

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407284

可见光通信上行链路研究进展*

梁静远¹ 葛亚航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: 一个完整的通信系统必须包含完整的双向通信链路,也就是含有上行链路和下行链路,上行链路一直以来是双向通信系统的难题。而近年来可见光技术飞速发展,其具有无电磁辐射、通信容量大且绿色环保等优点可以作为传统上行链路方案的补充。本文首先介绍了可见光通信的应用场景和系统构成,并对近年来可见光上行链路国内外研究现状进行综述,另外给出了可见光上行链路的各种方案如可见光与射频、可见光与可见光、可见光与电力载波以及单光源逆向调制技术4种方案,最后总结了可见光通信上行链路目前面临的问题,并总结了各种方案的优缺点以及对未来发展趋势进行展望。

关键词: 上行链路;可见光通信;逆向调制;异构网络

中图分类号: TN929

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.50

Research progress in visible light communication uplink

Liang Jingyuan¹ Ge Yahang¹ Ke Xizheng^{1,2}

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Collaborative Network for Civil-Military Cooperation, Xi'an 710068, China)

Abstract: A complete communication system must encompass a full two-way communication link, which includes both uplink and downlink. The uplink has always been a challenge for two-way communication systems. In recent years, the rapid development of visible light communication technology, with its advantages of no electromagnetic radiation, large communication capacity, and environmental friendliness, can serve as a supplement to traditional uplink solutions. The article first introduces the application scenarios and system composition of visible light communication, and then provides a review of the current research status of visible light uplink at home and abroad in recent years. In addition, it presents various schemes for visible light uplink, such as visible light with radio frequency, visible light with visible light, visible light with power line carrier, and single-source reverse modulation technology. Finally, it summarizes the current issues faced by the visible light communication uplink and summarizes the advantages and disadvantages of various schemes, as well as prospects for future development trends.

Keywords: uplink; visible light communication; reverse modulation; heterogeneous network

0 引言

在可见光通信(visible light communication, VLC)系统中,传输数据的调制是基于发光二极管(light emitting diode, LED)辐射的光强度进行的。传输的数据由接收器通过光电探测器检测^[1]。与射频(radio frequency, RF)相比, VLC 提供了几个优势,包括:1)由于 VLC 频谱中的巨

大带宽可用性。2)由于现有的照明结构可以同时用于照明和通信目的,因此具有成本效益和能源效益;3)高指示和低穿透信号特性增强了安全传输;4)对电磁干扰的鲁棒性等^[2-5]。然而,由于障碍物或基于方向的自阻塞导致的高信号衰减, VLC 的覆盖范围比 RF 系统低^[6]。此外, VLC 信号容易受到太阳光等环境光源的噪声影响^[7]。因此, VLC 被认为适合于室内通信目的,因为它受环境光的干扰较小。

收稿日期: 2024-02-21 Received Date: 2024-02-21

* 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

目前可见光通信上行链路研究取得了一定的进展,但是这些技术应用于生活中的成熟度还是较低,在许多方面仍然面临许多挑战,如调制带宽限制、信号失真、高频衰减和传输损耗、系统设计与集成、多用户传输技术、可见光上行链路异构网络、可见光上行链路的部署问题等。

调制带宽限制:LED 的调制带宽非常有限这严重限制了 VLC 系统的传输速率。为了解决这一问题,可以采用基于非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 的可见光通信容量优化方法,以及通过预加重和后均衡技术将白光 LED 的带宽拓展^[8]。信号失真:VLC 系统中的非线性源会引起信号失真,进而降低系统性能。针对这一问题,可以通过采用改进的直流偏置正交频复用方案和发送预编码技术来缓解色域串扰的影响,从而减少信号失真^[9]。高频衰减和传播损耗:可见光通信信道中的高频衰减和传播损耗以及复杂的室外环境等因素一直都是可见光技术发展和应用的阻碍。通过建立室内外环境的 VLC 信道模型,并通过实验验证模型的准确性。此外,还可以采用联合扰码-滤波方案来抗室外背景光噪声干扰,可以有效解决这些问题^[10]。多用户传输技术:在无线光通信上行链路的多用户传输技术方面,可以采用建立高效的信道模型和子信道分配等方法^[11]。异构网络:在涉及 RF、光纤、电力线通信 (power line communication, PLC) 和自由空间光等技术的基于 VLC 的聚合网络中,消息帧兼容性是必须解决的关键问题。VLC 系统必须与现有方案兼容。室内部署:基于 VLC 的网络实际部署的最重要挑战之一在于上行链路中使用的技术集成。同样值得强调的是光源的双重用途,同时作为通信和照明设备,这需要有效的算法来满足照明和通信的要求。

可见光上行链路技术面临的挑战包括调制带宽限制、信号失真、高频衰减和传播损耗、系统设计与集成以及多用户传输技术等方面。通过采用 NOMA、预加重和后均衡技术、建立信道模型、设计专用芯片、采取兼容的异构网络、以及采用高效的信道建模和子信道分配方法等解决方案,可以有效提升 VLC 系统的性能和应用潜力。此外,一个完整的通信系统必须包含完整的双向通信链路,也就是含有上行链路与下行链路,下行链路的应用技术已经成熟但上行链路一直以来是双向通信系统的难题。上行链路的应用技术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。

本文对可见光通信系统中的上行链路相关应用技术与方案进行介绍、总结并对国内外研究进展进行讨论,最后对可见光通信系统上行链路各个方案存在的问题、优缺点以及展望了可见光通信系统上行链路的发展方向。

1 可见光通信系统与上行链路

图 1 展示了可见光通信系统的基础结构组成。可见光通信系统主要是由两个核心模块构成:发送模块、接收模块。系统传输信息流程为:首先,将要发送的二进制序列经过编码和调制,调制出的电信号驱动 LED,LED 将即将发送的信息调制到光信号上并发出光信号。光电检测器负责接收传递的光信号,并将这些光信号转化为电信号。由于接收到的电信号相对较弱,并且电信号中可能含有高频噪声,因此在信号处理阶段,需要通过放大信号和低通滤波滤除噪声,以获取更适合的电信号。最终,通过解调和解码电信号,可以获得恢复的二进制序列^[12]。

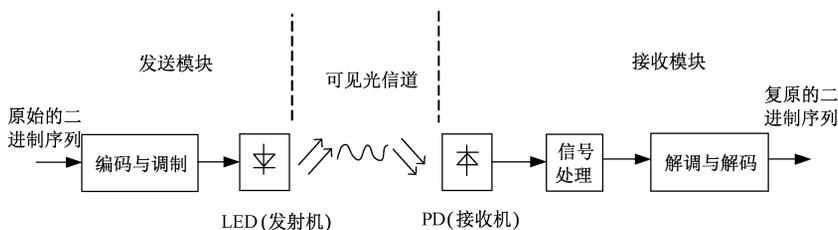


图 1 可见光通信系统结构

Fig. 1 Structure of visible light communication system

可见光通信上行链路示意图如图 2 所示。

在一间房间里由悬挂在天花板上的 LED 作为通信系统中的发射端,用户个人设备为接收端。上行链路是指从终端设备(如手机、电脑等)到网络的传输路径,而下行链路则是从网络到终端设备的传输路径。

下行链路中,先对待发送信息序列进行编码调制产

生交流电信号,LED 发射光信号通过下行链路由接收端光电检测器进行检测,再把光信号变成电流信号。最后从电信号中恢复出原始的信息序列。

在上行链路的部分,LED 驱动在可见光通信中被用来发送响应信号,这些信号被 LED 发送端的光电检测器捕获,从而形成了一个封闭的上行通信链路。

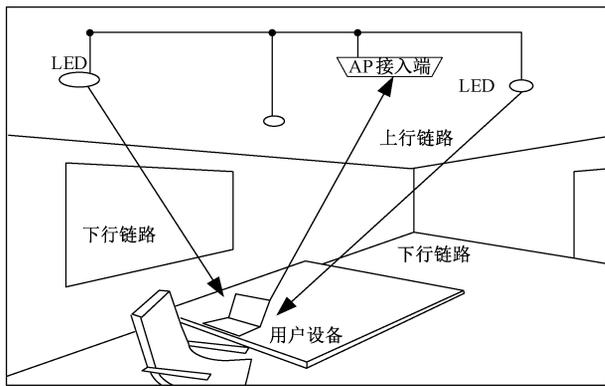


图 2 上、下行链路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of uplink and downlink

2 可见光上行链路国内外研究进展

21 世纪初随着 LED 效率的显著提升和成本的降低,可见光通信作为一种新兴技术开始受到关注。传统的 VLC 系统主要关注下行链路,即从光源到接收器的数据传输。研究上行链路是为了实现完整的双向通信,允许用户设备向网络发送数据,这对于交互式应用和网络服务至关重要。随着 5G 和未来 6G 网络的发展,对高速率、低延迟和高可靠性的通信需求不断增长。VLC 上行链路的研究有助于适应这些需求,为未来网络提供支持。

2.1 国外研究进展

2005 年 Komine 等^[13]采用时分多址的调制方式,研究了可见光信道传输中阴影和墙面多径反射对系统的影响,通过该调制方式可以有效地降低了阴影对系统的影响。

2011 年波士顿大学的 Rahaim 等^[14]提出了一种 WiFi 和 VLC 相结合的室内融合照明系统。该系统利用下行链路 VLC 通道来补充上行链路 RF 通信,该系统的提出为 VLC 异构网络方案提供了新的思路。

2013 年 Schmid 等^[15]提出以 VLC 作为上、下行链路的可见光通信短距离系统,文献给出了一种新的通信网络协议,这对上行链路的实现至关重要。

2014 年 Cossu 等^[16]提出了一种发送和接收端都使用 LED 作为光源和探测器的双向通信系统,采用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)或 32/64 阶正交幅度调制(32/64-quadrature amplitude modulation, 16/64-QAM)可以实现高速上行链路数据传输。文献提出的抗干扰措施可以解决在非直视传输条件下上行链路面临更多的干扰问题。

2015 年 Ying 等^[17]研究了一种多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO) VLC 系统的上行链路中采用预编码器和均衡器的联合优化设计。该优化

方法可以提高上行链路的数据传输效率和信号质量,尤其是在多用户环境中。均衡器设计有助于减少上行链路中的干扰和衰减,提高信号的接收质量。

2019 年 Yang 等^[18]为提出了一种基于 VLC 上行链路的中继传输系统,中继传输系统的应用可以降低光源功率过大对人眼的影响,提出的最优设计使得系统复杂度大大降低。

2019 年 Wang 等^[19]为解决现有的 NOMA-VLC 系统的工作主要集中在下行链路上,功率分配算法主要关注信道状态信息,忽略了传输信号的影响。提出了一种用于上行 NOMA-VLC 系统的信道和比特自适应功率控制策略。仿真结果表明,提出的自适应功率控制策略优于增益比功率分配方案、固定功率分配方案和时分多址方案。

2019 年 Rosenthal 等^[20]提出了一个差分正交相移键控(differential quadrature phase shift keying, DQPSK)反向散射上行链路的神经脑机接口(brain-computer interface, BCI)作为一种替代主动无线电。上行链路在 915 MHz 工业、科学和医疗(industrial scientific medical Band, ISM)频段上工作时,吞吐量达到 25 Mbps。

2020 年 Ndjonoue 等^[21]提出一种基于 VLC 的网络架构,该架构采用双工户外 VLC 主干网子系统连接,用于在两个无线光个人区域网络(optical wireless personal network, OWPAN)之间共享数据,并给出了相关的链路容量。最后,概述了在 OWPAN 中应用 VLC 技术及其与现有传统网络集成的研究机会。

2021 年 Olejniczak 等^[22]提出了一个在由软件定义的窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT)上行链路框架。该框架可以用作开发、研究和优化数字发射机路径的学术工具。

2021 年 Kim 等^[23]提出了一种上行链路的空复用方法,该方法可以利用基本服务集(basic service set, BSS)颜色和邻近信息来提高载波感知的效率,从而提高空复用,仿真结果表明,该方法实现了相当大的吞吐量改进。

2022 年 Zhang 等^[24]提出了一种物理保存上行链路光源的全双工自由空间光学电台(radio over free-space optica, RoFSO)传输系统结构。提取下行双边带(double side band, DSB)调制信号的光中心载波作为上行光源,降低了系统复杂度。

2022 年 Wang 等^[25]提出了一个波形指数调无线光通信上行链路系统,该系统每个波形都被视为一个虚拟发射机。额外的数据通过选择性激活的虚拟发射器的索引进行传输,并且可以提高上行链路速度,结果表明,所提出的波形索引调制(waveform index modulation, WIM)上行链路可实现高达 15 Gb/s 的数据速率。

2.2 国内研究进展

2014 年北京大学郑重等^[26]探讨详细介绍了应用于可见光通信的上行链路方案,提出了射频、可见光、780~950 nm 红光以及激光可作为可见光上行链路方案详细介绍了每个方案的优缺点以及给出了展望。

2015 年邱灏等^[27]提出一种采用单光源的全双工逆向调制系统,并进行了室内近距离单光源全双工逆向调制实验实现了询问端调制速率为 2.048 Mbit/s,逆向端的调制速率为 2.0 kbit/s。

2015 年徐山河等^[28]在单光源的基础上,采用内外调制相结合的方法成功搭建了双工通信系统,该系统采用内调制作为上行链路,声光外调制作为下行链路,其中下行通信速率最高为 30 kbit/s,下行通信速率最高可达到 3 Mbit/s。

2015 年 Song 等^[29]提出了一种基于 PLC 和 VLC 深度融合方案,此方案采用 PLC 作为下行链路,VLC 作为上行链路可以大大降低 VLC 网络协议的复杂性同时提供更好的信息覆盖。

2018 年武梦龙等^[30]提出并实现了采用 LED 同时作为光通信系统的收发元件并且可以进行实时双向可见光通信的系统方案,该方案上、下行链路均为可见光,系统采用硬件实现系统模式的快速切换。整个系统采用时分复用的方法使得 LED 工作在半双工模式下设计一个通信控制协议实现 VLC 系统的双向控制,并搭建了实验装置平台实现了 2 m 以上距离 8 Mb/s 速率的双向可见光通信。

2019 年郭晶森^[31]为了改善上行链路,分别研究了用户关联问题和小区间干扰问题。提出了一种创新的上行链路干扰减少技术,此技术利用动态的分布式功率控制策略来降低共道干扰。最终,通过仿真实验,证实了动态分布式功率控制策略和改良后的反频率复用方案具有显著的有效性。

2020 年王晓明等^[32]提出了一种新的上行链路调度算法,可以解决上行链路调度存在公平性差、分组丢弃多的问题。该算法根据实时业务的延迟约束条件建立目标整数线性规划模型,仿真结果表明该方法相对比与动态匈牙利算法的性能公平性得到提升的同时还没有牺牲 MAC 层吞吐量。

2021 年朱蔓菁等^[33]提出了在 VLC 中采用中继技术,该技术可以解决 VLC 技术中链路遮挡的问题,该系统中中继的作用在上下链路各不相同,下行链路中中继节点主要是协助信源节点转发信息,上行链路中中继节点作用是降低光源的发射功率降低对人眼的伤害。

2022 年卢霆威等^[34]设计了满足以太网技术要求的全双工可见光通信系统。系统由近端和远端构成,该系统可在通信距离为 10 m 的情况下实现 100 Mbps 以太网

的全双工通信。

2022 年段志文^[35]提出在去蜂窝大规模多输入多输出技术系统的通用模型中进行了上行链路信号传输的相关研究,通过对时分双工(time division duplex, TDD)和波分双工(frequency division duplex, FDD)模式的分析,指出运行在 TDD 模式下,系统中导频污染问题的来源以及功率优化中效应函数的分类。

可见光通信上行链路的研究和实现是近年来可见光通信技术发展的重要方向之一。当前研究主要集中在在以下几个方面:提高上行链路的传输速率与吞吐量;利用 MIMO 技术^[17]、空间复用技术^[23]以及先进的调制技术,如 M-QAM、OFDM^[16]、DQPSK^[20]和 WIM^[25],可以显著提升 VLC 上行链路的数据传输速率和系统吞吐量。降低多径反射对传输效果的影响;通过时分多址(time division multiple access, TDMA)调制方式^[13]和编码器与均衡器的联合优化设计^[17],可以有效减轻多径反射对上行链路传输质量的不利影响构建可见光异构网络;引入 RF、PLC 和 VLC 技术等构建异构网络,RF-VLC 异构网络^[15]可以解决传统 RF 通信系统中的网络拥堵问题。然而,这种系统可能面临电磁干扰和频谱资源占用的问题。VLC-VLC 异构网络^[16,30]因其简单结构、大通信容量和高传输速率而受到关注,但上行光可能对人眼造成视觉影响,限制了其应用场景。采用单光源逆向调制系统^[27],通过系统内的两次调制构成上下行链路,可解决电磁干扰问题,减少对人眼的影响,但传输速率有待提高。文献^[28]则是在单光源逆向调制的基础上结合内调制和外调制技术,可以提高系统的灵活性并减少光路间的干扰。PLC-VLC 异构网络^[29]结合了 PLC 的广泛覆盖范围和 VLC 的高安全性与传输速率。降低上行光源对人眼视觉的影响;采用中继技术,通过降低光源发射功率,有效减轻上行链路中光源对人眼视觉的影响^[18,33]。

综上所述,可见光通信上行链路领域的研究正朝着提升上行链路性能、构建高效异构网络以及降低人眼视觉影响的方向发展。通过应用先进的调制解调技术、网络架构创新以及中继技术,VLC 系统的性能得到了显著提升。未来的研究将继续探索更高效的数据传输方法、更优化的网络结构以及更安全的用户视觉体验。

3 可见光通信系统上行链路方案

目前的研究已经提出了无线电波、无线光波和各种异构融合网络系统这三大类上行链路用于可见光通信系统,其中无线电波主要采用 Wi-Fi 作为其典型解决方案,而光波方案中又可以按照波段分为 380~780 nm 间的可见光波段与 780~950 nm 间的红外光上行链路,其中异构融合网络系统可以分为可见光-可见光系统、可见光-射

频系统、可见光-电力线系统、红外-射频 (infrared-radio frequency, IR-RF) 系统^[36]和单光源的逆向调制技术的可见光通信系统。如表 1 所示。根据表中不同的方案在上行链路中各有优劣,选择合适的方案应该考虑具体的应用场景成本、覆盖范围、信号传输速率以及抗干扰能力等因素。

表 1 上行链路方案优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of uplink solutions

类别	优点	缺点
射频	系统成熟,通信链路可遮挡	与现有系统不兼容,存在射频干扰,占用频谱资源
可见光	系统结构简单,通信容量大,无需另行设计上行系统	上行光人眼可见,有视觉影响,限制应用场合
逆向调制	系统结构简单,无需频谱许可,保证人眼安全	传输速率不高
电力载波	传输距离较长,抗干扰能力强,基础设施利用率高	传输速率不高、安全性较低

3.1 射频-可见光通信系统方案

目前 WiFi 上行链路已成为射频上行链路的主流, WiFi 无所不在的特性可以很好的被用在上行链路,故而目前 WiFi 与 VLC 的融合通信系统成为主流^[37-39]。特别是下行链路使用 VLC 上行链路采用 WiFi 的异构网络可以减少 RF 上行链路上的拥塞。室内无线局域网目前应用和部署最广泛,技术最成熟的就是 WiFi 协议,也就是 IEEE 802.11 系列协议^[40]。

根据文献[41-45]可将有关 RF/VLC 异构网络传输混合形式分为 3 类。

第 1 类:双跳 RF-VLC 异构系统模型,它是指发射机到接收机的链路分为两跳,一跳使用 VLC 技术,另一跳使用 RF 技术如图 3 所示^[46],信源经过调制和添加直流偏置由 LED 发出光信号经过可见光信道到达中继节点,中继节点接收到 LED 发出的光信号将其转化为电信号再由射频发送器传输数据到移动终端。

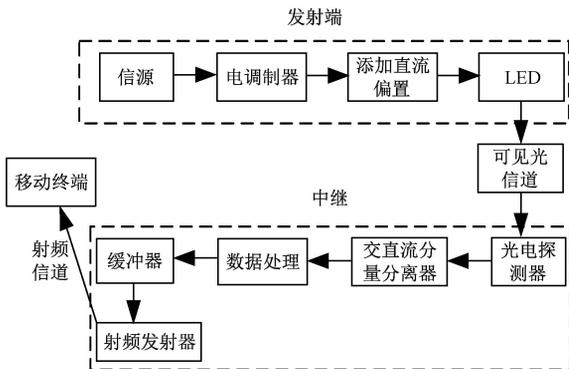


图 3 双跳射频-可见光系统

Fig. 3 Double hop radio frequency-visible light system

第 2 类:并行 RF-VLC 异构系统模型特点是用户接

收机同时接收 RF 和 VLC 传输的信息,如图 4 所示^[47],在室内 VLC 和射频同时向用户传递信息而用户方面采用聚合技术整合射频和可见光所发送的数据,当可见光链路被遮挡时或者射频链路不能正常运作时,该系统可以保证另一个链路也可以正常接收和发送消息。

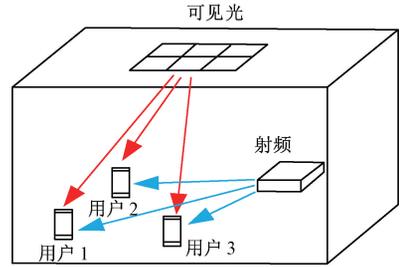


图 4 并行射频-可见光异构系统模型

Fig. 4 Parallel radio frequency-visible light heterogeneous system model

第 3 类:机会型独立系统模型,是指用户接收机无聚合 RF 和 VLC 信息的能力,系统发射机或用户接收机需要从 RF 和 VLC 两者中选择其一进行通信。如图 5 所示^[48],LED 信号发射器的通信覆盖区较小,而射频发射器的通信覆盖区较宽,当用于处于 LED 通信范围和射频通信范围重叠区域时时可以根据收信信噪比、应用需求、设备移动性参数等自由选择最佳的网络。

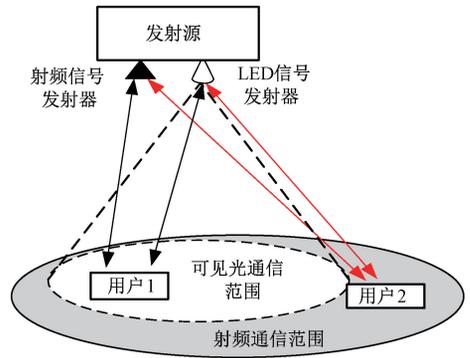


图 5 独立射频-可见光系统

Fig. 5 Independent radio-visible light system

表 2 为双跳 RF/VLC 异构系统模型,并行 RF/VLC 异构系统模型,机会型独立系统 (RF/VLC) 模型的优缺点分析和使用场景。

3.2 电力线通信-可见光通信系统方案

PLC 是一种通过中、低压电力线来实现数据传输的通信技术。该技术的主要优势在于其广泛的覆盖范围,既可以作为一线设备使用,也可以作为各种电器的直接网络终端。PLC 在家庭内部网络中的应用已经达到了成熟的标准和产品,为解决“最后 300 m/100 m”的问题提供了一个具有较高竞争力的解决方案^[49]。

表 2 RF-VLC 异构系统模型对比

Table 2 Comparison of RF-VLC heterogeneous system models

类别	优点	缺点	适用场景
双跳 RF/VLC 异构系统模型	能够克服单一通信技术的局限性,提高系统的可靠性和覆盖范围。	存在复杂的中继管理和信号处理需求,以及可能增加的系统成本和复杂性。	适用于需要长距离通信或在复杂环境中需要增强信号覆盖的场景。
并行 RF/VLC 异构系统模型	可以充分利用两种技术的优势,提供更高的数据吞吐量和更好的服务质量。	设计和实现可能较为复杂,需要精确的同步和协调两种通信方式。	适用于高数据速率和高可靠性要求的场景,如城市环境中的密集网络部署。
机会型独立系统模型	具有灵活性和适应性,可以根据环境变化和用户需求动态调整使用的技术。	可能需要复杂的决策算法来选择最佳的通信技术,且在切换技术时可能会有短暂的服务中断。	适用于通信环境多变,需要快速适应不同条件的场景,如移动通信或临时部署的网络。

PLC 和 VLC 的天然结合为室内可见光通信与互联网的连接提供了更大的便利性。PLC-VLC 融合系统拥有出色的通信性能以及不需要额外布线的优点在物联网、和电力系统以及智能家居等领域得到了广泛应用^[50],但是当室内可见光通信系统中采用 LED 作为无线发射端时需要摆脱信息孤岛的问题^[51]。

目前 PLC 与 VLC 融合系统的方案有 3 种分别是^[52]:

方案 1:所述 VLC 为固定位置发送,其特征在于:所述 VLC 光源下方设置有专用 VLC 收发器以使 VLC 发送可在固定位置完成。正如图 6 中所显示的那样,该方案中上下行链路均是采用 VLC 进行通信,上下行的通信都是在 VLC 光源的发送器和接收器之间完成,VLC 光源与外部设备通过 PLC 设备相连接,上网设备通过以太网线连接至 VLC 收发器。该计划的优点在于上网设备不需要进行任何改装,只需接入网线就可以上网。最早的 VLC 和 PLC 组合方案最为简单,各类设备变化也是最多的^[53]。

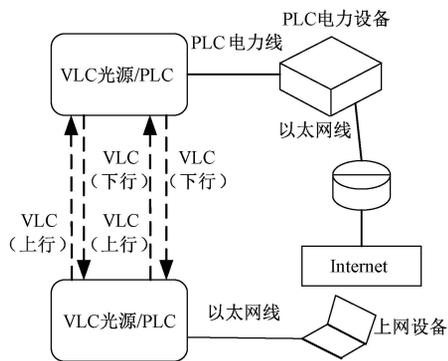


图 6 方案 1:VLC 固定位置传输示意图
Fig. 6 Option 1: schematic diagram of VLC fixed position transmission

方案 2:VLC 定点传输的特征在于:每一个装有 VLC 收发器的 VLC 设备可以同时和 VLC 光源进行通信。图 7 表明,几种 VLC 设备可以在同一个房间共享 VLC 光

源。该方案还可推广为在一个房间内具有多个 VLC 光源,VLC 光源通过电力线 PLC 联网和通信,用户可利用最近的 VLC 光源进行 Internet 上网通信。

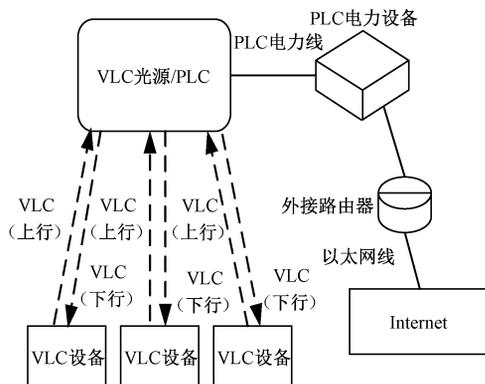


图 7 方案 2:VLC 定点传输
Fig. 7 Option 2: VLC fixed point transmission

方案 3:VLC 下行,PLC 上行。如图 8 所示,室内的 VLC 设备可以通过 PLC 作为上行链路进行上行回传,这样可以有效降低 VLC 设备之间的发光造成光信号干扰通信。

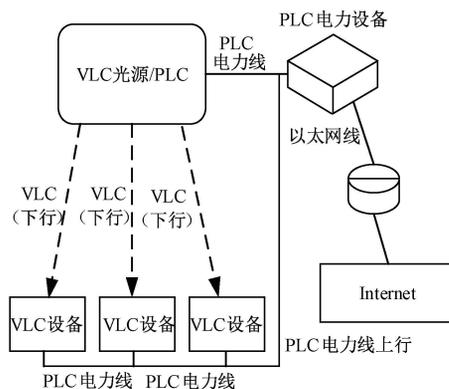


图 8 方案 3:VLC 下行,PLC 上行
Fig. 8 Option 3:VLC downlink, PLC uplink

表 3 为 PLC-VLC 融合方案对比表中介绍了 3 种

融合方案各自的优缺点和适用场景,其中方案 2 和 3 具有更好的灵活性,允许用户在一定范围内移动设备。而方案 1 在部署时成本较低,因为只需要在固定

位置安装收发器。方案 3 可能在维护上更为复杂,但方案 3 通过电力线进行上行通信,可能具有更好的抗干扰能力。

表 3 PLC-VLC 融合方案对比

Table 3 Comparison of PLC-VLC fusion schemes

类别	优点	缺点	使用场景
固定位置 VLC 设备	设备无需改造,易于实现;简化布线需求。	限制用户移动性;多设备使用不便。	适合于对移动性要求不高的场景,例如办公室或家庭中的固定工作区域。
固定位置 VLC 设备 VLC 定点传输	提高光源利用效率;便于设备管理和扩展。	增加设备成本和维护难度;管理多光源复杂。	适用于需要多设备共享单一光源的住宅或小型办公室环境。
VLC 下行,PLC 上行	减少光信号干扰;提高上行通信稳定性。	依赖电力线网络质量;对稳定性和带宽要求高	适合于光源密集且对上行通信质量有较高要求的环境,如商场、会议中心等。

3.3 可见光-可见光通信系统方案

基于 LED 的可见光通信技术受到了广泛的关注。并已被纳入 5G 移动通信的技术框架和网络标准中^[54]。尽管如此,基于 LED 的 VLC 技术仍然存在一些待解决的核心技术难题。具体来说,下行链路的设计是使用照明 LED 作为光源,并采用光电二极管作为接收部件,但上行链路的具体实施方式仍存在许多争议^[55]。

VLC 系统上行链路实现双向通信,则可采取以下方法,第 1 种方法是利用光学链路进行隔离,通过采用简单的光学部件来规划光学路径,并配置光学收发器;第 2 种方法是采用波分复用技术,系统的上下行链路采用不同波长进行通信,该方法可以采用红绿蓝三色发光二极管 (red green blue light emitting diode, RGB LED) 和滤光片使得接收端接收到正确的波长。第 3 种方法采用时分双工模式,同过将时间分成不同时隙上下行链路在不同的时隙内进行通信。

方案 1:采用逆向调制技术使得系统为单光源可见光传输系统,现有可见光上行链路方案主要以射频和红外光、可见光为主和其他解决方案均包含有弊端,逆向调制技术在可见光上行链路上的应用可以确保人眼安全问题、无需频谱许可可以在有电磁干扰的地方进行应用并且只需要一个光源使得系统结构复杂度大大降低^[11]。

室内可见光单光源全双工通信系统如图 9 所示,该系统包括主动端与逆向端两大部分。系统的主动端通常放置在室内天花板固定,负责给室内照明的同时发送信息。逆向端一般被布置于各个类别的终端上,负责在接收到发送端传输的下行信息后提供回传数据。

方案 2:采用波分复用法,如图 10 所示^[16]采用使用 RGB LED 作为系统的发光元件采用加载了 32/64QAM-OFDM 上行信号的蓝色光作为系统的上行通道,在红、绿光通道上加载 32/64QAM-OFDM 下行信号。通过在探测器正面加装滤光片,有效抑制了不同波长通道之间的相

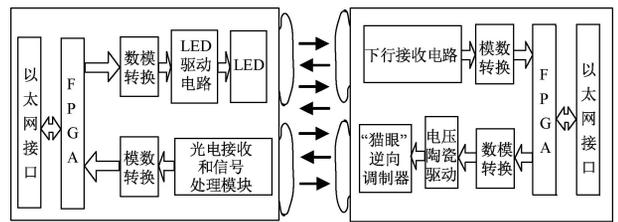


图 9 系统整体结构图

Fig. 9 Overall system structure diagram

互干扰,形成可见光波分双工系统。波分复用技术所使用的三色 LED 仅有红绿蓝 3 个固定通道,不能像时分复用方式那样灵活地分配上下行速率。

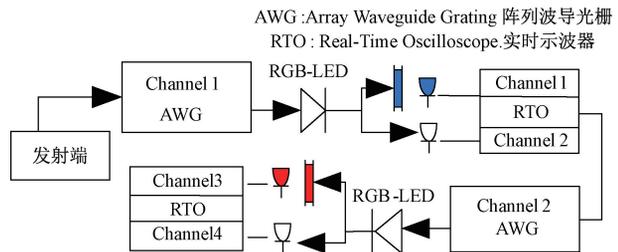


图 10 RGB 可见光通信系统

Fig. 10 RGB visible light communication system

方案 3:采用时分复用法^[30],使得每个 VLC 设备以 3 种通信模式之一运行,并在通信协议要求时改变其模式。如果 VLC 设备没有任何帧要发送,并且没有接收任何帧,则它保持在 IDLE 模式。在 IDLE 模式下,VLC 设备周期性地传输所谓的空闲模式,使 LED 看起来在恒定亮度下打开,如图 11 所示。该设备以给定的交替频率 (1/2T) 按照预定义的模式传输 ON 和 OFF 符号,其中 T 是每个插槽的持续时间 (T=500 μs),因此光被感知为恒定强度。Idle 模式期间的周期性 ON-OFF 空闲模式由 4 个连续时隙 ON-OFF-off-on 的周期性重复组成如图 11 所示。

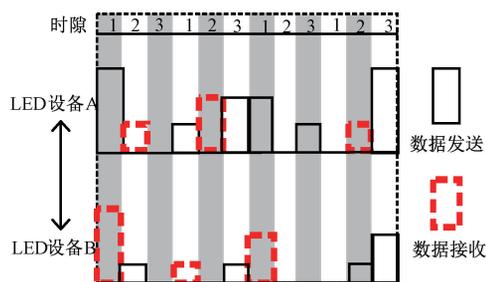


图 11 基于时分复用的双向通信

Fig. 11 Two-way communication based on Time division multiplexing

表 4 为 VLC 系统上行链路方案优缺点和适用场景对比表,其中时分双工技术相对成熟,设备简单,而波分双工和逆向调制技术则可能需要更高级的技术支持。时分双工通常具有成本优势,但在频谱利用和抗干扰方面可能不如波分双工。逆向调制技术在多变的环境中可能表现更好,但实现成本和复杂度较高。在选择适合的上行链路技术时,需要根据具体的应用需求、成本预算、技术成熟度以及环境条件进行综合考虑。

表 4 VLC 系统上行链路方案优缺点

Table 4 Advantages and disadvantages of the VLC uplink solution

类别	优点	缺点	适用场景
逆向调制技术	灵活性高:可以根据信号强度动态调整调制参数,提高信号质量。抗干扰能力强;通过调整调制方式,可以减少外部光源干扰的影响。	实现复杂;需要复杂的信号处理算法来实现逆向调制和解调。带宽效率可能较低;动态调整调制参数可能会牺牲一定的带宽效率。	适用于外部光源干扰较大或信号质量不稳定的环境。
波分双工	频谱利用率高:使用不同波长的光信号实现上下行链路的分离。抗干扰性能好;不同波长的信号可以减少相互干扰。	成本较高;需要多个 LED 和光电探测器来处理不同波长的信号。设备复杂性增加;需要精密的波长控制和滤波器。	适用于需要高数据传输速率和高抗干扰能力的环境,如数据中心。
时分双工	设备简单;相对于波分双工,时分双工不需要多个波长的光源和探测器。	效率受限;上下行不能同时进行,可能影响通信效率。时钟同步要求高;需要精确的时序控制来避免上下行信号冲突。	适用于成本敏感且对实时性要求不高的环境,如智能家居控制系统。

4 结论

目前可见光上行链路的前景是非常广阔的,今后的进一步研究包括:提供多用户接入的同时实现很高的空间复用率。利用可见光资源实现接入设备和用户终端短距离通信,可以解决无线电磁信号容易被窃听的问题,还可以利用可见光上行链路构建抗干扰的安全信息空间。随着技术的进步和各种终端设备的普及,可见光通信在未来的 6G 通信系统中将发挥重要作用。基于 VLC 的室内定位技术可以利用已有的照明设施,通过移动终端的摄像头接收信号,实现高精度的室内定位。高频谱利用率和覆盖能力的提升,通过链路设计与优化,更加注重上行链路与下行链路传输速率的匹配度,提高上行链路的传输速率和距离,以满足不同场景下的需求。解决可见光通信系统中的多用户接入问题,特别是在上行链路中,以支持更加丰富和动态的应用场景。上行链路与其他技术相结合,如将可见光作为下行链路和上行链路 WiFi 结合的异构网络系统和上行链路和下行链路都是可见光的全双工通信系统。以提高上行链路的传输性能和可靠性。将进一步拓展其应用范围和提高通信效率。

参考文献

[1] ELTOKHY M A R, ABDEL-HADY M, HAGGAG A, et

al. Audio SIMO system based on visible light communication using cavity LEDs [J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 82 (30): 46371-46385.

[2] TEIXEIRA L, LOOSE F, ALONSO J M, et al. A review of visible light communication LED drivers [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 10 (1): 919-933.

[3] ZAKAVI M J, NEZAMALHOSSEINI S A, CHEN L R. Multiuser massive MIMO-OFDM for visible light communication systems [J]. IEEE Access, 2023, 11: 2259-2273.

[4] MOHSAN S A H, KHAN M A, AMJAD H. Hybrid FSO/RF networks: A review of practical constraints, applications and challenges [J]. Optical Switching and Networking, 2023, 47: 100697.

[5] MA SH, YANG R X, DU CH, et al. Robust power allocation for integrated visible light positioning and communication networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71 (8): 4764-4777.

[6] MARAQA O, NGATCHED T M N. Optimized design of joint mirror array and liquid crystal-based RIS-aided VLC systems [J]. IEEE Photonics Journal, 2023. DOI: 10.1109/JPHOT.2023.3295350.

[7] RAHMAN M T, BAKIBILLAH A S M, PARTHIBAN R.

- Review of advanced techniques for multi-gigabit visible light communication [J]. *IET Optoelectronics*, 2020, 14(6):359-373.
- [8] KOWALCZYK M, SIUZDAK J. VLC link with LEDs used as both transmitters and photo-detectors [C]. 2015 Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks. IEEE, 2015: 893-897.
- [9] LI SH, PANDHARIPANDE A, WILLEMS F M J. Two-way visible light communication and illumination with LEDs [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 65(2): 740-750.
- [10] JO S, AN B. Demonstration of low-complexity LED-to-LED two-way visible light communication system [C]. 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). IEEE, 2016: 216-219.
- [11] 杨玉峰,蒋明争,张颖,等. 基于单光源的全双工可见光通信系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1):78-86.
- YANG Y F,JIANG M ZH,ZHANG Y, et al. Design of full duplex visible light communication system based on single light source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019,56(1):78-86.
- [12] 孙大壮. 基于LED的可见光双向通信技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2021.
- SUN D ZH. Research on LED-based visible light bi-directional communication technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [13] KOMINE T, LEE J H, HARUYAMA S, et al. Adaptive equalization for indoor visible-light wireless communication systems[J]. *IEEE*, 2005:20(9):294-298.
- [14] RAHAIM M B, VEGNI A M, LITTLE T D C. A hybrid radio frequency and broadcast visible light communication system[J]. *IEEE*, 2011, 18(52):792-796.
- [15] SCHMID S, CORBELLINI G, MANGOLD S, et al. LED-to-LED visible light communication networks [J]. *ACM*, 2013,35(6): 1-10.
- [16] COSSU G, CORSINI R, KHALID A M, et al. Bi-directional 400 Mb/s LED-based optical wireless communication for non-directed line-of-sight transmission [J]. *IEEE*, 2014, 22(10): 1-3.
- [17] YING K, QIAN H, BAXLEY R J, et al. Joint optimization of precoder and equalizer in MIMO VLC systems [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(9): 1949-1958.
- [18] YANG Y, ZENG ZH M, CHENG J L, et al. A relay-assisted OFDM system for VLC uplink transmission [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(9): 6268-6281.
- [19] WANG ZH Y, YU H Y, WANG D M. Channel and bit adaptive power control strategy for uplink NOMA VLC systems[J]. *Applied Sciences*, 2019,9(2):220.
- [20] ROSENTHAL J, SHARMA A KAMPANAKIS E. A 25 Mbps, 12.4 pJ/b DQPSK backscatter data uplink for the neurodisc brain-computer interface [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2019, 13(5):858-867.
- [21] NDJONGUE A R, NGATCHED T M, DOBRE O A. VLC-based networking: Feasibility and challenges [J]. *IEEE Network*, 2020,34(4):158-165.
- [22] OLEJNICZAK A, BŁASZKIEWICZ O, CWALINA K K. Software-defined NB-IoT uplink framework-the design implementation and use cases [J]. *Sensors*, 2021, 21(24):8-16.
- [23] KIM H, JUNGMIN S. Improving spatial reuse of wireless LAN uplink using bss color and proximity information[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(22):154-160.
- [24] ZHANG SH, ZHAO L, SONG S, et al. Full-duplex transmission without an uplink light source for a millimeter-wave radio over a free-space optical system[J]. *Applied Optics*, 2022,61(28):8323-8332.
- [25] WANG K, KANDEEPAN S. Experimental demonstration of an indoor optical wireless communication system with a waveform index modulated uplink [J]. *Optics Letters*, 2022,47(13):3187-3190.
- [26] 郑重,刘璐,胡薇薇. 应用于可见光通信的上行链路方案探讨[J]. *中兴通讯技术*, 2014,20(6):8-11.
- ZHENG ZH, LIU L, HU W W. Uplink scheme for visible light communication [J]. *ZTE Communication Technology*, 2014,20(6):8-11.
- [27] 邱灏,汪井源,徐智勇,等. 单光源全双工逆向调制的光通信技术研究[J]. *光电子激光*, 2015,26(12):2314-2319.
- QIU H, WANG J Y, XU ZH Y, et al. Research on optical communication technology with single-source full-duplex reverse modulation [J]. *Optoelectronics and Lasers*, 2015,26(12):2314-2319.
- [28] 徐山河,肖沙里. 一种新型的单光源双工通信系统[J]. *半导体光电*, 2015,36(3):447-450.
- XU SH H, XIAO SH L. A novel duplex communication system with a single light source [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015,36(3):447-450.
- [29] SONG J, DING W B, YANG F, et al. An indoor broadband broadcasting system based on PLC and VLC[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2015, 61(2): 299-308.
- [30] 武梦龙,郭佳,刘文楷,等. LED作为收发元件的双向

- 可见光通信系统方案及实现[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 4-8.
- WU M L, GUO J, LIU W K, et al. Scheme and implementation of bi-directional visible light communication system with LED as transceiver element[J]. Journal of Optics, 2018, 38(4): 4-8.
- [31] 郭晶森. 异构网络中上行链路性能改善的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2019.
- WU J M. Research on uplink performance improvement in heterogeneous networks[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.
- [32] 王晓明, 王晨, 王志强, 等. LTE 系统上行链路调度算法研究[J]. 通信技术, 2020, 53(3): 667-672.
- WANG X M, WANG CH, WANG ZH Q, et al. Research on uplink scheduling algorithm for LTE system [J]. Communication Technology, 2020, 53(3): 667-672.
- [33] 朱蔓菁, 王玉峰, 刘晓东. 可见光通信中继技术研究[J]. 光通信研究, 2021(3): 64-71.
- ZHU M J, WANG Y H, LIU X D. Research on visible optical communication relaying technology [J]. Optical Communication Research, 2021(3): 64-71.
- [34] 卢霆威, 王泽平, 刘梦, 等. 基于可见光通信技术的全双工以太网通信系统设计[J]. 电子学报, 2022, 50(1): 45-53.
- LU T W, WANG Z P., LIU M, et al. Design of a full-duplex ethernet communication system based on visible light communication technology [J]. Journal of Electronics, 2022, 50(1): 45-53.
- [35] 段志文. 去蜂窝大规模 MIMO 系统上行链路的频谱效率提升研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
- DUAN ZH W. Spectral efficiency enhancement of uplink in de-cellular large-scale MIMO system[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2022.
- [36] 迟楠. 高速可见光通信关键技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019: 22-24.
- CHI N. Key technologies for high-speed visible light communication [M]. Beijing: People's Post and Telecommunications Publishing House, 2019: 22-24.
- [37] BERGH A A, COPELAND J A. Optical sources for fiber transmission systems [J]. Proceedings of the IEEE, 1980, 68(10): 1240-1247.
- [38] SAENGUDOMLERT P. Transmit beamforming for line-of-sight MIMO VLC with IM/DD under illumination constraints[C]. 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). IEEE, 2015: 1-4.
- [39] 杨应平, 胡昌奎, 胡靖华. 光电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 97-98.
- YANG Y P, HU CH K., HU J H. Optoelectronic technology [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2014: 97-98.
- [40] IEEE Standard Association. IEEE standard for local and metropolitan area networks-Part 15.7: Short-range wireless optical communication using visible light [J]. IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2011: 1-309.
- [41] 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.
- [42] ASAD M, QAISAR S. Energy efficient QoS-based access point selection in hybrid WiFi and LiFi IoT networks[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 6(2): 897-906.
- [43] PAPANIKOLAOU V K, DIAMANTOULAKIS P D, SOFOTASIOS P C, et al. On optimal resource allocation for hybrid RF/VLC networks with common backhaul[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 6(1): 352-365.
- [44] YANG L, YAN X, DA COSTA D B, et al. Indoor mixed dual-hop VLC/RF systems through reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1995-1999.
- [45] 贾楠楠, 方国杏, 杨茹, 等. 三跳混合 FSO/RF/VLC 中继系统性能研究[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2020, 49(1): 62-68.
- JIA N N, FANG G X, YANG R, et al. On the performance of mixed triple-hop FSO/RF/VLC relay system[J]. Journal of Shanghai Normal University, 2020, 49(1): 62-68.
- [46] HSIAO Y, WU Y, LIN C. Energy-efficient beamforming design for mu-miso mixed RF/VLC heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(14): 3770-3784.
- [47] 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.
- [48] AMBRISH K, PARUL G, AKASH G. PLS analysis in an indoor heterogeneous VLC/RF network based on known and unknown CSI [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 15(1): 68-76.
- [49] 杨立伟, 侯聪, 程强. 可见光通信与电力线融合技术研究[J]. 电信网技术, 2014(2): 58-61.

- YANG L W, HOU C, CHENG Q. Research on visible optical communication and power line convergence technology[J]. Telecommunications Network Technology, 2014(2):58-61.
- [50] LIN Y J, LATCHMAN H A, LEE M, et al. A power line communication network infrastructure for the smart home[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 9(6):104-111.
- [51] MA H, LAMPE L, HRANILOVIC S. Integration of indoor visible light and power line communication systems [C]. 2013 IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, IEEE, 2013, 11(10):291-296.
- [52] 王熠, 许振召, 王楠. 电力线通信与可见光通信的结合及其移动应用[J]. 电信快报, 2019(11):5-10.
WANG Y, XU ZH ZH, WANG N. The combination of power line communication and visible light communication and its mobile application [J]. Telecommunications Express, 2019(11):5-10.
- [53] 徐继东, 王琳, 杨立伟, 等. 可见光通信与电力线结合技术的研究报告[R]. 北京: 中国通信标准化协会, 2014.
XU J D, WANG L, YANG L W, et al. Research report on the combination technology of visible optical communication and power line [R]. Beijing: China Communications Standardization Association, 2014.
- [54] 迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3):7-18.
CHI N, LU X Y, WANG C, et al. High-speed visible light communication based on LED[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3):7-18.
- [55] 赵黎, 彭恺. 基于白光发光二极管的室内可见光通信

光源布局优化[J]. 光学学报, 2017, 37(7):49-57.

ZHAO L, PENG K. Optimization of light source layout in indoor visible light communication based on white light-emitting diode [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7):49-57.

作者简介



梁静远, 2015 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助理工程师, 主要研究方向为无线光通信系统调制解调技术。

E-mail: ljy@xaut.edu.cn

Liang Jingyuan received her M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2015. Now she is an assistant engineer in the School of Automation and Information Engineering at Xi'an University of Technology. Her main research interests include modulation and demodulation technology for wireless optical communication systems.



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.