

面向矿山场景的 通感一体关键技术研究及应用

Research and Application of Key Technologies for ISAC in Mining Scenarios

范济安¹,刘中国²,刘凯³(1. 中国联合网络通信集团有限公司,北京 100033;2. 中讯邮电咨询设计院有限公司,北京 100048;
3. 中国联通山东分公司,山东 济南 250001)

Fan Jian'an¹,Liu Zhongguo²,Liu Kai³(1. China United Network Communications Group Co.,Ltd., Beijing 100033,China;2. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co.,Ltd., Beijing 100048,China;3. China Unicom Shandong Branch,Jinan 250001,China)

摘要:

通感一体化被认为是5G-A/6G时代最具有广泛应用前景的技术,其业务服务范围将突破传统通信维度,利用同一硬件设备提供感知和通信服务。面对“通感一体化”大趋势,需要积极应对技术与行业场景结合的功能/效果/性能/成本的挑战。基于露天矿高陡复杂边坡监测难,危险系数高的现状,提出了一种可验证可落地的应用场景——基于通感一体的边坡安全状态监测预警技术。

关键词:

智慧矿山;通感一体;5G-Advanced;6G;边坡监测;安全生产

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.12.007

文章编号:1007-3043(2025)12-0034-05

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:

Integrated sensing and communication (ISAC) is considered the most widely applied technology in the 5G-A/6G era, and its business service scope will break through the traditional communication dimension, utilizing the same hardware device to provide perception and communication services. Facing the trend of ISAC, it is necessary to actively respond to the challenges of combining technology with industry scenarios in terms of functionality, effectiveness, performance, and cost. Based on the current situation of difficulty in monitoring steep and complex slopes in open-pit mines and high risk factors, a verifiable and practical application scenario — slope safety status monitoring and warning technology based on ISAC is proposed.

Keywords:

Smart mine;ISAC;5G-A;6G;Slope monitoring;Safety production

引用格式:范济安,刘中国,刘凯.面向矿山场景的通感一体关键技术研究及应用[J].邮电设计技术,2025(12):34-38.

0 前言

通感一体技术是5G-A/6G的重要演进方向,未来10年,无线技术将跨越人联和物联阶段,迈向万物智联时代。通信能力与感知能力融合共生,在有效支撑通信能力广域拓展的同时,叠加具有目标定位(测距、测速、测角)、目标成像、目标检测、目标跟踪、目标识别等能力的感知网络,最终实现网络、用户、终端、环

境、物体、应用的交融互通。在智能家居、智慧工业、精准医疗、智慧交通等众多行业领域中,在无人机监管、公共安全、天气监测等场景已开展了通感一体典型场景开发、技术研究、性能测试等工作,而在应急安全领域,如矿山安全、自然灾害、地质灾害等领域的通感一体化技术研究和应用,目前还处于空白阶段。

在露天矿山场景中,矿山边坡稳定性一直是影响其安全生产的最重要因素。随着开采深度的增加,边坡失稳造成的灾害风险与矿山经济效益提升之间的矛盾日益突出。随着凹陷性露天矿山开采深度的增

收稿日期:2025-11-17

加,其边坡高度也在加大,滑坡等失稳现象逐年增多^[1]。现有的边坡监测技术在一定程度上满足了边坡滑动监测要求,但尚存在监测信息不全面、应急响应滞后、抗干扰性差、覆盖范围有限、功能单一、成本较高等问题,极大地制约了边坡监测预警的实时性和科学性。因此,如何利用新技术实现露天矿边坡智能监测预警及快速应急响应成为亟待解决的问题,这对于提高我国露天矿生产安全具有重要意义^[2]。

本文首先对基于通感一体技术的工作原理进行描述,其次对基于通感一体技术的矿山边坡监测可行性进行分析,并介绍相关方案;最后,探讨基于通感一体的矿山边坡监测实验结果及可行性,展望随着通信技术演进,通感一体技术在智慧矿山领域未来的发展趋势和需要迎接的挑战。

1 通感一体技术发展情况和工作原理

1.1 通感一体发展情况

2021年4月,第1届6G通信感知一体化学术研讨会在成都成功召开,提出“通信感知一体化,开启无线新未来”的目标;同时,中国移动研究院和华为公司联合主办的通信感知一体化行业应用研讨会在北京召开,各个运营商、设备商、终端商等产业代表分析5G网络演进现状,并展望6G中通信感知融合的机遇和前景。2021年9月,IMT-2030(6G)推进组发布“通信感知一体化技术研究报告”,对通感一体化的研究现状和发展趋势进行总结,阐述了相关应用场景、基础理论研究和关键技术等,展望商用之前面临的多方面挑战;2022年1月,IMT-2020(5G)推进组完成全球首个面向5G-Advanced通信感知一体化测试验证,通感一体化为相关行业突破发展瓶颈带来了全新的可能。与此同时,中国通信学会也于2022年1月发布“通算一体网络前沿报告”白皮书,分析通感一体化的典型应用场景和性能评价指标体系,阐述了通信感知融合的关键技术,希望加快相关技术的发展,推进通信感知融合在各行业的规模化商用。

1.2 通感一体技术原理

2021年4月,3GPP确定以5G-Advanced(5G-A)作为5G网络演进的第2阶段目标。5G-A以及6G移动通信网络将革命性地扩充系统功能,即在提供高速通信功能的前提下,增加感知能力,以支撑全方位的智能化应用,实现万物互联^[3]。通感一体化可以感知目标的方位、距离、速度等信息,实现对目标的检测、捕

捉、跟踪、成像等。相比当前独立的通信系统,通感一体化系统所提供感知层面的信息可辅助通信实现更高的速率、更可靠的信息传递。

通感一体化是指在同一系统中通过频谱共享、硬件共享、信号共享等方式,在进行信息传递的同时,能够通过无线信号的发射和接收,来感知目标物体的方位、距离速度等信息,或者对目标物体、事件或环境等进行检测跟踪、识别、成像等^[4]。此时的无线信号既是通信信号,又是感知信号。相比较通信感知分离的系统,通感一体化可以更快地获得融合增益、协作增益。从通信感知的发展和融合演进方向分析,经历了从共存、共享到融合共生的历程。

a) 共存:通信功能和感知功能单独设计,采用独立的硬件和频谱。在这种情况下,通感一体化主要体现在功能融合方面,即感知功能获得用户和周围环境的信息,以提高通信性能(这里的提高主要体现为通信资源的调度)。此外,通信功能可以有效传递和汇聚感知信息,以支撑多节点协作感知,进而扩展感知的维度和深度。

b) 共享:通信功能和感知功能会以频分、时分、空分的形式共享同一块硬件资源。在共享过程中,会以通信功能或感知功能中的某一种功能为主,同时利用剩余资源来完成另一种功能。其关键问题在于需在保证一方性能的同时优化另一方性能。频谱融合设计有2个技术方向:一是在感知信号中调制通信信号;二是在通信信号中引入感知信号。

c) 共生:通信感知一体化最终要实现按需感知、按需通信、绿色智能的目标。在这种趋势下,通信功能和感知功能不但共享同一块硬件资源,还能够在信号设计、波形和调制技术上实现共享。这种一体化设计不仅能够满足未来高速、低时延、大规模连接和高可靠性的通信需求,同时也能够满足复杂多样的感知需求。在系统设计时,需将通信和感知联合考虑,从硬件架构、波形设计、协议设计、接收信号处理等各个角度实现通信和感知功能的深度融合,进而提升频谱使用效率,优化系统整体性能^[5]。

2 通感一体技术在矿山边坡监测中的应用

2.1 现有矿山边坡监测技术概述

目前,矿山边坡监测技术主要有基于GNSS的边坡监测系统以及边坡雷达监测系统。现有的GNSS边坡监测系统采用点状监测方式,它有效地适用于大变

形和整体滑坡监测,但无法对局部片帮、落石等灾害进行防护监测^[6]。在现场实践工作中,单个监测点所能监测的区域较小,仅能反映周围一定范围的形变信息。因此,GNSS边坡监测系统往往需要在被测边坡布置多台监测点才能真正反映该区域边坡岩体的形变信息。而通感一体技术采用面状监测方式,能够提供更全面的边坡变形信息,适用于捕捉边坡的整体变形趋势和行为。

相较于GNSS系统,边坡雷达监测系统的监测精度更高,能够实现实时边坡面全覆盖式监测,对整体滑坡、局部片帮、崩塌、落石等边坡灾害进行监测预警,适合地质复杂的高陡边坡监测^[7]。目前主流的边坡监测技术主要分为2种方式:一种是通过波束扫描的方式来记录形变信息;另外一种是基于成像的方式来记录累计形变信息。SSR雷达主要采用波束扫描的方式,通过获取边坡上散射点的载波相位时序信息,结合配置算法计算散射体差分相位,再利用相位解缠绕与噪声干扰滤波等技术,获取边坡上反射体的形变量。相比于SSR雷达,圆弧式合成孔径雷达的摆臂通过旋转,并通过圆弧运行轨迹,在空间上形成合成孔径,采用成像的方式进行预测。在成本方面,国外毫米波频段已经大规模商用部署,国内毫米波频段已经具备商用的能力。毫米波频段是5G中可能使用到的高频频段,也是与现有雷达频段最接近的频段,因此从频段的趋同性来看,可以较快地实现通信和感知技术的一体化。目前毫米波在我国还没有正式商用,仅在少部分地区试点部署,所以设备单价较高。参考5G设备商用趋势,随着后期毫米波大量商用,运营商大量集采,其成本会显著下降,相比边坡监测雷达,未来它在成本方面具有很大优势。

2.2 基于通感一体技术的矿山边坡监测可行性分析

结合算力的通信和感知融合正是在这个时候应运而生的网络部署级别的技术。通信感知融合基于软硬件资源以及频谱资源的共存/共享,在一张网上同时实现无线感知与无线通信功能。在通信感知一体化中,感知能力聚焦于无线信号感知,即通过分析无线电波的直射、反射、散射信号,对目标对象或环境信息(如属性和状态等)进行感知,完成定位、测距、测速、成像、检测、识别、环境重构等功能,进而实现对物理世界的感知探索。通信感知一体化的研究目前主要集中在毫米波频段,可以实现全双工功能。

2.3 基于通感一体的矿山边坡监测的预警方法设计

本文结合露天矿高陡软弱边坡的变形破坏规律,提出一种基于通感一体设备监测数据驱动的、适用于露天矿不同变形破坏模式(落石、崩塌、片帮、滑坡等)的预警方法。通信感知一体化技术也即通信雷达一体化技术,可通过通信体制的信号来实现雷达感知的功能。

2.3.1 相位多径抑制技术

通过提取毫米波载波相位,利用多次观测值校正载波频率误差,并结合优化算法提升载波相位的精度。基于提取的多频点载波相位,构建基于频域信道状态信息的超分辨估计技术体系,获取多路径的时延和谱估计参数。提取估计的谱参数,基于回波谱变化自适应修订检测阈值门限,设计滤波算法,抑制雨雪对形变估计精度的影响。基于小波变换、时频变化等技术,对时序测量的信号进行高效滤波处理,增加检测边坡形变点的灵敏度。通过超分辨算法估计多径时延参数,并结合MIMO天线波束扫描算法^[8],进行多径分离并实现对目标反射路径的增强,实现载波相位多径抑制。消除基站收发链路之间初始相位误差、频率误差、硬件缺陷导致的电时延误差以及信号发射及信号接收时刻采样点的校正误差。利用OFDM多频点目标回波载波相位,构建载波相位测距观测模型,并分析模型误差及抑制方法。根据多频点目标回波载波相位的频率差异,并结合时延约束实现整周模糊度快速求解。

2.3.2 角度估计与定位精度提升技术

获取边坡上边坡监控点的位置与载波相位时序信息,该模块基于MIMO波束赋形与波束扫描技术,利用波束差分算法提升角度估计精度^[9]。和差波束的目的是提高阵面的测角精度,由于天线波束3 dB带宽的存在,为了提高测角精度,往往会引入和差波束技术来提高该指标。相控阵雷达可以对每个发射或接收通道进行相位补偿,以此获得目标点最大同相信号叠加,因此在相控阵雷达中都会存在移相器(也可称为加权,给每个输出信号引入相位加权)。将接收支路进行加权后相加则就形成了和波束通道。如果想引入差波束通道,则需在前端将阵列一分为二,将2个阵列分别进行求和作差,以此获得一个和波束通道,以及一个差波束通道,可提高测角精度。

2.4 矿山边坡监测算法系统

利用差分波束技术,并结合载波相位观测方程来对回波目标进行定位,同时设计优化算法以提升定位

精度。基于边坡监控点位置与载波相位时序信息,结合雨雪抑制模块和观测误差模型,设计自适应形变检测门限,实现不同天气环境、不同场景下检测门限的自更新^[10]。为获取边坡的整体形变量,算法基于边坡监控点位置与载波相位的时序信息,结合配置算法计算边坡监控点的差分相位,再利用相位解缠绕与噪声干扰滤波等技术,获取边坡上反射体的形变量并进行展示^[11-15]。矿山边坡监测算法系统框图如图1所示。

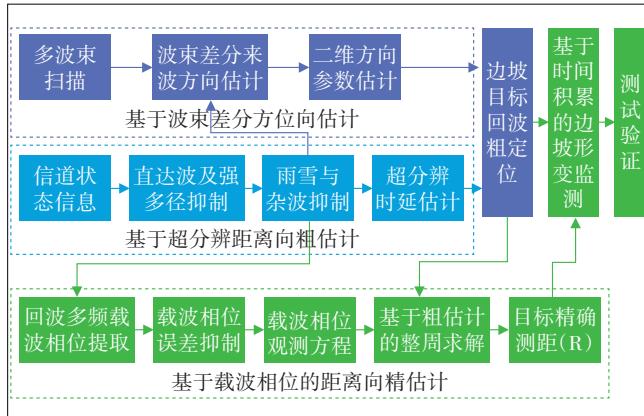


图1 矿山边坡监测算法系统框图



图2 矿山现状及所选边坡

射、接收信号。如图3所示,分别设置发射天线与山坡的直线距离为100 m(场景1)和120 m(场景2),开展2组实验。发射天线布置在前方,接收天线布置在后方,从而在一定程度上减少自激信号干扰。将发射天线(发射AAU)位置固定,将接收天线(接收AAU)固定在游标卡尺导轨上,向后移动接收天线(即通过移动接收AAU),进行边坡表面微位移检测。

测试结果如图4所示。2组测试均实现优于毫米(mm)级矿山边坡形变测量。依据《国家矿山安全监察局关于开展露天矿山边坡监测系统建设及联网工作

3 测试结果与分析

本文基于以上方法及思路,采用通感一体基站,在内蒙古某露天矿山真实场景中进行测试验证(见图2)。该井田面积为6.25 km²,生产能力为240万吨/年。本次验证通感一体基站在矿山场景下的性能,并结合边坡监测算法分析微动位移测试效果。

本次实验所选择的测试位置为一个小型边坡,该位置距离站址大概100 m,离主要的矿山位置约400 m,可验证在2种距离下的监测精度。其中,在所选站址和所选测试位置之间有调度办公室,该办公室具备电源,可将BBU、服务器以及时钟同步服务器部署于调度办公室,AAU安装在室外,BBU与AAU之间通过POE供电。测试期间天气晴朗,但风速较大,为保证监测准确性,需保持基站设备稳定;然而在大雾、雨雪天气,由于毫米波与雨雪、水汽的相互作用会造成毫米波散射和功率衰减,测量范围和精度可能会受到影响。

在测试过程中,将通感一体基站部署在距离地面约2 m的平面上,向基站感知覆盖区域远处的边坡发



图3 通感设备向山坡100 m和120 m测试场景

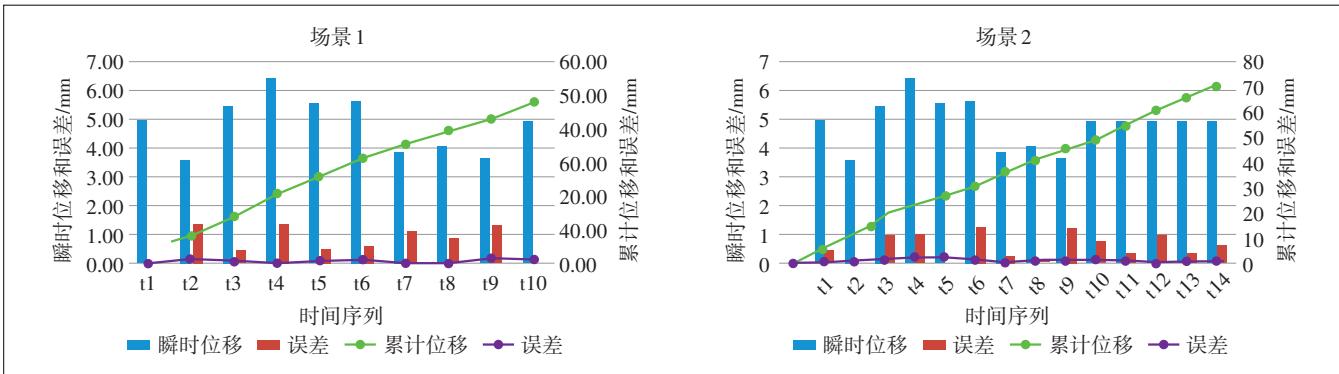


图4 2组实验的测试结果

的通知》(矿安[2023]119号)的要求,雷达(面状监测)应满足监测精度优于1 mm,本次技术验证达到了矿山行业的精度标准要求。

在场景1中设备收、发天线分别监测到的瞬时位移(监测边坡处石块某一瞬间的位置变化)均值误差为0.79 mm,累计位移(监测对象为边坡处基站堵盖范围内某石块在测试时间14 s的累计位置变化)为50 mm,均值误差为0.99 mm。在场景2中,设备收、发天线分别监测到的瞬时位移均值误差为0.59 mm,累计位移为70 mm,均值误差为0.79 mm。

4 结束语

基于通感一体化的边坡智能监测和应急响应技术,从几个维度实现矿区边坡监测的高覆盖感知、确定性通信、敏捷智能计算和快速反馈。首先,通过在矿区建设5G毫米波基站,实现5G无线通信网络覆盖,可实时监测边坡表面变形和滑动情况及矿山环境因素和地质状态,通过融合多方面的监测信息,对边坡稳定状态进行综合评估,实现优于边坡雷达的监测预警效果;其次,通过5G、时间敏感网络、无损传输等技术建设矿区确定性网络设施,实现感知数据实时、精准、可靠传输;最后,通过云计算、边缘计算和云边端协同技术,汇聚多源异构大数据,实现对历史数据的分析和预测,构建分秒必争的边坡监测异常信息快速处理和超前预报能力。基于通感算一体技术,能实现边坡智能监测、安全管控与应急通信的无缝集成,有效提高应急响应的可靠性和快速性。

参考文献:

- [1] 张瑞新,毛善君,赵红泽,等.智慧露天矿山建设基本框架及体系设计[J].煤炭科学技术,2019,47(10):1-23.

- [2] 孙继平,陈晖升.智慧矿山与5G和Wi-Fi6[J].工矿自动化,2019,45(10):1-4.
- [3] 刘玉鹏,王佳妮,赵力强.面向6G通感算融合的网络智能感知[J].无线电通信技术,2023,49(1):72-82.
- [4] 杨艳,李福昌,张忠皓.6G通感传算融合需求分析与关键技术研究[J].无线电通信技术,2023,49(1):83-88.
- [5] 陈大伟,向际鹰,陈诗军,等.5G-A通感一体化的场景、挑战及关键技术[J].邮电设计技术,2022(8):23-28.
- [6] 伊盼盼,李佩佩,赵永海,等.矿山边坡稳定性分析及生态保护修复探讨——以微山县天宝建筑石料用灰岩矿为例[J].矿山工程,2023,11(2):149-153.
- [7] 张雪.三维激光扫描技术在矿山边坡监测中的应用[J].世界有色金属,2022(16):211-213.
- [8] 袁昕,刘向南,梁琰,等.面向通感一体化网络能效优化的波束赋形方案[J].无线电通信技术,2023,49(1):126-132.
- [9] 王长江,傅友华.IRS辅助毫米波MIMO系统波束赋形优化的低复杂度方案[J].信号处理,2022,38(9):1965-1974.
- [10] 丁圣利,李健之,陈保龙,等.通感一体化中的感知非理想因素及其消除方法[J].移动通信,2023,47(9):46-56.
- [11] 张涛,路向阳,李雷,等.露天矿山运输无人驾驶关键技术与标准[J].控制与信息技术,2019(2):13-19.
- [12] 罗香玉,李嘉楠,郎丁.智慧矿山基本内涵、核心问题与关键技术[J].工矿自动化,2019,45(9):61-64.
- [13] 霍中刚,武先利.互联网+智慧矿山发展方向[J].煤炭科学技术,2016,44(7):28-33,63.
- [14] 王国法,王虹,任怀伟,等.智慧煤矿2025情景目标和发展路径[J].煤炭学报,2018,43(2):295-305.
- [15] 杨韶华,周忻,毕俊蕾.智慧矿山异构数据集成平台设计[J].工矿自动化,2015,41(5):23-26.

作者简介:

范济安,中国联合网络通信集团有限公司大数据首席科学家,博士,主要从事工业领域数字化转型工作;刘中国,高级工程师,硕士,主要从事矿山能源领域数字化转型工作;刘凯,高级工程师,硕士,主要从事5G应用创新工作。