

智能矿山

文章编号: 1004-4051(2024)S2-0127-06

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241670

露天矿山 5G 全连接智能采矿无线网络 设计及应用

黎一冰¹, 韩文成¹, 王仁福¹, 卿启林¹, 车长路²

(1. 攀钢集团矿业有限公司, 四川 攀枝花 617000;

2. 华为技术有限公司全球技术服务部, 广东 深圳 518000)

摘要: 随着矿山行业向无人化、少人化趋势发展, 5G 技术以其高速率、低延时、广连接的特点, 为智能采矿应用持续融合创新提供了坚实的网络基础。露天矿山地理环境复杂, 自动驾驶、远程操控等智能化应用对网络质量要求很高, 5G 专网的设计和建设面临挑战。本文以推进攀钢矿业露天矿山 5G 远程采矿技术智能化应用研究为背景, 首先, 通过对露天矿山中各类智能化应用进行详细调研分析, 并结合矿山业务需求和地理分布进行了网络建模; 其次, 结合 5G 专网特点和网络建模结果, 制定了 5G 专网设计的基本原则和流程; 最后, 提出一套露天矿山 5G 无线网络覆盖、容量的规划方案, 用于指导 5G 基站的勘测与选址, 同时对网络规划结果进行了仿真校验, 旨在确保网络规划方案可以满足矿山作业的实际需求。研究和实践证明, 基于精准规划的高标准 5G 专网, 对于露天矿山加速数智化转型, 实现高质量发展具有重要意义。

关键词: 5G 专网; 业务画像; 网络建模; 网络设计; 网络仿真

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A

Research and application of 5G fully connected intelligent mining wireless network design for open pit mines

LI Yibing¹, HAN Wencheng¹, WANG Renfu¹, QING Qilin¹, CHE Changlu²

(1. Pangang Group Mining Co., Ltd., Panzhihua 617000, China;

2. Global Technical Service Dept., Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: As the mining industry develops towards unmanned and less manned, 5G technology features high rate, low latency, and wide connectivity, providing a solid network foundation for continuous convergence and innovation of intelligent mining applications. The geographical environment of open-pit mines is complex. Intelligent applications such as self-driving and remote control have high requirements on network quality. Therefore, the design and construction of 5G private networks are facing challenges. Based on the background of promoting the intelligent application of 5G long-distance mining technology in open-pit mines of Pangang, this paper first investigates and analyzes various intelligent applications in open-pit mines in detail, and carries on network modeling according to the mine business requirements and geographical distribution. Secondly, based on the characteristics of 5G private networks and network modeling results, the basic principles and processes of 5G private network design are formulated. Finally, a set of 5G wireless network coverage and capacity planning

收稿日期: 2024-08-24 责任编辑: 刘硕

第一作者简介: 黎一冰 (1975—), 男, 汉族, 四川武胜人, 硕士, 主要从事智能矿山建设、企业管理等方面的研究工作, E-mail: 615820498@qq.com.

引用格式: 黎一冰, 韩文成, 王仁福, 等. 露天矿山 5G 全连接智能采矿无线网络设计及应用[J]. 中国矿业, 2024, 33(S2): 127-132.

LI Yibing, HAN Wencheng, WANG Renfu, et al. Research and application of 5G fully connected intelligent mining wireless network design for open pit mines[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S2): 127-132.

scheme for open-pit mines is proposed to guide the survey and site selection of 5G base stations. At the same time, the network planning results are simulated and verified to ensure that the network planning scheme can meet the actual requirements of mining operations. The research and practice have proved that the high-standard 5G private network based on precise planning is of great significance to accelerate the digital intelligence transformation of open-pit mines and achieve high-quality development.

Keywords: 5G private network; service profiling; network modeling; network design; network simulation

0 引言

党的二十大报告指出,要加快建设网络强国、数字中国。习近平总书记深刻指出,加快数字中国建设,就是要适应我国发展新的历史方位。在这一背景下,5G网络在历史的新征程上被赋予了新的使命。矿山行业作为我国经济发展的重要支柱之一,积极响应这一号召,探索无人化和少人化的运营模式,以提高生产效率和水平。

露天矿山作为矿产资源开采的重要领域,面临着环境恶劣(如高温、粉尘等)、作业复杂、人员安全风险高等挑战。传统的人工操作模式不仅效率低下,还存在着较大的安全隐患。为应对这些问题,矿山行业逐渐向数字化、智能化转型,其中5G全连接智能采矿的应用成为实现这一转型的重要技术支撑。通过构建5G全连接无线网络,能够实现矿山设备的实时监控与远程操控。这不仅可以提升矿山的生产效率,还显著降低了工人的劳动强度和安全风险。尤其在解决露天矿采面工作装备远程操控及无人驾驶中的高清视频大带宽上行、控制指令低时延高可靠性方面,5G技术的应用是刚需,亦是实现露天矿采面作业降本增效和本质安全的必然选择。当前,国家进一步提出发展新质生产力的要求,矿山企业需要不断创新和优化生产管理模式,以适应市场竞争和可持续发展的需求。5G全连接智能采矿无线网络的设计与应用,不仅是矿山无人化、少人化发展的必然趋势,也是推动矿山行业迈向高效、安全、绿色发展的关键路径,对于提升矿山生产效率和实现本质安全具有重要的现实意义^[1-4]。

1 露天矿采矿业务画像和建模

1.1 5G全连接智能采矿业务画像

5G全连接智能采矿项目包含矿卡自动驾驶、电铲远程控制、电钻远程自动作业、无人机数字化测量、设备预测性维护等多种应用场景。在凹陷露天矿的作业区内,设备种类多、数量大、分布密集,各类设备对5G网络的带宽、时延和可靠性要求都很高。业务画像是OT业务到ICT网络需求转换桥梁,通过对各类智能装备进行详细地调研和行业画像,掌握设备对网络传输的准确需求,为5G专网网络集成的详细规划设计提供有效输入,以使5G网络设计和建设满足全连接采矿的需求^[5-6]。

针对远程操控及自动驾驶业务场景需求,调研业务对5G专网网络的要求^[7-8],主要分为以下几部分内容。

1)掌握矿山智能化转型规划,输出行业画像时适当超前,满足当前业务及后续拓展需求。

2)掌握矿山其他场景需求可能对网络的需求。

3)综合考虑矿山智能化整体规划及分阶段实际场景需求,实地考察改造设备,了解设备数量、数据采集方式、设备分布及网络和计算存储资源的要求,明确业务场景及数量、业务场景分布,以及业务隔离、可靠性要求等。

露天矿山5G远程采矿业务画像基于3D高精度地图描述5G智能化设备数量,以及空间地理分布、铲装作业面面积、矿卡运输线路等,如图1所示。



图1 露天矿山5G远程采矿业务画像

Fig. 1 5G remote mining service profiling of open-pit mines

1.2 5G全连接智能采矿网络建模

在完成业务画像后,基于业务画像掌握的需求和数据,对网络需求进行建模,使网络需求模型化,以更好地支撑网络规划和设计。网络建模包括部件模型建模、设备模型建模、业务模型建模、网络模型建模四个部分。

1)部件模型建模。不同场景、各类设备产生的业务数据和依赖的网络要求存在差异,需要具备对更细粒度的设备如各类传感器、PLC(可编程逻辑控制器)及摄像头等进行业务分析并分解出数据传输对5G网络的KPI(关键性能指标)能力要求。

2)设备模型建模。在业务需求调研和原子模型设计完成后,需要对调研的设备进行建模分析,使用设备建模的工具,快速定义一款接入设备所具备的属性(如颜色、大小、采集的数据、可识别的指令或

者设备上报的事件等信息), 并标识一款设备所属的厂家、设备类型和设备型号等信息, 从而将物理空间中的设备实体数字化, 并在中心端构建该实体的数据模型, 用于描述该实体的功能。不同厂家设备通过遵循并建立统一的设备模型, 从而屏蔽 IT、网络、协议的需求表述差异化, 简化设备对接难度, 提升管理效率。

3) 业务模型建模。业务模型主要基于业务特点, 进行该业务的模型建模, 以描述该业务所需要的网络服务能力和边缘数据中心资源服务能力。借助原子模型和设备模型, 在特定业务场景下, 结合业务工作空间、边缘业务应用系统等相关维度参数, 在业务层面进行模型建模, 用于定量描述实现该业务所需的网络能力参数和边缘数据中心资源能力参数, 以指导网络模型建模和边缘数据中心资源规划建设。

4) 网络模型建模。完成业务场景的业务建模和设备建模后, 业务模型包括该场景的业务描述、业务活动范围、应用工作特性、空间时间分布等, 设备模型包括设备的活动覆盖、对网络的 SLA(服务水平承诺) 诉求、设备的功能特性等, 下一步将对此场景进行网络建模。网络场景建模主要基于部件模型、设备模型等输入, 根据场景和实际业务需求, 绑定场景特定参数、组合场景下各类部件模型和设备模型, 进行场景模型建模, 输出基于场景的整体网络 SLA 需求, 以指导后续的网络模型建模。网络建模包括网络 SLA、网络容量、覆盖和网络资源。通过分析部件数据包的网络特征(如发包频次、传输周期、数据包大小、工业控制协议等), 分析出部件的网络需求。

1.3 网络建模示例

以电铲为例, 对智能化的部件和设备进行网络

建模, 梳理各业务数据流的 5G 网络模型(图 2)。以电铲为例, 计算网络容量需求: 用于电铲远控的主画面摄像头一般配置为前视(左前、正前、右前)主码流 1 440 P(码率 4 Mbps)、辅码流 480 P(码率 1 Mbps), 其他位置的监控视频配置为主码流 1 080 P(码率 2 Mbps)、辅码流 480 P(码率 1 Mbps)。这些视频编码数据中的 I 帧, 即视频压缩技术中的一种关键帧, 占用传输带宽最大, 计算多路视频业务带宽需求时, 要考虑其中某几路视频峰值带宽(I 帧带宽)碰撞的概率, 即多路视频的 I 帧在同一时刻并发传输的概率, 这种碰撞概率计算公式见式(1)。

$$P \leq C_{CamN}^{ColK} * (\frac{IFD}{IFI})^{K-1} * (1 - \frac{IFD}{IFI})^{N-K} \quad (1)$$

式中: ColK 为 I 帧碰撞个数 K; CamN 为摄像头个数 N; IFI 为 I Frame Interval, 代表 I 帧间隔; IFD 为 I Frame Duration, 代表 I 帧持续时长。

基于实际视频流抓包分析计算, 清晰度 2 560×1 440、码率 4 Mbps、帧率 25、I 帧间隔 50、编码协议 H265 时, I 帧带宽需求约为 11.48 Mbps; 同理 1 080 P 的 I 帧带宽约为 8.93 Mbps, 480 P 的 I 帧带宽为 4.14 Mbps。

电铲配置 11 路视频(11 个摄像头)时, 2 路视频碰撞的概率约为 89.87%, 3 路视频碰撞的概率约为 25.81%, 4 路视频碰撞的概率约为 2.77%, 5 个摄像头碰撞的概率约为 0.23%。因此, 为保证在 >99% 的情况下, 传输带宽可以满足 I 帧碰撞需求, 多路视频传输带宽需求=I 帧带宽×碰撞路数+码率×剩余路数=(11.48×3+8.93+2×7)=57.37 Mbps。综合理论计算和现场验证的结果, 如果电铲视频传输带宽能达到 58 Mbps 以上, 视频主观体验是可以满足业务需求的。

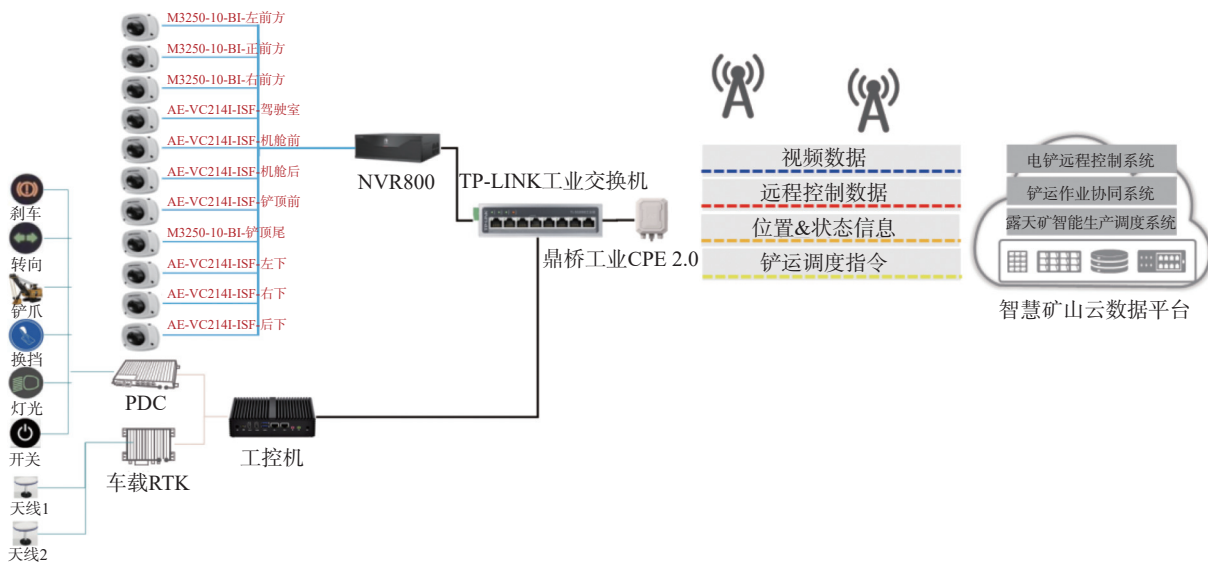


图 2 电铲远程操控应用网络拓扑

Fig. 2 Network topology of remote-control application of electric shovel

基于上述方法可计算得出 5G 全连接采矿场景各种设备的网络 SLA 需求, 见表 1。

表 1 矿山终端网络需求

Table 1 Requirements of mining terminal network

5G 应用	业务类型	网络时延/ms	UL 带宽 (Mbps)/ 单台设备
钻机远程自主作业	视频回传	NA	49
	远程控制	40	1
电铲远程操控	视频回传	NA	60~70
	远程控制	40	1
矿卡自动驾驶	视频回传	NA	37
	远程控制	40	1

注: NA 表示无效值。

2 露天矿山 5G 无线网络设计

2.1 5G 专网设计原则

1) 基于网络需求的设计: 5G 远程采矿涉及矿上核心生产业务, 矿山 5G 专网需要保障到矿山智能化设备的每一个连接, 因此规划时需要基于实际设备的网络需求(上行带宽、时延、可靠性等)作为输入。需要通过业务画像, 对设备进行业务建模, 并将设备的网络需求, 转换为具体的网络 SLA 需求。

2) 场景化的网络设计: 矿山专网的设计, 需要细化到每一个具体的场景, 对应划分不同的区域, 比如采矿区, 检修区, 停车区、运输道路等, 由于不同的区域设备类型、数量、活动范围都不一样, 因此对网络的需求也是差异化的。

3) 基于业务发展的网络设计: 由于矿山生产是持续进行的, 而站点规划在一定程度上是固定的, 因此在设计时, 需要具有业务前瞻性, 充分考虑长期生产计划的趋势, 预估一定的提前量。

2.2 5G 专网设计流程

通常情况下, 矿山 5G 专网设计分为几个步骤。

1) 网络需求分析: 通过业务画像建模, 将业务诉求转换为网络诉求, 具体请参考上文第 1 部分。

2) 网络覆盖规划: 基于画像建模得到的网络 SLA 需求, 得到网络的边缘诉求要求, 基于边缘诉求, 通过链路预算来确定基站站间距, 从而得到基于覆盖的站点数量。

3) 网络容量规划: 针对矿山智能化设备的活动范围, 基于业务对矿区进行场景化的划分, 并通过区域内设备的最大并发数据, 考虑当前无线网络设备的容量能力, 计算需求的站点数目, 并与基于覆盖的站点数目对比, 取大值。

4) 站址规划与勘测: 矿山作业区域场景复杂, 需要充分考虑地质、震动、引电、传输、未来生产计划等因素, 勘测可建站址, 作为预选规划站址。

5) 仿真: 通过专业工具, 对候选站址进行仿真,

考虑信号覆盖情况以及上行带宽情况, 判断是否能达到作业要求, 并给出最终设计方案。

2.3 5G 专网覆盖规划

为了满足业务 SLA 要求实现 5G 应用基站精准规划, 按照矿区作业流和矿卡运输路线道路覆盖的连续性, 分场景进行覆盖规划。例如朱兰铁矿露天采区, 将矿区覆盖划分为矿卡运输路线和采矿作业面两个场景进行链路预算。

根据业务画像的结果, 单矿卡的上行带宽需求为 38 Mbps, 电铲上行带宽约 70 Mbps。针对矿卡路线, 按路线上行边缘速率满足 40 Mbps 为目标, 进行覆盖估算, 站间距约为 480 m。采矿作业面则按照上行边缘速率 70 Mbps 为目标, 进行覆盖估算, 站间距约为 370 m。基于站间距的计算, 结合实际业务活动范围, 得到区域内大致的建站数目。

2.4 5G 专网容量规划

网络容量规划, 需要细分具体的业务活动场景, 基于场景内各设备的活动范围、设备网络需求以及并发数量, 场景化的对容量进行计算, 得到容量策略。在朱兰铁矿露天采场, 需要将矿区划分为八个场景: 采掘区、矿卡停车区、矿石破碎站、岩石破碎站、1290 仓、桉树林、边帮, 以及矿卡从采面到矿石破碎站、岩石破碎站、1290 仓及桉树林的作业路线。各场景单扇区预估最大上行并发带宽需求计算见表 2。

由表 2 可知, 基于各场景单扇区下的容量需求, 仅 2.6 G 站点(单小区 200 Mbps 上行容量)无法满足业务需要, 为满足矿区实际生产业务需求, 建议容量策略: ① 电铲和牙轮钻对时延更敏感, 承载在容量更大的 4.9 G 小区(7:3 时隙配比, 小区上行带宽为 300 Mbps)。② 矿卡承载在 2.6 G 网络, 由于在矿石破碎站等区域上行速率需求超过 200 MHz, 建议使用 2.6 G 余下 60 M 带宽, 对 2.6 G 进行分层, 保证矿卡网络容量需求。基于上述策略, 最终的容量方案采用业务分层模式: 2.6 G(100 M+60 M 带宽)承载矿卡智能化应用、4.9 G(100 MHz 带宽)承载电铲和牙轮钻智能化应用。频段策略为: ① F1: 2.6 G 100 MHz 带宽: 6 辆矿卡; ② F2: 2.6 G 60 MHz 带宽: 4 辆矿卡; ③ F3: 4.9 G 100 MHz 带宽: 6 台电铲+6 台牙轮钻。

2.5 5G 专网站址选择与勘测

矿山生产场景非常复杂, 矿山 5G 专网基站站址选择分为如下几个步骤。

1) 基于矿山高精地图进行站址预设计: 通过无人机航拍图片, 生成高精度实景地图, 结合画像建模得到的业务区域和范围, 覆盖以及容量规划得到的策略和站点数目, 基于高精度地图, 给出候选站址。

2) 站址预勘测: 考虑高精度地图与现实环境的

表 2 带宽需求计算

Table 2 Calculation of bandwidth requirement

设计区域	矿卡数量(6个IPC)	电铲数量(15个IPC)	钻机数量(13个IPC)	固定视频监控路数	上行带宽/Mbps	单扇区最大设备数	最大并发速率/Mbps
采掘区	10	6	6	0	1094	4车2铲2钻	392
矿卡停车区	10	0	0	0	380	6车	228
矿卡线路	10	0	0	0	380	6车	228
矿破区域	10	0	0	2	390	6车	238
岩破区域	10	0	0	3	395	6车	243
1290仓	10	0	0	0	380	4车	152
桉树林	10	0	0	0	380	4车	152
边帮	0	6	6	0	714	1铲1钻	120

差异, 基于预规划的站址, 深入露天矿现场进行站址的预勘测, 筛选掉不合理的候选站址。

3) 联合上站勘测: 基于预勘测得到的站址, 联合设备厂商、运营商设计院、运营商土建施工、矿方生产计划、电工、地质等专业部门, 进行联合上站勘测, 得到满足建站条件的候选站点列表, 作为仿真的输入。站址勘测需要充分考虑地质环境、爆破震动、电力引入、传输光纤敷设路径以及后续扩容调整等因素。

2.6 5G 专网网络覆盖及上行吞吐率仿真

矿区建网的目的是要保障每一个生产应用(无人矿卡、电铲、钻机等)的 SLA 要求, 前端的规划设计直接决定了 SLA 能否满足要求。矿区地形结构复杂, 生产应用可以在不同的地方作业, 因此, 规划结

果是否合理, 是否满足要求需要依靠专业的仿真工具来进行模拟验证。同时, 矿区作业时, 是多个应用同时进行工作, 需要模拟多应用之间的干扰, 以及对网络能力的要求, 因此多个应用并发作业的仿真模拟是非常重要的工作。

精准仿真是网络规划中最常用的评估网络覆盖的方法。通过计算链路损耗、干扰, 基于栅格分析小区覆盖率、电平值、信噪比、峰值吞吐率等各项指标, 从而评价现有组网规划方案是否满足要求。

基于高精度 3D 仿真地图, 以及 3D 射线追踪传播模型, 通过网络仿真工具, 可以精确地对多应用并发作业的网络能力进行精确的评估。传播模型体现了在某种特定环境或传播路径下无线电波的传播损耗情况。传播模型的使用, 直接影响无线网络规划中覆盖、容量等指标的仿真和预测结果, 因而对规划结果的准确性有重要影响。传播模型与无线场景有很大的联系, 不同的无线环境下传播模型有很大的差异。在无线网络规划中需要根据环境的差异对原始传播模型进行校正, 以获得适合本地区无线环境的传播模型。事实上, 射线追踪传播模型的计算比较复杂, 不是一个固定公式。主要由确定项和经验项组成, 其中确定项是直射径、反射径、衍射径、透射径的能量合并, 经验项是基站高度项、天线增益修正项、植被损耗等, 仿真迭代过程中应根据实际测试结果对经验项进行验证。

朱兰铁矿露天采区 5G 基站规划仿真结果效果良好。RSRP(参考信号接收功率)RSRP 大于 -80 dB 的比例接近 100%, 5G 网络覆盖良好。上行吞吐率: 矿卡路线边缘速率可到 40 Mbps 以上, 采面边缘速率基本可达 70 Mbps 以上, 满足业务需要(图 3 和图 4)。

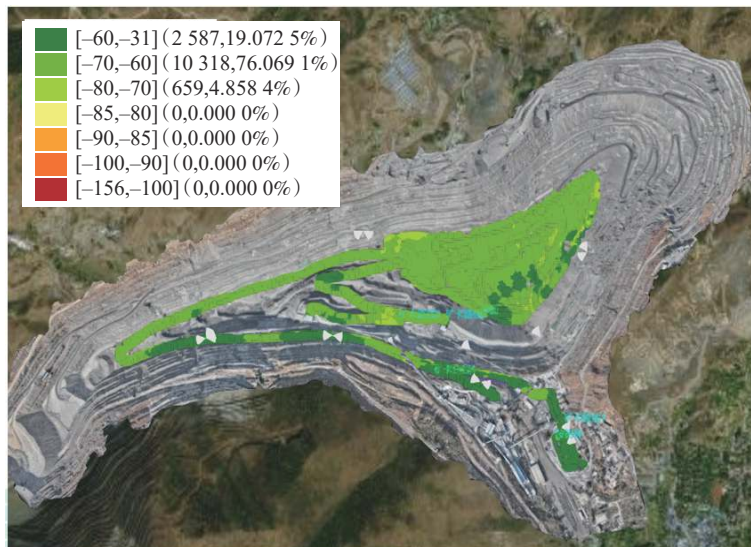


图 3 朱兰铁矿露天采区 3D 覆盖仿真结果

Fig. 3 3D coverage simulation results of open-pit mining area of Zhulan Iron Mine

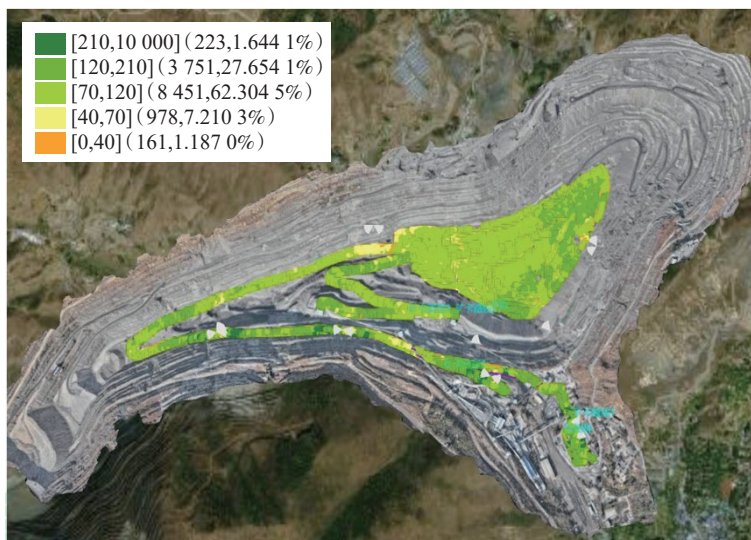


图4 朱兰铁矿露天采区3D上行速率仿真结果

Fig. 4 3D uplink speed simulation results of open-pit mining area of Zhulan Iron Mine

3 结语

5G技术在智能矿山建设中发挥着关键作用,对露天矿山5G全连接智能采矿无线网络进行深入研究是非常必要的。本文在详细的业务画像建模和5G专网设计原则的基础上,提出了一套科学合理的5G网络覆盖和容量规划方案,以满足矿山智能化应用对大带宽、稳定低时延和高可靠性的网络需求。以5G为代表的新一代信息化技术在露天矿山成功应用,不仅有助于提高生产效率,降低安全风险,还推动了矿山行业向高效、安全、绿色发展的方向迈进。未来,随着5G技术和智能化生产装备的不断创新和升级,矿山产业的数智化转型将迈上一个新的台阶,并为我国采矿业的可持续发展做出贡献。

参考文献(References):

- [1] 廖露华. 5G专网在露天矿远程采运中的研究与应用[J]. 移动通信, 2023, 47(8): 92-96.
LIAO Luhua. Research and application of 5G private network in remote mining and transportation of open-pit mines[J]. Mobile Communications, 2023, 47(8): 92-96.
- [2] 高曦, 张炜, 赵相宽, 等. 数字化转型背景下典型新兴前沿技术在矿业行业中的应用[J]. 中国矿业, 2022, 31(10): 23-29.
GAO Xi, ZHANG Wei, ZHANG Xiangkuan, et al. Application of typical emerging frontier technologies in mining industry under the background of digital transformation[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(10): 23-29.
- [3] 吴智广, 栾桂勇, 陈学辉. 基于5G技术的井下铲运机远程控制设计与应用[J]. 现代矿业, 2020, 36(6): 147-148, 212.
WU Guangzhi, LUAN Guiyong, CHEN Xuehui. Design and application of remote control of underground scraper based on 5G technology[J]. Modern Mining, 2020, 36(6): 147-148, 212.
- [4] 王立文, 唐雄燕, 黄蓉, 等. 面向工业应用的5G增强技术[J]. 邮电设计技术, 2022(3): 7.
WANG Liwen, TANG Xiongyan, HUANG Rong, et al. 5G enhancement technology for industrial application[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2022(3): 7.
- [5] 赵慧杰, 张学智, 谢东. 基于5G的水泥行业数字矿山应用场景及网络建设难点[J]. 电信科学, 2021(7): 142-147.
ZHAO Huijie, ZHANG Xuezhi, XIE Dong. Application scenarios and difficulties in network construction of digital mines in cement industry based on 5G[J]. Telecommunications Science, 2021(7): 142-147.
- [6] 王忠鑫, 辛风阳, 陈洪亮, 等. 我国露天矿智能运输技术现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2022, 48(6): 16-18.
WANG Zhongxin, XIN Fengyang, CHEN Hongliang, et al. Current status and development trend of intelligent transportation technology in China's open-pit mines[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(6): 16-18.
- [7] 肖伟. 金属矿山智能化与5G专网[J]. 数字通信世界, 2021(10): 36-39.
XIAO Wei. Metal mine intelligence and 5G network[J]. Digital Communication World, 2021(10): 36-39.
- [8] 刘昕, 付元, 李晨鑫. 5G特性在智慧矿山中的应用研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(10): 136-141.
LIU Xin, FU Yuan, LI Chenxin. Research on the application of 5G characteristics in intelligent mine[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(10): 136-141.