



文章编号: 1671-251X(2022)06-0001-05

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.17942

矿井无线通信系统现状与发展趋势

霍振龙^{1,2}

(1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015;

2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)

摘要: 矿井无线通信系统具备通信覆盖范围广、连接方便、移动性好、组建容易、设置和维护简单等优点,在矿井智能化建设中具有不可替代的作用。全矿井无线通信系统目前主要有 WiFi(IEEE 802.11b/g/n/ac), 3G, 4G, 5G, WiFi6(IEEE 802.11ax)系统,其中 3G 系统正逐步被替代,4G 和 WiFi 系统逐步减少,5G 和 WiFi6 系统目前为起步阶段,并将逐步成为主流。从技术要点、主要功能、应用情况等方面分析了 4G, 5G, WiFi/WiFi6 系统,指出各系统的优点和存在的不足:① 矿用 4G 无线通信系统在带宽和实时性指标方面无法达到高清智能视频和远程控制等应用场景的需求。② 5G 在多系统、多天线情况下存在无线发射信号的安全问题;5G 基站以隔爆兼本安型为主,质量大、体积大,使用不便且使用场合受限;5G 终端生态匮乏,通信模组价格高、功耗大,不具备规模行业应用条件;实际应用案例少,应用场景有待进一步挖掘。③ WiFi6 无线通信系统时延偏高、移动性和可靠性相对较低,加上手机终端不够成熟,影响了语音通话质量。基于上述分析,指出智能矿井对无线通信系统的需求为大带宽需求;低时延、高可靠需求;多接入需求;多系统多接口需求;位置信息需求。最后指出矿井无线通信系统未来发展趋势,即系统融合(无线通信和有线通信融合、无线通信内部融合、无线通信系统和其他系统融合)、通信定位一体化、设备本质安全、终端模组低功耗、协议接口规范化。

关键词: 智能矿井; 无线通信; 5G; WiFi; WiFi6; 系统融合; 通信定位一体化

中图分类号: TD655

文献标志码: A

Current situation and development trend of mine wireless communication system

HUO Zhenlong^{1,2}

(1. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;

2. Tiandi(Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: The mine wireless communication system has the advantages of wide communication coverage, convenient connection, good mobility, easy to establish, simple setup and maintenance, etc. It plays an irreplaceable role in the construction of mine intelligence. The whole mine wireless communication system mainly include WiFi(IEEE 802.11b/g/n/ac), 3G, 4G, 5G and WiFi6(IEEE 802.11ax) system. 3G system is gradually replaced. 4G and WiFi system are gradually reduced. 5G and WiFi6 system are at the initial stage, and will gradually become the mainstream. The 4G, 5G and WiFi/WiFi6 systems are analyzed from the aspects of technical points, main functions and applications. And the advantages and disadvantages of each system are pointed out in this paper. ① The main disadvantage of the mine 4G wireless communication system is that the bandwidth and real-time indicators cannot meet the needs of application scenarios such as high-definition intelligent video and remote control. ② The problems of 5G in practical use are listed as following points. In the

收稿日期: 2022-05-07; 修回日期: 2022-05-26; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2020-TD-ZD004)。

作者简介: 霍振龙(1965—), 男, 江苏常熟人, 研究员, 硕士, 长期从事煤矿通信、矿井人员定位管理等技术的研发工作, E-mail: hzl@cari.com.cn。

引用格式: 霍振龙. 矿井无线通信系统现状与发展趋势[J]. 工矿自动化, 2022, 48(6): 1-5.

HUO Zhenlong. Current situation and development trend of mine wireless communication system[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(6): 1-5.



增强视频

扫码移动阅读

case of multiple systems and multiple antennas, there is a security problem of wireless transmission signals. 5G base stations are mainly explosion-proof and intrinsically safe types, which are large in quality and volume. There are problems of inconvenient to use and limited in use. 5G terminal ecology is lacked. The communication modules are expensive and power consumption is high. It does not have the conditions for large-scale industrial applications. There are few practical application cases, and the application scenarios need to be further explored. ③ WiFi6 wireless communication system has high latency, relatively low mobility and reliability. The mobile phone terminal is not mature enough, which affects the quality of voice calls. Based on the above analysis, it is pointed out that the demand of intelligent mine for wireless communication system is the demand of large bandwidth, low latency, high reliability, multi-access, multi-system, multi-interface, and position information. Finally, this study points out the development trend of mine wireless communication system. The trend includes system fusion (wireless communication and wired communication fusion, wireless communication internal fusion, wireless communication system and other system fusion). It also includes communication and positioning integration, equipment intrinsic safety, terminal module low power consumption and protocol interface standardization.

Key words: intelligent mine; wireless communication; 5G; WiFi; WiFi6; system integration; communication and positioning integration

0 引言

煤矿井下通信系统按技术形态主要分为有线通信系统和无线通信系统两大部分。无线通信系统与有线通信系统相比具备通信覆盖范围广、连接方便、移动性好、组建容易、设置和维护简单等优点,在矿井智能化建设中具有不可替代的作用。矿井无线通信系统主要承载矿井语音、图像和数据传输功能,主要应用于移动通话、移动视频、设备远程控制和传感器数据传输等。矿井无线通信系统可分为全矿井无线通信系统和局部无线通信系统(装置)两大类:全矿井无线通信系统传输带宽大、覆盖范围广,一般布置在井下巷道、硐室和采掘工作面等作业点,满足矿井语音、图像和部分数据的接入需求,如 4G, WiFi(IEEE 802.11b/g/n/ac), 5G, WiFi6(IEEE 802.11ax)等系统;局部无线通信系统(装置)主要解决矿井局部区域传感数据采集上传和局部语音通信的需求,如漏泄通信、中频感应通信、ZigBee 和 UWB 等系统(装置),也有将 WiFi 用于矿井局部通信的情况。本文主要讨论全矿井无线通信系统。

1 矿井无线通信系统现状

随着地面通信技术的发展,多种矿用无线通信系统在矿井得到规模应用,小灵通、CDMA2000、WiFi、TD-SCDMA、WCDMA 和 4G 等无线通信系统在不同阶段基本满足了矿井生产在语音、部分视频和数据方面的无线通信需求^[1]。但随着矿井智能化建设的不断推进,对通信的需求不断增加,除语音通信外,井下视频监控、环境监测监控、地质构造监

测、巷道数据采集、即时信息发布、井下视频会议、辅助运输管理、远程遥控作业等对无线通信系统在带宽、时延和连接数等方面提出了更高的要求,5G 和 WiFi6 系统也相继在煤矿投入使用。从全国范围来看,小灵通、2G 和 3G(CDMA2000, TD-SCDMA, WCDMA)通信系统已逐步被取代和淘汰,4G 无线通信系统、WiFi 无线通信系统使用较为普遍,而近两年新投入的 5G 和 WiFi6 无线通信系统目前还处于起步阶段。下面主要介绍 4G, 5G, WiFi/WiFi6 无线通信系统的现状。

1.1 4G 无线通信系统

4G 改进并增强了 3G 的空中接入技术,采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)和多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)作为其无线网络演进的唯一标准。4G 主要特点:在 20 MHz 频谱带宽下能够提供下行 100 Mbit/s 与上行 50 Mbit/s 的峰值速率,相对于 3G 网络大大提高了基站容量,同时大大降低了网络时延;内部单向传输时延低于 5 ms,控制平面从睡眠状态到激活状态的迁移时间小于 50 ms,从驻留状态到激活状态的迁移时间小于 100 ms。

矿用 4G 无线通信系统由核心网交换机、地面调度终端、地面基站、矿用本安型无线基站、矿用本安型手机和矿用数据终端等组成。

矿用 4G 无线通信系统主要功能:① 音视频通信。提供语音、视频、短信等业务通信功能^[2]。② 多媒体集群调度。支持语音、视频、短信、数据等集群调度业务及实时视频、数据回传分发功能,具有组呼、群呼、强插、强拆、会议、录音和监听等功能。

③ 视频监控。通过井下摄像仪及手机终端摄像并回传,实现实时视频监控。④ 数据传输。监测监控系统、人员定位系统及各种传感器数据的无线传输等。

矿用4G无线通信系统主要优点:① 组网灵活。4G采用全IP的分布式结构,融合性好,可与WiFi等不同无线技术在同一架构下实现融合、共存,并可方便地与采用软交换技术或IP-PBX交换机的有线网络调度通信系统融合,形成井上下有线无线一体化的综合调度通信系统。② 覆盖范围广。矿区地面基站覆盖半径不小于5 km,井下覆盖范围800 m,并能适应不同规模组网,大大减少基站数量,节约用户投资。③ 技术和产品成熟。经过多年的应用和完善,4G系统稳定性和对环境的适应性不断提高,终端设备相对丰富。

矿用4G无线通信系统主要缺点是带宽和实时

性指标方面无法达到高清智能视频和远程控制等应用场景的需求。

1.2 5G无线通信系统

5G是具有高速率、低时延和广连接特点的新一代宽带移动通信技术,是实现人机物互联的网络基础设施。国际电信联盟定义了5G的三大类应用场景,即增强移动宽带(Enhanced Mobile Broadband, eMBB)、超高可靠低时延通信(Ultra Reliable Low Latency Communication, uRLLC)和海量机器类通信(Massive Machine Type Communication, mMTC)。

5G和4G相比,传输速率提升10~100倍,峰值速率达10 Gbit/s,端到端时延达到毫秒级,连接设备密度增加100倍,流量密度提升100倍,能效提升100倍,频谱效率提升3~5倍,能够在500 km/h的速度下保证用户体验。5G与4G关键技术指标对比见表1^[2]。

表1 5G与4G关键技术指标对比

Table 1 Comparison of 5G and 4G key technical indicators

无线通信	用户体验速率/ (Gbit·s ⁻¹)	峰值速率/ (Gbit·s ⁻¹)	流量密度/ (Tbit·s ⁻¹ ·km ⁻²)	连接数密度/km ⁻²	空口时延/ms	移动性/ (km·h ⁻¹)	支持服务
4G	0.01	1	0.1	10 ⁵	10	350	VoLTE、高速网络数据
5G	0.1~1.0	20	10	10 ⁶	1	500	eMBB/uRLLC/mMTC

5G无线空口技术(Radio Interface Technology, RIT)方案基于3GPP新空口(New Radio, NR)和窄带物联网(Narrow Band Internet of Things, NB-IoT)技术。其中,NR重点满足eMBB,uRLLC场景的技术需求,NB-IoT满足mMTC场景的技术需求。

矿用5G无线通信系统主要由地面调度终端、地面5G核心网(5G Core Network, 5GC)、矿用基站控制器(Base Band Unit, BBU)、矿用网络集线器(Remote Radio Unit Hub, RHUB)、矿用基站射频单元(Remote Radio Unit, RRU)、矿用手机、矿用客户前置设备(Customer Premise Equipment, CPE)、光缆、光缆分/接线盒、矿用电源(也可与矿用基站、BBU、RHUB等构成一体)等组成^[3-4]。

5G在煤矿的可应用场景:① 超可靠、低时延通信。无人驾驶运输、设备远程操控、移动设备实时监控、煤矿机器人控制等。② 增强型移动宽带。井下视频监控、语音通信、广播调度、智能终端、虚拟矿山构建、混合现实采矿等。③ 低成本、低能耗、广连接。井下电子围栏、车辆运输管理、智能穿戴设备、安全系统监控、作业安全监控、人员精确定位等^[1]。

矿用5G无线通信系统的推广和使用目前仍处于起步阶段,终端方面(如5G手机、矿用CPE等)已取得相关煤安认证,具备了井下应用条件^[5],涉及

R16 NB-IoT的矿用产品暂未完成煤安认证。因此,5G在煤矿的实际应用场景相对有限,主要有以下方面:

① 远程控制。5G低时延特性结合多样化传感器和边缘计算技术,实现对煤矿井下综采、掘进、排水、通风、运输、变电等方面的集中远程控制管理,如智能综采工作面集中控制、智能掘进工作面集中控制和无人驾驶等。② 智能视频。部署矿用高清摄像装置,结合移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)连接视频智能分析平台,通过对视频的实时分析,对异常事件(如塌方、人员不戴安全帽等行为异常、设备运行异常等)进行探测并告警,实现对主运煤流的监测等。③ 综合调度。利用5G大带宽、低时延、广连接的特性,构建了集语音、数据、视频于一体的融合调度通信系统,扩展接入IP广播系统、人员监测、安全监测等行业应用,实现了多种应用场景的一网接入,为井下万物互联提供了通信平台,解决了当前各类系统之间相互独立、无法互通的问题。

5G具有传输速率高、时延低、并发能力强、可靠性高等优点,但实际使用中存在问题:① 多系统、多天线情况下,无线发射信号的安全问题。根据GB 3836.1—2010《爆炸性环境 第1部分:设备通用要求》,煤矿瓦斯气体环境中射频天线的发射功率不得超过6 W,导致无线覆盖范围小、设备投资高、

安装维护工作量大等问题,不利于推广。② 5G 基站以隔爆兼本安型为主,质量大、体积大,使用不便且使用场合受限。③ 5G 终端生态匮乏,通信模组价格高、功耗大,不具备规模行业应用条件^[5]。④ 实际应用案例少,应用场景有待进一步挖掘^[6]。

1.3 WiFi/WiFi6 无线通信系统

WiFi/WiFi6 是 IEEE 推出的无线局域网标准。IEEE 802.11 最初发表于 1997 年,其中定义了介质访问接入控制层和物理层,工作频段为 2.4 GHz,数据传输速率为 2 Mbit/s。随着通信技术的发展和通信需求的增长,IEEE 先后推出了 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, 802.11ax 等标准。

WiFi6 工作在 2.4 GHz 和 5 GHz 频段,和以往标准相比,在传输速率、并发数量、时延等方面有较大提升,峰值速率达 9.6 Gbit/s(160 MHz 带宽, 8T8R),每个接入点最多接入数为 1 024 个,并发用户数最大可达 72 个,网络时延不大于 20 ms^[7]。

WiFi/WiFi6 无线通信系统基于标准的工业以太网传输网络,组成结构相对简单,系统主要由 IP 调度交换系统、地面环网接入器、矿用环网接入器、矿用本安型无线基站、矿用本安型 WiFi 手机、矿用摄像头及其他配套设备组成,能实现矿区井上与井下的语音、数据、图像传输功能。目前 WiFi/WiFi6 无线通信系统主要用于以下方面:① 语音通话、语音调度。包括双向通话、组呼、群呼、强插、强拆、会议、录音和监听等。② 人员定位。利用场强大小和指纹特征等信息,判断手机持有人员所在大致位置。③ 视频传输。WiFi 的特点之一是大带宽,可实现相对低成本但时延要求不高的视频传输。

WiFi6 无线通信系统具有结构简单、成本低、传输速率高等优点,但时延偏高、移动性和可靠性相对较低^[7],加上手机终端相对不够成熟,影响了语音通话质量。

2 智能矿井对无线通信系统的需求

智能矿井是一个基于全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、协同控制的完整智能系统,需确保矿井在开拓、采掘、运通、分选、安全保障、生态保护、生产管理等全过程的智能化运行。具体来说,要实现全面感知,就离不开对环境和设备的监测感知,就会有大量传感器接入,传统的有线接入技术难以实现,会导致建设成本巨大、维护困难、网络可靠性差等问题;要实现工作面无人或少人化作业,就要实现采煤机自主运行或对采煤机的远程控制,其中涉及移动视频和控制信号的高可靠、低时

延无线传输;要实现自动驾驶、设备间协同控制等,就要实现精确定位。归结起来,智能矿井对无线通信系统的需求主要体现在以下方面:① 大带宽需求。满足移动视频监控、虚拟矿山构建、多媒体调度等大数据传输需求。② 低时延、高可靠需求。保证语音、高清视频的传输质量和远程控制功能的及时性和可靠性。③ 多接入需求。满足大量机电设备运行参数和环境参数等传感器数据的接入。④ 多系统多接口需求。满足环境监测监控系统、视频监视系统、IP 广播系统、信息发布系统及各种传感器接口的不同要求。⑤ 位置信息需求。人机作业安全、智能协同作业、无人化运输、井下机器人等应用都离不开对位置信息的需求。

3 矿井无线通信系统展望

智能矿井建设是一个不断渐进的过程,随着大数据、云计算、人工智能等技术的不断进步和矿井需求的不断提高,对无线通信系统的要求也将随之改变,目前主要体现在以下方面:

(1) 系统融合。① 无线通信和有线通信融合。要求制式上能够整合矿井有线通信、无线通信、广播等系统,支持手机、固话、IP 电话、4G/5G/WiFi 终端、会话初始协议(Session Initiation Protocol, SIP)广播终端等设备的接入,业务上能够实现数据、语音、视频等媒体的多制式融合通信。② 无线通信内部融合。不同应用场景对通信的要求各不相同,如对井下环境的感知需大量传感器接入,这时用 5G NR 模组就不是很适合,不仅体积大、成本高,而且功耗大,难以现场实施,而短距离无线通信技术(如 ZigBee, UWB 等^[8])就比较合适。③ 无线通信系统和其他系统的融合(多系统融合)。提供丰富的对接接口,可对接安全监测、风门监测控制和应急救援等系统,满足井上下人、机、环之间的快速信息传输与通信,辅助矿井安全生产与决策管理。无线通信系统作为矿井通信联络装备的主要组成部分,实现和其他系统的融合是必然趋势,除满足双向语音通信需求外,实现移动数据上传和指令有效下达。

(2) 通信定位一体化。矿井各类目标的精确位置信息对于建设智能矿井具有重要作用。一方面,井下各类动态目标的精确位置监测与实时跟踪能够有效提升矿井安全管理水平,另一方面,智能矿井少人和无人化发展趋势对井下采掘运装备的自主协同作业提出了明确需求,装备能够感知自身和相互的精确位置是实现自主协同作业的先决条件^[6]。目前大多有专门的定位系统(如 UWB 精确定位系统等),

若无线通信系统除通信功能外还具备定位功能,将能更好地满足矿井智能化建设需要。未来有2个途径:①通信系统和定位系统一体化设计,基站中既有通信的模组,也包含定位的模组,射频部分和天线部分视使用频段具体设计,可以是共用的,也可以是独立的。②直接利用通信系统实现定位功能,但目前精度有限(如5G系统),使用新的编码方式、波束赋形、大规模天线阵列、毫米波频谱等,有利于参数估计,为高精度距离和角度测量提供支持^[9],可望实现米级的位置监测。

(3)设备本质安全。矿用防爆型设备在瓦斯超限或停风情况下必须停电,不能在瓦斯超限和停风断电控制区域工作,而本质安全型设备适用于煤矿井下所有场所和瓦斯超限等条件^[3]。通信设备尤其是矿用通信设备最基本的要求就是不能断电,特别是在有灾害发生的情况下。因此,无线通信设备的本安化设计显得尤为必要。

(4)终端模组低功耗。无线通信系统的一大优点就是方便接入,但也带来了终端供电问题。为方便安装和日常使用,许多终端尤其是传感设备采用电池供电方式,要求更换周期6个月以上,这就要求终端模组必须是低功耗的。

(5)协议接口规范化。除了关键技术需要进一步研究外,作为智能化建设的重要基础设施,无线通信和定位相关技术规范与标准的制定、颁布也迫在眉睫,如涉及通信和定位的物理接口、空中协议、传输规范、数据交互等。

4 结论

(1)无线通信系统在智能矿井建设中的作用不可替代,主要体现在2个方面:①大量传感数据的接入。②移动场景下,大带宽、低时延智能视频的应用和低时延、高可靠控制信号的传输。

(2)全矿井无线通信系统目前主要有WiFi, 3G, 4G, 5G, WiFi6系统,其中3G系统正逐步被替代,4G和WiFi系统逐步减少,5G和WiFi6系统目前为起步阶段,并将逐步成为主流,这些系统以各自在性能和成本等方面的不同优势满足智能矿井建设的需求。在实际使用中,考虑到已有系统和设备的延续性,以及不同场景对无线通信系统性能的不同需求,不同系统不是直接替代的关系,往往并存使用,如5G+4G, 4G+WiFi及在此基础上再融合定位功能是目前较通用的做法。

(3)5G作为新一代无线通信技术,现有的产品主要面向地面场景需求,在煤矿井下的应用还需在网络架构、无线覆盖特性和功耗方面针对煤矿特点

进行完善和改进。

(4)在智能矿井建设中,无论是设备自主运行、环境智能感知,还是紧急救援实施,都依赖于准确的位置信息,另外,智能矿井的全面自主感知、实时高效互联、精准协同控制等都不是由单一的孤立系统独自完成的,因此未来的无线通信系统一定是满足通信定位一体化要求的融合系统。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 胡丹. 4G/5G无线链路及覆盖差异探讨[J]. 移动通信, 2019, 43(7): 86-90.
HU Dan. Discussion on the difference of 4G/5G radio links and coverage[J]. Mobile Communications, 2019, 43(7): 86-90.
- [3] 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.
- [4] 孟庆勇. 5G技术在煤矿井下应用架构探讨[J]. 工矿自动化, 2020, 46(7): 28-33.
MENG Qingyong. Probe on 5G architecture applied in coal mine underground[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(7): 28-33.
- [5] 顾义东, 孟玮. 煤矿5G无线通信系统建设构想[J]. 工矿自动化, 2021, 47(10): 1-6, 13.
GU Yidong, MENG Wei. Coal mine 5G wireless communication system construction concept[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(10): 1-6, 13.
- [6] 王国法, 赵国瑞, 任怀伟. 智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 34-41.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, REN Huaiwei. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 34-41.
- [7] 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.
- [8] 张文祥, 马银花. 短距离无线通信技术在煤矿井下的应用探讨[J]. 移动通信, 2009, 33(3): 144-146.
ZHANG Wenxiang, MA Yinhua. Application of short-distance wireless communication technology in underground coal mine[J]. Mobile Communications, 2009, 33(3): 144-146.
- [9] 欧阳俊, 陈诗军, 黄晓明, 等. 面向5G移动通信网的高精度定位技术分析[J]. 移动通信, 2019, 43(9): 13-17.
OUYANG Jun, CHEN Shijun, HUANG Xiaoming, et al. High precision localization technology for 5G mobile communication networks[J]. Mobile Communications, 2019, 43(9): 13-17.