

Li-Fi 在煤矿智能化中的应用

韩哲^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013)

摘要: 针对现阶段煤矿井下的无线通信技术无法满足高速率、低延时和广覆盖的智能化发展需求的形势, 介绍了可见光无线通信(Li-Fi)的工作原理和技术优势, 着重分析了煤矿 Li-Fi 网络系统的整体架构和 Li-Fi 在煤矿中的典型应用场景, 最后从 6 个方面展望了未来 Li-Fi 技术的研究方向。

关键词: 可见光无线通信; 第五代移动通信技术; 煤矿智能化; 应用场景

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)04-0007-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.04.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Application of Li-Fi in intelligent coal mine

HAN Zhe^{1,2}

(1. Coal Mining Research Institute Co., Ltd. of CCTEG, Beijing 100013, China;

2. Mining and Design Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In view of the situation that the wireless communication technology in coal mine can not meet the intelligent development needs of high speed, low delay and wide coverage, this paper introduces the working principle and technical advantages of light fidelity (Li-Fi), emphatically analyzes the overall architecture of Li-Fi network system in coal mine and the typical application scenarios of Li-Fi in coal mine, and finally looks forward to the future development of Li-Fi technology from six aspects research direction.

Key words: light fidelity; the fifth generation mobile communication technology; coal mine intelligence; application scene

0 引言

通信系统是煤矿最重要的系统之一, 在煤炭生产中占据着举足轻重的地位, 是实现数据驱动的智能化采煤的重要基石。煤矿井下人员定位及车辆无人驾驶等移动目标监测、硐室无人巡查、井下环境感知、采掘设备状态监测及控制、机械设备远程维护和透明矿井建设等智能化应用场景都需要大带宽、低延时的网络支持。井下无线通信先后采用过小灵通(PHS)、3G、4G、WiFi、LoRa、Zigbee 和 UWB 等通信技术, 主要用于实现井下语音、图像和数据通信功能。最新的第五代

收稿日期: 2020-09-04。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0603005)资助; 国家自然科学基金项目(51804158)资助。

作者简介: 韩哲(1989—), 男, 吉林榆树人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为综采工作面智能控制理论与技术、煤矿井下无线通信技术。参与“十三五”国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项“煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术”项目, 曾获得“中国煤炭科学技术奖三等奖”。



移动通信技术(5G)在煤炭行业处于初级应用阶段, 其通信架构、井下覆盖范围、成本和能耗等针对性的技术问题仍处于研究探索过程中^[1-2]。

在煤矿智能化信息基础设施建设过程中, 多种通信技术融合并存、优势互补能够有效克服煤矿应用的瓶颈, 高带宽网络、精准定位导航和多网络数据融合亦是下一代网络发展的必然趋势^[3]。可见光无线通信(Li-Fi)兼具无线和光的特性, 具有宽频谱、无电磁辐射、无电磁干扰和绿色节能等突出优势, 是未来 6G 网络蓝图中重要的组成部分^[4]。Li-Fi 可替代或补充现有短距离无线通信技术的劣势, 融合 5G、电力线通信(PLC)和人工智能(AI)等通信技术, 搭建矿井泛在通信网络。Li-Fi 打破了传统无线电通信技术的制约, 为搭建煤矿智能化工业互联网平台、煤矿大数据平台和矿井综合管控平台提供了高速、可靠的底层数据通信链路。本文将分析 Li-Fi 技术优势, 综述 Li-Fi 在煤矿智能化中的应用。

1 Li-Fi 概述

1.1 工作原理

随着发光二极管(LED)产业的快速升级、无线需求的井喷式增长以及 6G 研究的兴起,Li-Fi 技术得到了较好的发展机遇。Li-Fi 是可见光通信技术的无线应用,是由德国物理学家哈拉尔德·哈斯教授^[9]提出的。可见光具有 400 THz(380~780 nm)的巨大带宽,Li-Fi 系统通过在 LED 灯内植入芯片形成等同于无线接入点的设备,使终端接入网络;利用 LED 灯的快速响应特性发出不影响人类视觉的高速明暗闪烁信号,无需光纤、以太网等有线传输介质,在空气中直接传输光信号。Li-Fi 的关键元器件包括发射部件、接收部件和光学天线等^[9],其关键技术包括信道建模、调制、编码、均衡、复用、正交频分复用和多输入多输出(MIMO)等技术^[7],Li-Fi 原理图如图 1 所示。

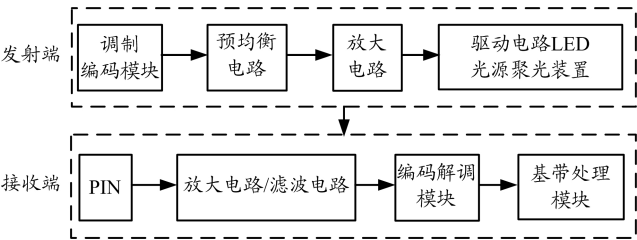


图 1 Li-Fi 原理图

系统调制编码模块将原始的数据信号进行编码调制,并对光信道衰落进行预均衡处理;预处理后的电信号经过放大电路放大,通过光源驱动模块与 LED 进行耦合实现信号的电/光转换,利用聚光装置增强光信号强度并将光信号发射进入自由空间信道传输;光信号由光电探测器 (PIN) 接收并实现信号的光/电转换;电信号经过放大电路和滤波电路进行信号放大和干扰预处理,然后由编码解调模块进行信号恢复和处理,最后基带处理模块完成信号的解调和解码,恢复原始发射信号^[8-10]。Li-Fi 信道包括上行链路和下行链路。在移动通信中,下行链路是指由集中点到分散点的传输链路,即照明灯基站到移动节点之间的链路,上行链路则与之相反。

1.2 技术优势

无线化是未来煤矿智能化演进的重要趋势,实现煤矿井下全域无线覆盖,以此支撑矿井下移动作业环节全面感知。目前,井下应用的无线与有线融合的通信技术不能满足通信需求,无线通信速率、稳定性等已成为制约井下信息技术发展的瓶颈,亟需探索具备高质量通信能力的、新的短距离无线通信技术,支撑

煤矿智能化发展。Li-Fi 特性如下:

- ①无电磁干扰。煤矿井下应用大量的电力电子设备,在使用过程中会产生一定的谐波和电磁干扰,将导致无线信号出现反射、绕射、遮蔽和干扰等现象,而光通信不受电力电子设备辐射影响。
- ②频谱丰富。可见光谱带宽远高于目前在用的无线频谱带宽,具备高速通信能力。射频信号频谱资源紧张,影响通信质量。可见光频谱的带宽是射频频谱的 1 万倍,无需考虑频谱互相干扰的问题。
- ③低成本、广覆盖。井下电缆敷设成本高,维护工作量大,可见光设备可复用现有照明电力线、环网,无需再新建基础设施,有利于系统的小型化、低成本设计。
- ④兼容性强。可与井下工业以太环网、5G 和电力线等有线网络结合;在井下不同的生产场景,实现广覆盖、高速和稳定的信息通信。

短距离无线通信技术主要参数对比如表 1 所示。

表 1 短距离无线通信技术主要参数对比

通信技术	常用工作频段	传输速率	覆盖范围	抗扰性	频宽
Li-Fi	380~750 THz	80 Mb/s~15.17 Gb/s	≤20 m	无干扰	100 THz
5G	运营商频段	1~10 Gb/s	远距离	一般	100 BW/area
4G	运营商频段	100 Mb/s~1 Gb/s	远距离	一般	—
WiFi6	2.4 GHz, 5 GHz	1201 Mb/s	≤100 m	一般	160 MHz
蓝牙 5.0	2.4 GHz	24 Mb/s	≤50 m	差	—
NBLoT	运营商频段	250 kb/s	远距离	一般	窄带
LoRa	433~915 MHz	50 kb/s	远距离	一般	窄带
UWB	3.1~10.6 GHz	480 Mb/s	≤20 m	差	1 GHz
Zigbee	2.4 GHz	250 kb/s	≤200 m	差	—
RFID	2.4 GHz	10 kb/s	≤5 m	差	—

近年来,国内外专家学者针对 Li-Fi 的异构网络融合技术、光学器件、反向链路技术和高速系统等关键技术进行了大量的研究,有效地促进了 Li-Fi 的发展。国内外已研发出不同于传统 LED 的新型可见光通信光源,包括基于 InGaN 的高速可见光激光器、超辐射 LED、硅基 LED 和 Micro-LED 等。与传统的光源相比较,Li-Fi 光源具有调制带宽更宽等特点^[11]。关于大气激光通信、光纤通信和室内可见光通信的异构融合网络也取得了一定的研究进展^[12-14],部分典型研究成果如表 2 所示。

表 2 近年国内外 Li-Fi 部分研究成果

序号	研究机构	年份	传输速度(非实时)	距离
1	德国 HHI	2011	803 Mb/s	12 cm
2	意大利 SSSUP	2012	2.1 Gb/s	10 cm
3	台湾交通大学	2013	3.22 Gb/s	25 cm
4	牛津大学	2016	10.4 Gb/s	1.5 m
5	复旦大学	2018	10.72 Gb/s	1 m
6	中科院	2020	1.393 Gb/s	3.3 m
7	复旦大学	2020	14.6 Gb/s	—
8	爱丁堡大学	2020	15.7 Gb/s	—

2 煤矿 Li-Fi 网络架构

Li-Fi 结合工业环网、工业光网、PLC、5G 和 WiFi 等技术^[15-18],形成泛在覆盖、高速传输、安全可靠、拓展灵活和节能绿色的煤矿智能化网络架构,如图 2 所示。在煤矿井下地质条件分为缓变区域和大变形区域,缓变区域包括主巷道、侧巷道和硐室(机电、设备、排水和供电等)等;大变形区域包括采煤工作面、掘进工作面等。根据不同的工作场景,采用不同模式的异构网络组网方式,为人员定位、智能穿戴、无人驾驶、硐室巡检、智能控制、远程设备维护和透明矿井等技术的实现提供网络支持,为实现煤矿智能化建设提供一种新型高速混合信息网络。

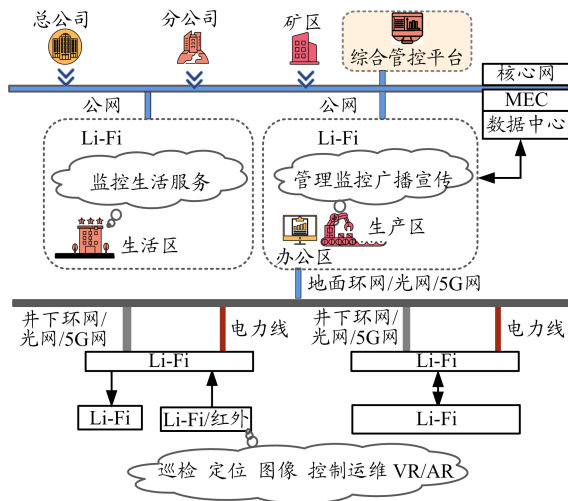


图 2 煤矿 Li-Fi 网络架构

3 Li-Fi 在煤矿的典型应用场景

3.1 定位服务

煤矿智能化建设的少人化和无人化对定位精度和完整性提出了更高的要求,井下人员及设备管理的信息化和智能化建设势在必行,各作业区域需实现人员及设备的动态跟踪、区域分布、行踪路线、灾后急

救、人员及车辆生产和考勤管理等位置服务功能。

目前煤矿井下主要的定位技术包括 UWB、蓝牙和 ZigBee 等技术,这些通信技术在设备群中受到电磁干扰,会造成极大的定位误差,无法满足精准定位的现实需求。在井下复杂的电磁环境下,Li-Fi 不受低频的电磁干扰,有灯光的区域即可提供通信服务,体现了 Li-Fi 的特殊优势,同时依托 PLC、5G 等主干网络,为实现高精度的井下位置服务提供网络支撑。Li-Fi 定位图如图 3 所示。

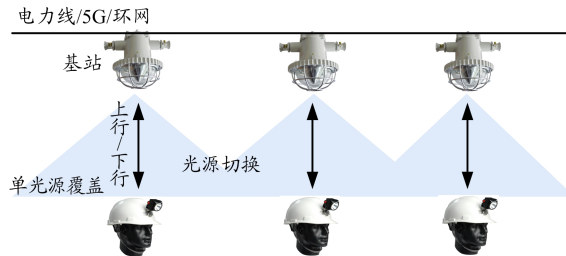


图 3 Li-Fi 定位

3.2 智能穿戴

目前应用的智能化矿灯功能仍需完善,不具备人员作业全面防护的能力。需提高井下作业人员穿戴的智能化水平,最大程度减少人员事故伤害,智能化穿戴设备(如图 4 所示)是未来井下的必备装备,在应急救援工作中将发挥重要的作用。基于 Li-Fi 的特点,利用图像视觉传感技术,实现井下作业人员、作业人员与地面生产调度进行实时双向通话,并具备拍照、图像传输及环境信息感知等功能,增强生产作业现场协同工作能力,实现作业人员安全数字化跨越。

3.3 无人驾驶

煤矿无人驾驶技术近年在露天矿区发展较迅速,但井工煤矿胶轮车、轨道运输车等无人驾驶技术发展仍较缓慢。智能化无人驾驶需要具备精准导航定位、路径调整、防冲撞、防脱轨、障碍物识别、上下车识别

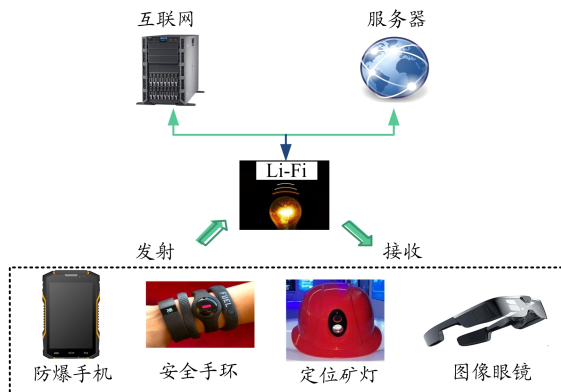


图 4 智能终端

韩哲:Li-Fi 在煤矿智能化中的应用

和紧急安全防护等功能,因此融合视觉、激光、雷达和 AI 等驾驶技术是实现井下无人驾驶和地面远程管控的关键。井下无人驾驶技术对低时延、高可靠和广覆盖的网络能力提出了需求。将数据通信与车辆信号灯相结合,应用 Li-Fi 的高速无干扰特性(如图 5 所示),极大提升视觉数据、传感数据的传输能力,形成地面与车辆、车辆与车辆间的数据实时共享、泛在连接,融合 5G 网络切片技术,实现井下车辆无人驾驶、远程干预运输模式。



图 5 无人驾驶场景

3.4 硐室巡检

煤矿井下包括机电硐室、设备硐室、排水硐室、打点硐室和躲避硐室等几十至上百个硐室,传统的人工巡检方式效率低。为减少巡检人员,近年来巡检机器人发展较快,已经具备了环境温度、气体含量、设备温度、烟雾预警、异物识别和红外检测等功能,但 AI 摄像机等新技术应用受制于网络带宽,未得到较好的推广应用。Li-Fi 通过电力载波技术实现照明线路和网络传输线路复用(如图 6 所示),将巡检机器人信息通过高速电力线传输至煤矿综合管控平台,其拥有低时延、高带宽的特性,为视频传输提供大带宽的传输信道,为实现泵房无人值守、自动化运行提供了更经济可靠的传输方式。

3.5 采煤工作面智能控制

智能传感器是采煤工作面实现智能化控制决策

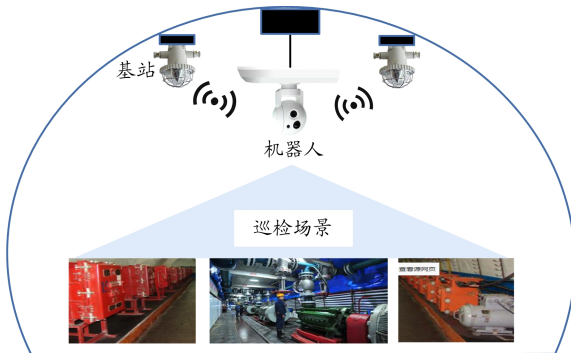


图 6 机器人巡检

的基础,包括液压支架的压力、姿态和推移行程等;采煤机的截割速度、滚筒高度、振动和扭矩等;输送机的负荷、振动和温度等;设备群空间位置、图像视觉分析、协同控制、环境感知和人员定位等应用。随着智能化工作面建设步伐的加快,更多的传感器将会被应用于综采设备群。目前的有线和无线传感器网络受设备群移动作业的影响,存在丢数据、高时延等现象,与智能化工作面的需求存在一定差距。通过在采煤设备、移动终端和在传感终端内布置 Li-Fi 照明通信基站(如图 7 所示),实现工作面无线链路网络覆盖;结合 WIFI6 技术,实现上、下行数据高质量传输;异构网络混合组网的方式为设备群空间位置定位、远程实时控制和虚拟交互提供更加稳定可靠的网络通道。

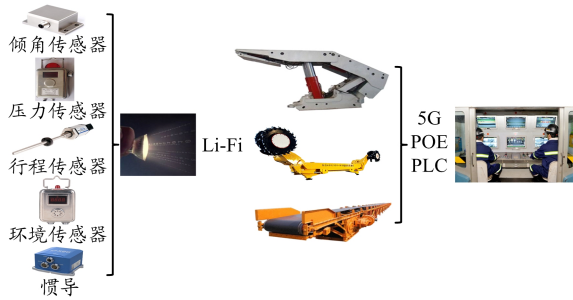


图 7 采煤工作面 Li-Fi 网络

3.6 远程设备维护

智能化煤矿井下设备规模大、种类多且维护量大,传统运行维护需要技术人员现场检修,设备数据关联性差,专家无法较好提供现场协助,不能及时消除设备隐患,运维成本较高。而 Li-Fi 网络可在远端专家和井下现场之间建立一条高速通道(如图 8 所示),通过基于低扰动、低延时信道的多源信息交融的交互式三维动态视景和真实行为的仿真系统,实现专家与现场技术人员同平台仿照式操作。

3.7 透明矿井

虚拟现实(VR)、增强现实(AR)和混合现实(MR)等多种技术区别于传统视频形式,具有沉浸式、可交互、虚拟数字和现实环境相结合等特性。VR、AR 或

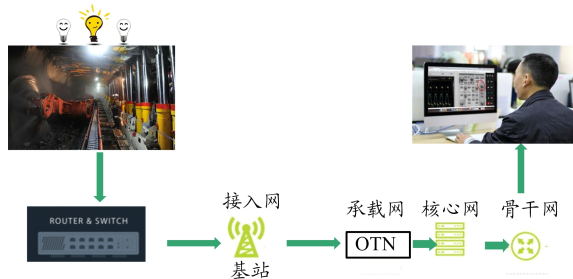


图 8 专家远程运维

MR 技术在智能化煤矿应用场景主要包括井下设备工况可视化展示、安全教育培训、实时联动仿真开采和远程运维等,通过感知网络获取实时环境参数和设备工况信息,从而同步实况反映井下数据的动态变化。要建设透明可视化矿井,需要更高速率回传网络、超低网络延时和边缘渲染计算处理能力。而 5G+Li-Fi 的融合网络(如图 9 所示)具有高速率、低延时、无电磁干扰以及边缘计算等特性,通过新型组网方式充分发挥云、网、边、端的能力,实现井下全景信息模拟、生产安全可视化监测。

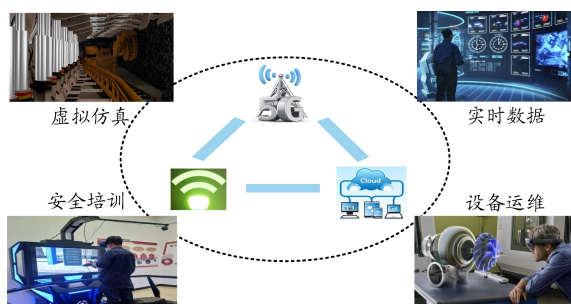


图 9 透明矿井虚拟场景

4 结束语

近年来, Li-Fi 发展迅速, 已应用于智慧家居、智慧交通和智慧展览馆等场景。Li-Fi 可适应煤矿智能化无线通信发展的需求, 将成为推动矿井传输网络革新的关键手段。但要在煤矿智能化建设中普及 Li-Fi 技术的应用, 针对煤炭行业的应用场景和网络性能还需要更深入地探索和研究, 具体研究方向如下:

①需要研究探索煤矿多网络协作通信整体架构, 包括 Li-Fi、5G、NBLoT 和 WiFi6 等集感知、通信、智能和计算一体化的网络架构, 促进 Li-Fi 异构网络的融合发展。

②需要有针对性地研究适应于井工煤矿恶劣环境下 Li-Fi 系统的光源分布、调制方法和信道模型等关键技术, 满足井下传输需求。

③井工煤矿工人作业需佩戴矿灯设备, 给 Li-Fi 上行链路提供了支持, 开展基于 Li-Fi 的智能化信息矿灯的研究可拓展 Li-Fi 在煤矿的应用; 井工煤矿固定设备, 如姿态传感器、视觉传感器等, 可研究相对成熟的 Li-Fi 和红外相结合的技术, 提供比射频频谱更大的工作范围, 来解决低传输速度的问题。

④探索适用于煤矿井下传输的 Li-Fi 融合红外或 WIFI 的传输切换模式, 研究异构网络的切换算法, 实现发射、接收端网络低延时切换。

⑤Li-Fi 对于墙体设备遮挡、井下煤尘和干扰光源等遮挡物问题, 需研究光的低损耗技术, 通过增强光的穿透能力来克服煤矿复杂多变的环境。

⑥为适应矿井大规模智能终端的应用, 深入研究 MIMO 通信技术来实现 Li-Fi 系统大容量、高质量的通信需求。

参考文献:

- [1] 孙继平. 煤矿信息化自动化新技术与发展 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 19-23.
- [2] 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.
- [3] 迟楠, 胡昉辰, 周盈君. 高速可见光通信技术的挑战与展望[J]. 中兴通讯技术, 2019(5): 56-61.
- [4] YANG P, XIAO Y, XIAO M, et al. 6G Wireless communications: vision and potential techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(4): 70-75.
- [5] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G Wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 28-41.
- [6] BURCHARDT H, SERAFIMOVSKI N, TSONEV D, et al. VLC: beyond point-to-point communication[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 98-105.
- [7] 迟楠, 石蒙, 哈依那尔, 等. Li-Fi: 可见光通信技术发展现状与展望[J]. 照明工程学报, 2019(1): 11-19.
- [8] 乔梁, 卢星宇, 梁尚雨, 等. MISO visible light communication system utilizing hybrid post-equalizer aided pre-convergence of STBC decoding[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(6): 38-42.
- [9] 迟楠, 乔梁, 赵嘉琦, 等. 基于可见光通信的 MIMO 技术研究现状[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(2): 113-122.
- [10] 迟楠. LED 可见光通信关键器件与应用 [J]. 互联网天地, 2015(8): 95-95.
- [11] 李志全, 谢锐杰, 王聪, 等. 基于白光 LED 可见光通信的音频传输系统[J]. 发光学报, 2016(7): 852-858.
- [12] 宋小庆, 赵梓旭, 陈克伟, 等. 可见光通信应用前景与发展挑战[J]. 激光与光电子学进展, 2015(8): 36-44.
- [13] 何胜阳. 室内可见光通信系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [14] 邓榆钦. 可见光 MIMO 通信系统预编码技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [15] 张汝岐. 可见光通信自适应信道均衡与可调光编码技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [16] ZHANG Tian, ZABIH G, SUJAN R, et al. OFDM-PWM scheme for visible light communications [J]. Optics Communications, 2017, 385: 213-218.
- [17] JIANG Rui, WANG Qi, WANG Fang, et al. An optimal scaling scheme for DCO-OFDM based visible light communications [J]. Optics Communications, 2015, 365: 136-140.
- [18] 余冰雁. 基于照明 LED 的室内高速可见光通信关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.