

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306670

工业互联网下的无线光通信研究进展*

秦欢欢¹ 王梦凡¹ 柯熙政^{1,2}

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室 西安 710048)

摘要:无线光通信是一种重要的现代通信手段,具有频谱资源丰富、抗电磁干扰等优点,可以作为传统无线射频技术的重要补充,有望为未来工业制造提供重要的技术驱动力。文章首先介绍了工业互联网背景下无线光通信的相关应用,并对近年来国内外的研究现状进行综述,针对较为典型的研究进展进行总结,另外阐述了无线光通信系统的信道模型及关键技术,并介绍了射频/可见光异构技术用来保证通信系统上下行链路可靠传输。最后总结了当前无线光通信在工业互联网面临的问题,并对未来发展趋势进行展望,可为未来无线光在该领域的研究和提供一定的参考和借鉴。

关键词:工业互联网;无线光通信;可见光通信;数据传输;可见光定位

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Research progress of optical wireless communication under industrial Internet

Qin Huanhuan¹ Wang Mengfan¹ Ke Xizheng^{1,2}

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Collaborative Network for Civil-Military Cooperation, Xi'an 710048, China)

Abstract: Optical wireless communication is an important means of modern communication, with rich spectrum resources, anti-electromagnetic interference and other advantages, can be used as an important supplement to traditional radio frequency technology, which is expected to provide an important technical driving force for future industrial manufacturing. This paper firstly introduces the relevant applications of optical wireless communication under the background of industrial Internet, and summarizes the research status at home and abroad in recent years, summarizes the typical research progress, expounds the channel model and key technologies of optical wireless communication system, and introduces the RF/visible light heterogeneous technology used to ensure the reliable transmission of the uplink and downlink of the communication system. Finally, the paper summarizes the current problems faced by optical wireless communication in the industrial Internet, and looks forward to the future development trend, which can provide reference for the future research and development of optical wireless in this field.

Keywords: industrial internet; optical wireless communication; visible light communication; data transmission; visible light positioning

0 引言

无线光通信是以光为载波,在自由空间传输信息的技术,具有频谱资源丰富、保密性强、抗电磁干扰和免频谱授权等优势,可以独立部署无线通信链路,便于监控智能设备快速接入互联网平台。21世纪以来,在工业生产

经济和工业通信服务不断创新的背景下,工业互联网正逐步向信息化、网络化发展^[1]。传统有线通信具有部署成本高、传输速率低等缺点,业界提出将射频识别、无线局域网或无线传感装置等一系列无线通信技术引入工厂内进行数据传输,然而这些技术必须面对信号衰落、多径干扰等问题^[2],无线光通信作为射频(radio frequency, RF)技术的重要补充获得了人们的广泛关注。工业互联

收稿日期: 2023-06-28 Received Date: 2023-06-28

* 基金项目: 陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、国家自然科学基金面上项目(61377080)资助

网下的无线光通信是一个值得深入研究的课题,对于该问题的研究具有一定的现实意义。

本文对工业互联网背景下的无线光通信相关应用进行了介绍,总结并讨论了其中的关键技术和国内外研究进展,在文末对无线光在工业互联网存在的挑战进行分析,并对未来进行展望。

1 工业互联网下的无线光通信

近年来,工业互联网已经成为我国发展制造业强国 2025 战略的重要支撑。为增强生产要素之间安全可靠的互联性并降低成本,迫切需要用无线通信方式替代传统有线通信,当今通用的 RF 无线通信方式容易受到工厂设备的电磁干扰,且频谱受限,可见光通信 (visible light communication, VLC) 能够将照明与通信相结合,通过发光二极管 (light emitting diode, LED) 的高密集布设实现对工厂设备的大范围通信覆盖,不仅可以实现设备数据传输,并且支持室内设备定位,频谱资源丰富,是现有 RF 频谱的 10 000 多倍^[3],可以成为当今无线通信技术的有力补充, VLC 与 RF 通信特征比较如表 1 所示。

VLC 是以 380~780 nm 的光波作为信息载体,在自

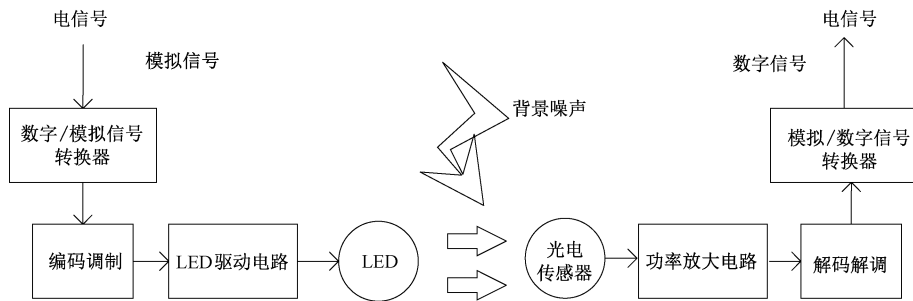


图 1 VLC 系统框图^[6]

Fig. 1 VLC system block diagram^[6]

2 工业场景下的无线光通信相关应用

2.1 数据传输

光保真度 (light-fidelity, LiFi) 扩展了 VLC 的概念,以实现双向和完全联网的无线通信^[7]。图 2 给出了工厂数据传输的应用框图。LED 灯通过电力载波 (power line communication, PLC) 进行通信,上位机将信息加载在电力线上传输,经过天花板上的 LED 灯传递给工厂内的智能设备。设备的反馈信息经过 WiFi 上行链路传输至接收端,再通过 PLC 传递给上位机接收,构成了工厂内的整个无线通信网络。PLC 可以简化工厂内设备连接,不需要建立新的通信网络,只要有电缆就能进行通信传输,从而实现低成本高效益的宽带数据服务交付。由于 LED

表 1 VLC 与 RF 通信特征比较^[3]

Table 1 Comparison of VLC and RF communication characteristics^[3]

特性	VLC	RF
带宽	428 THz~750 THz	300 MHz~10 GHz
电磁辐射	无	有
多径	低	高
噪声干扰	较大	小
功耗	少	相对较多
设施	LED 光源 无需增加基础设施	热点 需要增加基础设施
系统复杂度	低	高
安全性	高	相对较低
灵活性	低	相对较高
覆盖面	窄	相对较宽

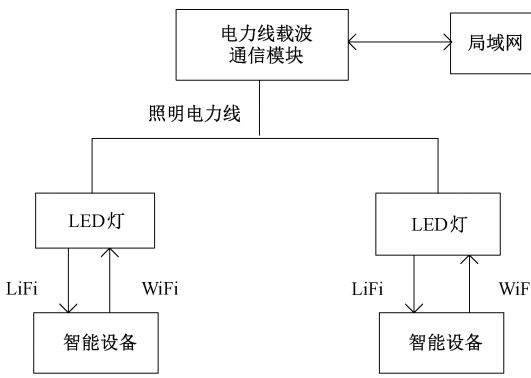
由空间中传输信息的无线光通信技术^[4]。VLC 系统框图如图 1 所示。主要由发射模块、无线信道和接收模块 3 部分组成。发射模块负责将需要传输的数据编码、调制成相应的电信号,电信号经过 LED 驱动电路变为光信号,LED 以人眼无法识别的闪烁对信号进行发送,经过无线信道传输至接收端^[5]。接收端主要采用光电探测器或图像传感器实现光电转换,电信号传输至解码解调电路恢复出原始数据。

灯需要电源进行供电,因此对于 LiFi 骨干网来说,电力载波通信是一项极具吸引力的技术。

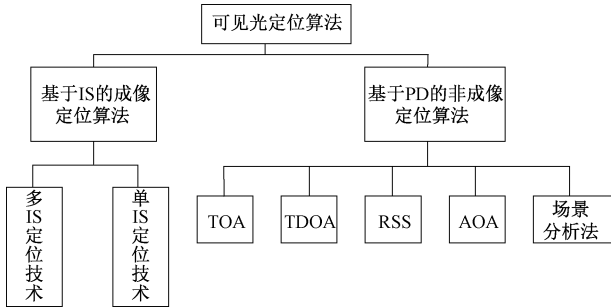
2.2 可见光定位

随着工厂智能化的发展,货物识别和定位技术逐渐成为了一种需求。光信号的波长短,基本沿直线传播,使得可见光定位 (visible light positioning, VLP) 技术能够较容易地达到比 RF 定位更高的精度。发送端对光信号进行线路编码,灯具内装有调制器将每个 LED 预分配的唯一标识符调制成适合 VLC 传输的码字,相应的驱动电路以开关键控的调制方式驱动 LED 灯,实现电光转换。接收端接收到光信号后进行解码、译码等工作,再由相应的定位算法完成位置坐标计算^[9],机器控制模块根据定位结果来计算方向信息,进行工厂设备的巡检导航。

VLP 根据接收方式可以划分为基于光电探测器

图 2 工厂数据传输的应用框图^[8]Fig. 2 Application block diagram of factory data transmission^[8]

(photo detector, PD) 的非成像定位技术和基于图像传感器 (image sensor, IS) 的成像定位技术^[10]。定位算法分类如图 3 所示。

图 3 VLP 算法分类^[11]Fig. 3 VLP algorithm classification^[11]

以 IS 为接收器的定位技术主要利用图像处理算法和光学成像原理对待测点进行定位。首先摄像头捕捉到 VLP 信号并对接收到的图像进行处理,再根据光学几何关系计算出待定位点的位置信息^[12]。工厂设备中普遍集成的加速传感器可以为该技术采集到的图像提供角度矫正,从而提高 VLP 的定位精度。

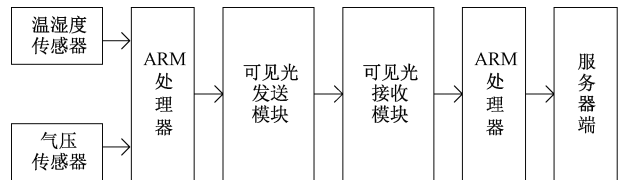
以 PD 为接收器的定位技术利用 PD 对光线的敏感特性接收可见光信号,结合到达时间 (time of arrival, TOA)、到达时间差 (time difference of arrival, TDOA)、接收信号强度 (received signal strength, RSS)、到达角度 (angle of arrival, AOA)、场景分析等定位算法实现室内定位^[13]。TOA 和 TDOA 是将时间或者时间差换算成距离来实现测距,然后利用三边定位法进行位置估算;RSS 根据定位点到 LED 的光信号强度来进行位置估算;AOA 通过接收多个 LED 的可见光信号,根据每个 LED 信号到达 PD 接收机的角度完成位置估算。场景分析法首先建立环境采样点的光强信息并记录到数据库中,接收端接收到光强信息后与数据库进行匹配,从而估算出定位点

位置。

2.3 环境监测

对于一些对室内环境参数和电磁干扰比较敏感的工业场所,如化工厂、矿井等,它们对当前环境中气体浓度、室内温度和气压比较敏感,可以将 VLC 与室内环境监测技术相结合,利用 LED“通信照明”两用的特点,将传感器采集到的数据通过 VLC 收发模块发送给后台服务器端,从而实现室内环境的实时监控。

如图 4 为工业环境下 VLC 环境监测系统框图。ARM 处理器负责采集环境参数,包括温度、湿度、气压等,然后 ARM 处理器将数据信息以定义好的数据帧格式发送到 VLC 发送模块上,LED 灯以可见光形式发送出去,VLC 接收模块将光信号转换成电流信号后解析成一定的数据帧格式发送给服务器端,服务器端负责对接收到的环境数据进行分析。

图 4 VLC 环境监测系统框图^[14]Fig. 4 Block diagram of VLC environmental monitoring system^[14]

3 国内外研究进展

早在 1990 年,无线光通信 (optical wireless communication, OWC) 就已经被国外学者提出作为室内通信的一种重要手段。当时的人们对自由空间光学系统提供便携式数据通信的潜力产生了很大兴趣,尤其是随着无线电频谱的拥挤,超带宽的频率分配很难获得,由于技术限制导致无法使用微波或毫米波系统进行更高带宽服务等,都让界内学者将重点转移到频谱资源丰富、安全环保的无线光通信技术领域。

2015 年, Goroshko 等^[15]研究了基于正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 的 VLC 系统的时间同步方案,该系统提高了工厂中机器间传输速率,提高通信过程的鲁棒性和低延迟特性,通过此系统可以使未来的工厂制造单元更灵活。

2015 年, Shao 等^[16]提出两种异构 WiFi-VLC 系统。第 1 种系统利用单向 VLC 信道作为下行链路,并保留 WiFi 反向信道作为上行链路,该方案解决了光上行链路的挑战;第 2 种系统将 WiFi 和 VLC 并行聚合均用作下行链路。研究表明,两种混合系统具有较高的吞吐量,优于单一 WiFi 系统,并且在考虑阻塞持续时间和接入点与用户设备之间的距离时,聚合系统的性能更高。

2017 年,牛衍方等^[17]提出一种可应用于智能工业领

域的 VLC 照明控制系统,并提出该系统可以与虚拟现实技术相结合,实现工厂中物品信息定位、流水线检测数据分析等功能。

2018 年, Kim 等^[18] 提出利用 VLC 实现工业互联网网络设备管理和数据传输的方案。研究表明,在此方案下 VLC 数据包的交换可以在 590 ms 内完成, VLC 发射机之间的切换可以在 210 ms 内完成。

2018 年, Berenguer 等^[19] 提出了面向工业制造小区的多输入多输出 (multi input multi output, MIMO) 信道测量方案,并证明了分布式 MIMO 中天线的有效性,用来应对直视链路阻塞的问题。1 年后,该团队^[20] 提出用一个非线性均衡器来增加工业 OWC 过程中的驱动信号功率,该均衡器可以提高 3.5 dB 信噪比,并验证了 MIMO 技术中的天线分集方案可以显著提高通信过程中物理层的可靠性。

2018 年,李浩^[21] 利用 VLP 作为工厂内自动驾驶车的定位寻址方式,结果表明,设计的整套系统能满足自动寻址的功能,定位误差在 3.6 cm 左右、定位时延在 37 ms 左右。

2019 年, Almadani 等^[22] 讨论了工业 VLP 下无人机的覆盖范围和定位精度的问题,结果表明,设置一定范围内发射机的发射角和无人机的视场高度,信号能够准确接收。

2019 年, Lam 等^[23] 提出了一种新的 VLP 定位方法,将可操纵的激光 (射线) 和 LED 相结合来定位设备。研究表明,该技术能够同时瞄准多个设备,可以对操作区域内的设备提供实时跟踪,该方法相较于传统 VLP 更利于与工业 AR 技术相结合,且便于解决 3D 定位的需求。两年后, Koonen 等^[24] 利用二维可操纵的红外光束,实现工厂内密集设备的无干扰连接,在保证数据传输的同时,实现设备的自校准定位,并基于光电二极管矩阵提出了一个宽视场接收机,实验证明了该 OWC 系统能够将高带宽的数据流无干扰地传输给紧密间隔的设备。

2020 年, Yang 等^[25] 提出了一种支持上下行通信的异构 RF/VLC 工业网络架构,用来支持工业物联网设备的不同服务质量要求,并且提出了新的深度学习算法来学习该网络智能资源管理的最优策略。仿真结果验证了该 RF/VLC 工业网络的有效性,所提出的新型学习算法优于其他现有算法。

2022 年,杨建国^[26] 提出 3 个直流偏置光 OFDM 系统的时间同步算法,以减小时间同步误差对 OFDM 系统的影响,研究表明该算法具有更高的时间同步性能,同时具有更高的频谱效率以及较低的算法复杂度。

LiFi 是 VLC 的延伸,它可以利用光进行高速、双向和完全联网的无线通信。2020 年, Bechadergue 等^[27] 根据目前 LiFi 在工业领域的市场反馈,提出 LiFi 可以与其

他 RF 技术进行集成,保证工厂的无线网络接入。Jungnickel 等^[28] 提出将分布式多用户 MIMO、定位、与 5G 集成等新的系统概念引入工业 LiFi 应用中,并提供了初步的概念证明。

2021 年, Zhang 等^[29] 针对工厂中非直视链路中的漫反射功率衰减问题,提出一种漫反射聚焦技术,并引入快速聚焦传输矩阵算法,在漫反射的 25 cm 自由空间链路上进行了实验证明,验证了 40 Gbit/s > 80° 覆盖范围的光束转向 OWC 系统。

同年, Schneider 等^[30] 针对工厂条件中无线光信道传输的恶劣环境进行了实验研究,提出了一种计算叠加测量的单个光谱发射的新方法,并建立了量化叠加测量对通信影响的模型,此外,还得出环境和人工光源会严重干扰光谱和电谱分布的结论。亢令川^[31] 针对工业互联网中设备移动及高密度相邻信道干扰问题,设计优化了一个最佳旋转角接收机和孔径阵列接收机,并且验证了该设计的强鲁棒性和抗干扰能力。

2022 年, Ma 等^[32] 首次在实际工厂环境中评估了一个基于 ITU-T G. 9991 OWC 标准的 LiFi 定位系统,该系统的三维定位误差约为 5 cm,通过引入校正因子进一步改善至 3 cm 左右,证明了 LiFi 在未来工业互联网中实现定位的可能性。Kouhini 等^[33] 在此基础上提出将分布式 MIMO 引入 LiFi 链路,分析了此链路在空间分集和空间多路复用两种模式下的运行,验证了该系统具有较高的信噪比增益和高吞吐量。Ozyurt 等^[34] 将 LiFi 与工厂设备间通信、多点协同传输技术相结合,推出了设备间通信覆盖区域的解析模型,利用随机几何方法,推导出了不同参数 (如发射机密度和偏置因子) 下的多点协同传输概率和覆盖性能的解析表达式。1 年后,该团队^[35] 分析了工业 LiFi 网络中设备到设备间通信的性能指标,研究表明,密集部署的接入点会导致设备通信停留时间降低、设备模式转换速率增加。

同年, Reguera 等^[36] 提出了基于多脉冲位置调制的新型编解码算法和准最优软决策检测算法,整套系统在满足工业互联网高效照明和数据传输的基础上,允许调光控制,实验验证了该系统能耗更低且传输数据速率更高。基于前人将 OFDM 调制引入工业无线光的研究,为了弥补可见光上行链路传输限制,杨博瑞^[37] 提出将 VLC 与 PLC 技术相结合,利用电力线传输作为上行链路,结果表明,该系统能实现稳定的上下行通信,传输误码率均可达到 10^{-4} 量级。

2022 年, Xue 等^[38] 针对工厂内 VLC 密集覆盖下设备移动造成的资源利用不平衡问题,提出将多接入边缘计算与 VLC 相结合的混合集成系统。结果表明,该系统具有更低的用户丢弃率,提高了资源利用率,减少整体时延。同年,该团队^[39] 提出了一种无边界的密集组网 VLC

系统,该系统取消了传统发射器的多址技术以提高传输效率,接收端自适应地实现非重叠区域的抗噪声接收和重叠区域两个发射信号的同时恢复,实验表明该系统有更低的误码率和更宽的通信范围。

2022 年, Costa 等^[40] 借助机器学习的人工智能来预测 OWC 链路的轨迹及信道性能。以两个工业场景为例子对所提方案进行评估,结果表明,该算法能够对链路参数进行优化、预测 VLC 通道增益,能够有效提高工业场景下 VLC 系统的功率和光谱效率。

2023 年, Du 等^[41] 提出一种基于卷积神经网络的 VLP 系统,其中训练数据为图像传感器采集的 LED 图像,无需调制 LED 即可从识别的角度实现终端定位。研究结果表明,该算法的平均识别精度在 95% 以上,且整个 VLP 系统具有较高的鲁棒性。

2023 年, Zhou 等^[42] 设计了一种基于以太网的全双工实时 VLC 系统,该系统也可视为工业无线光网络的接入系统,研究表明,该系统可实现 108 个数据包的零丢包传输,传输速率为 94.9 Mbps,保证多个终端设备可以通

过无线光同时接入 VLC 网络。

2023 年, Aboagye 等^[43] 讨论了将可重构智能表面技术引入 VLC 系统,以解决 VLC 系统中的直视阻塞等问题,通过选择合适的可重构智能表面技术来适配 VLC 系统,实现光束精确控制,可以有效提升通信可靠性。

无线光通信在工业互联网下的相关研究刚刚起步,综合国内外研究现状可以发现,目前大多数研究主要集中在可见光通信的数据传输、室内定位方面,研究人员通过改善调制编码方式、引入 RF/PLC/RIS 等其他技术进行补充、改善通信信道、优化信号处理算法等方式来提高数据传输速率,提升系统可靠性,降低能耗成本。但是真实的工厂环境中存在灰尘颗粒散射、天花板过高导致链路范围过长等多种因素干扰,而当今大部分研究都是在实验室环境内进行的,因此会存在一定的误差,在未来的研究中应该模拟真实的工厂环境,使得到的数据和相关研究成果更加可靠。可将国内外研究进展大致分为数据传输、定位两方面,具有代表性研究进展总结如表 2、3 所示。

表 2 工业互联网下无线光数据传输的国内外研究进展

Table 2 Research progress of optical wireless data transmission under industrial Internet at home and abroad

年份	作者	研究内容	研究成果
2015	Shao 等 ^[16]	提出两种异构 WiFi-VLC 系统	混合系统具有较高的吞吐量
2018	Berenguer 等 ^[19]	提出 MIMO 信道测量方案	分布式 MIMO 中天线分集方案是必要的
2019	Berenguer 等 ^[20]	提出用一个非线性均衡器增加驱动信号功率	将信噪比提高了 3.5 dB,且利用天线分集可以获得更高的增益
2020	Yang 等 ^[25]	提出了一种异构 RF/VLC 的工业网络架构和新的深度学习算法实现智能资源管理	证明了该异构网络的有效性,所提出的新型学习算法优于其他现有算法
2021	亢令川 ^[31]	设计了最佳旋转角接收机和孔径阵列接收机	误码率、信干噪比性能方面优于其他接收机
2022	Ozyurt 等 ^[34]	将 LiFi 与工厂设备间通信、多点协同传输技术相结合	推出了设备间通信覆盖区域的解析模型,推导出了不同参数下多点协同传输概率的表达式
2022	Reguera 等 ^[36]	提出了基于多脉冲位置调制的新型编解码算法和准最优软决策检测算法	允许调光控制 提高了数据速率和误码性能
2022	杨博瑞 ^[37]	将 VLC 与 PLC 技术相结合	能够实现稳定的上下行通信,传输误码率均可达到 10^{-4} 量级
2022	Xue 等 ^[38]	提出将多接入边缘计算与 VLC 相结合	具有更低的用户丢弃率,可以提高资源利用,减少整体时延
2022	Xue 等 ^[39]	提出无边界的密集组网 VLC 系统	具有更低的误码率和更宽的通信覆盖范围
2023	Zhou 等 ^[42]	设计了一种基于以太网的全双工 VLC 系统	可实现 108 个数据包的零丢包传输,传输速率为 94.9 Mbps
2023	Ozyurt 等 ^[35]	分析了工业 LiFi 中设备间通信的性能指标	密集部署的接入点会导致设备通信停留时间降低、设备模式转换速率增加

表 3 工业互联网下无线光定位的国内外研究进展

Table 3 Research progress of optical wireless positioning under Industrial Internet at home and abroad

年份	作者	研究内容	研究成果
2018	李浩 ^[21]	利用 VLP 作为工厂内自动驾驶车的定位寻址方式	定位误差在 3.6 cm 左右、定位时延在 37 ms 左右
2019	Almadani 等 ^[22]	讨论了工业 VLP 下无人机的覆盖范围和定位精度的问题	设置一定范围内发射机的发射角和无人机的视场高度,信号能够准确接收
2019	Lam 等 ^[23]	提出了一种射线表面定位的 VLP 方法	更利于与工业 AR 技术相结合 更好地解决 3D 定位的需求
2021	Koonen 等 ^[24]	引入二维可操纵的红外光束,基于光电二极管矩阵提出了一个宽视场接收机	能够实现数据传输和自校准定位
2022	Ma 等 ^[32]	首次在实际工厂环境中评估了一个基于 ITU-T G. 9991 OWC 标准的 LiFi 定位系统	三维定位误差约为 5 cm,通过引入校正因子 进一步改善至 3 cm 左右
2023	Du 等 ^[41]	将卷积神经网络引入 VLP 系统	该算法的平均识别精度在 95% 以上,具有较高的鲁棒性

4 工业互联网下无线光通信的关键技术

在面向工业互联网的无线光传输系统中,实现高速度、低复杂度、高效率的通信过程是满足未来工厂需求的关键因素。为此,本章从工业互联网下的无线光通信涉及到的相关技术出发,首先介绍了 VLC 信道模型,然后介绍了 MIMO 技术、编码调制技术、相邻信道干扰抑制技术和多址接入技术,来增强工业场景下 VLC 链路性能,同时介绍了 VLC /RF 异构技术,通过将二者优势相结合,保证通信系统上下行链路可靠传输。

4.1 可见光信道模型

VLC 系统发射端采用 Lambert 型的光 LED,接收端采用光电传感器。VLC 线性基带传输模型如图 5 所示。

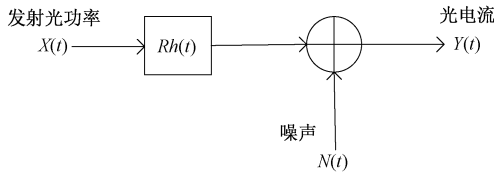


图 5 VLC 的线性基带传输模型^[44]

Fig. 5 Linear baseband transmission model for VLC^[44]

接收端接收到的光电信号 $Y(t)$ 表示为:

$$Y(t) = R \cdot X(t) \otimes h(t) + N(t) \quad (1)$$

其中, \otimes 为卷积, R 是光电转换效率, $X(t)$ 为 LED 的发射光功率, $h(t)$ 为信道的冲激响应, $N(t)$ 为信道中的加性高斯白噪声。

在封闭的室内 VLC 环境中,LED 光信号可以分为两种传播路径到达接收端,将直接到达接收端的路径称作直视链路(line of sight, LOS),在传播过程中经过物体反射到达接收端的路径称作非直视链路(non-line of sight, NLOS)^[45]。由于部分工厂中会存在烟雾、粉尘等固体颗粒,因此在信道分析时需要根据实际情况考虑颗粒对光传播的散射特性。VLC 链路方式如图 6 所示。

在 LOS 链路中,发射端和接收端是对准的,具备较高的功率利用率,但是 LED 光源和接收端之间如果存在障碍物会妨碍信号传输甚至导致通信中断。在 NLOS 链路中,接收视角较大,对收发两端指向的要求较低,但是不同物体反射光信号到达接收端存在时间差异,可能会导致码间串扰,从而降低 VLC 系统的误码性能。因此,在实际工厂应用中应根据不同需求择优选取两种链路方式。接收端装置的功率公式为:

$$P_r = H(0) = H(0) \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) d(t) \quad (2)$$

其中, P_r 表示发射功率的均值, $H(0)$ 表示直流信道

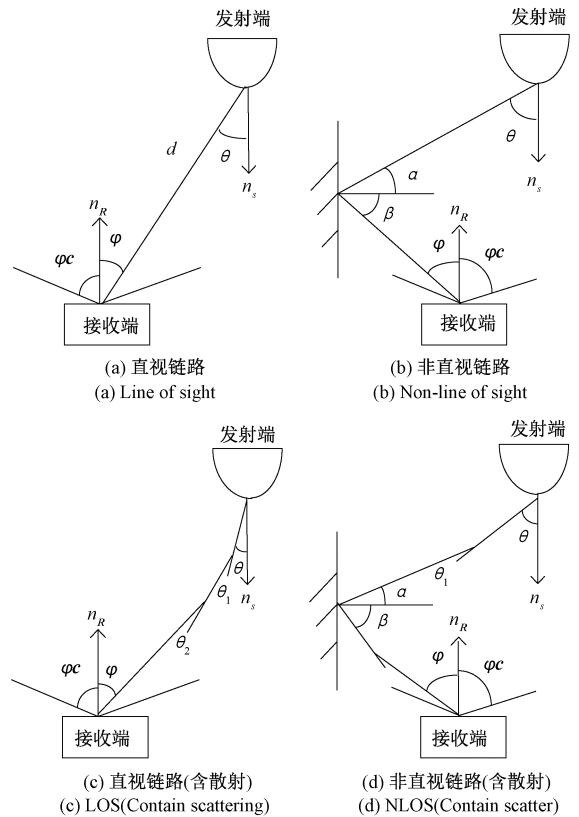


图 6 VLC 链路方式^[46]

Fig. 6 VLC link mode^[46]

增益,在 LOS 链路和 NLOS 链路中依次为 $H_d(0)$ 和 $dH_r(0)$,其公式依次为:

$$H_d(0) = \begin{cases} 0, \varphi > \varphi_c \\ \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\theta) T(\varphi) g(\varphi) \cos(\varphi), 0 \leq \varphi \leq \varphi_c \end{cases} \quad (3)$$

$$dH_r(0) = \begin{cases} 0, \varphi > \varphi_c \\ \frac{(m+1)A}{2(\pi d_1 d_2)^2} \cdot dA_{wall} \cdot \cos^m(\theta) \cos(\alpha) \cos(\varphi) \\ T(\varphi) g(\varphi) \cos(\varphi), 0 \leq \varphi \leq \varphi_c \end{cases} \quad (4)$$

其中, A 表示传感器的接收面积; θ 表示发射角; φ 表示接收角; φ_c 表示接收机的接收范围,当入射光超过范围时接收机将接收不到光信号; m 表示朗伯辐射系数; d 表示链路距离,其中 d_1 代表从 LED 发送阵列到第 1 次反射点的距离, d_2 代表第 1 次反射点和接收机之间的距离; dA_{wall} 是反射面的单位面积; α 和 β 分别为光线到反射点的入射角度以及反射点到接收机的辐射角度; $T(\varphi)$ 表示滤波器增益; $g(\varphi)$ 表示接收机汇聚能量的强度。冲激响应 $h(t)$ 如式(5)所示:

$$h(t) = \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\theta) T(\varphi) g(\varphi)$$

$$\cos(\varphi) \operatorname{rect}\left(\frac{\varphi}{\varphi_c}\right) \delta\left(t - \frac{d}{c}\right) \quad (5)$$

4.2 多输入多输出技术

随着工业互联网中设备数量的迅猛增加,必须建立强大的通信网络才能确保设备间可靠的通信传输。为了支持工业网络中的大规模连接^[47-49],将 MIMO 技术引入 VLC 传输过程中,该技术能够有效利用空间资源,实现多天线并行数据传输,在不增加系统传输带宽的条件下大幅度提高系统的传输容量^[50]。

可见光 MIMO 技术是在收发两端设置多根天线,发射端将多路串行信号经调制、编码后利用可见光信道并行传输,接收端对信号进行解调和解码,并恢复出原始信号^[51]。可见光 MIMO 系统示意图如图 7 所示。

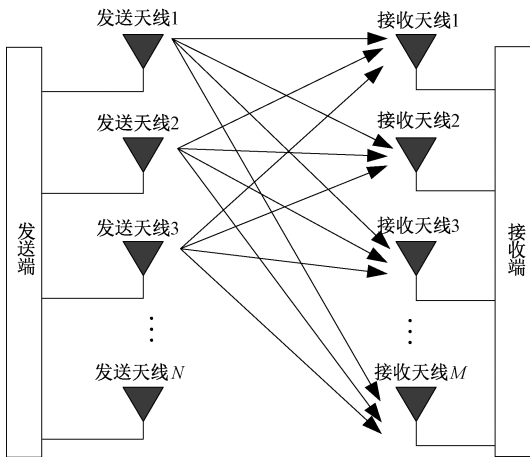


图 7 可见光 MIMO 系统示意图^[52]

Fig. 7 Schematic diagram of visible MIMO system^[52]

可见光 MIMO 技术可分为分集技术、空间复用两种^[53]。

1) 分集技术

分集技术利用多个发射天线将相同的数据信息通过不同的通信信道发射出去,在接收端利用多个接收天线接收信息^[54]。由于在不同信道中信号衰减不一,接收端对多路信号进行合并,能够有效降低系统误码率,减弱信道中多径衰落的影响,在不增加传输功率和带宽的同时,提高了通信传输的可靠性。

2) 空间复用

空间复用在发送端使用多根天线并行传输相互独立的信号,为了实现空间复用技术,必须确保收发天线之间的距离大于相关距离,以确保收发两端的各个子信道是独立且不相关的。然而,邻近的信道可能会产生相互干扰,所以需要在发射端采用预编码技术对信号进行预处理,或者在接收端采取迫零算法、最小均方误差算法、最大似然算法等抗干扰技术降低系统误码率。

虽然分集技术与空间复用技术类似,这两种方法都

是将数据分成若干个信息流再通过不同的发射天线发送出去,但是空间复用的增益没有分集的增益高。分集技术的信息流是用于发送冗余信息,提高通信传输的可靠性,而空间复用技术通过发送不同的信息流以提高传输速率,提升通信传输的有效性。MIMO 技术是系统误码率和数据传输速率的折中,在提高空间分集增益的同时,空间复用增益会随之降低^[53],因此需要根据工厂中实际的通信目的选取合适的技术。

4.3 编码和调制技术

VLC 系统通常采用强度调制/直接检测的方式传输信号,编码方式大多采用二进制开关键控或曼彻斯特编码,为提高传输速度也使用如脉冲位置调制相类似的光学组编码形式,但系统在解码过程中对时钟同步的要求较高。二进制开关键控编码方式相对简单,但传输速度较慢且误时隙率较高;曼彻斯特编码误码率较低,但是对频带带宽要求较高,而 LED 的可用调制带宽是十分有限的。

VLC 系统的调制技术中,常用的单载波调制方案会引起 LED 前端非线性信号失真等一系列问题^[55],且工业环境内对数据传输速率要求较高,为了在有限的信道带宽下实现信息的高速传输,国内外研究人员考虑将更加高效的多载波调制技术引入工业 VLC 系统。

OFDM 技术具有频谱效率高、带宽扩展性强的优点,能够有效降低室内多径效应引起的频率选择性衰落,其基本思想是将整个通信信道划分为多个较小的子信道,将串行数据划分为多个并行数据后调制到每个子信道上传输信息,子信道上的信号带宽小于整个信道的相关带宽,能够抵抗时延扩展,克服信号符号间干扰。光 OFDM 原理框图如图 8 所示。输入数据流经过星座调制和串/并转换后,经过 N 点傅里叶逆变换将频域信号变为时域信号,为了保证子信道之间的正交性插入循环前缀,经过并/串转换和数/模转换后得到连续模拟信号,然后添加直流偏置确保信号是正实值信号,最终由 LED 光源发射出去,接收端接收到信号后进行与发射端相反的逆过程,还原出原始数据^[56]。

在通信传输过程中,各个子载波同时采用相同的发射功率且进行同种调制方式有可能会引起子信道间误码率的增高,影响系统性能。可以将自适应技术引入 OFDM 系统,一定程度上减小了系统的多径效应。自适应 OFDM 调制可以根据各个子信道的传输情况对调制方式和功率进行合理调整,实现系统的高度灵活性和信道资源的最大化利用,提高系统的传输效率^[57]。

4.4 相邻信道干扰抑制技术

在 VLC 信道的相邻单元中,使用同样的传输频率会产生同信道干扰 (co-channel interference, CCI)^[3],CCI 示

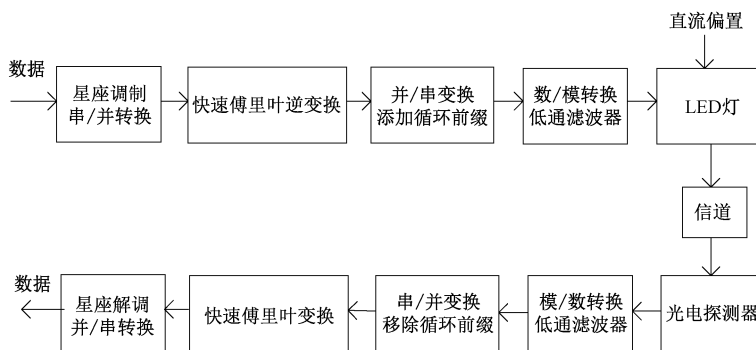


图 8 光 OFDM 原理框图
Fig. 8 Optical OFDM block diagram

意图如图 9 所示。LED 光源的发射模式具有很强的指向性,光源辐射的大部分光功率都位于接入点的覆盖范围内,因此 CCI 会发生在覆盖单元的边沿和相邻接入点的光发射重叠区域,在高密度空间复用的情况下,CCI 会严重影响通信传输的准确性^[58]。

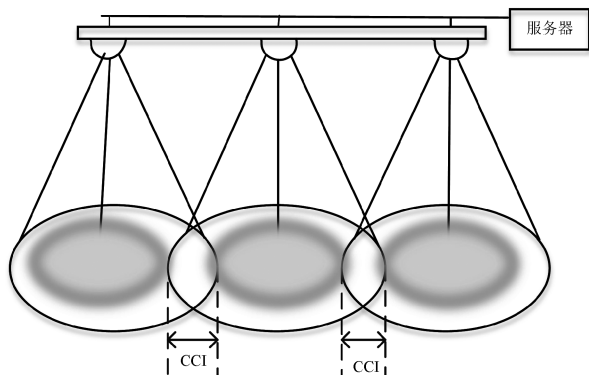


图 9 同信道干扰示意图
Fig. 9 Co-channel interference diagram

通过采用频率复用技术可以有效抑制可见光通信中相邻单元 CCI 的问题,带有多个 LED 阵列的 VLC 系统也被称为蜂窝式光网络,频率复用技术的基本思想是将整个光网络划分为若干小区簇,使用相同频率的单元相隔一定的距离,小区簇中使用相同频率单元的个数被称为频率复用因子^[59]。频率复用示意图如图 10 所示,其中图 10(a)为统一频率复用,图 10(b)为频率复用因子

为 2 的部分频率复用,统一频率复用中所有小区使用相同频率的频带,频率复用因子为 2 的部分频率复用中所有小区共用两种频率的频带。干扰只发生在使用相同频率的相邻小区的重叠区域,以此来抑制 CCI。

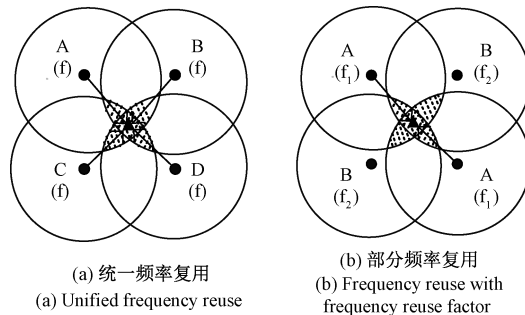


图 10 频率复用示意图^[59]
Fig. 10 Frequency reuse diagram^[59]

4.5 多址接入技术

在工厂中,多个设备在同一时间使用同一资源(如共享信道)进行通信时,可能会产生信息碰撞导致通信失败。多址接入技术是指多个设备可以同时接入同一通信网络,采用特定的信道复用技术,在相同传输信道中,多个设备能够独立、可靠地进行数据接收和解调,以此来达到资源共享的目的,提高信道利用率。目前室内 VLC 系统中已经发展了多种多址技术,常用多址接入技术原理及优缺点如表 4 所示。

表 4 常见多址接入技术对比

Table 4 Comparison of common multiple access technologies

名称	原理	优点	缺点
时分多址	不同设备在不同时隙传输信息	平均功率效率高,实现难度低	需要设备同步,开销大
频分多址	不同设备在不同频段传输信息	多路信号同时传输,互不干扰	划分频段越多,单路信道上传输速率越慢
码分多址	利用正交码字序列区分不同终端信号	带宽通信抗衰落和抗干扰能力强	用户较多时,码字会过长
空分多址	将自由空间分成不同子信道传输数据	频谱利用率高	预编码复杂度受相邻信道干扰
非正交多址	根据信道质量对终端分配不同发射功率	多路信号同时传输,传输速率高	复杂度较高

4.6 RF/VLC 异构技术

工厂中收发端之间存在障碍物或接收设备位置改变都有可能造成 VLC 信号质量降低或通信中断,解决该挑战的有效方法是将 RF 无线通信大面积覆盖的优势与 VLC 高速率通信的优势相结合,形成 RF/VLC 异构网络,以增强传输系统的通信性能^[60]。根据目前的研究,通信系统的上行链路通常采用 RF 无线通信技术,下行链路采用 RF/VLC 异构技术,系统模型可大致分为 3 种,分别是双跳 RF/VLC 系统、独立 RF/VLC 系统、并行传输 RF/VLC 系统^[61]。

1) 双跳 RF/VLC 系统

如图 11 所示,双跳 RF/VLC 系统将链路传输分为两个阶段,第 1 阶段设置为 VLC 链路,第 2 阶段设置为 RF 链路,两跳中间通过添加中继节点、智能反射面等设备,将 VLC 传输信号转化为适合在 RF 链路传输的信号。反之也可以将第 1 跳设置为 RF 链路,第 2 跳设置为 VLC 链路。该系统可应用于接收端不具有接收 VLC 或 RF 系统传输信号能力的设备,以及收发端之间直接链路不可达等场景。



图 11 双跳 RF/VLC 系统^[61]

Fig. 11 Double hop RF/VLC heterogeneous system^[61]

2) 独立 RF/VLC 系统

如图 12 所示,独立 RF/VLC 系统是指由接收端或者系统设置的中央单元决定选择独立 VLC 链路或独立 RF 链路进行信息传输,通常该系统下的接收端不具有聚合 VLC 和 RF 信息的能力。接收端可以根据接收信噪比、应用需求、设备的移动性等参数自由选择最佳的网络,或者系统设置的中央单元根据网络的负载平衡、公平性等情况进行网络选择提供服务。

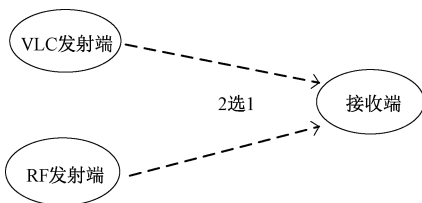


图 12 独立 RF/VLC 系统^[61]

Fig. 12 Independent RF/VLC system^[61]

3) 并行传输 RF/VLC 系统

如图 13 所示,并行传输 RF/VLC 系统是指 RF 和 VLC 同时传输信息给接收端,接收端使用聚合技术将 RF 和 VLC 发送的信息进行整合。该异构系统的实时传输

性能较好,当其中一条链路不工作时,另外一条链路还可以正常收发信息,但该系统设备复杂度相对较高,实现难度较大。



图 13 并行传输 RF/VLC 系统^[61]

Fig. 13 Parallel transmission RF/VLC heterogeneous system^[61]

5 工业互联网下无线光通信面临的问题

尽管工业互联网下的无线光通信技术研究取得了一部分成效,但这些技术实际应用于工业的成熟度较低,在广泛部署之前仍面临许多挑战。大致包括较长的传输范围、室内衰减、多径反射、信号丢失和阻塞、RF/VLC 异构传输理论等问题。

1) 较长的传输范围

在仓库和工厂等较大场所,天花板高度导致链路范围较长,会发生多路径分散,导致路径损耗提高,降低数据速率。此外,天花板上的光源数量越多,它们之间的干扰水平就越高,会影响通信系统性能^[62]。

2) 室内衰减

室内应用的传输介质通常被认为是清新的空气,而复杂的工业环境可能会存在油蒸气、水雾、工业烟雾等杂质,这些杂质颗粒会影响光波传输,削弱信号功率^[63]。

3) 多径反射

工业环境中的金属装置和设备等高反射表面会引起光信号的多径反射,多径效应产生的符号间干扰会影响光信号传输的质量,根据目前的研究,可以采用 OFDM 提高 VLC 链路性能,因而引入了 OFDM 的不同变体,例如直流偏置光 OFDM、非对称限幅光 OFDM、脉冲幅度离散多音调制等。

4) 信号丢失和阻塞

VLC 严重依赖直视传播,因此发送端和接收端之间必须有一条清晰且不间断的路径。工厂中机器人手臂时的随机运动很有可能阻碍光波传播导致信号损失。国外研究人员提出了天线分集模型,该模型将接收端放置在制造单元周围以确保始终存在直视链路,结果显示,即使机器人手臂移动几 cm,也会发生信号衰减高达 20 dB。

5) RF/VLC 异构传输理论问题

对于 VLC/RF 异构网络,现有的大多数研究都假设 VLC 输入信号为高斯信号,但是可见光信号是有界并且非负的,因此传统香农公式并不适合推导传输速率。RF/VLC 异构系统传输速率的闭式表达式和最佳传输机制还有待研究人员进一步的研究。

此外,当前对工业互联网环境下的无线光通信设计

仍然局限于 Lambert 光波束发射器的研究方法,没有充分利用当今商业 LED 光源的非朗伯光波束空间特性。由于工业环境较为复杂,在相关领域的研究需要评估和表征来确定是否投入工厂中,以满足工业自动化要求。

6 结 论

近年来,国内外研究人员通过大量实验证明了无线光通信的工业应用潜力,未来无线光技术在工业领域的研究将集中在提高带宽、增加传输距离、自动方向对准等方面,目前在工业互联网环境中具备如下潜在应用:

1) 定位和信号传输

将无线光通信用于设备定位和信号传输。工厂内移动车可以与 LED 灯交换数据,并且通过 LED 发射的功率强度进行自身定位,中央控制器通过 LED 传达的反馈信号来精确定位移动车的位置。安装了 LED 的设备可以传输数据信息,要求原料交付以用于生产,无人机接收到相应信号将立即响应并参与任务。

2) 集成于可穿戴安全设备

在一些危险性较高的工业场所中,工人需要佩戴头盔形式的可穿戴安全设备来应对突发情况的产生,可以将 VLC 收发器集成到可穿戴安全设备中,这些设备可以捕获 LED 发射的危险信息并广播给其他员工,以提高工作场所的安全性。

3) 水下工业互联网

在海洋环境中,通过水下工业互联网实现整个海洋的数据传输,使水下传感器系统进行相互通信并将数据传递至地面网络。由于射频信号无法穿透水中,声信号在传播过程中数据速率较低并且成本较高,因此无线光通信被考虑作为水下工业互联网的通信技术之一。

4) 与增强现实技术相结合

增强现实是一项借助虚拟信息来补充现实世界体验感的技术,它可以为工厂中的机械操作提供指导。可以将增强现实技术与无线光相结合,为一台机器虚拟标记数据信息,员工使用专用设备来获取这些信息,起到便捷办公的作用。

参考文献

[1] 王敏. 面向工业互联网的无线通信技术研究[J]. 长江信息通信, 2022, 35(10): 227-229.
WANG M. Research on wireless communication technology for industrial Internet [J]. Changjiang Information Communication, 2022, 35(10): 227-229.

[2] 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.
DING J P, YI ZH L, ZHAO K, et al. Research progress of industrial wireless optical technologies [J]. Optical

Communication Technology, 2022, 46(2): 35-40.

[3] 张思雨. LiFi 网络频谱资源分配及接入方案研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
ZHANG S Y. Research on spectrum resource allocation and access scheme of LiFi network [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2019.

[4] HUANG H M, LAN T X, HUANG C, et al. Visible-light communication using high-power LED panel-lamp and low-complexity MOSFET circuit [J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(1): 1-17.

[5] 李征, 王沸钢, 梁静远, 等. LED 可见光通信的研究进展[J]. 照明工程学报, 2023, 34(1): 29-40, 44.
LI ZH, WANG F G, LIANG J Y, et al. The principle and research progress of LED visible light communication [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2023, 34(1): 29-40, 44.

[6] 郑瀚. 基于可见光的室内无人机定位方法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.
ZHENG H. Research on indoor UAV location method based on visible light [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021.

[7] 张丽萍. LiFi 技术发展综述[J]. 现代电信科技, 2017, 47(2): 42-48, 55.
ZHANG L P. Overview of LiFi technology developments [J]. Modern Science and Technology of Telecommunications, 2017, 47(2): 42-48, 55.

[8] 阳世荣. LiFi 技术在船舶综合监控中的应用探讨[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(11): 14-16, 43.
YANG SH R. Discussion on application of LiFi technology in ship integrated monitoring [J]. Automation and Instrumentation, 2022, 37(11): 14-16, 43.

[9] LUO J H, FAN L Y, LI H S. Indoor positioning systems based on visible light communication: state of the art [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(4): 1-4.

[10] 厉宁. 室内定位算法研究与系统实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
LI N. Research and system implementation of indoor positioning algorithm [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.

[11] 郭涛. 室内不规则场景 VLC 信道建模与定位的研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
GUO T. Research on VLC channel modeling and localization for indoor irregular scenes [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2022.

[12] WANG Y Q, GONG Y K, SHI Z F. Research on the collinear equation model of visual positioning based on

- visible light communication [J]. MATEC Web of Conferences, 2015, 22(4): 33-37.
- [13] JIANG J J, GUAN W P, CHEN ZH N, et al. Indoor high-precise three dimensional positioning algorithm based on visible light communication and fingerprinting using k-means and random forest [J]. Optical Engineering, 2019, 58(1): 336-348.
- [14] 彭恺. 基于可见光的便携式无线数据传输系统研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2017.
PENG K. Research on portable wireless data transmission system based on visible light [D]. Xi' an: Xi' an Technological University, 2017.
- [15] GOROSHKO K, MANOLAKIS K, GROBE L, et al. Low-latency synchronization for OFDM-based visible light communication[C]. 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop. IEEE, London, UK, 2015: 1327-1332.
- [16] SHAO S H, KHREISHAH A, AYYASH M, et al. Design and analysis of a visible-light-communication enhanced WiFi system [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7 (10): 960-973.
- [17] 牛衍方, 孙德栋, 龚桃荣, 等. 可见光通信技术在智能工业照明中的应用研究[J]. 照明工程学报, 2017, 28(5): 27-31.
NIU Y F, SUN D D, GONG T R, et al. Application of visible light communication technology in the intelligent industrial lighting [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2017, 28(5): 27-31.
- [18] KIM C M, KOH S J. Device management and data transport in IoT networks based on visible light communication[J]. Sensors, 2018, 18(8): 2741-2752.
- [19] BERENQUER 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.
- [20] BERENQUER P W, HELLOWIG 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.
- [21] 李浩. 基于可见光定位自动导引车的室内自动定位导引系统设计[D]. 广州: 暨南大学, 2018.
LI H. Design of indoor automatic positioning guidance system based on visible light positioning automatic guided vehicle[D]. Guangzhou: Jinan University, 2018.
- [22] ALMADANI Y, IJAZ M, RAJBHANDARI S, et al. Dead-zones limitation in visible light positioning systems for unmanned aerial vehicles [C]. 2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks. IEEE, Zagreb, Croatia, 2019: 419-421.
- [23] LAM E W, LITTLE T D C. Visible light positioning for location-based services in industry 4.0 [C]. 2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems. IEEE, Oulu, Finland, 2019: 345-350.
- [24] KOONEN T, MEKONNEN K A, CAO Z ZH, et al. Beam-steered optical wireless communication for industry 4.0 [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(6): 1-10.
- [25] YANG H L, ALPHONES A, ZHONG W D, et al. Learning-based energy-efficient resource management by heterogeneous RF/VLC for ultra-reliable low-latency industrial IoT networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5565-5576.
- [26] 杨建国. 面向可见光通信 DCO-OFDM 系统的半盲时间同步算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
YANG J G. Research on semi-blind time synchronization algorithm for visible light communication DCO-OFDM system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [27] BECHADERGUE B, AZOULAY B. An industrial view on LiFi challenges and future [C]. 2020 12th International Symposium on Communication Systems. IEEE, Porto, Portugal, 2020: 1-6.
- [28] JUNGNICHEL V, BERENQUER P W, MANA S M, et al. LiFi for industrial wireless applications [C]. 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. IEEE, San Diego, USA, 2020: 1-3.
- [29] ZHANG X B, CAO Z Z, LI J H, et al. Wide-coverage beam-steered 40-Gbit/s non-line-of-sight optical wireless connectivity for industry 4.0 [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(24): 6801-6806.
- [30] SCHNEIDER D, SHROTRI A, FLATT H, et al. Impact of industrial environments on visible light communication [J]. Optics Express, 2021, 29(11): 16087-16104.
- [31] 亢令川. 阵列可见光通信移动接收技术研究 [D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2021.
KANG L CH. Research on mobile receiving technology of array visible light communication [D]. Zhengzhou: Strategic Support Force Information Engineering University, 2021.
- [32] MA Z Y, KOUHINI S M, KOTTKE C, et al. LiFi positioning and optimization in an indoor factory environment [C]. IECON 2022-48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, Brussels, Belgium, 2022: 1-6.

- [33] KOUHINI S M, HOHMANN J, MANA S M. All-optical distributed MIMO for LiFi: Spatial diversity versus spatial multiplexing [J]. *IEEE Access*, 2022, 10 (13): 102646-102658.
- [34] OZYURT A B, POPOOLA W O. CoMP-JT scheme for D2D communication in industrial LiFi networks [J]. *IEEE Access*, 2022, 10(2): 70760-70768.
- [35] OZYURT A B, POPOOLA W O. LiFi-based D2D communication in industrial IoT [J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(1): 1591-1598.
- [36] REGUERA V A, TEIXEIRA L, BARRIQUELLO C H, et al. Efficient and low-complexity rate and dimming control of VLC for industrial IoT applications[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 2022, 3(4): 1087-1095.
- [37] 杨博瑞. 基于 OFDM 的 PLC 与 VLC 级联通信系统研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
YANG B R. Research of PLC and VLC cascade communication system based on OFDM[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.
- [38] XUE J SH, YE Z W, ZHANG H Y, et al. Flexible design of low-delay MEC-VLC integrating network based on attocell overlap for IIoT [J]. *Electronics*, 2022, 11(6): 223-228.
- [39] XUE J SH, ZHANG Y Y, WANG C, et al. Boundaryless visible light communication system without attocell for industrial Internet of Things [J]. *IEEE Access*, 2022, 10(6): 87454-87460.
- [40] COSTA W, CAMPOREZ H, HINRICHS M, et al. Toward AI-Enhanced VLC systems for industrial applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(4): 1064-1076.
- [41] DU X X, ZHANG Y Y, YE Z W, et al. LED lighting area recognition for visible light positioning based on convolutional neural network in the industrial internet of things [J]. *Optics Express*, 2023, 31 (8): 12778-12788.
- [42] ZHOU H Y, ZHANG M L, REN X M. Design and implementation of wireless optical access system for VLC-IoT networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(8): 2369-2380.
- [43] ABOAGYE S, NDJIONGUE A R, NGATCHED T M N, et al. RIS-assisted visible light communication systems: A tutorial [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2023, 25(1): 251-288.
- [44] 肖志强. 衰落信道下的可见光通信系统分析[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
XIAO ZH Q. Analysis of visible light communication system under fading channel [D]. Nanjing, Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [45] 文湘益, 汪井源, 徐智勇, 等. 室内可见光功率分布分析与仿真研究[J]. *军事通信技术*, 2013, 34(1): 73-76.
WEN X Y, WANG J Y, XU ZH Y, et al. Analysis and simulation of indoor visible light power distribution[J]. *Military Communication Technology*, 2013, 34 (1): 73-76.
- [46] 夏中金. 基于可见光通信的煤矿井下环境参数监测研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
XIA ZH J. Research on environmental parameter monitoring in coal mine based on visible light communication [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.
- [47] WANG Y G, TAO L, WANG Y Q. High speed WDM VLC system based on multi-band cap64 with weighted pre-equalization and modified CMMA based post-equalization[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(10): 1719-1722.
- [48] XU L D, HE W, LI SH C. Internet of Things in industries: A survey [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10 (4): 2233-2243.
- [49] FUSCO G, RUSSO M. Robust MIMO design of decentralized voltage controllers of PV systems in distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(6): 4610-4620.
- [50] STRICCOLI D, BOGGIA G, GRIECO L A. A Markov model for characterizing IEEE 802. 15. 4 MAC layer in noisy environments [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62 (8): 5133-5142.
- [51] BRUNDU F G, PATTI E, OSELLO A, et al. IoT software infrastructure for energy management and simulation in smart cities [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13 (2): 832-840.
- [52] 乔琪, 张悦. 基于 MIMO 的可见光通信系统研究[J]. *无线互联科技*, 2021, 18(1): 3-4, 25.
QIAO Q, ZHANG Y. Research on visible light communication system based on MIMO [J]. *Wireless Connectivity Technology*, 2021, 18(1): 3-4, 25.
- [53] 柯熙政, 杨尚君, 吴加丽, 等. 无线光 MIMO 技术及空时编码研究进展[J]. *湖南科技学院学报*, 2021, 42(5): 25-32.
KE X ZH, YANG SH J, WU J L, et al. Research progress of wireless optical MIMO technology and space-time coding[J]. *Journal of Hunan University of Science and Engineering*, 2021, 42(5): 25-32.
- [54] 杭程. 室内 MIMO 可见光通信系统信道相关性和信道

- 间干扰研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- HANG CH. Research on channel correlation and interchannel interference in indoor MIMO visible light communication system[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [55] HASS H, YIN L, WANG Y L, et al. What is LiFi? [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(6): 1533-1544.
- [56] 柯熙政, 雷思琛, 李蓓蓓. 无线光正交频分复用系统的实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1205003. KE X ZH, LEI S CH, LI B L. Experimental study on free space optical orthogonal frequency division multiplexing system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1205003.
- [57] 杨家旺, 曹阳, 刘世涛. 基于自适应 OFDM 的室内可见光通信系统性能研究[J]. 光通信技术, 2015, 39(4): 50-52. YANG J W, CAO Y, LIU SH T. Performance research of indoor visible light communication system based on adaptive OFDM technology [J]. Optical Communication Technology, 2015, 39(4): 50-52.
- [58] HAAS H, CHEN C, BRIEN D O. A guide to wireless networking by light [J]. Progress in Quantum Electronics, 2017, 55(5): 88-111.
- [59] 李绍举. 室内可见光通信下行信道及资源调度研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019. LI SH J. Research on downlink channel and resource scheduling of indoor visible light communication [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [60] 梁静远, 徐亚欣, 韩美苗, 等. 室内可见光通信异构融合系统研究进展 [J]. 光通信技术, 2023, 47(1): 46-50. LIANG J Y, XU Y X, HAN M M, et al. Research progress of heterogeneous integration system for indoor visible light communication [J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(1): 46-50.
- [61] 乔佳佳. 面向多用户的射频/可见光通信异构网络物理层安全研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022. QIAO J J. Research on physical layer security of heterogeneous RF/visible light communication networks for multiple users [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2022.
- [62] CHEN C, ZHONG W D, YANG H L, et al. Reduction of SINR fluctuation in indoor multi-cell VLC systems using optimized angle diversity receiver [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17): 3603-3610.
- [63] IJAZ M, GHASSEMLOOY Z, PESEK J, et al. Modeling of fog and smoke attenuation in free space optical communications link under controlled laboratory conditions [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(11): 1720-1726.

作者简介



秦欢欢, 2010 年于西安工业大学获得学士学位, 2013 年于西安理工大学获得硕士学位, 现为西安理工大学自动化与信息工程学院博士研究生, 主要研究方向为可见光通信技术。

E-mail: 523969187@qq.com

Qin Huanhuan received her B. Sc. degree from Xi'an Technological University in 2010, M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2013. Now she is a Ph. D. candidate in the School of Automation and Information Engineering at Xi'an University of Technology. Her main research interest includes visible light communication technology.



柯熙政 (通信作者), 1996 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为西安理工大学自动化与信息工程学院教授, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 主要研究方向为无线光理论与技术。

E-mail: xzke@263.net

Ke Xizheng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 1996. Now he is a professor at the School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, foreign academician of the Russian Academy of Natural Sciences. His main research interest includes theory and technology of optical wireless communication.