

文章编号:1671-251X(2024)S2-0105-06

面向露天矿的 5G 基站超级上行控制链路设计

额尔德木吐

(国能准能集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

摘要:传统 5G 网络在兼容性和私有化限制方面存在不足,且信号覆盖范围及传输速率难以满足露天矿需求。针对该问题,提出了一种 5G 基站超级上行控制链路设计方法。引入开放式无线接入网(O-RAN)架构,并结合可重构智能表面(RIS)和非正交多址接入(NOMA)技术,设计了一种适用于露天矿的上行链路控制系统。实验结果表明:在无信号干扰时,该系统的信号覆盖率达到 100%,优于开放式无线接入系统和非正交多址系统;有信号干扰时,该系统的信号覆盖率仍保持在 80%以上。

关键词:露天矿; 5G 基站; 控制链路; 开放式无线接入网; 可重构智能表面技术; 非正交多址接入技术
中图分类号:TD655.3 文献标志码:A

Design of 5G base station super uplink control link for open-pit mines

Erdemutu

(CHN Energy Zhunneng Group Co., Ltd., Erdos 010300, China)

0 引言

露天矿作为能源生产的重要场所,其安全管理尤为关键^[1]。然而,露天矿的特殊工作环境给通信系统的建设和维护带来了巨大的挑战。露天矿通常位于偏远地区,地理环境复杂,地形起伏较大。矿山内部存在大量的机械设备和运输车辆,这些设备不仅会产生强烈的电磁干扰,还可能遮挡信号传输路径,导致信号衰减严重^[2-3]。虽然 5G 网络在传输速率和延迟方面具有显著优势,但在露天矿这样的特殊环境中,仍存在一些局限性。首先,5G 网络的私有化程度较高,不同运营商之间的网络兼容性较差,难以实现跨网络的无缝连接^[4]。其次,5G 基站的覆盖范围有限,尤其是在地形复杂、障碍物较多的露天矿中,信号覆盖范围和传输质量难以保证。因此,设计一种高效的通信系统,提高露天矿的信号覆盖范围和传输速率,成为亟待解决的问题^[5]。

针对这些问题,国内外学者做出了许多研究。R. Harini 等^[6]针对 5G 蜂窝网络中能量消耗过高的问题,提出了一种基于反馈重试队列的基站休眠策略,以减少平均功耗并节约电力,结果显示,采用粒子群优化、人工蜂群算法和遗传算法等多种优化方法,可以有效降低系统能耗,达到最优成本。M. I. Christopoulou 等^[7]针对希腊 5G 新电台(New

Radio, NR)在 3 400~3 800 MHz 频段启动后对公众电磁暴露水平的影响问题,对 117 个已配备 5G NR 天线的基站进行了实地宽带和频率选择性测量,结果显示,大多数测量在城市环境中进行,电场强度水平均符合公众暴露参考标准。杨瑞科等^[8]针对 5G 毫米波通信在降雨环境下的全天候应用需求,提出了基于韦布尔分布的雨衰减概率密度函数模型,结果显示,该模型能有效预测毫米波通信链路的信道衰减状态,对电信运营商链路设计具有实际价值。李晓亮等^[9]针对中国环月飞行器与地面站间高速激光通信的问题,提出了环月-地面激光通信链路运动特性模型并进行仿真分析的方法,结果显示,喀什站的月地直接和中继信息传输链路更有利于月地激光通信链路的构建。刘畅等^[10]针对总线数据传输网络宽频带通信链路的问题,提出了基于高速光纤通信接口的总线网络链路设计方法,结果显示,该设计能有效提升总线网络的传输速率,增强网络的可靠性,并实现数据的快速传输及回传至上位机进行分析。晏鹏鹏等^[11]针对飞控计算机性能不足和可拓展性差的问题,提出了基于处理器与现场可编程门阵列结合的架构的软硬件协同工作框架,以工业控制总线作为通信总线的方法,结果显示,设计的飞控数据链路能有效提升数据传输效率。王杰等^[12]针对核电厂周围因为辐射问题必须时刻进行

收稿日期:2024-11-06;责任编辑:胡娟。

作者简介:额尔德木吐(1972—),男,蒙古族,内蒙古兴安盟科右中旗人,高级工程师,研究方向为通信工程,E-mail:510361987@qq.com。

监控的通信问题,提出了一种以多条链路进行控制的通信辐射的监测系统,结果显示,该系统能有效实现环境辐射监测数据的采集和发布,确保数据传输的稳定性和准确性。

学者们在 5G 通信系统研究领域取得了显著成果,但实际部署过程中可能面临更多不可预测的问题。基站休眠策略和初始参数选择方法在仿真环境下表现出色,但未充分考虑实际环境因素。此外,尽管天线小型化技术有效,但其对信号传输质量和网络性能的综合影响尚未得到详尽探讨,且未充分评估动态变化对系统性能的影响。目前的研究多聚焦于单一性能指标的优化,而忽视了基站与链路布局设计问题,缺乏对信号覆盖及链路优化的深入研究。因此,本文提出了一种基于 5G 基站的超级上行控制链路设计方法,创新性地引入开放式无线接入网(Open Radio Access Network, O-RAN)架构,并结合可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)与非正交多址接入(Non-orthogonal Multiple Access, NOMA)技术,设计了一种适用于露天矿的上行链路控制系统。该系统旨在解决露天矿通信系统中信号覆盖不足、传输速率低下以及抗干扰能力弱等问题,为露天矿的智能化管理与安全生产提供技术支撑。

1 基于 5G 基站的露天矿的上行链路设计

1.1 露天矿上行链路的信号控制系统

露天矿开采过程中的 5G 控制系统如图 1 所示。构建了基于工业互联网架构的云平台,该平台专门针对煤矿环保、安全、节能等特定场景的工业物联网协同控制需求^[13],旨在推动煤矿产业管理向智能化、协同化和数字化方向发展。控制系统的基础层级为场景感知层,该层主要依赖于多种类型的传感器来传递信息。场景感知层收集的信息传递至 5G 信号网络。各个 5G 基站将收集到的数据进行整合并传输至云平台,利用云平台强大的数据处理能力实现物联网数据管理^[14]。最终,经过处理的数据被传输至顶层应用,用于对矿山的整体情况进行评估和调整。

目前在 5G 网络架构中,受到私有化的限制,网络的兼容性较低,引入 O-RAN 架构对 5G 网络架构进行优化,优化后的体系架构如图 2 所示。O-RAN 分布式单元主要是用于无线链路控制、媒体模块接入及基带调度、处理和物理层管理。O-RAN 的中央单元主要是用来对数据聚合层进行协议分析,智能控制器用来收集网络信息并对一些必要的任务进行优化处理^[15]。

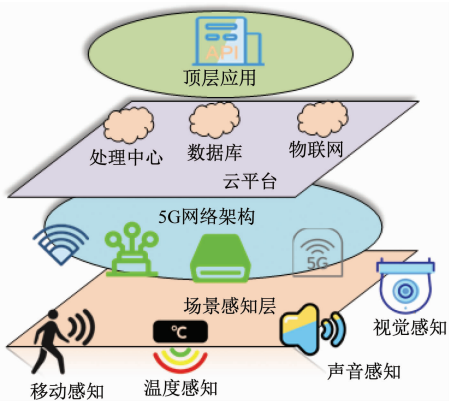


图 1 露天矿开采过程中的 5G 控制系统

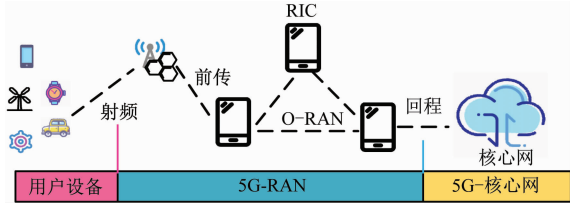


图 2 5G O-RAN 架构

开放式无线接入网中,如果上行链路中空间基站的位置太高,需要考虑地球的曲率对通信距离产生的干扰,地面终端与上行链路中基站之间的距离为

$$d = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \alpha + d_0^2} + \sqrt{2h_0 R_E} - R_E \sin \alpha \quad (1)$$

式中: R_E 为地球的半径,一般取值 6 371 km; α 为终端的仰角; d_0 为上行链路的空中基站距离地面的距离。

5G O-RAN 架构中基站终端通信链路如图 3 所示。该链路被划分为上行链路和下行链路 2 个部分。上行链路主要负责将信号从地面终端发送至空中基站,信号经过功率放大器处理后,通过地面天线作为传输媒介向空中发射。在上行链路中,空中基站负责接收来自地面的信号^[16]。上行链路需进行链路训练,训练过程中,通过下行链路收集的矿山导频信号来获取信道状态信息(Channel State Information, CSI)。在训练的初始阶段,所有传感器同步向基站发送导频信号,基站接收到的导频信号为

$$\mathbf{Y}_j = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sqrt{\rho_{lk}^0 h_{jkl}} \mathbf{z}_{lk}^T + N_j \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Y}_j$ 为第 j 个基站接收到的信号; L 为基站距离地面的距离; l 为特定的矿山区域; K 为基站系数; k 为矿山传感器的步长; ρ 为传输功率; h_{jkl} 为滤波器系数; $\mathbf{z}_{lk}$ 为信号向量; N_j 为高斯白噪声。

在矿山的信号实际传输过程中,信号不会没有阻碍地经过上行链路传输到指定的云终端,因此,使用最小二乘(Least Squares, LS)信道估计方法。信道求解方式为

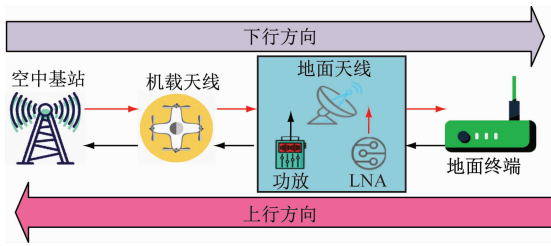


图 3 5G O-RAN 架构中基站终端通信链路

$$\mathbf{h}_{jjk}^{\text{LS}} = \arg \min \|\mathbf{Y}_j - \mathbf{h}_{jkl} \mathbf{z}_{lk}^{\text{T}}\|^2 \quad (3)$$

式中 $\mathbf{h}_{jjk}^{\text{LS}}$ 为 LS 优化问题的解。

对信道的估计误差进行定义：

$$\epsilon = \|\mathbf{Y}_j - \mathbf{h}_{jkl} \mathbf{z}_{lk}^{\text{T}}\|^2 = (\mathbf{Y}_j - \mathbf{h}_{jkl} \mathbf{z}_{lk}^{\text{T}})(\mathbf{Y}_j - \mathbf{h}_{jkl} \mathbf{z}_{lk}^{\text{T}})^{\text{H}} = \mathbf{Y}_j^{\text{H}} \mathbf{Y}_j - \mathbf{z}_{lk}^{\text{H}} \mathbf{h}_{jkl}^{\text{H}} \mathbf{Y}_j - \mathbf{Y}_j^{\text{H}} \mathbf{h}_{jkl} \mathbf{z}_{lk}^{\text{T}} + \mathbf{z}_{lk}^{\text{H}} \mathbf{h}_{jkl}^{\text{H}} \mathbf{h}_{jkl} \mathbf{z}_{lk}^{\text{T}} \quad (4)$$

式中 ϵ 为估计误差,其矢量运算可表示为

$$\begin{cases} (\mathbf{a} + \mathbf{b})^{\text{H}} = \mathbf{a}^{\text{H}} + \mathbf{b}^{\text{H}} \\ (\mathbf{a}\mathbf{b})^{\text{H}} = \mathbf{b}^{\text{H}}\mathbf{a}^{\text{H}} \\ (\mathbf{a}^{\text{T}})^{\text{H}} = \mathbf{a}^* \end{cases} \quad (5)$$

要得到信道估计的最小值,可以使 $\frac{\partial \epsilon}{\partial \mathbf{h}_{jjk}^{\text{H}}} = 0$, 得

到 $\mathbf{Y}_j \mathbf{z}_{lk}^* - \mathbf{h}_{jkl} \mathbf{z}_{lk}^{\text{T}} \mathbf{z}_{lk}^* = 0$, 则矿山布置的传感器与上行链路基站之间的估计值为

$$\mathbf{h}_{jjk}^{\text{LS}} = \mathbf{Y}_j \mathbf{z}_{lk}^* (\mathbf{z}_{lk}^{\text{T}} \mathbf{z}_{lk}^*)^{-1} \quad (6)$$

LS 信号估计方法复杂度较低,所以应用较为广泛。在矿山链路设计中,使用同样的原理对链路进行估计:

$$\mathbf{h}_{jjk}^{\text{LS}} = \frac{1}{\sqrt{p_{jk}^p}} \mathbf{Y}_j \mathbf{z}_{jk} \quad (7)$$

将式(2)代入式(7)中,可得

$$\mathbf{h}_{jjk}^{\text{LS}} = \mathbf{h}_{jjk} + \sum_{l \neq j}^L \frac{\sqrt{p_{lk}^p}}{\sqrt{p_{jk}^p}} \mathbf{h}_{jlk} + \frac{1}{\sqrt{p_{jk}^p}} N_j \mathbf{z}_{jk} \quad (8)$$

通过最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 对矿山上行链路进行信道估计:

$$\mathbf{h}_{jjk}^{\text{MMSE}} = \frac{p_{jk}^p \beta_{jjk}}{\sum_{l=1}^L p_{lk}^p \beta_{jlk} + 1} \mathbf{h}_{jjk}^{\text{LS}} \quad (9)$$

式中 β_{jjk} 为功率加权系数。

在矿山环境中,因为天线数量较多,信道估计实际执行过程比较困难,但是相较于 LS 信道估计方法,MMSE 方法更加适用于矿山上行链路信道估计。

1.2 露天矿上行链路接入系统优化

在矿山 5G 控制系统上行链路中引入 O-RAN,可以增强网络的兼容性,并在一定程度上缓解网络私有化程度过高的问题。但是信号传输因为矿山环境受到限制,为了扩大上行链路中的信号覆盖范围及信号传输速率。在上行链路中加入 RIS,设计了一种基于 RIS 的 NOMA 系统,如图 4 所示。

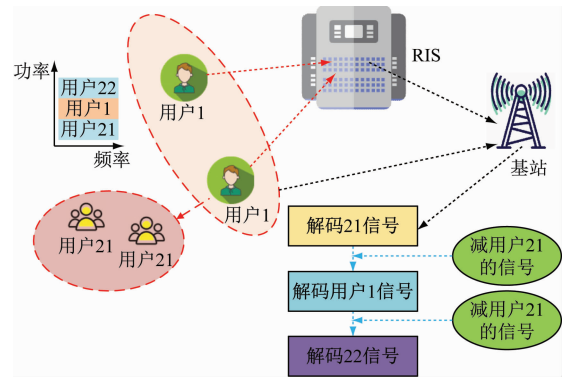


图 4 上行链路中的 NOMA 系统

在上行链路中的 RSMA 系统中,通常通过速率切割的方式实现发射信号的编码、调制及功率分配。在系统中的 RIS 中,因为单独的无源反射源可以自行完成信号幅值跟相移的变换,所以 RIS 在通信环境中都能够自带一条新的反射链。对 RIS 独立进行信号幅值和相移变换,对应产生的相移矩阵为

$$\Phi = \text{diag}(\alpha_1 \exp(jQ_1), \alpha_2 \exp(jQ_2), \dots, \alpha_N \exp(jQ_N)) \quad (10)$$

式中: Q_N 为相位角; N 为振幅反射系数。

链路中接收到的信号可以表示为

$$\mathbf{y} = (\mathbf{h}\Phi\mathbf{f} + \mathbf{h})\sqrt{P}\mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{f}$ 为信号频率的内容向量; P 为信号增益; $\mathbf{x}$ 为原始信号; $\mathbf{z}$ 为加性高斯白噪声。

基站处接收的信号可以表示为

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^K (\tilde{\ell}_i \mathbf{H} \Phi_i \mathbf{f}_i + \tilde{\ell}_i \mathbf{h}_i) \sqrt{P_i} x_i + \mathbf{z} \quad (12)$$

式中 $\tilde{\ell}_i$ 为第 i 个信号源的路径损耗。

基站接收通信信号后形成固定波束,系统对波束进行下一步处理,基站接收到的基础信号为

$$\mathbf{y} = \mathbf{w}^{\text{H}} \mathbf{y} = \sum_{i=1}^K (\tilde{\ell}_i \mathbf{w}^{\text{H}} \mathbf{H} \Phi_i \mathbf{f}_i + \tilde{\ell}_i \mathbf{w}^{\text{H}} \mathbf{h}_i) \sqrt{P_i} x_i + \mathbf{w}^{\text{H}} \mathbf{z} \quad (13)$$

在链路的基站中,信号接收点通常根据信号增益选择干扰解码的顺序,如果信号增益顺序是递减的,那么传感器接收到的信噪比为

$$\gamma = \frac{u_i}{v + \sum_{j=i+1}^k u_j} \quad (14)$$

式中: u 为标量值; v 为信号传输速度。

通过链路通信系统的信号总速率可以表示为

$$R_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^K R_i \quad (15)$$

式中 R_i 为第 i 个传感器传输速率。

上行链路系统中的 RIS 通过其特殊的反射链路可以实现信号覆盖范围的扩大,RIS 主要结构如图 5 所示。

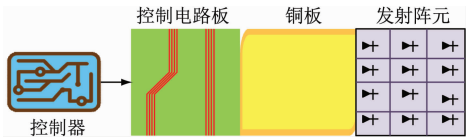


图 5 RIS 主要结构

RIS 主要由控制器、控制电路板、铜板以及发射阵元 4 个核心组件构成。在复杂环境下,由于直线路径中的信号无法实现转向,单一链路结构往往会导致通信中断。因此,链路性能难以精确满足用户对信号质量的高标准要求。引入 RIS 技术能够有效应对多种通信技术的挑战,其自身携带的链路能够根据环境变化进行自适应匹配,从而提升通信信号的传输速率,并扩展信号的传播范围和覆盖面积。通过 RIS 技术集成的 RIS-NOMA 模块结构如图 6 所示。

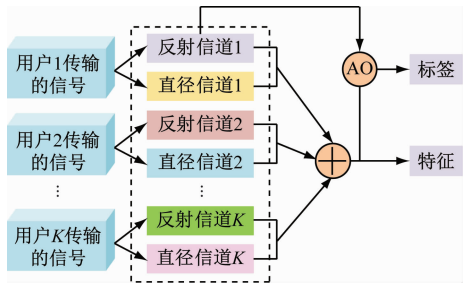


图 6 RIS-NOMA 模块结构

图 6 中关键元素包括用户传输信号、反射信道、直径信道、模拟量输出 (Analog Output, AO) 标签及特征等。该系统由多个用户构成,每个用户均拥有独立的传输信号,这些信号经由反射信道和直径信道传输至接收端。反射信道与直径信道分别代表无线通信环境中 2 种不同的传播路径,共同构成了用户的信道状态信息^[17]。AO 标签用于标识与区分不同用户,以确保信号的正确解码及功率的合理分配。特征则是通过对用户传输信号与信道状态信息的综合分析所获得的结果,是反映系统性能的关键指标。

2 5G 基站链路的性能测试和应用效果分析

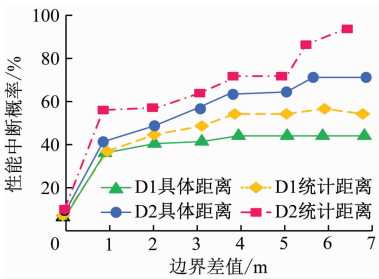
2.1 上行链路性能测试

搭建合适的测试环境进行链路性能测试,测试设备见表 1。

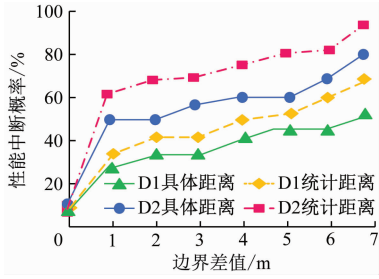
5G 基站一般使用适配电源进行供电,基站与信号屏蔽箱之间利用射频线连接,在基站和屏蔽箱之间串联 1 个信号衰减器。为了定量评价链路系统的诊断性能,令测试环境中的信噪比为固定值 15 dB,接入 2 个信号传输点,设为 D1、D2。将 D1 的内边界差值固定为参考值,D2 的边界值不断变化。随着边界差值的改变,系统的信号中断性能变化如图 7 所示。

表 1 上行线路控制系统的测试工具和设备

设备	作用
平板天线	接收和发送信号
5G 一体化基站	对主设备进行检测
5GCPE	专门用于终端测试
5G 手机	商用的诊断测试
射频线	基站设备与屏蔽箱之间的连接设备
天线	接收和发送信号的介质
信号屏蔽箱	屏蔽 5G 信号
信号衰减器	减弱 5G 信号
终端控制计算机	调控基站中的设备并记录数据
基站控制计算机	控制手机和 CPE 并记录数据
IxChariot	测试网络速率的软件
Spark	监测信号的软件
网线	基站与测试计算机之间的连接



(a) 无信号干扰时的性能中断效率



(b) 有信号干扰时的性能中断效率

图 7 系统的信号中断性能变化

图 7(a)中,在没有信号干扰时,信号中断性能随着边界差值的变化从 30%增加至 90%。图 7(b)中,在有信号干扰时,信号中断性能随着边界差值的变化从 23%增加至 90%,信号中断性能比起没有信号时,变化幅度较大。在无干扰的情况下,增加边界差值可以减少信号重叠和冲突,从而降低性能中断的概率。而在有干扰的情况下,尽管边界差值的增加仍然有助于减少性能中断,但干扰的存在使得系统性能的改善受到限制。有无信号干扰时不同系统的信号强度如图 8 所示。

在无信号干扰条件下,RIS-NOMA 系统展现出最佳性能,其响应时间最短,仅为 2 个信号强度单位。相比之下,单纯的 NOMA 系统和 RIS 系统的响应时间较长,分别为 6 个和 8 个信号强度单位。

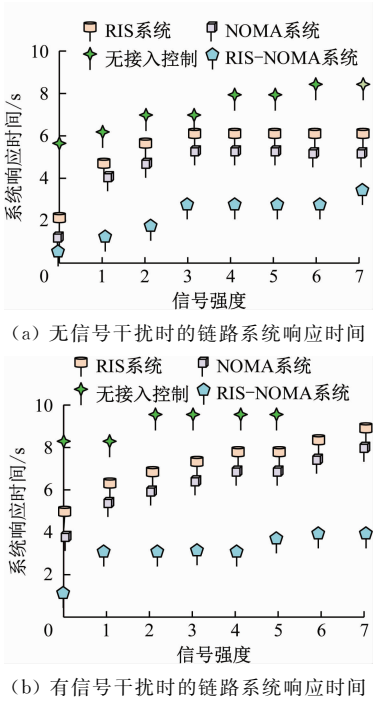


图 8 有无信号干扰时的不同系统的信号强度

在有信号干扰环境中,各系统的响应时间均有所增加。然而,RIS-NOMA 系统在存在干扰的情况下仍然保持了相对较短的响应时间,为 3 个信号强度单位,而 NOMA 系统和 RIS 系统的响应时间分别增加到 5 个和 6 个信号强度单位。这表明 RIS-NOMA 系统在抗干扰方面具有一定优势,RIS 智能表面能够调整反射信号,减少干扰对系统性能的影响。

2.2 上行链路系统的应用效果分析

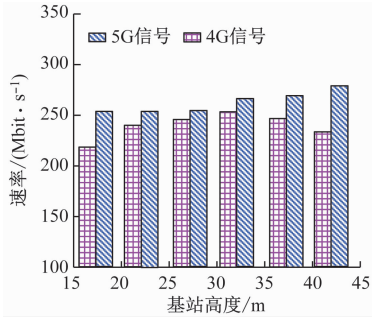
为防止对现有网络造成干扰,测试在没有中国移动 5G 信号的地区进行。在新疆某露天矿进行 0~13 km 的实际验证。测试点平均海拔为 1 320 m,地面平缓,无障碍物阻挡,半径 10 km 范围内没有运营商 5G 信号,通信通道状况良好。仿真模型参数配置见表 2。

表 2 仿真模型参数配置

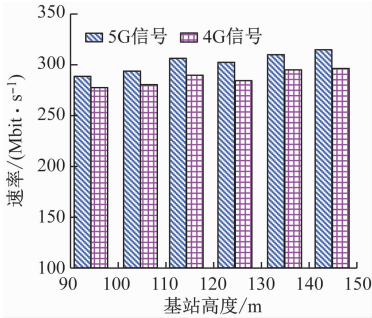
参数	设置
信号传输距离/km	15
衰减器衰减值/dB	49
终端天线要求	全向天线
基站天线要求	全向天线
链路射频损耗/dB	5
链路路径损耗	125.18
仿真模型的时延/ns	333 532

不同高度基站的信号传输速率如图 9 所示。图 9(a)显示,随着基站高度的增加,5G 信号传输速率从 100 Mbit/s 逐渐增加至 350 Mbit/s,而 4G 信号传输速率则从 100 Mbit/s 增加至 250 Mbit/s。

这表明,基站高度的增加有助于提高信号传输速率,且 5G 信号的提升幅度大于 4G 信号。图 9(b)显示,在设计系统后,5G 信号传输速率进一步提升,从 100 Mbit/s 增加至 350 Mbit/s,而 4G 信号传输速率也有所提高,从 100 Mbit/s 增加至 300 Mbit/s。这表明,设计系统的应用进一步优化了信号传输性能。



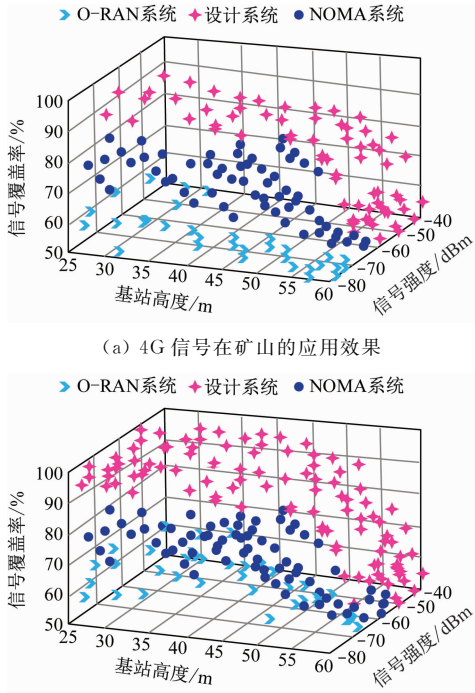
(a) 应用设计系统前信号传输速率随高度变化



(b) 应用设计系统后信号传输速率随高度变化

图 9 不同高度基站的信号传输速率

不同系统的信号覆盖率图 10 所示。在 4G 条件下,随着基站高度或信号强度的增加,3种系统的



(a) 4G 信号在矿山的应用效果

(b) 5G 信号在矿山的应用效果

图 10 不同系统的信号覆盖率

信号覆盖率均有所提高。当基站高度为 60 m 且信号强度为 -40 dBm 时,O-RAN 系统的信号覆盖率达到 80%,NOMA 系统的信号覆盖率达到 90%,设计系统的信号覆盖率达到 100%。在 5G 条件下,当基站高度为 30 m 且信号强度为 -70 dBm 时,O-RAN 系统的信号覆盖率约为 50%,NOMA 系统的信号覆盖率约为 60%,设计系统的信号覆盖率约为 70%。设计系统的信号覆盖率高于其他 2 种系统,随着基站高度和信号强度的增加,所有系统的信号覆盖率都有所提高,说明这 2 种因素对于提高信号覆盖率具有积极影响。

3 结语

针对露天矿特殊环境下的通信难题,提出了一种面向露天矿的 5G 基站超级上行控制链路设计方案。通过引入 O-RAN 架构,并在上行链路中融合 RIS 与 NOMA 技术,实现了信号覆盖范围的显著扩展及传输功率的提升。实验结果表明,所设计系统的信号覆盖率与传输速率均得到显著增强。在无信号干扰的条件下,当基站高度为 60 m、信号强度为 -40 dBm 时,信号覆盖率可达 100%,相较于 O-RAN 系统与 NOMA 系统有显著提升。在有信号干扰的情况下,该系统仍能保持超过 80%的信号覆盖率,而其他系统则分别下降至 60%和 70%。此外,该系统在无干扰与有干扰情况下的响应时间分别为 2 个和 3 个信号强度单位,均优于其他系统。综合分析,本文设计的系统有效提升了露天矿上行链路的信号覆盖率与传输速率,同时优化了通信系统的整体性能。研究不足在于实际测试环境与理论模型之间存在差异,未来的工作将致力于优化 RIS 配置和提高系统在多样化环境下的鲁棒性。

参考文献:

[1] 梁云杰,邢翱,袁明明. 基于 5G 技术的消防 Mesh 专网基站设计[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(8): 1116-1121.

[2] 苏曼,肖跃,刘垚圻,等. 低轨卫星通信系统下行链路设计[J]. 电讯技术, 2022, 62(2): 168-173.

[3] 胡文博,李昊洋,刘海涛. 基于 USRP 的 L-DACS1 前向链路设计与实现[J]. 无线电工程, 2022, 52(4):

692-698.

[4] 龙吟,黄才,丁凯,等. 面向复杂交会对接任务的星间链路设计与验证[J]. 航天器工程, 2022, 31(5): 15-25.

[5] 王芳,欧阳智辉,姜博. 铁路 5G-R 基站天线运用技术分析[J]. 中国铁路, 2024(8): 32-38.

[6] HARINI R, INDHIRA K. Dynamical modelling and cost optimization of a 5G base station for energy conservation using feedback retrial queue with sleeping strategy[J]. Telecommunication Systems, 2024, 86(4): 661-690.

[7] CHRISTOPOULOU M I, KYRITSI T, YALOFAS A, et al. 5G NR launching in Greece: preliminary in situ and monitoring network measurements of electromagnetic fields exposure levels at rooftops[J]. Bioelectromagnetics, 2024, 45(4): 193-199.

[8] 杨瑞科,高霞,武福平,等. 5G 毫米波雨衰减链路传播模型及通信性能[J]. 西安电子科技大学学报, 2022, 49(4): 24-30.

[9] 李晓亮,刘荣科,刘向南,等. 环月-地面激光通信链路运动特性分析与设计[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(5): 71-78.

[10] 刘畅. 高速光纤通信网络总线链路的设计与实现[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(4): 104-109.

[11] 晏鹏鹏,张玉民,盛蔚. 基于 ZYNQ-7000 的飞控计算机 PC/104 总线数传链路设计[J]. 现代电子技术, 2024, 47(14): 15-19.

[12] 王杰,欧阳小龙,马畅,等. 多链路通信环境辐射监测系统设计与实现[J]. 核电子学与探测技术, 2019, 39(2): 184-189.

[13] SHANMUGAVEL G, VASANTHI M S. Subcarrier-users nomination process for downlink NOMA system[J]. Automatika, 2024, 65(2): 652-661.

[14] 陈钟. 可用性视角下用户信息可视化全链路设计研究[J]. 家具与室内装饰, 2023, 30(7): 80-85.

[15] 谢欣妍. 物联网环境下舰船通信网络异常数据检测系统设计[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(8): 118-120.

[16] 魏正华,叶小兰. 煤矿井下无线 Mesh 通信系统设计[J]. 工矿自动化, 2021, 47(10): 115-120.

[17] 明朝辉,石洋,解晨阳,等. 基于“应急救援数字化战场”平台的融合通信链路设计[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(2): 227-230.