 谐波抑制与弱信号生成[J/OL].信号处理:1-17[2026-04-13].https://link.cnki.net/urlid/11.2406.tn.20260409.0958.016.
Yi Zhouwei, Zhu Jiehao, Zhu Yu, et al. A harmonic suppression and weak signal generation method in DAC with stochastic quantization [J/OL]. Signal Processing: 1-17 [2026-04-13]. https://link.cnki.net/urlid/11.2406.tn.20260409.0958.016.

[10] 陈涛浪.对流层散射超视距传播模型及其应用研究[D].成都:西南交通大学,2024.
Chen Taolang. Research on over-the-horizon propagation models of troposcatter and its application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2024.

[11] 杨亚波.基于信噪比的雷达作用距离评估方法[J].舰船电子工程,2025,45(11):96-98.
Yang Yabo. The radar range assessment method based on SNR[J]. Ship Electronic Engineering,2025,45(11):96-98.

[12] 龚猷龙.基于信噪比估计的自适应调制编码算法研究[J].自动化应用,2025,66(17):182-185+189.
Gong Youlong. Research on AMC algorithm based on SNR estimation[J]. Automation Application,2025,66(17):182-185+189.

[13] 刘宇翔,王旭,施政,等.基于信道容量约束的物理层安全语义通信[J].移动通信,2026,50(1):35-43.
Liu Yuxiang, Wang Xu, Shi Zheng, et al. Physical layer secure semantic communication based on channel capacity constraints[J]. Mobile Communications,2026,50(1):35-43.

[14] 张晨阳,罗珊,弓子悦,等.面向智慧地铁的无线物联网信道特性及容量分析[J].太赫兹科学与电子信息学报,2025,23(12):1289-1300.
Zhang Chenyang, Luo Shan, Gong Ziyue, et al. Analysis of channel characteristics and capacity of wireless IoT for smart subway[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology,2025,23(12):1289-1300.

[15] 张旭.OFDM 电缆通信系统中非高斯噪声与干扰的抑制方法研究与实现[D].成都:电子科技大学,2024.
Zhang Xu. Research and implementation of non-Gaussian noise and interference suppression methods in OFDM cable communication systems [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2024.

[16] 刘冠宸,张春雷,刘星宇.基于 EtherCAT 运动控制器的数据帧传输超时问题分析[J].自动化应用,2020(12):52-53+56.
Liu Guanchen, Zhang Chunlei, Liu Xingyu. Analysis of timeout problem of data frame transmission based on Ethercat motion controller[J]. Automation Application, 2020(12):52-53+56.

[17] 赵杨.5G+MESH 创新组网筑牢矿山应急防线[N].人民邮电,2026-02-27(001).
Zhao Yang. 5G+MESH innovative networking strengthens mine emergency defense [N]. People's Posts and Telecommunications News,2026-02-27(001).

[18] 刘家昕,高昌平,王冠华,等.5G 与 800 M 集群融合通信技术在胜利西一号露天矿的应用[J].智能矿山,2026,7(4):79-83.
Liu Jiaxin, Gao Changping, Wang Guanhua, et al. Application of 5G and 800 M trunking integrated communication technology in Shengli West No.1 open-pit mine[J]. Journal of Intelligent Mine,2026,7(4):79-83.

[19] Bhatt Ashutosh, Joshi Pooja, Joshi Kapil, et al. Advanced technologies for realizing sustainable development goals 5G, AI, big data, blockchain and Industry 4.0 applications[M]. Sharjah: Bentham Science Publishers,2024.

[20] 田原,刘怀亮,谢永恒,等.5G 网络切片技术及监测系统研究[J].工业控制计算机,2024,37(5):41-43.
Tian Yuan, Liu Huailiang, Xie Yongheng, et al. Research on 5G network slicing technology and monitoring system[J]. Industrial Control Computer,2024,37(5):41-43.

[21] Huang Mingfeng, Liu Anfeng, Xiong Neal N, et al. Towards intelligent and trustworthy task assignments for 5G-enabled industrial communication systems[J]. Digital Communications and Networks,2025,11(1):246-255.

[22] 许圣祥,叶旭明.基于信号处理技术的隧道无线通信时抗多径衰落研究[J].电子设计工程,2025,33(12):160-163+168.
Xu Shengxiang, Ye Xuming. Research on anti-multipath fading in tunnel wireless communication based on signal processing technology[J]. Electronic Design Engineering, 2025,33(12):160-163+168.