

5G 智慧矿山应用与实践

Application and Practice of 5G Intelligent Mining

陈斌¹, 林晓伯¹, 邱佳慧¹, 高沛¹, 卢浩², 咸金龙³(1. 中国联通智网创新中心, 北京 100048; 2. 联通智网科技股份有限公司, 北京 100031; 3. 华能伊敏煤电有限责任公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021100)

Chen Bin¹, Lin Xiaobo¹, Qiu Jiahui¹, Gao Pei¹, Lu Hao², Xian Jinlong³(1. Innovation Center of China Unicom Intelligent Network, Beijing 100048, China; 2. China Unicom Smart Connection Technology Co., Ltd., Beijing 100031, China; 3. Huaneng Yimin Coal Electricity Co., Ltd., Hulun Buir 021100, China)

摘要:

5G 技术赋能智慧矿山, 实现高度智能化与自动化。探讨 5G 在远程遥控、自动驾驶及数据采集等矿山生产环节的应用, 强调其高速率、低时延特性对作业安全与效率的关键作用。同时, 介绍 MEC、网络切片、5G LAN 等关键技术, 支撑矿山多样化需求。通过实证分析, 验证 5G 技术显著提升矿山作业智能化水平, 并有效降低运营成本, 为矿山行业数字化转型提供有力支撑。

关键词:

5G; MEC; 智慧矿山; 自动化; 网络切片; 低时延
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2024.07.014
文章编号: 1007-3043(2024)07-0070-07
中图分类号: TN929.5
文献标识码: A
开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Abstract:

5G technology empowers smart mines to achieve high intelligence and automation. It explores the application of 5G in remote control, autonomous driving, and data collection in mining production processes, and emphasizes its key role in ensuring operational safety and efficiency due to its high speed and low latency characteristics. At the same time, key technologies such as MEC, network slicing, and 5G LAN are introduced to support diversified mining needs. Through empirical analysis, it is verified that 5G technology significantly improves the level of intelligent mining operations and effectively reduces operating costs, which provides strong support for the digital transformation of the mining industry.

Keywords:

5G; MEC; Smart mining; Automation; Network slicing; Low latency

引用格式: 陈斌, 林晓伯, 邱佳慧, 等. 5G 智慧矿山应用与实践[J]. 邮电设计技术, 2024(7): 70-76.

1 概述

在矿山生产场景中, 驾驶员需要长时间地面对噪声、浮尘、震动等恶劣的工作环境, 同时这一环境还存在高危性及不确定性。据不完全统计, 自 2000 年以来, 我国发生 595 起重特大煤矿事故, 死亡 8 483 人^[1]。国家已出台多部智能矿山行业规范、指导意见、建设政策等文件, 以支持并积极引导智能矿山健康规范地发展。2022 年 8 月, 应急管理部和国家发改委联合印发了《“十四五”应急管理部门和矿山安全监察机构安

全生产监管监察能力建设规划》(以下简称《规划》), 明确以“推进安全生产治理体系和治理能力现代化”为主线, 提出到 2025 年, 科学技术支撑水平显著提升^[2]。

5G 智慧矿山的落地, 不仅契合《规划》的要求, 而且具有较高的紧迫性, 运用 5G 无线通信技术, 能够实现自动驾驶和远程遥控驾驶, 从而保障驾驶安全性, 提高作业效率, 提升作业舒适度。矿山的独特生产环境及作业模式对承载网络提出了新的功能和性能需求。目前, 5G 网络在成熟特性基础上, 逐步引入 MEC、切片、5G LAN、RedCap 等新特性, 以满足更丰富场景需求, 推动相关的业务部署和产业发展。

收稿日期: 2024-06-06

2 5G 智慧矿山业务需求

随着 5G 智慧矿山与通信技术、人工智能等的深度融合和快速发展,我国已经建成了自动化水平较高的智慧矿山^[3]。随之而来,业务对通信基础设施提出了更高的要求,主要体现在以下几个应用中。

a) 远程遥控驾驶是矿山开采的重要技术之一,主要应用于自动导引运输车辆及各类机器人等的远程遥控和接管。该技术对通信系统实时性要求较高,需要网络和业务系统的快速响应,确保指令实时触达。针对此类业务需求,可将视频监控系统和远程电控系统部署在边缘计算服务器,提供就近、低时延的远程遥控驾驶服务^[4]。此外,远程遥控对控制指令的可靠性要求极高,可利用 5G 网络切片技术对特定业务数据进行区分和独立承载,并提供高可靠性保障。

b) 自动驾驶已经广泛用于矿区各类车辆的日常作业中,智慧矿山中的矿用作业设备具备不同程度的自动驾驶能力。自动驾驶的实现一方面需要依靠边缘算力,生成全局的控制策略,另一方面需要车辆与路侧设施之间实现直连通信,以共享车辆状态交互和感知信息。针对此类业务需求,基于 5G LAN 的 5G 组播/广播技术可将车辆进行分组并实现超低时延的终端间通信,理论时延可以降低到 50 ms 以内^[5]。

c) 智慧矿山相比于传统采矿方式,在开采、生产、运营管理等环节产生了海量数据,包括矿产开采信息、矿区土地信息、车辆工况数据监测、边坡数据在线监测等。因此,数据采集、存储、分析处理和深度挖掘的需求显著增加,对边缘算力的需求也呈指数级增长。

d) 在智慧矿山中,矿卡、电铲、挖掘机、推土机、洒水车、平地机、无人机等多种矿用作业设备共存,不同设备、车辆的通信需求不尽相同。可利用 RedCap 的技术特性,通过裁剪终端能力适配不同设备、车辆的通信需求,在满足通信需求的情况下提高经济效益^[6]。

综上所述,5G 技术的引入可以对智慧矿山 IT/CT 能力带来质的飞跃,具体体现在远程控制、自动化作业、高清视频监控、环境检测、数字孪生等核心应用上,这些应用可有效提升矿山作业的安全性、效率和智能化水平。

3 5G 关键技术

针对上述智慧矿山的业务需求,5G NR 可提供高

速率、低时延的连接能力,5G MEC 可满足边缘侧高算力需求。切片、5G LAN、RedCap 等技术共同构建了一个能够满足不同通信需求、网业协同的移动物联网技术体系。

3.1 5G MEC

在 5G 智慧矿山中,MEC 通过 5G 流量的本地卸载和服务本地化,将数据处理和存储功能下沉到网络边缘,大幅减少数据传输时延,提高数据处理速度。MEC 在矿山中的部署架构如图 1 所示。

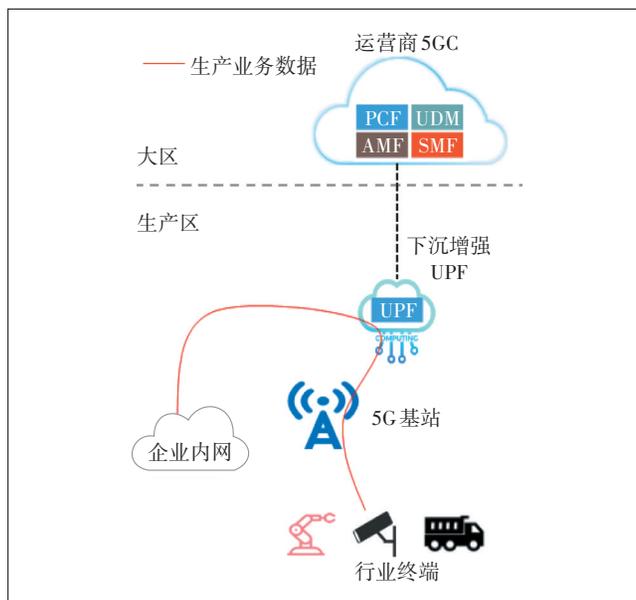


图 1 MEC 在矿山中的部署架构

MEC 可实现业务数据不出矿区,为矿山提供更加安全的网络环境。本地化数据处理的方式可减少数据泄露的风险,并通过 5G 网络的高级加密技术保障数据传输的安全性。5G 网络的大带宽和高连接密度,配合 MEC 的本地处理能力,可以优化整个矿区网络的性能,提高网络运行效率和可靠性,进而支持更复杂的自动化和智能化应用,如矿车自动驾驶、智能监控和预测性维护等。此外,通过 5G+MEC 可以在边缘侧构建矿山的数字孪生模型,进行实时的模拟和分析,优化生产流程和辅助决策。综上所述,5G 和 MEC 的结合,为智慧矿山提供了强大的网络基础和计算能力,推动了矿山行业向更高水平的自动化、智能化和安全性方向发展^[7]。

3.2 5G 切片

智慧矿山中业务类型纷繁复杂,不同业务对网络的需求不尽相同,为了满足智慧矿山应用的通信需

求,同时节约部署成本并提高网络资源利用率,网络切片技术得到了广泛应用。切片技术是在一张物理网络上划分出多张由特定网络拓扑和网络资源组成的虚拟网络,以满足不同网络切片租户或业务的差异化连接需求及服务质量要求(见图2)。

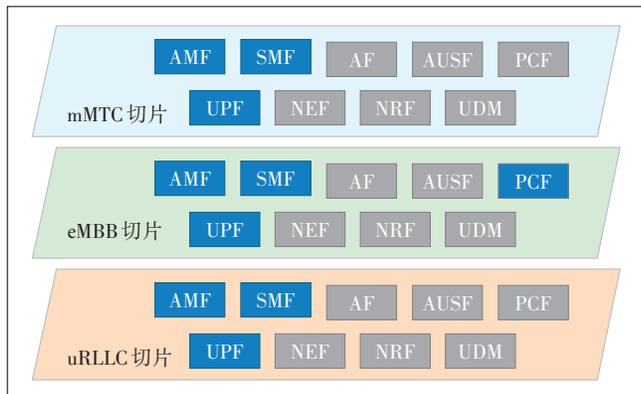


图2 5G核心网切片架构

在5G网络中,端到端的切片分为无线接入网子切片、承载网子切片和核心网子切片3个部分,其中5G核心网支持灵活的切片组网,基于微服务构建网络切片,支持切片的智能选择、切片的能力开放、切片的多层次的安全隔离等关键技术^[8]。5G切片技术支持按需分配和调整网络资源,为智慧矿山中不断变化的业务需求提供灵活的网络支持。它能够以更细粒度来管理和优化矿区的5G网络,通过共享、动态调整网络资源以满足不同业务的需求,提高网络资源利用率,降低建设和运营成本。对于需要高可靠性的业务(如远程驾驶控制指令),5G切片可以提供专用的网络资源,确保业务的连续性和稳定性,并且每个切片可实施独立的安全策略,确保关键业务数据的安全和隔离,防止潜在的网络攻击和数据泄露。5G切片技术为智慧矿山提供了一个高度可靠、灵活且可定制的网络环境,是实现智慧矿山自动化、智能化的关键技术之一。

3.3 5G LAN

5G LAN(5G Local Area Network)是3GPP在R16阶段定义的技术,5G LAN可以为用户提供L2/L3层局域网功能,包括组管理、广播/组播流量复制转发以及支持用户移动性等功能。根据不同场景的实际需求,该技术将终端进行“分组”或“建群”,构建特定的LAN网络,实现终端之间的数据传输^[9]。

3GPP根据不同的场景需求定义了3种转发方式:

基于Local Switch的转发、基于N6接口的转发和基于N19接口的转发^[10]。可根据实际业务场景有针对性地进行组网和部署,其中Local Switch转发(又称为“本地转发”),对点对点及移动性通信需求支持较好;基于N6接口的流量转发方式主要应用于大流量转发场景,支持星状网络拓扑结构,可实现多终端汇聚;基于N19接口的流量转发方式主要应用于跨域/广域互联通信场景,支持点对点网络拓扑,终端连接范围广泛,不受空间限制^[11]。

在智慧矿山场景中,由于终端种类繁多并且存在终端间的通信需求,需根据不同的业务需求,对终端设备进行分组,构建特定的网络,以实现更有效的数据通信和管理。此外,5G LAN技术支持超低时延的终端间通信,能够满足需要快速响应的矿山自动化业务需求,如无人驾驶矿车和巡检机器人的通信需求。5G LAN技术为智慧矿山提供了一个高效、灵活且响应迅速的局域网解决方案,有助于提升矿山作业的自动化、智能化水平,同时也增强了作业的安全性和可靠性。

3.4 5G RedCap

RedCap(即“轻量级5G”)是3GPP在5G R17阶段,针对速率、时延要求不高的5G应用场景,推出的一种新技术标准协议,旨在全面提升5G网络质量和覆盖率。作为移动物联网技术体系中的关键技术之一,RedCap被拓展应用于增强带宽(eMBB)、超高可靠低时延通信(uRLLC)和海量机器类通信(mMTC)等场景^[12]。通过裁剪终端能力并与5G技术协同工作,RedCap将持续为物联网领域的发展和 innovation 提供支持。

智慧矿山中存在多种类型业务终端,如传感设备、视频监控设备、穿戴设备等,它们的通信需求不同。采用定制化的模组,在满足业务需求的同时,还能降低终端设备的复杂度,从而降低成本和功耗,提高整体经济效益。通过RedCap技术,智慧矿山可以开发新的业务模式和服务,如基于数据的预测性维护和优化的作业调度。5G RedCap技术为智慧矿山提供了一种经济高效、灵活且可扩展的网络连接解决方案,有助于推动矿山的自动化、智能化和数字化转型。

3.5 5G轻量化核心网

轻量化5G核心网(Lightweight 5G Core Network)是一种针对特定应用场景或需求而设计的5G核心网解决方案。它通过减少一些功能或服务,以降低网络的复杂性、成本和功耗,同时保持5G网络的关键优势,

如高速率、低时延和高可靠性。

在矿区中,有可能会发生矿区对外链路临时中断的情况,轻量化5G核心网的主要作用为当矿区与大网控制面链路中断时,它能够替代大网控制面迅速接管业务,保证本地用户数据面业务不中断。部署架构如图3所示,一般在用户侧与UPF同局址部署。

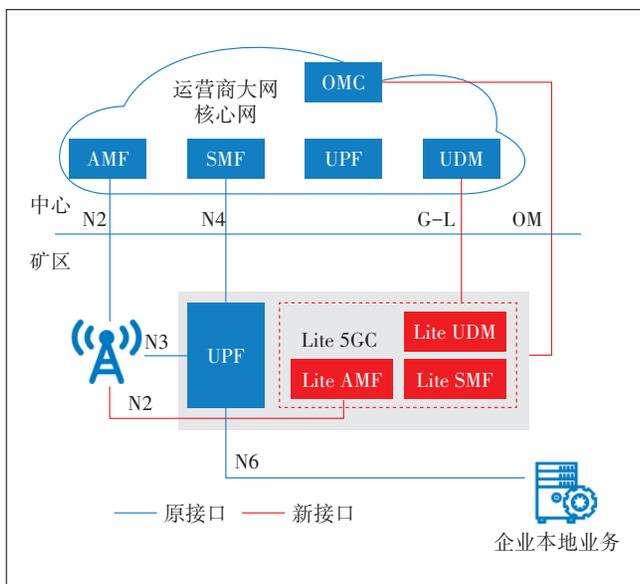


图3 轻量化应急5G核心网部署架构

在本案例中,轻量化5G核心网的主要网元包括轻量化的AMF、UDM及SMF,分别实现本地接入、移动性管理、会话管理以及用户数据管理功能。新增部署轻量化5G核心网后,相应新增N2、G-L、OM等3个接口,其中N2是Lite AMF与基站之间的接口,其功能与运营商大网相同;G-L是运营商大网核心网与Lite UDM之间的接口,用于连接轻量化的用户面功能和运营商的大网核心网用户数据管理功能(UDM),该接口的主要作用是实现用户数据的同步和管理,确保用户身份信息和会话信息在轻量化核心网和大网核心网之间保持一致性。当矿区与大网控制面链路中断时,G-L接口可以支持轻量化核心网独立运作,保证本地用户数据面业务的连续性;OM接口是用于网络管理的接口,它连接轻量化5G核心网网管和运营商大网网管,该接口的主要作用是实现网络的监控、配置、管理和优化,确保轻量化5G核心网的稳定运行和服务质量,OM接口支持运营商对轻量化核心网进行远程管理和控制,包括但不限于性能监控、故障检测、软件升级、配置更改和用户数据同步等。因此在对外链路中断发生时,轻量化5G核心网可迅速替代大网控制面,保证本地用

户数据面业务不受影响。

4 5G智慧矿山应用案例

4.1 5G智慧矿山路侧融合感知系统

矿车作业分为装载、运输和卸载3个过程。其中装载指矿车到达装载区域后由装载机或人工将物料装入矿车的车厢中;运输指装载完成后,矿车沿指定运输轨道运行至卸载区域;卸载即矿车到达卸载区域后,以翻斗、底卸、侧卸等方式将物料卸下。基于5G+MEC的车路协同路侧融合感知系统实现了装载、运输和卸载的自动化和智能化,提高了作业效率和安全性。

5G智慧矿山路侧融合感知应用场景如图4所示,在矿区部署路侧感知点、破碎站感知点1和2,其中在路侧感知点部署1个激光雷达和3个摄像头,在破碎站感知点1和2各部署1个激光雷达和1个摄像头,以满足该区域的路侧感知需求。

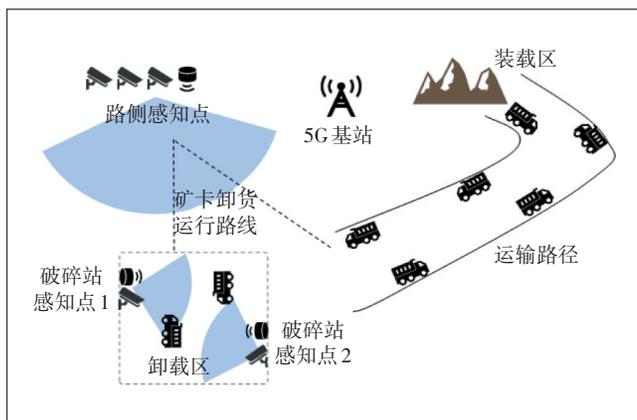


图4 智能卸料协同应用场景

如图5所示,5G智慧矿山路侧融合感知系统架构分为3部分:车侧系统、路侧系统及矿区MEC。其中路侧感知融合子系统部署位置可能会随着开采进程的推进而变化,并且无线网络不易受到环境变化的影响,因此5G作为回传网络,不仅能降低通信系统部署成本,还能提高系统的稳定性。

5G智慧矿山路侧融合感知系统子系统功能如表1所示。

基于上述5G智慧矿山路侧融合感知系统可实现的主要应用场景如表2所示。

部分应用场景在云平台上的展示结果如图6所示。图6(a)展示了精准停靠场景,当装有货物的矿卡行驶在摄像头以及激光雷达的覆盖区域内时,路侧融

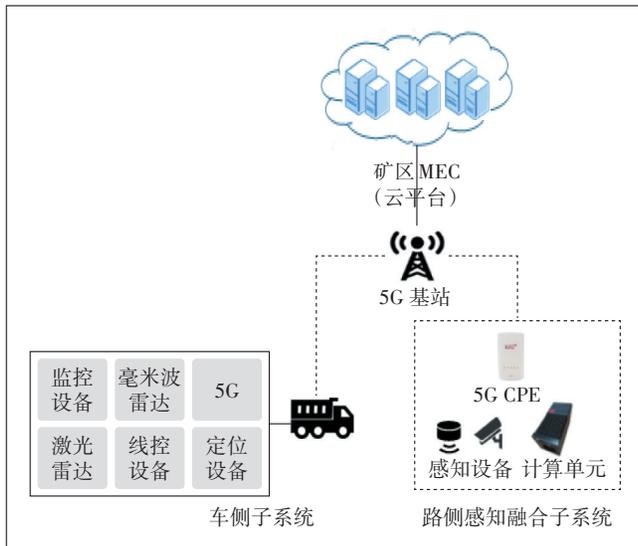


图5 智能卸料融合感知系统业务架构

表1 5G智慧矿山路侧融合感知系统子系统功能

子系统	功能	描述
车侧	5G	实现矿卡实时数据传输并支持规模化场景应用
	传感	提供高精度远距离探测和粉尘穿透
	线控	实现无人矿卡的远程控制
	定位	实现定位及自主导航
路侧感知融合	5G	实现路侧与MEC的实时通信
	传感	实现对路面情况进行实时监测
	计算	对于路侧的感知数据的前端预处理,含目标物的识别、标定和连续追踪
矿区MEC		是部署在矿区的边缘计算服务器,结合下沉UFP引导矿区5G业务至矿区MEC,部署GPU算力,实现对整个矿区的交通事件的AI分析,以及车辆调度、作业管理、生产统计、地图管理等功能

合感知系统判断当前位置为非精准停靠位置,将结果上报云平台;图6(b)展示了车辆异常状态监测场景,该矿卡停止在运输路径上,路侧融合感知系统监测到车辆长时间未动,将车辆异常状态上报云平台;图6(c)展示了行人闯入监测场景,若行人在卸货区附近徘徊,路侧融合感知系统监测到行人闯入,将结果上报云平台;图6(d)展示了堆料高度监测场景,激光雷达实时监测堆料口的剩余高度,此时堆料高度正常,将结果上报云平台。

4.2 5G远程遥控驾驶系统

在某露天煤矿矿区,部署5G专网、MEC以及远程遥控中心,从而实现矿用作业车辆在矿区中的远程遥控驾驶,系统架构如图7所示。

本文针对该远程遥控系统进行了网络性能测试,主要目的是验证在矿区独立部署的专网网络性能。

表2 5G智慧矿山路侧融合感知系统主要应用场景

场景	场景描述
精准停靠	矿卡驶入感知区域时,路侧融合感知子系统感知并识别到矿卡基本信息、行驶信息,通过5G上报云平台,云平台向矿卡发送控制指令实现预定位置的精准停靠
地面平整度监测	路侧融合感知子系统感知并识别路面异物,通过5G上报云平台,云平台向所有矿卡发送控制指令避让异物,并通知运维人员及时进行清理
车辆异常状态监测	车侧子系统或路侧融合感知子系统感知并识别车辆异常状态,通过5G向云平台上报异常车辆基本信息、行驶信息,云平台向异常车辆发送控制指令,并通知运维人工及时到场处理
行人闯入监测	路侧融合感知子系统感知并识别行人,通过5G向云平台上报行人实时信息,云平台通过多途径发送相关警告
卸货区前车辆位姿监测	矿卡驶入感知区域时,路侧融合感知子系统感知并识别到矿卡基本信息、行驶信息,并结合当前卸货区实时状态,通过5G上报云平台,云平台向矿卡下发指令能否进入卸货区
堆料高度监测	路侧融合感知子系统识别卸料口中堆料的实时准确高度,并结合相应的判断条件,将堆料口容量信息通过5G上报云平台,云平台向矿卡下发指令能否继续卸货



图6 5G智慧矿山路侧融合感知系统部署验证

需要注意的是,此次测试的是矿山专用网络,其网络指标经过定制化配置,测试结果不代表5G大网的性能。本测试网络拓扑如图8所示,考虑到多数智慧矿山业务的上下行业务流不对称,本次分别对上行路径和下行路径进行了测试,上行路径为client端→5G CPE→5G基站→交换机→server端,下行路径为server端→交换机→5G基站→5G CPE→client端,测试指标包括时延及带宽。

4.2.1 时延测试

为了准确测量单向时延,本测试环境中的client端和server端是一台服务器中的2个虚机,并采用同一个高精度时钟同步源进行授时。测试中,使用我们自研

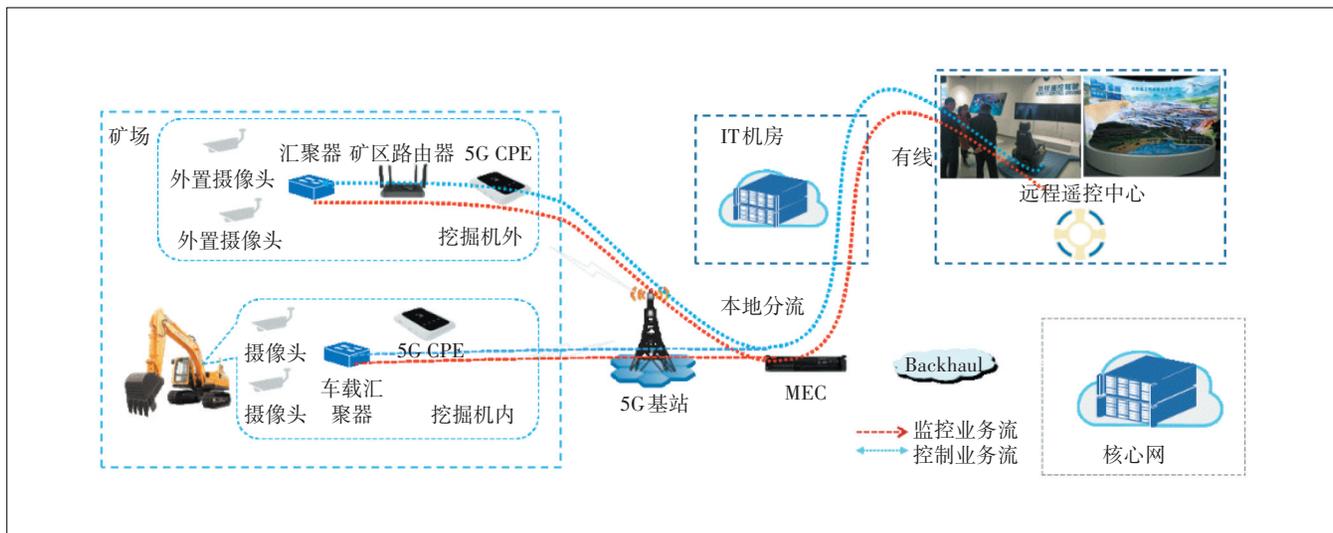


图7 远程遥控驾驶系统架构

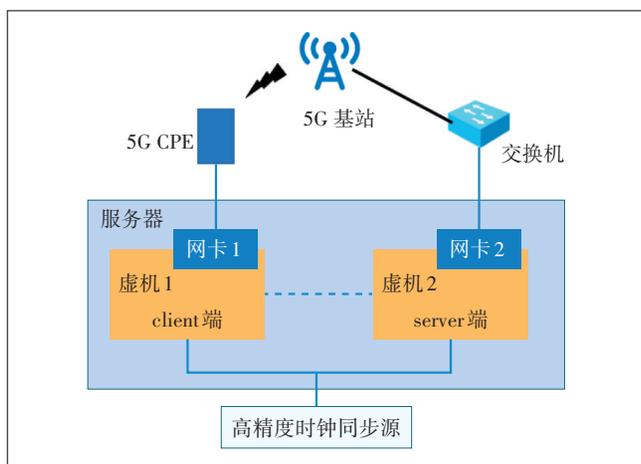


图8 5G专网测试拓扑

的测试工具,模拟视频业务流,发送UDP数据包,数据包大小为1471字节。

经过约1000次上行时延测试,所得的上行时延为10~28 ms,其中12~20 ms这一区间的测试结果约占总体结果的60%,时延平均值为17.60 ms,中位数为16.80 ms,抖动平均值为2.95 ms。上行时延分布如图9所示。

经过约1000次下行时延测试,所得的下行时延为1~32 ms,其中1~10 ms这一区间测试结果约占总体结果的60%,时延平均值为9.67 ms,中位数为7.88 ms,抖动平均值为5.05 ms。下行时延分布如图10所示。

结合上行和下行时延数据,计算得出整体往返平均时延为27.27 ms,中位数为24.68 ms。根据实践经验,当往返时延低于40 ms时,用户几乎无感知,因此

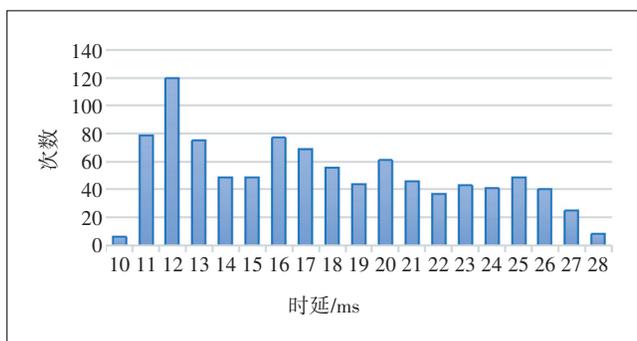


图9 上行时延分布

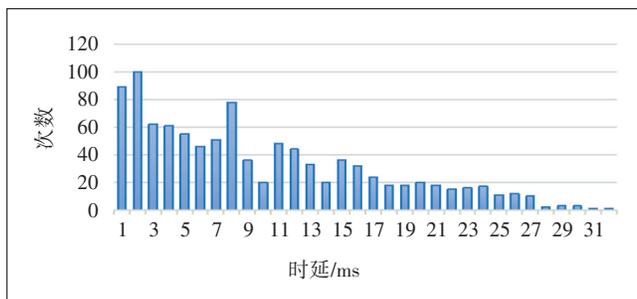


图10 下行时延分布

27.27 ms的平均往返时延不会影响远程遥控的操作。

4.2.2 带宽测试

使用iperf 3工具进行带宽测试,分别进行上、下行发送测试,每次发送1 GB数据。

上行速率随时间变化情况如图11所示,平均速率为84.59 Mbit/s。

一般情况下,上行带宽主要被智能矿用作业车辆采集的视频画面数据占用。智能矿用作业车辆一般

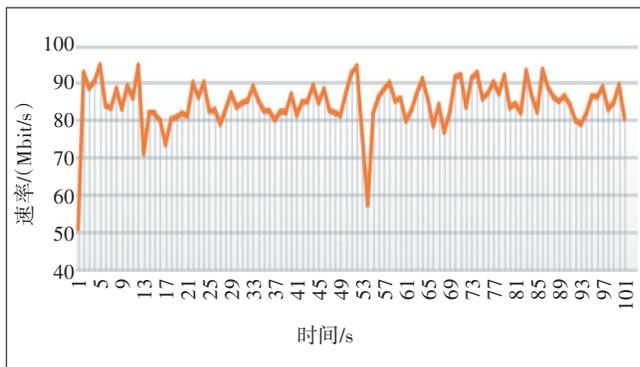


图 11 上行带宽实时速率

配备4路以上视频通道,可设置主、副视频流。为保证画质可辨识(平均帧码率不低于400 kbit/s)和视频直播相对流畅(即帧率不低于25FPS,主视频分辨率不低于1 280×720),直播画面至少占用12~18 Mbit/s带宽,考虑到不同方案中可能对车内或其他车外画面有要求,外加业务逻辑数据,整体上行带宽需求应为20 Mbit/s。结合测试结果,该网络可支持至少4辆矿卡同时进行远程遥控驾驶操作。

下行速率随时间变化情况如图12所示,平均速率为86.05 Mbit/s。



图 12 下行实时速率

一般情况下,下行链路主要用于传输远程驾驶舱下发的控制指令,指令的发送频率一般为20 Hz,且指令数据包较小,因此预估的下行带宽需求为1 Mbit/s。

实测结果表明,本5G网络的上下行时延和带宽均能够满足远程遥控驾驶的业务需求。

5 总结

5G技术以其高速率、低时延和高连接密度的特性,成功应对了矿山生产中恶劣环境带来的高风险挑战,满足了远程遥控驾驶、自动驾驶和数据采集等关

键业务需求。本文重点介绍了5G网络的关键技术,包括MEC、切片、5G LAN、RedCap以及轻量化5G核心网,为智慧矿山提供了定制化的网络解决方案,提高了矿山的智能化及自动化水平。通过实际应用案例(路侧融合感知系统和远程遥控驾驶系统),本文验证了5G技术在智慧矿山中的应用效果。这些案例充分证明,5G技术不仅能够提高矿山作业的安全性和效率,还能够降低运营成本,推动矿山行业的数字化转型。随着5G/5G-A技术的不断发展和应用,这些技术将为矿山行业的自动化和智能化提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 李敏,林志军,王德明,等.我国煤矿重特大火灾事故统计分析[J].中国安全科学学报,2023,33(1):115-121.
- [2] 应急管理部国家矿山安全监察局.“十四五”矿山安全生产规划[EB/OL].[2024-01-21].<http://www.mem.gov.cn/gk/zfxgkpt/fdzd-gknr/202208/P020220810544224394583.pdf>.
- [3] 任艳艳,王云娜,晁萌.数字时代智慧矿山建设的探索与实践[J].数字通信世界,2024(2):87-89.
- [4] 黎冠,李志伟,陈浩,等.边缘计算在智慧矿山建设中的应用分析[J].华北科技学院学报,2024,21(1):1-11.
- [5] 林晓伯,郑圣,邱佳慧,等.5G+MEC承载车联网业务传输性能测试与验证[J].现代电子技术,2024,47(3):171-178.
- [6] 武懋.平朔东露天矿用卡车无人驾驶系统应用[J].露天采矿技术,2023,38(4):61-63+69.
- [7] 徐樑,韦舒懿.基于5G多接入边缘计算的车联网应用的探讨[J].广西通信技术,2021(4):17-22.
- [8] 李昊,张坦,王妮.5G网络切片技术综述与初期部署方案研究[J].通信技术,2020,53(5):1053-1062.
- [9] 刘霞,陈礼波,王运付,等.工业物联网终端5G LAN组网方案研究[J].邮电设计技术,2024(1):83-87.
- [10] 陈婉娟,穆佳.5G LAN应用场景与关键技术分析[J].邮电设计技术,2021(9):82-86.
- [11] 王飞飞,孙颖,曹亚平.面向5G 2B业务的5G LAN解决方案分析[J].电子技术应用,2023,49(12):56-59.
- [12] 李常国,毕研涛.5G RedCap应用场景及网络技术研究[J].山东通信技术,2023,43(3):7-12.

作者简介:

陈斌,国务院特殊津贴专家,高级工程师,硕士,主要从事车联网、云计算、5G通信等技术研究工作;林晓伯,高级工程师,硕士,主要从事车联网、5G通信、IP网络等技术研究工作;邱佳慧,正高级工程师,博士,主要从事车联网、5G通信、高精度定位等技术研究工作;高沛,工程师,学士,主要从事5G网络创新产品管理、解决方案制定等工作;卢浩,工程师,硕士,主要从事车路协同、融合感知、5G通信等技术研究工作;咸金龙,工程师,学士,主要从事自动驾驶、露天矿山机电设备等技术研究工作。