分析研究

文章编号:1671-251X(2020)03-0001-05　　DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17553

5G 通信技术及其在煤矿的应用构想

霍振龙[1,2]，　张袁浩[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)

扫码移动阅读

摘要:近年来我国煤矿无线通信系统首选 WiFi 和 4G 通信技术,随着煤矿智能化建设的发展,现阶段煤矿无线通信系统的性能已无法满足煤矿智能化发展的各项需求。对比前几代移动通信技术,阐述了第五代移动通信技术(5G)关键技术及其性能优势;给出了矿用 5G 无线通信系统的组成及组网方式;结合 5G 通信技术特点和煤矿智能化发展需求,提出了 5G 通信技术在煤矿的应用场景,如井下无人驾驶及智能运输、全矿井位置服务、设备远程操控、故障远程诊断、大宽带业务数据传输、煤矿机器人云端控制、全矿井安全监测信息采集、虚拟现实/增强现实矿山等;指出针对煤炭行业的 5G 技术应用场景还需不断挖掘和完善,且由于 5G 网络对承载网要求较高,煤矿应预估部署成本,结合自身发展状况和需求搭建矿井 5G 通信网络。

关键词:矿井无线通信;5G;煤矿智能化;低时延;高带宽;安全监测监控

中图分类号:TD655　　文献标志码:A

5G communication technology and its application conception in coal mine

HUO Zhenlong[1,2],　ZHANG Yuanhao[1,2]

(1.CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;
2.Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract:In recent years, WiFi and 4G communication technology are preferred in coal mine wireless communication system in China. With development of intelligent construction of coal mine, the performance of coal mine wireless communication system cannot meet needs of intelligent development of coal mine. The paper described key technologies and performance advantages of the fifth generation mobile communication technology (5G) by comparing with previous generation mobile communication technologies. It also discussed composition and networking mode of mine-used 5G wireless communication system. Combined with characteristics of 5G communication technology and needs of coal mine intelligentization development, it put forward application scenarios of 5G communication technology in coal mine, such as underground unmanned driving and intelligent transportation, whole mine location service, equipment remote control, fault remote diagnosis, large broadband service data transmission, coal mine robot cloud control, whole mine safety monitoring information collection, virtual reality/augmented reality mine. It is pointed out that 5G technology application scenarios for coal industry still need to be continuously explored and improved, and since 5G network has high requirements for carrying network, coal mine should estimate deployment cost, and build mine 5G communication network based on its own development status and needs.

收稿日期:2020-02-11;**修回日期**:2020-03-04;**责任编辑**:盛男。

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,张袁浩.5G 通信技术及其在煤矿的应用构想[J].工矿自动化,2020,46(3):1-5.
HUO Zhenlong,ZHANG Yuanhao.5G communication technology and its application conception in coal mine[J].Industry and Mine Automation,2020,46(3):1-5.

Key words: mine wireless communication; 5G; coal mine intelligentization; low latency; high bandwidth; safety monitoring and control

0 引言

为满足煤炭工业安全生产对矿井无线通信的需求，自 20 世纪 80 年代起，我国先后研制并应用了矿井漏泄通信、感应通信、透地通信、PHS(小灵通)通信系统[1]。2010 年后，通信技术发展愈来愈快，煤矿无线通信系统的应用随时面临矿井特定工作环境和作业流程的制约，如：宽带要求，矿井提升机视频监控、采掘工作面实时移动视频；流动性要求，机车运输调度、巡检员等流动作业人员之间及巡检员和调度员之间的信号联络、对移动设备的数据采集等；即时性要求，设备及时维修、发生事故时组织紧急撤离和安全救护等。针对这些要求，各通信公司和研究院所科研人员经过不懈努力，先后研制出矿井 CDMA，WiFi，3G，4G 通信系统并成功推广应用。相较而言，能够保证较好的语音、图像、视频传输性能的 WiFi 和 4G 通信技术，近年来成为我国煤矿井下移动通信系统的首选，其性能基本满足煤矿井下开采主要业务的数据通信需求[2]。然而，煤炭行业对于先进通信技术的要求是不断存在且愈加苛刻的[3-5]。一方面，井下特殊环境不仅要求通信系统具有传输速率高、时延低、并发量大、可靠性高的特点，还对网络覆盖、传输功率、安全防爆、传输绕射、抗干扰等能力有特殊要求；另一方面，随着煤炭行业的发展及矿井智能化水平的提高，包括智能采煤、智能运输、矿井物联网、煤矿大数据、矿用机器视觉、煤矿机器人、虚拟现实(Virtual Reality，VR)等新兴技术的井下应用，井下各类数据趋向规模化和复杂化，现阶段煤矿无线通信系统的性能逐渐无法满足智能化发展的各项需求。矿井无线宽带通信是智慧矿山建设的关键[6]，5G 技术将突破传统无线通信技术在传输带宽、时延、连接数等方面的制约，搭建矿井 5G 通信网络将为煤矿智能化开采[7-8]、矿井物联网建设、煤矿大数据业务等方面提供高速率、低时延、大连接、高可靠的通信链路保障。

1 5G 关键技术及优势

1.1 5G 关键技术

面对多样化场景的极端差异化性能需求，5G 很难像以往一样以某种单一技术为基础形成针对所有场景的解决方案，5G 技术创新主要来源于无线技术和网络技术两方面[9-10]。在无线技术领域，大规模天线阵列、超密集组网、新型多址和全频谱接入等技术已成为业界关注的焦点；在网络技术领域，基于软件定义网络(Software Defined Network，SDN)和网络功能虚拟化(Network Functions Virtualization，NFV)的新型网络架构已取得广泛共识。此外，基于滤波的正交频分复用(Filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing，F-OFDM)、滤波器组多载波(Filter Bank Multicarrier，FBMC)、全双工、灵活双工、终端直通(Device to Device，D2D)、多元低密度奇偶检验(Q-ary Low-density Parity-check，Q-ary LDPC)码、网络编码、极化码等也被认为是 5G 潜在关键技术。

1.2 5G 技术性能优势

5G 关键技术的应用使 5G 通信系统的性能大幅提高，与前几代无线通信技术相比，5G 通信技术具有传输速率高、网络频谱宽、时延低、可靠性高、容量大等优势(表 1)。

表 1 2G/3G/4G/5G 通信技术性能对比

Table 1 Performance comparison of 2G/3G/4G/5G communication technologies

技术	理论峰值速率	用户体验速率	端到端时延/ms	连接数密度/km^{-2}	移动性/($km \cdot h^{-1}$)	支持服务	多址方式	信道编码
2G	384 kbit/s	—	600	—	—	数字通信	TDMA/CDMA	Turbo
3G	21 Mbit/s	440 kbit/s	200	—	200	高质量数字通信	CDMA	Turbo
4G	1 Gbit/s	10 Mbit/s	30～50	10^4	350	VoLTE、高速网络数据	OFDM	Turbo
5G	10 Gbit/s	100 Mbit/s	<1	10^6	500	eMBB/mMTC/uRLLC	F-OFDM/FBMC/PDMA/SCMA	LDPC/Polar

(1) 用户体验速率(真实网络环境下用户可获得的最低传输速率)：100 Mbit/s～1 Gbit/s。

(2) 连接数密度(单位面积上支持的在线设备总和)：$10^6/km^2$。

(3) 端到端时延(数据包从源节点开始传输到被目标节点正确接收的时间)：1 ms。

(4) 移动性(满足一定性能要求时，收发双方时间的最大相对移动速度)：500 km/h 以上。

(5) 流量密度(单位面积区域内的总流量)：10 $Mbit \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$。

(6) 用户峰值速率(用户可获得的最高传输速率):10～20 Gbit/s。

2　矿井 5G 无线通信系统架构

2.1　系统组成

矿井 5G 无线通信系统由核心网平台、地面 5G 基站、井下基站、井下 HUB 等组成,如图 1 所示。井上采用 AAU(Active Antenna Unit,有源天线单元)完成地面覆盖,通过 Ir 接口与 BBU(Building Baseband Unit,室内基带处理单元)相连;井下采用 Pico RRU(Remote Radio Unit,射频拉远单元)井下基站实现无线网络覆盖,井下基站通过井下 HUB 进行汇聚后,与井上 BBU 相连,传输接口为 Ir 接口。

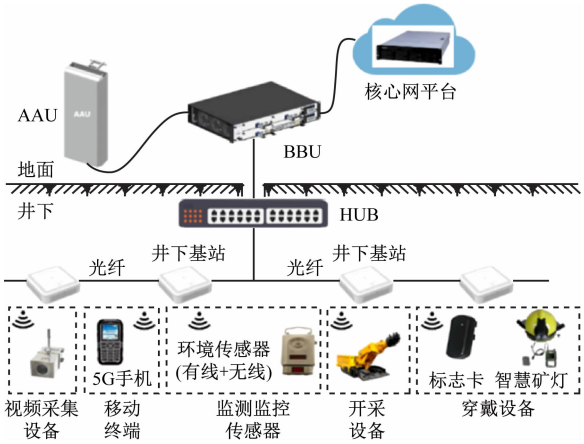

图 1　矿井 5G 无线通信系统架构

Fig. 1　Architecture of mine 5G wireless communication system

2.2　组网方式

5G 网络部署包含非独立组网(Non-Standalone,NSA)和独立组网(Standalone,SA)2 种方式[11]。NSA 是利用现有 4G 基础设施,融合 4G 核心网部署 5G 网络,并实现 5G 与长期演进(Long Term Evolution,LTE)联合组网,这种方式在演变过程中涉及核心网的切换和增强型 4G 基站的改造,初期建网速度快,成本相对较低,但灵活性较差,中后期部署工作量大;SA 则是重新搭建一张 5G 网络,所用基站和基础设施均要重新部署和建设,初期成本较高,虽然也可将现有的 4G 基站升级增强后与 5G 核心网连接,但 SA 架构的最终形态是 5G 基站连接 5G 核心网,不依赖现有的 4G 网络和基站设备,这种组网方式支持 5G 所有的新功能和新应用。矿井可依据现有无线通信系统的装备情况和对无线通信的需求选择合适的组网方式。

3　5G 通信技术在矿井的应用

从矿山智慧化发展的角度来看,要实现煤矿作业人员、环境和设备全面感知下的“万物互联”,“一网一站”的高速井下通信网络搭建,矿山关键设备远程控制,矿井上下实景三维模型虚拟仿真,矿山数据的深层次挖掘等应用,大数据、云计算、物联网、SDN、VR 和增强现实(Augmented Reality,AR)等数字化进程的关键技术,催生着煤炭行业不断创新,为煤矿智能化建设和煤炭企业安全生产提供了新的技术手段,而 5G 通信网络则将这些技术和矿井应用场景紧密连接起来。通过分析 5G 技术三大应用场景,初步认为 5G 技术的优势特点与煤炭行业智能化发展进程中对通信网络技术的需求相契合,5G 技术的三大应用场景均覆盖了井下通信技术发展和应用方向,见表 2。

表 2　5G 技术煤矿应用场景

Table 2　Application scenarios of 5G technology in coal mine

5G 场景	特点	煤矿应用场景
uRLLC	低时延、超可靠通信	井下无人驾驶、智能运输、智能开采、全矿井位置服务、设备远程操控、故障远程诊断、机器人控制、设备协同作业等
eMBB	增强型移动宽带、热点高容量	井下高清视频监控、语音通信、智能终端、VR/AR 矿山、混合现实采矿等
mMTC	低能耗、小数据量、大连接数	车辆运输管理、智能穿戴设备、安全监测信息采集、井下电子围栏等

3.1　井下无人驾驶及智能运输

井下无人驾驶对矿井无线网络的需求极高,而机器对机器之间的通信一直是无线通信网络的难题。目前,只有 5G 技术才能为井下通信网络提供充足的带宽、优良的服务质量、低时延及精确的定位能力。井下车辆行驶过程中,5G 技术的高速率能够实时对巷道大量 3D 地图数据进行转换,传感器数据的共享也将提升车辆的环境感知能力。通过 5G 网络及设备,车辆具备精确定位、安全监测、自主感知、主动避障、自动错车、风门联动等功能,实现井下运输车辆无人驾驶。

井下运输系统的自动化、信息化和智能化,需要在顶层对井下煤流、物料、人员运输整个过程中所涉及的运输车辆、运料装备、胶带、集装箱、调度装备、自动化转运装置及相关的运输对象进行整体协调,5G 技术将大规模、实时传输采集到的车辆、车皮、设备、煤流、物资及附近环境等相关参数信息,以提高车辆运输和设备运行效率,保证运输系统运转过程安全高效。

3.2　全矿井位置服务

目前井下定位系统或位置跟踪系统都是针对单一需求而设计,仅满足了矿井部分场合和局部的业务需求。井下作业的少人化和无人化发展对位置服务的需求日益显现,对井下位置服务系统的精度、容量和响应时间等指标都提出了更高的需求。5G 技术利用大规模天线、高频段通信等技术特征,为实现

高精度定位提供了技术保障。

3.3 设备远程操控

设备远程操控是智能开采的重要组成部分[12]，实现设备远程控制对网络实时性的要求极高，井下设备控制网络通信链路长、环境苛刻，5G 技术所提供的高可靠和超低时延的控制网络是保证井下设备正常运转的前提。同时，井下开采作业伴随着大量数据的生成，设备高精度传感器要采集掘进机、采煤机、液压支架等主要设备的实时状态参数信息，环境传感器要采集作业巷道环境参数信息，高清摄像头要采集工作面作业视频和煤壁图像。这些数据种类繁多、体量巨大、生成速度极快，必须依靠 5G 通信网络高带宽、低时延、高可靠、高连接的传输特性，才能在远端搭建实时同步的开采可视化模型，人员在地面利用可视化系统实时跟踪工作面现场场景，下达控制指令，实现设备及整套作业工序的智能远程控制。

3.4 故障远程诊断

井下设备故障远程诊断依赖 5G 网络的低时延和高服务质量保障特性，利用智能传感器实现设备状态实时监测，并与云端 AI 平台、数据库进行状态数据的分析和处理，对设备进行主动监测，提出定制化的诊断方案，维修人员不必专门前往井下判断设备故障类型，大幅降低了检修班工作强度。此外，5G 技术与 AR/VR 技术的结合应用，通过回传的现场高清视频，有望实现地面人员对井下设备的远程运维，或指导当班人员现场进行维修作业，如对检修设备进行远程操控，甚至不用人员下井就能完成故障修复。

3.5 大宽带业务数据传输

5G 技术可满足矿井高清视频监控服务对网络带宽的要求，井下大宽带业务数据来源于主要作业点，包括采掘工作面、进回风巷、主要运输巷道等重点视频监控区域，视频采集设备为作业点固定安装和搭载在各类巡检机器人上的高清摄像装置。基于人工智能的矿井视频监控将有效提高人员作业安全性，提升井下生产效率，其主要用于生产作业区域的人员违规识别、煤岩介质识别、煤流运输状况识别、煤矸分拣图像识别、作业安全质量识别、设备状态巡检等场景。此外，灾后救援现场的图像和视频也可用于指导开展救援工作。

3.6 煤矿机器人云端控制

灵活、可移动、高带宽、低时延和高可靠的通信网络是煤矿机器人实现安全协同生产作业的基本要求。未来煤矿井下需要更多的机器人代替人工进行各类作业，但每个机器人的计算能力有限。煤矿机器人云端控制即实时地将机器人获取的外部信息发送给云端，再将计算结果即时返回机器人，煤矿机器人自身只作为纯粹的执行器，计算资源部署在云端。5G 网络负责将煤矿机器人连接至云端“大脑”，其拥有的低时延特性满足云端处理和网络传输时间相加不超过 100 ms 的要求，高带宽特性为机器人提供足够的带宽(10 Gbit/s 以上)。

3.7 全矿井安全监测信息采集

目前井下感知设备和传输网络无法做到全矿井安全监测信息的泛在感知，如采空区等危险区域的环境监测未能有较好的解决方案。井下巷道、硐室和设备需要布置大量的感知节点，不仅要求终端具备低能耗、低成本、高安全性的特点，还对无线网络的连接数密度、传输速率和实时性有较高要求。5G 技术的低功耗大连接场景将端到端时延控制在 10 ms 以内，连接数密度达 $10^6/km^2$，满足全矿井安全监测信息采集的需求。井下环境监控、作业设备监控、人员体征监控、仪器仪表监控、通风及排水监控等系统均需要 5G 网络实现大规模感知节点的互联互通，用一张容纳海量传感器的网络实现全矿井安全监测信息的采集[13]，并接入移动边缘计算服务器，对所采集的信息进行分析和处理，结合云计算和人工智能等先进技术，回传数据处理结果。

3.8 VR/AR 矿山

VR、AR 技术在煤矿的应用主要有矿山模型可视化展示、教学和操作培训、仿真环境下施工和开采模拟、工作面设备作业规划和控制[14]、综采监测监控[15]、远程设备维修[16]等。基于 VR、AR 技术建立真正意义上的虚拟矿山模型需要采集所有井下实时更新的巷道环境和作业数据，通过激光测距仪等专业测距仪器获取的点云数据建立 3D 模型，通过大量传感节点获取实时环境参数和设备工况信息，从而真实、同步反映矿山数据的动态变化过程，建立矿井远程透明监控系统[17]。5G 技术所特有的低时延、高带宽使大量源数据持续不断地被用于对模型数据进行更新和校正，满足虚拟矿山构建的需要。

混合现实(Mixed Reality，MR)采矿是 VR 技术在煤矿应用的进一步发展，该技术通过在虚拟环境中引入煤矿现实场景信息，在虚拟矿山、现实矿山和煤矿作业人员之间搭起一个交互反馈的信息回路，所利用的技术包括 5G、物联网、精确定位，对井下全景信息进行准确模拟，实现全矿井生产、安全状况的实时监测。

4 结语

5G 通信技术具备优异的性能，是矿井无线通信发展的趋势；但是目前来看，相关产业链还不够完善，5G 网络架构、设备形态及部署方式均还存在一定的不确定性，针对煤炭行业的 5G 技术应用场景还需不断挖掘和完善，且由于 5G 网络对承载网要

求较高,煤矿应预估部署成本,结合自身发展状况和需求搭建矿井 5G 通信网络。

参考文献(References):

[1] 孙继平. 矿井宽带无线传输技术研究[J]. 工矿自动化,2013,39(2):1-5.
SUN Jiping. Research of mine wireless broadband transmission technology [J]. Industry and Mine Automation,2013,39(2):1-5.

[2] 任文清. 4G 无线网络通信技术在大柳塔煤矿的应用[J]. 陕西煤炭,2018(3):94-98.
REN Wenqing. Application of 4G wireless network communication technology in Daliuta coal mine[J]. Shaanxi Coal,2018(3):94-98.

[3] 孙继平. 矿井移动通信的现状及关键科学技术问题[J]. 工矿自动化,2009,35(7):110-114.
SUN Jiping. Present situation and key problems of science and technology of mine mobile communication [J]. Industry and Mine Automation, 2009, 35(7): 110-114.

[4] 孙继平. 现代化矿井通信技术与系统[J]. 工矿自动化,2013,39(3):1-5.
SUN Jiping. Modern mine communication technology and system[J]. Industry and Mine Automation,2013, 39(3):1-5.

[5] 孙继平. 煤矿安全生产监控与通信技术[J]. 煤炭学报,2010,35(11):1925-1929.
SUN Jiping. Technologies of monitoring and communication in the coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(11):1925-1929.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 葛世荣,王忠宾,王世博. 互联网+采煤机智能化关键技术研究[J]. 煤炭科学技术,2016,44(7):1-9.
GE Shirong,WANG Zhongbin,WANG Shibo. Study on key technology of internet plus intelligent coal shearer [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7):1-9.

[9] 余莉,张治中,程方,等. 第五代移动通信网络体系架构及其关键技术[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2014,26(4):427-433.
YU Li, ZHANG Zhizhong, CHENG Fang, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G mobile communication networks [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition),2014, 26(4):427-433.

[10] 赵国锋,陈婧,韩远兵,等. 5G 移动通信网络关键技术综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2015,27(4):441-452.
ZHAO Guofeng,CHEN Jing,HAN Yuanbing,et al. Prospective network techniques for 5G mobile communication: a survey[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition),2015,27(4):441-452.

[11] 朱颖,杨思远,朱浩,等. 5G 独立组网与非独立组网部署方案分析[J]. 移动通信,2019,43(1):40-45.
ZHU Ying,YANG Siyuan,ZHU Hao,et al. Analysis on deployment schemes for 5G standalone and non-standalone mode[J]. Mobile Communications,2019, 43(1):40-45.

[12] 田成金. 煤炭智能化开采模式和关键技术研究[J]. 工矿自动化,2016,42(11):28-32.
TIAN Chengjin. Research of intelligentized coal mining mode and key technologies[J]. Industry and Mine Automation,2016,42(11):28-32.

[13] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报,2017,42(1):1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1):1-7.

[14] 张旭辉,陈利,马宏伟,等. 煤矿掘进机器人虚拟仿真与远程控制系统[J]. 工矿自动化,2016,42(12):78-83.
ZHANG Xuhui, CHEN Li, MA Hongwei, et al. Virtual simulation and remote control system for coal mine roadheader robot [J]. Industry and Mine Automation,2016,42(12):78-83.

[15] 李昊,陈凯,张晞,等. 综采工作面虚拟现实监控系统设计[J]. 工矿自动化,2016,42(4):15-18.
LI Hao, CHEN Kai, ZHANG Xi, et al. Design of monitoring and control system based on virtual reality technology on fully-mechanized coal mining face[J]. Industry and Mine Automation,2016,42(4):15-18.

[16] 张旭辉,张雨萌,王妙云,等. 基于混合现实的矿用设备维修指导系统[J]. 工矿自动化,2019,45(6):27-31.
ZHANG Xuhui,ZHANG Yumeng,WANG Miaoyun, et al. Maintenance guidance system of mine-used equipments based on mixed reality[J]. Industry and Mine Automation,2019,45(6):27-31.

[17] 谢嘉成,王学文,李祥,等. 虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术,2019,47(3):53-59.
XIE Jiacheng, WANG Xuewen, LI Xiang, et al. Research status and prospect of virtual reality technology in field of coal mine[J]. Coal Science and Technology,2019,47(3):53-59.