

井下多模态通信（UWB/光纤/5G）协同组网关键技术研究

蒋国强

深圳市隧道工程有限公司 广东深圳

【摘要】随着井下作业智能化发展，对通信系统高效性、可靠性要求提高，井下多模态通信（UWB/光纤/5G）协同组网是解决通信难题关键。剖析UWB定位与通信、光纤传输、5G通信特性，研究协同组网架构设计，探索不同通信方式自适应切换机制及信号干扰抑制与同步等关键技术。通过研究实现井下通信无缝覆盖与高速稳定传输，满足多样化业务需求，为井下安全生产与智能化作业提供支撑，推动井下通信技术创新发展。

【关键词】井下通信；多模态；UWB；光纤；5G

【收稿日期】2025年11月6日

【出刊日期】2025年12月30日

【DOI】10.12208/j.jer.20250412

Research on key technologies for multi-modal communication (UWB/Fiber/5G) collaborative networking in underground operations

Guoqiang Chang

Shenzhen Tunnel Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong

【Abstract】With the advancement of intelligent underground operations, there is an increasing demand for efficient and reliable communication systems. The collaborative networking of multi-mode communication (UWB/fiber/5G) has become crucial for addressing communication challenges. This study analyzes the characteristics of UWB positioning and communication, fiber transmission, and 5G communication. It explores collaborative network architecture design, investigates adaptive switching mechanisms for different communication modes, and examines key technologies such as signal interference suppression and synchronization. Through this research, seamless coverage and high-speed stable transmission of underground communications are achieved, meeting diverse operational needs while supporting safe production and intelligent operations in underground environments. This work drives technological innovation in underground communication systems.

【Keywords】Underground communication; Multi-Mode; UWB; Fiber; 5G

引言

井下作业环境复杂，传统单一通信方式难以满足日益增长的通信需求。人员实时精准定位、设备状态实时监测、高清视频流畅传输等，都亟需更先进的通信技术支持。UWB、光纤、5G等多模态通信技术协同组网，有望突破现有通信瓶颈，为井下作业提供稳定、高效通信保障。如何实现多模态通信在井下的有效协同，成为亟待解决的关键问题。

1 井下多模态通信技术特性剖析

井下多模态通信技术的特性差异为协同组网提供了技术互补的基础。UWB技术基于超宽带脉冲信号，通过精确测量信号飞行时间实现厘米级定位精度。这种定位能力在井下作业环境中具有不可替代的作用。井下巷道布局复杂，人员和设备分布广泛，UWB定位

系统能够实时追踪人员位置，为突发事故救援提供准确信息，避免盲目搜救带来的风险。在设备管理方面，通过对关键设备的位置监测，可以优化设备调度，提高设备使用效率。UWB的短距离高速通信特性，特别适合井下局部区域的设备数据交互，如采掘设备间的状态信息传输，保障设备协同作业的顺畅性。

光纤通信以光信号为载体，在井下通信中发挥着骨干传输的核心作用。其高速率、大容量的特性能够满足井下大量数据传输的需求。随着井下智能化发展，高清视频监控、设备运行状态实时监测等产生的海量数据需要可靠的传输通道。光纤通信凭借低损耗的优势，能够实现长距离无中继传输，将井下各区域的信息稳定传输至地面控制中心^[1]。在煤矿开采中，工作面的高清视频图像通过光纤网络实时回传，地面操作人员可

以清晰掌握井下作业情况,及时发现并处理安全隐患。光纤通信不受电磁干扰的影响,在井下复杂的电磁环境中,能够保证数据传输的准确性和稳定性。

5G通信技术的引入为井下通信带来了革命性变化。其大带宽特性支持大量设备同时接入网络,满足了井下智能化发展对设备联网的需求。无论是传感器、执行器还是移动终端,都能通过5G网络实现互联互通。低时延和高可靠的特点则为实时控制类业务提供了保障。在远程操控应用中,操作人员的控制指令能够快速准确地传输到井下设备,设备的反馈信息也能及时回传,实现精准的远程操作^[2]。在危险区域的设备维护工作中,操作人员可以在安全地带通过5G网络远程控制设备,避免人员直接进入危险区域,提高作业安全性。5G网络的广域覆盖能力,能够为井下移动设备和人员提供稳定的通信服务,支持语音、数据等多种业务的融合应用。

2 协同组网架构设计与搭建

构建UWB、光纤、5G融合的协同组网架构,需充分考虑井下环境的特殊性和业务需求的多样性。井下巷道狭长曲折,空间有限,通信设备的部署受到诸多限制。因此,选择光纤作为骨干网络,能够利用其长距离传输和高稳定性优势,搭建起覆盖整个井下区域的基础传输链路。光纤网络的铺设可以沿着主要巷道进行,形成环形或星型拓扑结构,确保网络的冗余性和可靠性。在关键节点设置光分路器和光交换机,实现数据的汇聚和分发,为其他通信网络提供稳定的接入基础。

UWB网络的部署需结合井下具体的定位和通信需求。在人员密集的工作区域、设备频繁移动的运输巷道等对定位精度要求较高的地方,合理布置UWB基站。这些基站通过与光纤网络的连接,将采集到的定位数据和局部区域的通信数据上传至地面控制中心^[3]。UWB网络与光纤网络的融合需要解决接口和协议适配问题。通过设计统一的数据格式和通信协议,确保UWB网络的数据能够无缝接入光纤骨干网。在实际应用中,可以采用网关设备实现协议转换,使UWB信号能够在光纤网络中传输,从而实现定位信息与局部数据的高效交互。

5G基站的布局要综合考虑井下人员和设备的分布以及业务需求。在工作面、硐室等人员和设备密集的区域,合理设置5G基站,确保信号覆盖的完整性和稳定性。5G基站通过光纤连接到骨干网络,利用光纤的高带宽和低损耗特性,保障5G信号的传输质量^[4]。在

基站设计方面,要充分考虑井下的电磁环境和空间限制,采用小型化、高集成度的设备,降低功耗和安装难度。通过优化基站的天线布局和参数配置,提高信号的覆盖范围和抗干扰能力。还需要设计合理的切换机制,确保移动设备在不同5G基站间的平滑切换,保证通信的连续性。

3 复杂环境下自适应切换与干扰抑制

井下复杂的环境对通信系统的稳定性和可靠性提出了严峻挑战。巷道的曲折布局、金属设备的遮挡以及电磁干扰等因素,都会导致信号强度的剧烈变化。为应对这些问题,需要建立高效的自适应切换机制。该机制以信号强度、传输速率、时延等参数作为判断依据,实时监测各通信方式的运行状态。当某一通信方式的信号质量下降到预设阈值时,系统自动启动切换流程,将业务转移到更优的通信方式上^[5]。在巷道转弯处,5G信号容易受到遮挡而减弱,此时系统通过实时监测发现信号强度不足,立即将通信切换到UWB或光纤网络,确保数据传输不中断。自适应切换机制的实现需要各通信网络之间的紧密协作,通过统一的管理平台进行协调控制,保证切换过程的快速性和准确性。

多模态通信组网中,不同通信信号之间的干扰问题严重影响通信质量。为有效抑制干扰,需要从多个方面采取措施。在频谱分配方面,合理规划UWB、光纤和5G信号的工作频段,避免频段重叠产生的干扰。通过动态频谱管理技术,根据各通信网络的负载情况和干扰状况,实时调整频谱资源分配,提高频谱利用率。在编码技术上,采用抗干扰能力强的编码方案,如纠错编码、扩频编码等,增强信号的抗干扰性能。当信号受到干扰时,这些编码技术能够通过冗余信息恢复原始数据,保证数据传输的准确性。智能天线技术的应用也是抑制干扰的重要手段。

除了上述技术手段,还需要建立完善的干扰监测和预警系统。在井下关键位置部署干扰监测设备,实时检测通信频段内的干扰信号强度和来源。一旦发现干扰,系统立即进行分析定位,并发出预警信息。管理人员根据预警信息,及时采取相应的措施,如调整设备参数、优化网络布局等,消除干扰影响^[6]。通过对干扰数据的长期统计分析,总结干扰发生的规律和特点,为后续的干扰抑制策略制定提供依据,不断提升通信系统的抗干扰能力,确保多模态通信协同组网在复杂环境下的稳定运行。

4 协同组网关键技术实践与应用

在实际井下作业场景中,多模态通信协同组网技

术的应用展现出显著的优势。以人员管理为例，UWB 技术的精准定位功能与 5G 网络的实时通信能力相结合，为井下人员管理提供了全新的解决方案。通过为每位井下作业人员配备 UWB 定位标签，管理人员可以在地面控制中心实时掌握人员的位置、行动轨迹等信息。当发生紧急情况时，能够迅速确定被困人员位置，制定最优救援方案，提高救援效率。结合 5G 网络的语音和视频通信功能，管理人员可以与井下人员进行实时沟通，下达调度指令，协调作业流程，确保井下作业有序进行。在设备管理方面，利用 UWB 对设备的定位和追踪，实现设备的智能化管理，提高设备的使用效率和维护及时性。

光纤网络在数据传输方面的优势为井下信息的高效传递提供了保障。井下各区域部署的大量传感器和监测设备，实时采集设备运行状态、环境参数等数据，这些数据通过光纤网络快速传输至地面控制中心。高清视频监控系统拍摄的井下作业画面也通过光纤网络实时回传，使地面操作人员能够直观了解井下情况^[7]。在煤矿开采中，工作面的采煤机、刮板输送机等设备的运行参数和状态信息，通过光纤网络实时传输到地面，技术人员可以对设备进行远程监测和故障诊断，提前发现设备隐患，安排维修计划，减少设备故障停机时间。高清视频监控则帮助管理人员及时发现违规操作和安全隐患，采取相应措施进行纠正和处理，保障井下作业安全。

在采煤工作面等复杂区域，多模态通信协同工作实现了设备的远程精准控制。5G 网络的低时延特性使得远程操控成为可能，操作人员在地面控制中心通过操作终端发送控制指令，指令通过 5G 网络快速传输到井下设备，设备接收到指令后立即执行相应动作，并将反馈信息通过 5G 网络回传。UWB 技术则为设备提供精准的定位信息，确保设备在复杂环境中的准确运行。光纤网络作为骨干传输，保障了大量数据的稳定传输。在综采工作面，操作人员可以远程控制采煤机的割煤、移架、推溜等动作，通过高清视频监控实时观察设备运行情况，根据煤层变化及时调整开采参数^[8]。多模态通信协同组网技术的应用，不仅提高了生产效率，还大大降低了人员在危险区域作业的风险，推动了井下作业向智能化、无人化方向发展。

5 结语

井下多模态通信（UWB/光纤/5G）协同组网关键技术研究，有效解决了井下复杂环境下的通信难题，实现了通信的高效、稳定与可靠。未来，随着技术的不断发展，需进一步优化协同组网架构，提升自适应切换的精准度与速度，加强对新型干扰的抑制能力。探索多模态通信与人工智能、物联网等技术的深度融合，拓展井下通信的应用场景，为井下智能化作业提供更强大的通信支持，推动井下作业向更安全、高效、智能的方向发展。

参考文献

- [1] 于力,张建华,蔡逸辰.6G 数字孪生信道的三个使能技术:多模态感知、环境知识和大模型[J/OL].中兴通讯技术,1-15[2025-07-21].
- [2] 张广,吴帆,江拼.多模态融合与 BEV-Transformer 架构下的智能网联汽车障碍物识别及 V2X 通信优化研究[J].汽车维护与修理,2025,(13):89-92.
- [3] 陈永炜,郭文润,张木栋,等.5G-A 通感一体及多模态融合技术在低空安防领域的应用研究[J].通信世界,2025,(12):32-38.
- [4] 黄国文,阳亚平,吴建铭.多模态联邦学习在个性化学习资源推荐中的应用研究[J].福建开放大学学报,2025,(03):73-76.
- [5] 刘辉,皮大伟,秦也辰,等.多模态/可重构地面运载平台技术进展及发展建议[J].前瞻科技,2025,4(02):115-129.
- [6] 王硕.时频混叠下电子通信微弱信号检测方法研究[J].长江信息通信,2025,38(06):206-208.
- [7] 王琴.基于物联网的多模态数据智能控制技术实践探索[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2025,41(03):35-41.
- [8] 缪巍巍,张瑞,张震,等.面向电力 6G 的白盒网络多模态智能路由技术研究[J].电力信息与通信技术,2025,23(05):9-17.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

