

文章编号: 1671-251X(2023)07-0014-05

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2023020012](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2023020012)

煤矿井下无线通信技术演进

白雪峰, 舒晓军

(浙江凡双科技有限公司, 浙江 杭州 311112)

摘要: 矿井通信是煤矿智能化发展不可或缺的一环。分析了煤矿井下无线通信不同发展阶段不同通信制式和技术的优缺点, 得出目前5G、WiFi6在传输速率、时延、可靠性及用户容量方面具有较大技术优势及较好的适用性, 是现阶段矿用无线通信技术的主流解决方案。探讨了井下无线通信系统建设面临的问题及对应的发展方向: ①技术融合问题。不同场景对带宽、时延、功耗、可靠性有不同要求, 单一的通信技术难以满足煤矿所有应用场景的需求, 必须根据实际应用情况, 选择适合的通信技术来满足应用需求, 不同技术通过协议转换器、网关等设备实现融合, 形成井上下多技术融合的一体化通信网络平台。②系统融合问题。由于各系统由不同厂家提供, 通信协议及硬件接口不一致, 难以真正实现矿井各系统数据共享, 应提供标准接口、开放的网络架构、统一的用户数据, 为监控、应急、生产等系统提供互联互通功能, 并进一步提供统一数据报文, 让数据在各系统内低延时、高并发、实时、同步地流通。③设备功耗问题。现有矿用5G基站等由于设备本身功耗大, 只能做功能单一的隔爆型产品, 设备笨重、体积大, 安装维护困难, 制约了5G技术在矿井的普及推广, 可从主芯片、射频模块、功率放大模块3个方面着手进行低功耗设计。

关键词: 煤矿通信; 5G; WiFi6; 技术融合; 系统融合; 低功耗设计

中图分类号: TD655.3

文献标志码: A

Wireless communication technology evolution in underground coal mines

BAI Xuefeng, SHU Xiaojun

(Zhejiang Finsung Technology Co., Ltd., Hangzhou 311112, China)

Abstract: Mine communication is an indispensable part of the intelligent development of coal mines. This paper analyzes the advantages and disadvantages of different communication systems and technologies in different development stages of wireless communication in underground coal mines. It is concluded that 5G and WiFi6 currently have significant technological advantages and good applicability in terms of transmission rate, delay, reliability, and user capacity. They are the mainstream solutions for mine wireless communication technology in recent years. This paper discusses the problems in underground wireless communication system construction and the corresponding development directions. ① Technological convergence issues. Different scenarios have different requirements for bandwidth, delay, power consumption and reliability. A single communication technology can not meet the requirements of all application scenarios in coal mines. It is necessary to select appropriate communication technology according to the actual application situation to meet the application requirements. Different technologies are integrated through protocol converters, gateways and other devices to form an integrated communication network platform for technological convergence above the ground and underground. ② System integration issues. Since each system is provided by different manufacturers, and the communication protocol and hardware interface are inconsistent, it is difficult to truly realize the data sharing of each system in the mine. It is necessary to provide standard interfaces, open network architecture, and unified user data to provide interconnection and inter-working functions for monitoring, emergency, production, and other

收稿日期: 2023-02-03; 修回日期: 2023-07-11; 责任编辑: 胡娟。

作者简介: 白雪峰(1973—), 男, 辽宁营口人, 工程师, 主要从事无线专网通信方面的工作, E-mail: 5079711@qq.com。

引用格式: 白雪峰, 舒晓军. 煤矿井下无线通信技术演进[J]. 工矿自动化, 2023, 49(7): 14-18.

BAI Xuefeng, SHU Xiaojun. Wireless communication technology evolution in underground coal mines[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(7): 14-18.



扫码移动阅读

systems. It is further required to provide unified data messages to enable data transmission with low delay, high concurrency, real-time, and synchronization within each system. ③ Device power consumption issues. The existing mine 5G base station and other equipment can only be made into a single flameproof product due to their high power consumption. The equipment is bulky, large, and difficult to install and maintain, which restricts the popularization of 5G technology in coal mine. Low-power design can be started from the main chip, RF module, and power amplifier module.

Key words: coal mine communication; 5G; WiFi6; technological convergence; system integration; low-power design

0 引言

为推动煤矿智能化发展,国家先后出台了一系列相关政策和规划^[1-3],针对煤矿智能化发展、能源领域5G应用场景及阶段性发展目标给出了指导意见及实施方案。矿井通信是煤矿智能化发展不可或缺的一环,是煤矿智能化建设的重要技术支撑。

我国煤矿井下无线通信历经小灵通、WiFi、3G、4G等阶段,目前正处于4G转5G的过程中^[4]。本文立足于煤矿行业无线通信理论研究和实践发展,对井下无线信号传输、井下无线通信系统特点和应用情况进行对比分析研究,总结了目前所面临的问题,并提出了未来发展方向。

1 井下无线信号传输分析

与地面环境相比,煤矿井下无线电环境较简单,干扰较小,基站信噪处理更容易,但井下生产环境比较特殊:工作面设备多,且位置随开采掘进不断变化;巷道较长,转弯多且角度大;各类硐室比较多,硐室密闭性好。根据上述特性,得出无线通信覆盖设计要求:线性巷道覆盖占比大,信号覆盖硐室、工作面区域空间,通信量相对较少。

文献[5-6]通过理论计算和实验相结合的方式研究了电磁波频率对井下电磁波传输特性的影响,采用金属波导法分析了圆形、拱形及弯曲隧道中电磁波的传输特性,并给出衰减率近似公式,得出结论:在平直隧道中,频率越高,衰减率越小,越有利于电磁波传播;在弯曲隧道中,频率越高,衰减率越大,越不利于电磁波传播;900 MHz左右为井下无线通信系统最佳频段。

井下巷道是管状线性结构,适合采用定向天线提高覆盖距离;要提高信号源复用率,可采用功率分配方式或不同通道连接不同天线,后者无信号损耗,更适合巷道覆盖;硐室密闭性较好,适合采用吸顶天线,相邻硐室可用功率分配方式增加吸顶天线数量,提升覆盖范围;工作面较开阔,适合采用全向天线覆盖,并使用定向天线和吸顶天线补充覆盖盲点。

2 井下无线通信系统的特点和应用

1) WiFi。WiFi技术设计目的是用于数据业务,特点是要求高带宽,但对实时性和移动性要求不高。WiFi技术井下覆盖距离短,有效距离不超过200 m; WiFi采用的是小区无线机制,设计上不考虑移动切换问题,即 WiFi 终端需先与当前基站中断连接,再重新搜索新的基站,因此 WiFi 终端无法保证无线通信的移动性和实时性,移动通信存在断续问题;由于 WiFi 标准设计没有定义语音业务,为了实现终端语音通话,需要封装基于 IP 的语音传输 (Voice over Internet Protocol, VoIP) 功能,开销大,延时高,通话质量差;缺乏专业的 WiFi 语音终端,终端兼容性差,终端可靠性和可延续性得不到保障^[7]。 WiFi 适用于以无线数据通信应用为主、语音应用较少、对移动通信质量要求不高的场景。

WiFi6是一种新的 WiFi 标准,数据传输速率高达 9.6 Gbit/s,具有如下特点:采用正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 技术保障数据传输,速度更快;采用多用户多入多出 (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output, MU-MIMO) 技术允许更多终端同时通信;采用目标唤醒技术减少终端射频发射次数和信号搜索频率,减少电量消耗,提升设备续航时间。 WiFi6 比之前的 WiFi 版本更加适应井下无线通信需求,并可用于智慧矿山宽带无线通信^[8-9]。

2) 小灵通。小灵通初期应用于企业专网、区县范围的区域移动通信,优点是基站发射功率低,体积小,功耗低,易改造成为本质安全型防爆基站,适合煤矿井下移动语音应用。缺点是采用铜缆传输,传输距离不超过 5 km,以语音业务为主,数据业务能力不足。小灵通在 2009 年前曾在煤矿井下大量部署^[10],3G 井下无线通信系统出现后退出煤矿行业。

3) 3G。相对于 WiFi 和小灵通,3G 通信呈现高速移动、宽带数据、视频通话等新特点,给矿山移动互联网和物联网应用提供了必要的网络基础^[11-13]。煤矿无线通信自 2009 年开始进入了移动数字化时

代,当时在煤矿井下大规模使用的主要有时分同步码分多址(Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access, TD-SCDMA)制式和宽带码分多址(Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA)制式。

TD-SCDMA 是中国主导的 3G 标准,网络设备和手机终端全部实现国产化,没有专利陷阱。TD-SCDMA 在相同频带内的时域上划分不同时段(时隙),上下行双工通信,时钟同步要求较严格。由于煤矿井下难以引入 GPS/北斗的时钟信号源提供时钟同步,当时井下 TD-SCDMA 基站全部是使用专用光纤的射频拉远单元。

WCDMA 作为 3G 时代产业链最成熟、网络部署最广泛、终端最丰富的技术,相关网络设备及终端均有强力的支持。WCDMA 采用频分双工进行双工通信,当时井下 WCDMA 基站全部是接入以太网的飞基站。

4) 4G。煤矿井下 4G 通信网络 2015 年开始建设,4G 提高了速率和带宽,统一了制式,终端兼容,产业链丰富,生命周期长,完全适合煤矿井下无线通信需求,对井下无线通信系统来说是一次历史性的转变^[14]。

5) 5G。5G 具有超高的传输速率和用户密度、海量终端连接、超低时延、超高移动速度等。随着 5G 大规模商用,国家也在大力推动煤矿行业 5G 通信系统建设,5G 已经成为了智能矿山的重要组成部分^[15-16]。

井下 5G 无线通信系统在网络建设模式、语音支持、业务应用方面的特性如下。

网络建设模式: 目前井下无线通信系统实际建设中主要是 5G 混合专网与 5G 独立专网。煤矿企业希望拥有安全可靠的自主 5G 专网系统,完全能够自己管控。理想模式下,可采用专有无线设备和核心网设备构建一张增强带宽、低时延、物理封闭的无线网络,实现用户语音通话与运营商公网完全隔离,且不受公网影响。

语音业务实现: 在井下无线通信系统中,语音通信仍然是最基础的业务需求。4G 无线通信系统采用的是长期演进语音承载(Voice over Long-Term Evolution, VoLTE)方式, WiFi 采用的是 VoIP 方式,按照规范定义,5G 可采用新空口承载语音(Voice over New Radio, VoNR)方式。测试表明,VoLTE/VoNR 的语音通话质量优于 VoIP 方式,是首选方案。在井下无线覆盖中,目前大部分厂家的语音解决方案仍然延续了公网方式,通过 4G/5G 双模方式

实现,增加了系统的部署复杂度与成本。5G 独立组网时,单网提供 VoNR 语音业务是需要尽快解决的问题,而在 4G/5G 混合组网时,需要实现 4G/5G 共用 IP 多媒体子系统(IP Multimedia Subsystem, IMS),研究 4G 与 5G 之间 VoLTE 语音与 VoNR 语音的无缝切换问题。

业务应用: 移动语音和数据通信、高清移动视频监控与远程控制等业务已开始在井下推广应用,智能掘进、智能工作面等生产作业流程已经实现了与 5G 的结合^[17-19]。

3 目前面临的问题

3.1 技术融合问题

随着煤矿信息化、自动化及智能化的发展,各类监测监控系统在煤矿大量使用,各类通信技术也被广泛应用,如 RS485、CAN 等总线技术,工业以太网、光纤网等有线通信技术,4G、5G 及 WiFi 等无线通信技术^[20]。这些通信技术均具有各自的特点及在某些特殊场景下的应用优势,短时间内难以统一为一种技术。各类通信技术之间的互联互通存在一定壁垒,制约了煤矿智能感知的发展进程。因此,必须解决好各类技术的融合问题,使各通信系统能够及时有效地互联互通,实现井下各类工况、环境等信息的智能感知、智能决策和智能控制,推动煤矿智能化发展。

3.2 系统融合问题

煤矿应用系统包括煤矿安全监测监控系统、煤矿视频监控系统、煤矿灾害预警系统、煤矿安全隐患排查系统、煤矿动目标管理系统、煤矿供应链管理系统、办公自动化和应急预案管理系统等。随着智能化矿井的建设,需要这些系统能够实现信息共享,以便进行多源信息融合及综合利用,为矿井安全生产、协同作业、灾害预警、智能决策等提供数据支撑。但是,由于各系统由不同厂家提供,应用软件虽然可满足用户需求,但软件质量参差不齐,没有形成行业规范;各系统通信协议及硬件接口不一致,难以真正实现矿井各系统数据共享,严重影响了煤矿各系统的综合感知、信息交互及灾害预警能力,阻碍了煤矿信息化、智能化的发展进程。

3.3 设备功耗问题

煤矿井下环境特殊,在设备外壳防护、设备功耗、射频输出功率、设备最高表面温度等方面均有严格要求,只有符合相关国家标准、行业标准及规范并取得煤安证的产品才能在井下使用。5G、WiFi6 等新技术的多路射频输入输出等特性增加了设备功

耗,在矿用产品测试认证中存在大量新的挑战,如设备射频功率必须小于6W的问题^[21],设备本身功耗大带来的散热及壳体设计问题,设备的供电及后备电源设计问题等。现有矿用5G基站等由于设备本身功耗大,只能做功能单一的隔爆型产品,设备笨重、体积大,安装维护困难,制约了5G技术在矿井的普及推广。

4 煤矿无线通信系统的发展方向

4.1 多技术融合发展

未来智能矿山通信既要支持高清视频监控所需的高带宽传输,也要支持智能工作面远程遥控所需的低时延、高可靠传输,还要支持井下万物互联的海量终端用户连接功能。不同场景对带宽、时延、功耗、可靠性有不同要求,单一的通信技术难以满足煤矿所有应用场景的需求,必须根据实际应用情况,选择适合的通信技术来满足应用需求,如WiFi6用于视频监控,5G用于远程遥控,UWB用于精确人员定位等。不同技术通过协议转换器、网关等设备实现融合,形成井上下多技术融合的一体化通信网络平台,为煤矿智能化提供可靠、适用的通信保障。

4.2 多系统有机融合

未来的智能矿山需综合运用云计算、物联网、大数据、地理信息系统、人工智能、数字孪生等技术,实现多系统有机融合,满足煤矿智能化全面感知、自主决策和敏捷响应需求。煤矿通信系统除了为其他系统提供基础的互联互通保障,还要实现煤矿各系统异构数据的互通共享,打破煤矿各系统间的数据壁垒。煤矿通信系统应提供标准接口、开放的网络架构、统一的用户数据,为监控、应急、生产等系统提供互联互通功能,并进一步提供统一数据报文,让数据在各系统内低延时、高并发、实时、同步地流通。

4.3 设备本安化和低功耗设计

矿用隔爆型设备功耗高、体积和质量大,在井下使用不便,且不能全范围使用,开发矿用本质安全型基站是未来智能矿山无线通信系统研究的重点。无线通信基站的功耗主要包括基带处理主芯片运算耗电、射频模块耗电、功率放大模块耗电3个部分:①主芯片方面,可通过采用更低制程的主芯片提高算力,降低功耗,或通过ASIC芯片削减传统ARM架构下不需要的功能,实现紧凑架构,降低功耗,目前这2种方式都存在芯片研发瓶颈。②射频模块方面,可通过软件无线电、系统级芯片(System on Chip, SoC)等减少射频模块的工作量,降低功耗,SoC是将部分功能分配给主芯片,还是依托芯片能力,短期内

仍存在芯片自主化困难。③功率放大模块方面,可研制外置功率放大器,通过多制式功率放大器与主站分离设计,分摊功耗,同时研发多频段多入多出本质安全型矿用天线等设备,形成包括一站多制式多功能的本质安全型基站、多制式多频段本质安全型外置功放、多频段多入多出本质安全型矿用天线在内的整套全业务低功耗本安解决方案,推进无线通信基站的低功耗、本安化、多业务化研究。

5 结语

煤矿井下无线通信技术随着地面通信技术的发展而不断演进,从小灵通、WiFi、3G到4G、5G,每一代无线通信技术都解决了当时矿井最主要的通信需求,促进了煤矿通信技术的发展。目前5G、WiFi6在传输速率、时延、可靠性及用户容量方面具有较大技术优势及较好的适用性,是现阶段矿用无线通信技术的主流解决方案。随着煤矿智能化的推进及通信技术的发展,多技术融合、多系统有机融合、设备本安化和低功耗设计等将成为当前井下无线通信系统的发展方向。

参考文献(References):

- [1] 国家发展改革委,国家能源局,应急管理部,等.关于印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的通知[EB/OL]. [2023-05-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/05/content_5487081.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Emergency Management, et al. Notice on printing and distributing *The guiding opinions on speeding up the intelligent development of coal mines*[EB/OL]. [2023-05-30]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/05/content_5487081.htm.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局,中央网信办,等.关于印发《能源领域5G应用实施方案》的通知[EB/OL]. [2023-05-30]. http://www.nea.gov.cn/2021-06/11/c_1310003081.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Office of the Central Cyberspace Affairs Commission, et al. Notice on printing and distributing *Implementation plan for 5G application in the energy field*[EB/OL]. [2023-05-30]. http://www.nea.gov.cn/2021-06/11/c_1310003081.htm.
- [3] 工业和信息化部,中央网信办,国家发展改革委,等.关于印发《5G应用“扬帆”行动计划(2021—2023年)》的通知[EB/OL]. [2023-05-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/13/content_5624610.htm.
Ministry of Industry and Information Technology, Office of the Central Cyberspace Affairs Commission,

- National Development and Reform Commission, et al. Notice on printing and distributing 5G application "sailing" action plan (2021-2023) [EB/OL]. [2023-05-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07-13/content_5624610.htm.
- [4] 李伟宏. 矿用4G与5G融合系统解决方案研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(增刊2): 78-80.
LI Weihong. Research on solution of mine 4G and 5G integration system[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(S2): 78-80.
- [5] 孙继平, 张高敏. 矿用5G频段选择及天线优化设置研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(5): 1-7.
SUN Jiping, ZHANG Gaomin. Research on 5G frequency band selection and antenna optimization setting in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 1-7.
- [6] 孙继平, 李继生, 雷淑英. 煤矿井下无线通信传输信号最佳频率选择[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005(3): 378-380.
SUN Jiping, LI Jisheng, LEI Shuying. Choice of optimal frequency for radio communication in mine tunnel[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005(3) : 378-380.
- [7] 王国法, 赵国瑞, 胡亚辉. 5G技术在煤矿智能化中的应用展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 16-23.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, HU Yahui. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 16-23.
- [8] 孙继平, 陈晖升. 智慧矿山与5G和WiFi6[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 1-4.
SUN Jiping, CHEN Huisheng. Smart mine with 5G and WiFi6[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 1-4.
- [9] 孙继平. 煤矿智能化与矿用5G[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 1-7.
SUN Jiping. Coal mine intelligence and mine-used 5G[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8) : 1-7.
- [10] 朱彤, 汪旭东. 煤矿井下小灵通无线通讯系统优化探析[J]. 科技展望, 2016, 26(6): 9.
ZHU Tong, WANG Xudong. Optimization analysis of wireless communication system of PHS for underground coal mines[J]. Technology Outlook, 2016, 26(6): 9.
- [11] 张波, 王维维. 3G无线通信系统在煤矿的应用[J]. 山东工业技术, 2016(13): 159.
ZHANG Bo, WANG Weiwei. Application of 3G wireless communication system in coal mine[J]. Shandong Industrial Technology, 2016(13): 159.
- [12] 王小红. 基于3G网的煤矿安全智能监控系统研究[J]. 煤炭技术, 2012, 31(11): 123-124.
WANG Xiaohong. Based on 3G network intelligent monitoring system of coal mine safety[J]. Coal Technology, 2012, 31(11): 123-124.
- [13] 秦霖. TD-SCDMA技术在煤矿安全生产中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(6): 834-836.
QIN Lin. Application of TD-SCDMA in safe coal mine production[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2011, 30(6): 834-836.
- [14] 霍振龙, 顾义东, 李鹏. LTE通信技术在煤矿的应用研究[J]. 工矿自动化, 2016, 42(1): 10-12.
HUO Zhenlong, GU Yidong, LI Peng. Application research of LTE communication technology in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(1): 10-12.
- [15] 李凤英, 季现伟, 张维国, 等. 智能矿山5G技术发展与应用场景分析[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(4): 89-92.
LI Fengying, JI Xianwei, ZHANG Weiguo, et al. Development and application scenario analysis of intelligent mine 5G technology[J]. China Mine Engineering, 2022, 51(4): 89-92.
- [16] 张丹枫. 基于5G技术智能矿山的应用分析[J]. 通讯世界, 2021, 28(6): 195-196.
ZHANG Danfeng. Application analysis of intelligent mine based on 5G technology[J]. Telecom World, 2021, 28(6): 195-196.
- [17] 杨海鹏. 基于5G网络的庞庞塔煤矿智能矿山建设研究[J]. 煤矿现代化, 2021, 30(4): 135-137, 140.
YANG Haipeng. Research on intelligent mine construction of pangpangta coal mine based on 5G network[J]. Coal Mine Modernization, 2021, 30(4) : 135-137, 140.
- [18] 孟峰, 徐煦, 薛国庆, 等. 5G+无人驾驶技术在国能宝日希勒露天煤矿智能化建设中的应用研究[J]. 中国煤炭, 2021, 47(增刊1): 172-182.
MENG Feng, XU Xu, XUE Guoqing, et al. Application research of 5G plus driveless technology in intelligent construction of China Energy Baorixile Open-pit Coal Mine[J]. China Coal, 2021, 47(S1): 172-182.
- [19] 丁慧霞. 5G技术在煤矿智能化建设中的应用展望[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(17): 154-156.
DING Huixia. Application prospect of 5G technology in intelligent construction of coal mine[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2022(17): 154-156.
- [20] 刘成武, 景东旭. 4G+5G+Wi-Fi6融合通信系统在煤矿井下的应用[J]. 现代矿业, 2023, 39(2): 164-167.
LIU Chengwu, JING Dongxu. Application of 4G+5G+Wi-Fi6 integrated communication system in coal mine[J]. Modern Mining, 2023, 39(2): 164-167.
- [21] 梁伟锋, 孙继平, 彭铭, 等. 煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 123-128, 163.
LIANG Weifeng, SUN Jiping, PENG Ming, et al. Research on safe power threshold of radio wave explosion-proof in coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 123-128, 163.