

引用本文: 丁举鹏, 易芝玲, 赵楷, 等. 工业无线光技术研究进展[J]. 光通信技术, 2022, 46(2): 35-40.

工业无线光技术研究进展

丁举鹏¹, 易芝玲², 赵楷¹, 王劲涛³, 阳辉³, 王丽丽⁴

(1. 新疆大学 信息科学与工程学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053;
3. 清华大学 电子工程系, 北京 100084; 4. 鲁东大学 信息与电气工程学院, 山东 烟台 264025)

摘要: 现有的绝大部分应用于各类工业环境无线解决方案是基于传统射频的技术范式, 存在电磁干扰、工业数据泄露等潜在风险, 众多研究机构正积极地将多样的无线光技术引入到工业智能场景。为了清晰阐述无线光技术在工业场景应用的研究进展, 分别从工业无线光多载波传输、多输入多输出(MIMO)传输、定位和原型通信系统实验这些方面进行了梳理, 初步给出了工业无线光技术进一步发展所要应对的主要技术挑战和潜在解决方案。

关键词: 工业无线光通信; 工业无线光定位; 工业无线链路

中图分类号: TN919 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)02-0035-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.02.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of industrial wireless optical technologies

DING Jupeng¹, I Chih-Lin², ZHAO Kai¹, WANG Jintao³, YANG Hui³, WANG Lili⁴

(1. School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China; 3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University,
Beijing 100084, China; 4. School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai Shandong 264025, China)

Abstract: The vast majority of existing wireless solutions applied to various industrial environments are based on traditional radio frequency technology paradigm, which has many potential risks such as electromagnetic interference and industrial data leakage. Many research institutions are actively introducing various wireless optical technologies into industrial intelligence scenarios. In order to clearly describe the research progress of wireless optical technology in industrial scene application, this paper combs the aspects of industrial wireless optical multi carrier transmission, multiple input multiple output (MIMO) transmission, positioning and prototype communication system experiment, and gives the main technical challenges and potential solutions for the further development of industrial wireless optical technology preliminarily.

Key words: industrial wireless optical communication, industrial wireless optical positioning, industrial wireless links

0 引言

智能工厂对工业生产设备在延迟量、可靠性和安

收稿日期: 2021-11-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62061043)资助; 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2019D01C020)资助; 新疆维吾尔自治区全职引进高层次人才项目(042419004)资助; 新疆维吾尔自治区天山雪松计划项目(2020XS27)资助。

作者简介: 丁举鹏(1985—), 男, 博士, 现任教于新疆大学。研究方向为无线光通信及组网、可见光通信及定位、光与无线的融合、物理层安全、空地海无线光通信、5G及B5G移动通信等, 主持国家自然科学基金(地区基金、青年基金)、新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目、新疆维吾尔自治区全职引进高层次人才项目和自治区天池博士计划项目等多项科研项目。



全性等方面提出了严格需求, 这对现有基于射频(RF)技术的工业无线技术是一种挑战^[1-8]。在最初的智能工厂及物联网集成场景中, 业界提出整合并使用包括射频标识(RFID)、无线局域网(WiFi)、移动网络和无线传感装置在内的多种无线技术来实现智能工厂的愿景。然而, 这几种无线技术必须面对信号衰落、多径传播、阴影效应和干扰问题等一系列劣化效应。

近年来, 无线光(WO)技术作为现有 RF 技术方案的重要补充获得了广泛关注和积极探索^[3-4]。WO 技术通过利用红外或可见光波来承载无线数据, 具有频谱资源丰富、保密性强、抗传统电磁干扰和免频谱授权等优势, 能够支持无线链路快速、独立部署, 无需对整个通信基础设施进行重新设计, 就可以整合 RF 和

丁举鹏, 易芝玲, 赵楷, 等: 工业无线光技术研究进展

WO 链路来构造混合解决方案^[5-7]。目前, 国际上工业 WO 及定位技术的研究与产业化、标准化的工作正在进行中, 针对工业环境 WO 技术的研究也取得了稳步的发展^[8-20]。结合工业领域 WO 技术的研究态势, 本文从工业 WO 传输、工业 WO 定位、传播特性和原型通信系统实验等方面进行介绍。

1 工业 WO 传输技术

为了实现工业数据的高效传输, 研究人员积极地将多载波和多输入多输出(MIMO)技术等先进传输架构引入到工业 WO 传输领域。其中, 多载波技术可以切实提升 WO 信道的频谱使用效率, 而 MIMO 技术则可以显著提升链路的整体可靠性。

1.1 多载波传输技术

德国弗劳恩霍夫电信研究院的 Klaus-Dieter Langer 的研究团队^[6]主要聚焦短距离和中等距离的工业 WO 系统, 其多载波传输系统采用基于正交频分复用(OFDM)的速率自适应传输方案, 信号所占用的信道被划分为更小的子频带(子载波), 而且信息的一部分被分配于彼此正交的子载波上。该方案采用一种比特分配算法为每个子载波选择调制尺寸, 其正交性使得接收端仅需要简单的均衡器即可实现。为了高效地利用信道动态性, 同时保持光组件尽可能简单, 该团队提出了系统的速率自适应设计, 如图 1 所示。在该 OFDM 系统的发送端, 通过快速傅里叶反变换操作完成 OFDM 符号的生成; 在接收端, 通过快速傅里叶变换操作完成 OFDM 符号的解调。由于已有面向快速傅里叶变换实现的专用集成电路, 因而 OFDM 是极具吸引力的多载波技术。

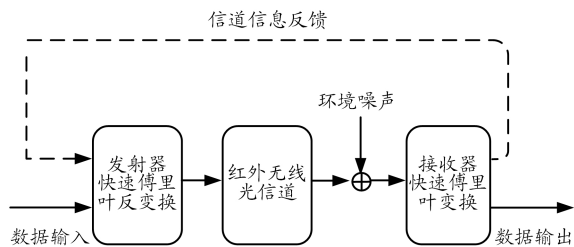


图 1 自适应信号处理支撑的工业 WO 多载波传输

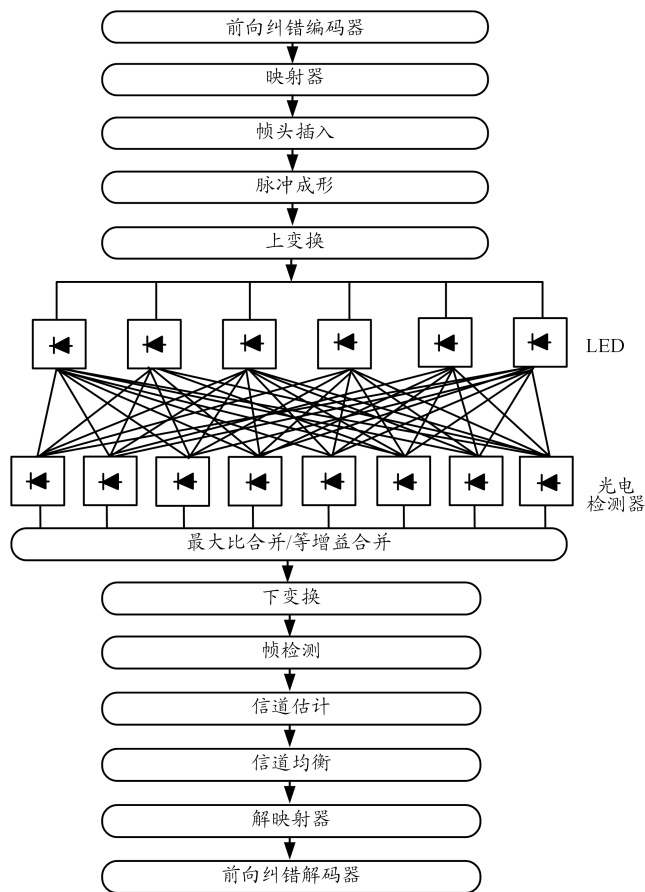
1.2 MIMO 传输技术

不同于室内 WO 场景, 工业 WO 应用经常需要为快速移动装置提供中等速率和微秒级的可靠连接。为应对上述挑战, 德国弗劳恩霍夫电信研究院与德国宝马集团^[7-9]合作提出了面向工业制造小区的 MIMO 分集方案。工业 WO MIMO 传输系统的应用场景和系统

架构图如图 2 所示。机器人被安放在小区的中心, 6 个 LED 发射器被固定于机器人机械臂末端, 8 个接收器被分布于机器人周围, 从而构造一个分布式 MIMO。在 MIMO 信道侦听过程中, 由于未使用透镜来增加信号覆盖, 接收器接收的功率较小。因此, 研究人员使用单独的正弦信号而非宽带导频信号来增加信道表征的灵敏度。测量结果表明: 在 5 m 长的视线链路(LOS)信道轨迹中, 首个 1.9 m 区间存在少量强信道; 接下来的 1.7 m 区间仅有多个弱信道; 轨迹的最后 1.4 m 区间仅有更少且更弱的信道可供 MIMO 传输使用。因此, 沿着轨迹位置的微小变化可以导致 LOS 信道分量的显著改变。为实现可靠的 WO, 必须使用多个发射器和接收器。



(a) 应用场景图



(b) 系统架构图

图 2 工业 WO MIMO 传输系统应用场景和系统架构图

2 工业 WO 定位技术

2.1 机器人定位技术

基于室内机器人平台, 香港科技大学的研究人员^[10]完成了高精度移动机器人定位展示。在机器人定位系统中, 每个智能发光二极管(LED)使用无线控制模块生成一个独一无二的标识号(ID), 蓝牙低功耗片上系统(SoC)被用作定位 LED 的无线控制系统。具体地, 智能 LED 被用于 WO 信号传输; 安装于机器人上的摄像头被用于捕获 LED 的图像, 然后采用 ID 识别算法根据捕获的图像来确定所检测的 ID 信息, 完成 LED ID 光条形码与标识信息之间特征匹配。

此外, 面向移动机器人定位需求, 泰国研究人员^[11]提出了整合接收信号抵达角度(AOA)和接收信号强度(RSS)的定位方法, 即 AOA-RSS 定位方法。该方法利用 2 种方法各自的优势, 仅需简单硬件和算法就可获得高准确性定位, 定位精度为 20 cm。后来, 研究人员借助扩展卡尔曼滤波器(EKF)和粒子滤波器(PF)改进上述 AOA-RSS 定位方法, 并获得了厘米级定位精度^[11]。

2.2 无人机定位技术

针对典型工业环境, 英国曼彻斯特城市大学的研究人员^[12]研究了室内飞行接收器(无人机)的覆盖区域和定位盲区。为了实现准确定位, WO 定位需要捕获超过 2 个发射器的信号。然而, 来自发射器的信号并非总是能被接收器捕获, 尤其是在靠近工业环境墙体的边缘区域(盲区), 导致定位不准确。仿真结果表明: 由盲区造成的信号损失与发射器的发散角、接收器的视场角(FOV)密切相关, 当 $FOV=85^\circ$ 且具有 4 个 WO 发射器时, 无人机的最大定位高度可达 7.8 m, 而且不会遭遇任何定位盲区。

另一方面, 针对工业仓库环境, 上述研究团队重点研究了环境反射效应对无人机 WO 定位的影响。研究显示: 在 $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 4.1\text{ m}$ 测试区域, 即使不掌握接收器的高度, 所提出的基于 RSS WO 定位系统也能实现 10.5 cm 的中等定位精度; 使用仓库存储架创造多径反射时, 将导致二维(2D)、三维(3D)定位误差分别增大 112% 和 69%; 线性最小二乘法(LLS)可以在靠近仓库存储架附近区域提供更佳定位表现; 凯莱门格尔行列式(CMD)定位算法可以实现较高的定位精度表现。

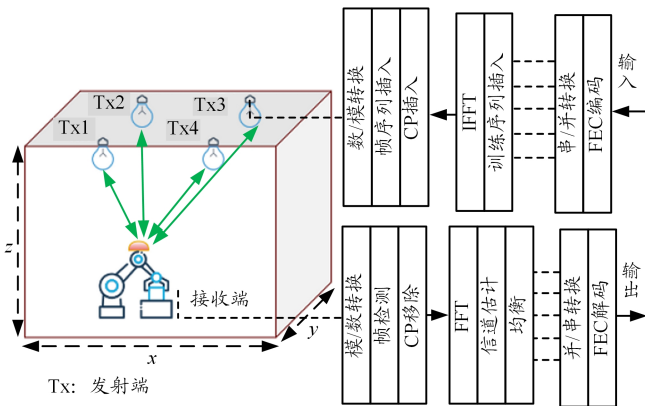
2.3 基于 OFDM 的定位技术

综合考虑 WO 高谱效传输和 WO 高准确定位表现, 德国弗劳恩霍夫及赫兹研究院的研究人员^[13]提出了基于 OFDM 工业 WO 定位的系统架构, 其信号处理

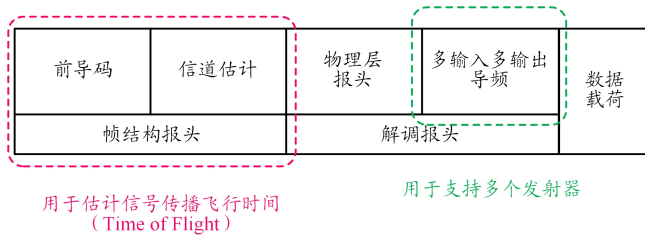
框图如图 3(a)所示, 展现了从多个发射单元到一个接收单元的 OFDM 传输过程。其中, 作为 OFDM 信号源生成器, 发射器以比特形式来产生信息流。这些比特被馈送到 OFDM 发射器, 并以前向纠错(FEC)作为数字信号处理的开始操作。接下来, 经过串/并变换操作, 面向频域的训练序列(TS)被插入到信号中用于信道估计。然后, 经过傅里叶逆变换(IFT)并添加周期前缀(CP)、帧序列插入和数/模转换操作, 信号被馈送到 LED 光源。在接收端, 信号经过模/数转换、帧检测、CP 移除、快速傅里叶变换(FFT)和信道估计等与发射器操作的逆向操作被用于接收信号。

该团队提出的室内定位系统的主要优势在于能够依托国际电信联盟电信标准化部(ITU-T)的推荐标准 G.9991, 从而与遵循该标准的众多供应商设备保持高度兼容性, 其系统帧结构如图 3(b)所示。其中, 基于飞行时间的定位算法能够利用帧同步前导码、信道估计前导码先后进行粗定时测量和精细同步测量。

在基于 OFDM 工业 WO 定位技术中, 为估计接收器的实际位置, 需要通过组合粗糙、精细时延估计来获取子采样精度的发射器与接收器间相对距离。为了获取传输信道的精准时延, 需要计算天花板上发射单元与移动接收单元之间的相对时延。该时延计算过程



(a) 信号处理框图



用于估计信号传播飞行时间
(Time of Flight)

用于支持多个发射器

(b) 系统帧结构图

图 3 基于 OFDM 收发器的

工业 WO 定位信号处理框图及相关帧结构图

丁举鹏, 易芝玲, 赵楷, 等: 工业无线光技术研究进展

分为 2 个阶段: 一是在 OFDM 调制解调器中, 通过帧起始检测来实现粗糙定时估计; 二是基于信道频响的相位斜坡完成精细定时估计。使用上述组合方式的前提条件是: ①为提供目标区域信号完全覆盖, 必须存在至少 3 个可见光发射器; ②通过所接收到的已发送分组获取粗糙定时信息; ③通过每个链路的信道频响获取精细定时信息。

3 工业 WO 传播特性及原型系统实验

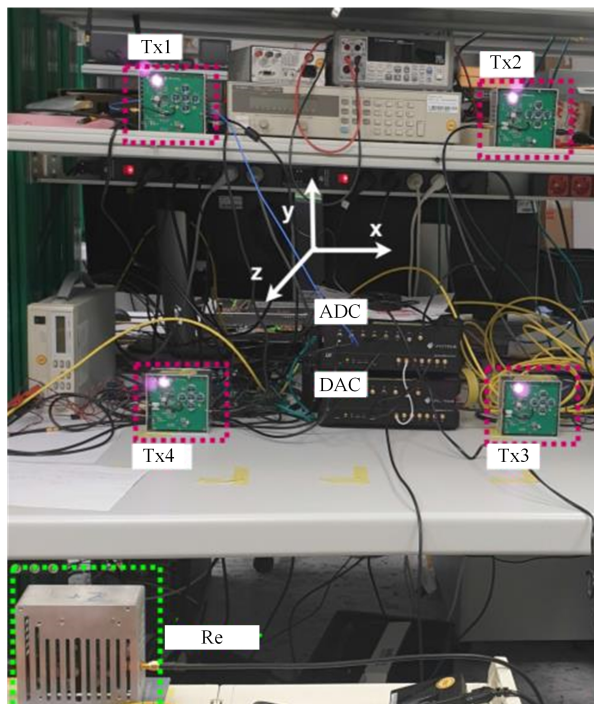
为了加快工业 WO 技术的研究进程和实用化程度, 充分度量影响 WO 信息系统的主要环境因素, 国际上诸多研究团队开展了一系列针对工业 WO 传播特性和原型实验的研究工作。

3.1 传播特性

在工业环境下, WO 是一类具备多样化潜力的技术。但是, 在恶劣的工业环境中, 一系列物理效应会对 WO 链路质量造成影响: 工业粉尘及其它颗粒会导致信号衰减的增加; 各种人造光源和工业处理过程(包括研磨、焊接等)都可能造成光串扰^[14]; 此外, 工业场景中众多的反射表面都会引起 WO 信号的多径传播, 并最终导致接收端的信号衰减。针对上述 3 类影响 WO 传播的工业环境因素, 德国 IOSB-INA 的研究人员^[14]在 5 个不同生产场地开展了 WO 传播特性测量及表征, 估计上述不同因素对 WO 传输的作用规律和影响程度。具体地, 研究人员借助光谱测量展示和证实了干扰光源的存在及其占据 WO 光谱的宽阔区间; 在电域, 此类干扰光源将引起由诸多频率集合构成的闪烁噪声。与此同时, 由环境及人造光源造成的串扰会同时影响光域和电域频谱分布。此外, 研究结果表明: 差异化制造过程会导致粉尘及衰减程度的差异, 不同工业区域对 WO 链路的影响明显不同。因此, 必须依据工业制造过程对不同区域进行分类表征, 并在工业 WO 系统设计过程中对此类环境效应进行充分考虑。

3.2 原型系统

国内及国际研究团队都相继公开了具有各自特色的原型系统。其中, 国家数字交换系统工程技术研究中心的研究团队^[15]提出了工业高压及低压电子设备之间指示状态的长距离 WO 传输系统, 如图 4 所示。该系统面向长距离衰落信道, 以单光子雪崩二极管 (SPAD) 作为核心器件。不同于已有众多 WO 研究工作, 该原型系统不再面向发射功率充足的应用场景, 而是聚焦于弱光点亮或指示的应用条件。在此类条件下, 作为指示器的 LED 光源仅能提供 10~30 mW 的发



Tx: 发射端 Re: 接收端 ADC: 模/数转换器 DAC: 数/模转换器

图 4 工业 WO MIMO 原型实验装置

射光功率。相应地, 接收端必须采用 SPAD 这一类具备高灵敏度和高检测效率的光电器件来构造 WO 接收器。相关原型性能试验表明: 尽管发射端发射光功率极为有限, 在 333.362 m 的长距离链路配置下, 接收端仍可以提供 100 kb/s 的传输速率, 误码率低于 1.22×10^{-3} 。

此外, 根据 SPAD 的时滞效应(一旦 SPD 检测到一个光子, 其将不再检测任何其它到达的光子, 直到光子熄灭过程完成), 研究人员^[15]提出了一项新的系统同步方案和一种快速盲联合检测算法。实验结果表明: 在不同应用配置条件下, 与传统未考虑时滞效应泊松多符号检测方法相比, 该方案与算法可以提供更优的表现性能。

德国弗劳恩霍夫研究院的研究团队^[13, 16-17]则致力于构建三维 WO 定位的原型系统。为了评估无线信道的真实距离, 必须对实验系统自身的固有时延进行补偿。此类时延主要来自数/模转换器 (DAC)、模/数转换器 (ADC)、不同的连接线和光前端装置。具体地, 为了简化测量过程, 研究人员将发射器和接收器通过同步电缆连接来保持恒定的时间同步, 分别从一维和更高维这 2 种情况进行 WO 定位性能测量。在仅包含单一发射器和单一接收器的简化配置、收发端保持 1.5 m 的间距条件下, 实验系统的测量偏差为 1~2 cm。在 1 m×1 m×2 m 服务区域, 该基于 G.9991 标准的定位原型系统平均距离误差为几厘米。

4 工业 WO 演进挑战

虽然面向工业环境下的 WO 技术研究已取得了一定的成效,但是,现有的工业 WO 技术的成熟度不高,离实际商用乃至大规模应用仍然面临诸多挑战。

目前,面向普通商用及家用的 WO 接入网络架构已经在国际上初步成形^[18-20],但是,此类架构主要是面向高清电视、智能手机和平板电脑等消费者电子终端,并非面向工业无线应用场景和种类多样的工业无线终端。同时,在传输时延、数据安全性和流量特性等诸多网络特性上也缺少面向工业无线互联的针对性设计。因此,在后续的研究工作中有必要开展面向工业 WO 组网特点的网络架构设计及优化工作。

此外,现有的工业 WO 系统设计仍然在很大程度上局限于传统朗伯光波束发射器的研究范式^[21-25],对于实际商用 LED 光源的众多非朗伯光波束空间特性缺少应有的重视和利用。为了充分论证已有工业 WO 使能技术对不同光波束配置的适应性,今后有必要提出针对性的优化设计方案,对不同光波束配置下的工业 WO 链路特性和传输表现开展针对性的表征和研究。

5 结束语

随着智慧工厂逐步从设想走向现实,工业 WO 技术必将取得长足的发展和应,使其具有的无电磁干扰、无有害辐射、保密性强、频谱资源丰富和传输容量大等优势得到充分利用。与此同时,由于 WO 技术在移动性、可靠性等方面面临关键挑战,需要针对性地研究解决方案,为其在严峻工业场景的大规模应用铺平道路。

参考文献:

- [1] VOLKER J, PABLO W B, ZSREELAL M, et al. LiFi for industrial wireless applications[C]//OSA. Proceedings of 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego: OSA, 2020: 1-3.
- [2] LINNARTZ J P, CORREA C R B, CUNHA T E B, et al. ELIoT: new features in LiFi for next-generation IoT [C]//IEEE. Proceedings of 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). Porto: IEEE, 2021: 148-153.
- [3] CHANGA S. A visible light communication link protection mechanism for smart factory [C]//IEEE. Proceedings of 2015 IEEE 29th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Gwangju: IEEE, 2015: 733-737.
- [4] TELI S R, ZVANOVEC S, GHASSEMLOOY Z. Optical internet of things within 5G: applications and challenges [C]//IEEE. Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS). Bali: IEEE, 2018: 40-45.

- [5] WU S, WANG H, YOUN C. Visible light communications for 5G wireless networking systems: from fixed to mobile communications [J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 41-45.
- [6] PARASKEVOPOULOS A, VUCIC J, VOB S, et al. Optical wireless communication systems in the Mb/s to Gb/s range, suitable for industrial applications [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(4): 541-547.
- [7] BERENGUER P W, SCHULZ D, HILT J, et al. Optical wireless MIMO experiments in an industrial environment [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(1): 185-193.
- [8] MANA S M, KOUHINI S M, HELLWIG P, et al. Distributed MIMO experiments for LiFi in a conference room [C]//IEEE. Proceedings of 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CNSDP). Bali: IEEE, 2020: 1-5.
- [9] BERENGUER P W, SCHULZ D, FISCHER J K, et al. Optical wireless communications in industrial production environments [C]//IEEE. Proceedings of 2017 IEEE Photonics Conference (IPC). Orlando: IEEE, 2017: 1-2.
- [10] WANG Y, GUAN W, HUSSAIN B, et al. High precision indoor robot localization using VLC enabled smart lighting [C]//IEEE. Proceedings of 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Francisco: OSA, 2021: 1-3.
- [11] NGUYEN N T, SUEBSOMRAN A, SRIPIMANWAT K, et al. Design and simulation of a novel indoor mobile robot localization method using a light-emitting diode positioning system [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2016, 38(3): 305-314.
- [12] ALMADANI Y, IJAZ M, RAJBHANDARI S, et al. Dead-zones limitation in visible light positioning systems for unmanned aerial vehicles [C]//IEEE. Proceedings of 2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Zagreb: IEEE, 2019: 419-421.
- [13] KOUHINI S M, KOTTKE C, MA Z, et al. LiFi positioning for industry 4.0 [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(6): 1-15.
- [14] DANIEL S, ABHIJEET S, HOLGER F, et al. Impact of industrial environments on visible light communication [J]. Optics Express, 2021, 29(11): 16087-16104.
- [15] CHAO W, HONG Y, YI Z, et al. Experimental study on SPAD-based VLC systems with an LED status indicator [J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28783-28793.
- [16] BERENGUER P W, HELLWIG P, SCHULZ D, et al. Real-time optical wireless mobile communication with high physical layer reliability [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(6): 1638-1646.
- [17] BERENGUER P W, HELLWIG P, RSCHULZ D, et al. Real-time optical wireless communication: field-trial in an industrial production environment[C]//IEEE. Proceedings of 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). Roma: IEEE, 2018: 1-3.
- [18] LACAUD M, NEGRU D. Multiple-source streaming over remote radio light head: a pragmatic, efficient and reliable video streaming system for 5G intra-building use cases [C]//IEEE. Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Paris: IEEE, 2020: 1-6.
- [19] JAWAD N, SALIH M, SAADOON R, et al. Indoor unicasting/multi-

丁举鹏, 易芝玲, 赵楷, 等. 工业无线光技术研究进展

casting service based on 5G internet of radio light network paradigm [C]//IEEE. Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Jeju: IEEE, 2019: 1–6.

[20] JAWAD N, SALIH M, COSMAS J, et al. Virtual gateway: local multimedia services and mobility management for 5G internet of radio light gNB [C]//IEEE. Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Paris: IEEE, 2020: 1–6.

[21] DING J P, I C L, XU Z Y. Indoor optical wireless channel characteristics with distinct source radiation patterns [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1–15.

[22] DING J P, I C L, ZHANG H, et al. Cells planning of VLC networks using non-circular symmetric optical beam [C]//IEEE. Proceedings of 2019

IEEE International Conference on Communications (ICC). Shanghai: IEEE, 2019: 1–6.

[23] DING J P, I C L, XIE R Y, et al. Actual radiation patterns-oriented non-deterministic optical wireless channel characterization [C]//Springer. Proceedings of 13th Chinese Conference on Biometric Recognition (CCBR 2018). Urumqi: Springer, 2018: 517–527.

[24] DING J P, I C L, ZHANG C, et al. Evaluation of outdoor visible light communications links using actual LED street luminaries[C]//Springer. Proceedings of 13th Chinese Conference on Biometric Recognition (CCBR 2018). Urumqi: Springer, 2018: 572–579.

[25] 丁举鹏, 易芝玲, 王劲涛, 等. 可见光定位系统中发光二极管空间光束效应分析[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 174–182.