

面向智能电力的无线光技术与进展

丁举鹏^{1*}, 易芝玲², 王劲涛³, 陈习锋¹

¹新疆大学信息科学与工程学院信号检测与处理新疆维吾尔自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

²中国移动通信研究院, 北京 100053;

³清华大学电子工程系北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084

摘要 随着各种新兴信息技术与电力电网的融合进一步走向深入, 依托并服务于智能电力的多种无线光技术方案先后被提出, 并形成了初步的规模。分别从电力线通信与可见光通信融合的信道特性及传输方案、混合射频电力可见光通信、电力无线光室内定位与中继、高压线路无线光监测等诸多方面阐述智能电力无线光技术的主要分类与前沿进展。结合多款原型实验, 介绍了目前各类智能电力无线光技术方案在传输速率、覆盖范围、定位精度、能耗水平等方面所能达到的主要技术指标水平; 最后给出智能电力无线光技术所面临的主要挑战与潜在的解决途径。

关键词 光通信; 智能电力; 可见光通信; 动力线通信

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.210003

Research and Development of Wireless Optical Technology for Smart Power

Ding Jupeng^{1*}, I Chih-Lin², Wang Jintao³, Chen Xifeng¹

¹Key Laboratory of Signal Detection and Processing in Xinjiang Uygur Autonomous Region, School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

²China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China;

³Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract With the further integration of various emerging information technologies and power grids, various wireless optical technology schemes relying on and serving smart power have been put forward and formed a preliminary scale. In this work, the main classification and frontier development of the smart power wireless optical technology are described from the aspects of the channel characteristics and transmission schemes of the fusion of power line communication and visible light communication, hybrid radio frequency power visible light communication, power wireless optical indoor positioning and relay, high voltage line wireless light monitoring, and so on. Then, combined with a number of prototype experiments, this paper introduces the levels of main technical indicators of various smart power wireless optical technologies in terms of the transmission rate, coverage, positioning accuracy, energy consumption, and so on. Finally, the major challenges and potential solutions of the smart power wireless optical technology are provided.

Key words optical communications; smart power; visible light communications; power line communications

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 060.4250

1 引言

基于固态光源的无线光(WO)技术具备频谱资

源巨大、无需频谱授权、保密性强、免传统电磁干扰等诸多优势,因而受到以电力领域为代表的传统行业的广泛关注。随着各种新兴信息技术与电力电网

收稿日期: 2020-02-25; 修回日期: 2020-03-22; 录用日期: 2020-03-27

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2019D01C020)

* E-mail: jupeng7778@163.com

的融合进一步走向深入,依托并服务于智能电力的多种无线光技术方案先后被提出,并形成了初步的规模。无线光技术主要分为两大类:1)在室外场景下,无线光技术通常被称为自由空间光(FSO)技术;2)在室内场景下,将使用可见光光源作为发射器光源的无线光技术称为可见光通信(VLC)^[1-6]。无线光技术与传统电力信息技术的交叉融合可以追溯到2003年日本庆应大学的研究人员的相关工作,他们在考虑白光LED具备高亮度、低功耗及长寿命等优越特性的基础上,率先提出了白光LED VLC与传统电力线通信(PLC)的综合系统方案^[1]。一方面,该方案具备可见光通信免于传统射频电磁干扰、所用LED光源辐射功率高等天然优势;另一方面,该方案可以重复利用已有的电力线基础设施,避免引入新的通信缆线,从而更大程度地降低建设成本。与此同时,上述团队给出了所提方案的原型系统实现,该原型系统将配有120颗LED灯珠的台灯作为可见光通信光源,采用子载波二进制移相键控(SC-BPSK);此外,在系统的紧凑化设计上,该团队给出了能适用于现有球泡灯螺口且同时满足所提方案要求的灯泡型VLC发射器组件。

此项开创性的工作激发了国际、国内众多研究团队的研究热情。截至目前,已有来自南非约翰内

斯堡大学、美国德克萨斯州大学、英国南安普顿大学、加拿大英属哥伦比亚大学、清华大学以及解放军信息工程大学等众多高校研究机构的研究人员参与到该交叉领域的研究工作,研究成果已初具规模^[7-14]。

当前,该领域的研究方向主要包括电力线通信与可见光通信融合的信道特性及传输方案、混合射频的电力可见光通信、电力无线光室内定位与中继、高压线路无线光监测等诸多方面。本文将从上述方向梳理近年来面向智能电力的无线光技术的发展脉络,同时结合多款原型系统展示本领域的前沿进展。通过总结智能电力无线光技术所面临的主要挑战与潜在解决途径,以期为此类技术的进一步发展和大规模商用提供有益参考。

2 智能电力无线光技术主要分类及进展

2.1 电力线通信与可见光通信融合的信道特性

目前研究人员针对电力线通信与可见光通信融合的系统信道特性开展了一系列理论建模和测量^[15-19],此类系统的通用功能框图如图1所示。在该系统中,信号将先后遭受PLC与VLC信道固有噪声的影响。

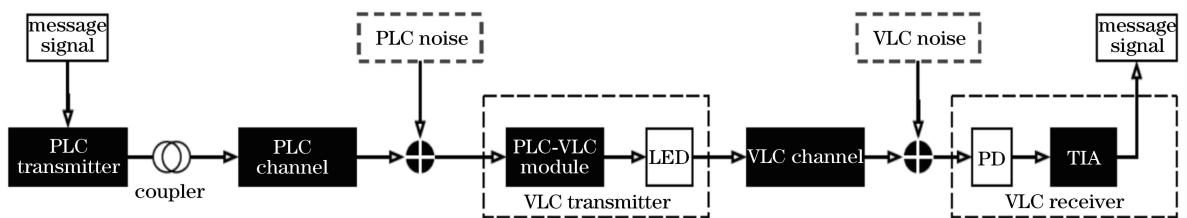


图1 综合PLC与VLC系统的通用功能框图^[8]

Fig. 1 Generalized functional block diagram for integrated system of PLC and VLC^[8]

在动力线通信部分,研究人员通常沿用Nlom等^[8]提出的适应性回声模型。该模型能够综合体现动力线网络中多径传播、频率依赖及线路长度的衰减特性。在可见光通信部分,为便于建模分析,研究人员通常借助无线光积分球模型来表示VLC信道的频率响应。不同于传统的非参数化无线光建模方案,该方案仅需光接收器与房间的表面积、房间的平均反射率即可直接给出信道非直射分量的信道增益,从而使得建模复杂度显著降低。通过改变PLC信道参数,研究人员模拟了不同的PLC环境与频率响应。随着PLC信道抽头数量的增加,PLC与VLC联合信道频率响应的凹槽将进一步加深。图2给出了包含12个PLC抽头的PLC与VLC联合

信道特性。

为表征LED调制带宽对PLC与VLC联合信道频率响应的影响,研究人员在实验室环境下分别对VLC部分频率响应与混合系统整体的频率响应特性进行了测量,如图3所示。测量结果显示,在50 MHz附近LED光源引入的衰减仅为10 dB。然而,一旦VLC系统被集成到PLC系统中,整体系统在高频部分的衰减将显著地减小系统的可用带宽。具体地,PLC信道使用典型的6径模型,同时VLC信道借助蓝光滤光片滤除杂散光。量化结果显示,在30 MHz处,混合系统的衰减约为40 dB,这表明系统可用调制带宽将受到限制。

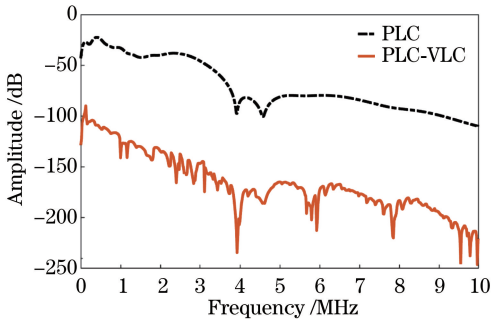


图2 包含12个PLC抽头的PLC与VLC联合信道特性^[8]
Fig. 2 Joint channel characteristics of PLC and VLC with 12 PLC taps^[8]

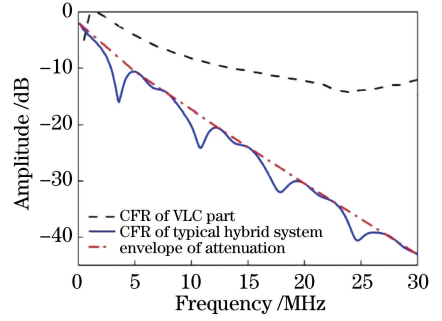


图3 典型PLC与VLC综合系统的实测频率响应曲线^[16]
Fig. 3 Measured frequency response curves of typical integrated system of PLC and VLC^[16]

2.2 电力线通信与可见光通信融合的传输方案

电力线通信及可见光通信融合的室内多用户下行链路的传输带宽有限。为了提高该混合系统的传

输光谱效率,越来越多的研究人员提出了各自的多载波系统方案,以期更好地应对信道的频率选择性^[20-25],如图4所示。

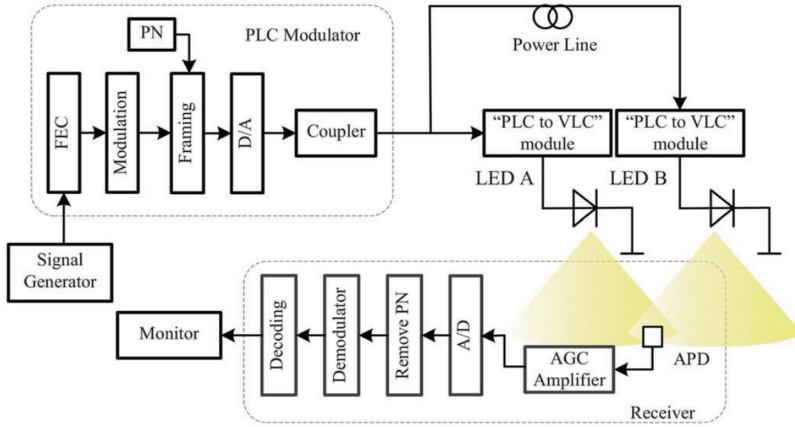


图4 综合PLC与VLC的多载波系统框图^[12]

Fig. 4 Block diagram of multicarrier system of integrated PLC and VLC^[12]

考虑到多个配有可见光通信功能的光源将服务于重叠的业务区域,来自加拿大的 Hranilovic 研究团队提出通过电力线来完成与VLC发射器的协作,并通过电力线将数据流加载至VLC发射器上^[11,20-21]。具体地,他们提出了一种命名为混合可

见光通信及电力线通信(HVP)的系统架构,并给出相应的解析框架。在该方案中,研究人员将空间光正交频分复用(SO-OFDM)应用于多个光源,并提出了针对性的多种子载波分配方案来探索VLC及PLC信道的频率选择性,如图5所示。较之于传统

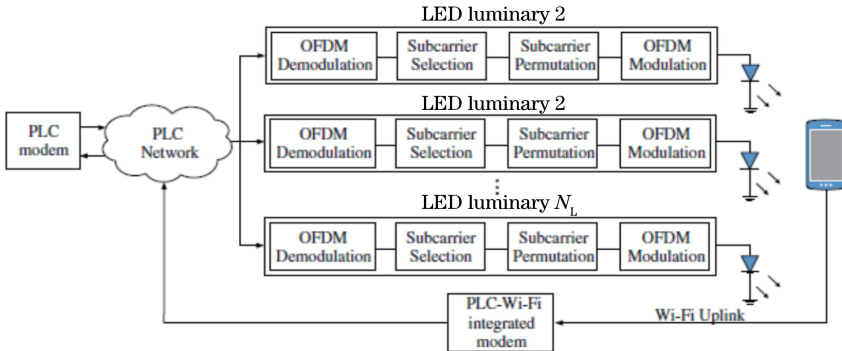


图5 综合VLC与PLC的室内多用户下行链路系统框图^[11]

Fig. 5 Block diagram of indoor multiuser downlink of integrated VLC and PLC^[11]

VLC 与 PLC 的集成,该方案改善了将 OFDM 应用于 LED 发射器所导致的高峰均功率比(PAPR)问题,并通过空间分布式光源间的协作来克服不同光源间干扰,在应对局部链路遮挡的情况时,系统稳定性同时获得了提升。

具体地,在上述方案中,研究人员给出了所提系统的基本数学模型,考虑了静态连续噪声、周期静态连续噪声及周期脉冲噪声这三类窄带 PLC 噪声。在可见光链路部分,研究人员仅考虑视线路径(LOS)分量的贡献以及杂散光散粒噪声及接收器预放大器噪声的影响。同时,以探测器尺寸远大于光波长为依据,研究人员忽略了多径衰落分量对系统表现的影响。通过量化分析结果,该团队进一步证实可见光链路部分可以提供高达 22 dB 的信噪比(SNR),这满足可见光通信及基础照明功能需求,因此该融合系统的整体表现在很大程度上受到 PLC 链路部分的影响。

研究人员也尝试将正交频分复用(OFDM)及色移键控(CSK)技术引入 PLC 与 VLC 的串联信道中,并对全链路传输条件下的上述串联信道进行特性进行研究^[25]。具体地,在 PLC 链路部分,研究人员尝试应用正交移相键控(QPSK)及 OFDM 调制方案,并在 VLC 链路部分借助 CSK 方案提升系统表现。研究人员致力于 PLC 链路中 OFDM 调制星座图到 VLC 链路中 CSK 星座图的映射方案设计。

面向室外建筑间通信场景,南非的研究人员提出了 PLC 与 VLC 的融合方案,并开展了针对性的探索。类似地,具体系统方案在 PLC 和 VLC 链路部分分别引入了相移键控(PSK)和 CSK 调制^[26]。研究人员通过仿真和实验研究给出并证实了 PSK 与 CSK 调制符号之间的映射方法,同时分析并强调了太阳光线对 CSK 的红、绿、蓝三色符号的干扰作用。在上述研究工作的基础上,研究人员进一步尝试采用不同的调制方案组合以获得系统表现的进一步提升。具体地,研究人员在 PLC 链路部分尝试采用扩频移键控(S-FSK),在 VLC 部分则试用最简单的开关键控(OOK)方案,该方案的最大优势在于极低的系统造价和系统复杂度,不足之处在于传输速率极为有限。基于该方案的原型实验,研究人员测量了一天中 4 个不同时间点的太阳光照射对系统表现的影响,确定了太阳光辐照度是系统噪声的主要来源^[27-28]。

不同于上述低压电力线通信研究,美国宾州州立大学的研究人员则讨论了中低压电路传输媒介

以及可见光通信系统的传输特性^[29],指出中低压电网可以提供相当大的传输容量,而上述网络中阻抗不匹配所造成的反射现象将会影响系统的表现。同时,研究结果显示通过阻抗匹配等网络合理化设计,可使上述 PLC 子系统具备实现 1 Gbit/s 传输速率的可能性。在可见光子系统部分,研究人员考虑了多径传播的光路径差对高速数据传输的影响,数值分析结果显示上述畸变高度依赖于房间尺寸以及系统配置,通过合理设计可以实现上述畸变的最小化。此项工作在理论上初步证实了中低压 PLC 与 VLC 融合系统在提供高速传输方面的技术潜力。

2.3 电力无线光通信原型系统实现及测试

为验证智能电力无线光技术的实际表现,国内外研究团队积极开展电力无线光通信系统的搭建与测试工作^[30-33]。为更好地应对医院、大型购物中心、体育馆等热点场景需求,清华大学研究人员致力于将 PLC 和 VLC 融合的技术应用于室内宽带数据广播。所提出的系统显著降低了 VLC 网络协议的复杂度,并将大幅降低基础设施改造程度。

具体地,研究人员给出了 LED 双灯网络的实验展示,并对所提方案进行评估^[12],如图 6 所示。通过时域 OFDM 技术将高清电视节目发送到上述混合系统;测量显示该系统的带宽为 8 MHz。在可见光路径长度被延伸至 8 m、室内干扰照明光源正常打开的条件下,所提出的混合系统能够提供约为 48 Mbit/s 的传输。由于室内天花板的典型高度为 3 m,由雪崩二极管构成的接收器被置于距离双灯均为 3 m 的重叠区域。为评估不同展示配置下的系统表现,研究人员保持 LED A 的发射信号功率恒定,通过调整连接到 LED B 的动力线长度以及 LED B 的发射功率水平来评估不同多径传播条件下系统的表现变化。测量结果显示,调制误差比(MER)正比于动力线长度并反比于 LED B 的发射

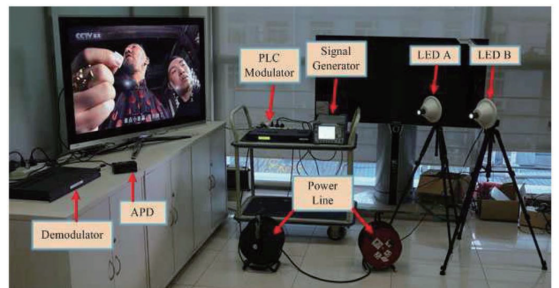


图 6 实验室环境中 PLC 结合 VLC 的广播系统展示平台^[16]

Fig. 6 Demonstration setup of PLC & VLC broadcasting system in laboratorial environment^[16]

信号功率。上述现象可以解释为:当二次路径增加或功率水平降低时,干扰水平将被相应地降低;因而,必须重视灯间干扰对接收端表现的深刻影响。

此外,清华大学的研究人员提出将上述系统推广应用到地下隧道场所,如图7所示。所实现的系统基于解码转发(DF)技术实现双工传输,通过构建对称双工宽带接入网以支撑多样化的双工高速通信业务。在地下隧道场景,借助动力线将多个LED连接起来。在实验原型系统中,动力线的长度超过100 m,解码转发模块、PLC与VLC耦合器、上行链路光电探测器被封装到LED装置,手持终端被嵌入VLC接收及发送模块。实验测试结果显示,在LED光源与接收终端的距离为3 m的条件下,上述系统能够支持语音、视频以及速率高达5 Mbit/s的双工宽带通信;长达3 d的场测时间内,误码率(BER)可以维持在 10^{-5} 。该系统的数据传输速率可以被进一步扩展至30 Mbit/s。在多用户场景下,不同用户之间可以实现低成本的无干扰通信。针对电力隧道应用,国家电网的研究团队还分别提出了面向电力隧道巡检的可见光通信和电力线通信融合的协议设计以及基于激光雷达导航的无人机巡线方案,这为改进电力无线光巡线技术提供了新的技术选项^[31-32]。

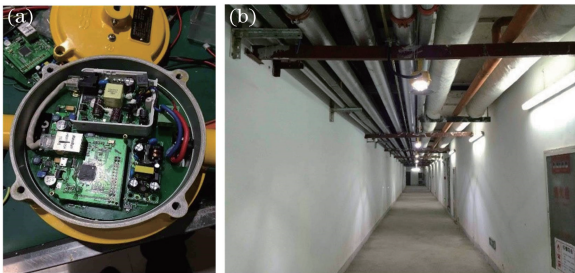


图7 PLC与VLC融合的双工通信网络的实现。(a)配有DF模块及PLC与VLC耦合器的LED光源装置;
(b) PLC与VLC接入网场景展示^[14]
Fig. 7 Implementation of duplex communication network combining PLC and VLC. (a) LED source with DF module and PLC-VLC coupler; (b) overview of PLC-VLC access network^[14]

另一方面,中国科学院半导体研究所的研究团队则聚焦智能家居场景,开展基于可见光和电力线载波的家庭网络设计与原型系统实现研究,其所提出的家庭网络系统的核心设备主要包括家庭网关、白光LED和网络用具这三部分。其中,家庭网关承担与外部网络或者外部个人消费终端相连接的功能;家庭网络中的受控终端则被称为网络用具;各通信单元之间通过PLC总线与网关互联,实现相互独立的双向通信。

对该系统的测试结果显示,利用网络发送端发送的22953条指令进行测试时,网络接收端能够正确接收到22829条指令,系统指令的正确传输率为99.46%,满足实际使用的基本要求^[30]。

2.4 电力无线光定位、中继及混合射频通信

在上述研究工作的基础上,研究人员开展了面向PLC的可见光定位系统,并展示了实验室原型系统^[12],如图8所示。上述原型系统借助安卓应用程序,以实现几kbit/s级别的低速链路。上述工作有助于加速此类系统的商用化。此类电力无线光定位系统可充分利用LED光束的定向性以及电力线通信回传网络为用户提供基于用户位置的定制化业务,如室内导航、装置追踪、设备管理等^[12,16]。此外,现有的室内监控或传感装置也可以使上述系统同时实现供电与通信功能,从而将监控或传感数据及时传递给室内无线终端。

必须指出,目前电力无线光定位技术的研究与

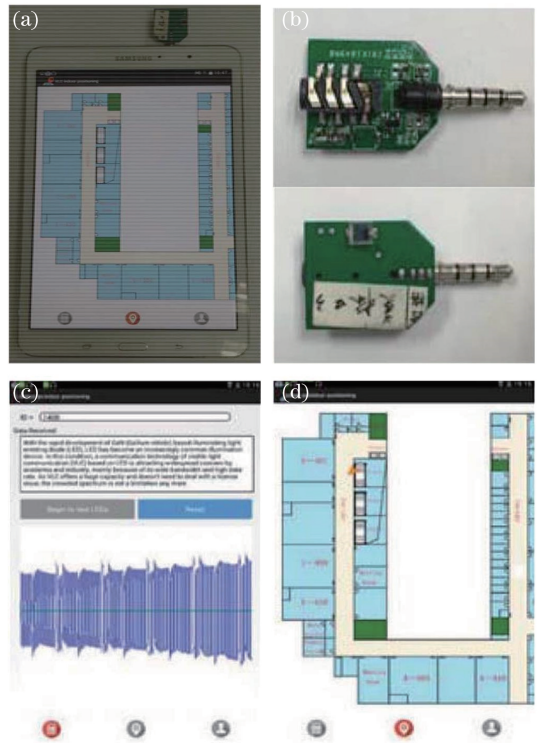


图8 基于VLC的室内定位系统展示及安卓应用程序^[12]。(a)装置展示;(b)接收器(背面与正面);
(c)安卓应用程序中的信号检测;(d)安卓应用程序中的地图定位

Fig. 8 Display of indoor localization system based on VLC and Android APP^[12]. (a) Display of system; (b) receiver (back & front); (c) signal detection in Android APP; (d) map localization in Android APP

实现还处于起步阶段。一些复杂度较高的潜在高精度可见光定位技术尚未被充分地探索。这些技术通常需要测量来自不同 LED 光源光信号的接收强度信息、抵达角度信息、抵达时间信息或者抵达时间差信息,从而依据此类信息以及光源位置信息来反向估算移动终端的空间位置^[6]。现有的研究工作往往

停留于定位算法本身,没有充分考虑与 LED 光源相连接的电力线网络的互联关系、物理特性、同步表现等实际因素对电力无线光定位技术表现的潜在影响。因此,有必要在综合考虑上述因素的基础上,开展针对性的性能提升工作,从而使高精度电力无线光定位技术从理论分析阶段发展到应用阶段。

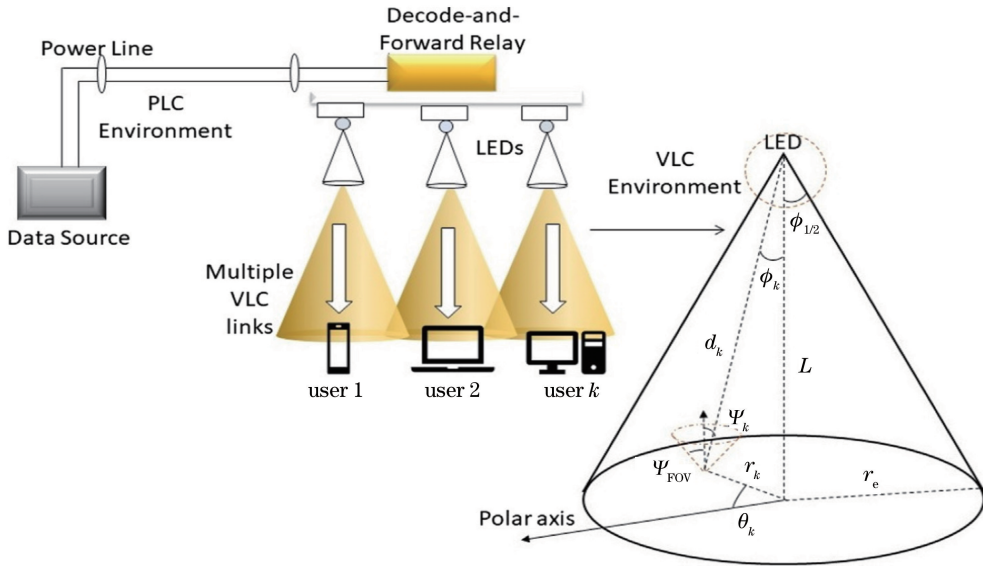


图 9 DF 中继辅助混合 PLC 与 VLC 系统的系统模型^[34]

Fig. 9 System model of DF relay assisted system combining PLC and VLC^[34]

为进一步提升 PLC 与 VLC 协作系统的性能表现,研究人员将中继技术引入到此类 VLC 室内广播通信系统中^[34-38]。在传统蜂窝移动网络中,借助中继技术可以显著地提升网络吞吐量并延伸网络覆盖范围。受此启发,PLC 与 VLC 系统也可被视为中继辅助的双跳通信系统。目前主要有两种中继技术可用于信号传输,分别是解码转发和放大转发。在解码转发中继方案中,在将 PLC 信号加载到 LED 光源之前需要先进行面向 PLC 传输的解调及解码操作,进而进行面向 VLC 传输的再编码以及再调制^[37]。另一方面,在放大转发中继方案中,叠加噪声分量的模拟 PLC 信号被直接放大并被加载到 LED 光源上进行发送,不涉及任何编码操作^[35]。具体地,PLC 子系统部分承担 VLC 链路的回传链路,这一部分回传信号易受到对数正态分布衰落。采用前一种方法并通过解码及重新编码方式可以彻底消除上述噪声的累积效应,但是实现复杂度相对较高。后一种方案虽然不能消除噪声的影响,但是不涉及复杂的解码、编码操作,实现复杂度很低,这有利于显著降低系统的实现成本。目前,国际上已有研究团队提出在 VLC 链路部分通过多个 VLC

接入点为用户提供服务,如图 9 所示。仿真研究显示系统整体特性依赖于终端用户的随机分布,选择分集组合技术可以为用户选择合适的接入点,为系统提供最大的瞬时信噪比,进而在单一中继节点基础上,采用选择分集技术从多个节点中选择最优链路,以提高通信系统的信号增益。

为提升 PLC 与 VLC 融合系统的吞吐量,越来越多的研究人员投入到相关的研究工作中来。具体地,英国南安普顿大学的研究团队提出面向 PLC 与 VLC 网络的多用户非正交多址(NOMA)联合功率分配策略^[10]。量化结果显示,在最小速率的多样需求及用户密度条件下,较之于传统正交多址技术(OMA),NOMA 技术能够实现更大的吞吐量。

VLC 技术的主要缺陷在于 LOS 缺失下的表现劣化,RF 通信以其更高的穿透能力,可以克服上述缺陷。实际上,PLC 技术与无线网络的融合也已经在多种应用场景被提出,其中就包括在智能电网应用中将 PLC 技术整合到无线中继系统中,从而实现长距离的数据传输^[39]。基于上述考虑,来自卡塔尔德州农机大学的研究人员提出了 PLC、VLC 以及

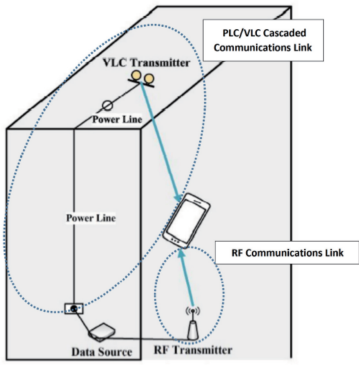


图 10 PLC、VLC 与 RF 融合的通信系统模型^[9]

Fig. 10 Communication system model combining PLC, VLC, and RF^[9]

RF 融合的通信系统^[39-40],如图 10 所示。在满足所需 QoS(quality of service)的基础上,研究人员构造并分析了整体发送功率最小化问题。为优化 RF 网络与 PLC、VLC 融合网络之间的协作,该团队讨论了两个并行链路,即 RF 链路 with PLC、VLC 综合链路之间的资源分配问题。所提出的系统使用多个无线接口来累积所接收到的并行数据流。研究表明,上述优化问题可以被构造为凸优化问题,因而可以借助计算高效行为来求解上述问题。量化结果显示,PLC 信道模型、RF 信号可用性等对网络表现有显著影响。因而,所提出的 RF 与 PLC、VLC 并行的系统作为一种有前景的架构,可以提高室内无线网络的数据传输速率和可靠性。

2.5 电力线路无线光传感监测

巴西的研究人员将无线光技术引入到高压输电线传感信号的无线传输中,并开展了一系列研究工作^[41-43]。具体地,电流传感器将传感信号传递到固定于高压线的远端单元,远端单元通过激光器发出波长为 1310 nm 的无线光信号,通过准直器 B 将无线光信号射向位于低电位的准直器 A,上述无线光外场监测装置系统框图如图 11 所示。接下来,光信号通过多模光纤将携带传感信息的光信号传递至控制单元。

考虑到一对准直器之间的电位差典型值可以高达 138 kV,研究人员引入线柱绝缘体并将其垂直悬挂于空中高压线,同时将准直器 B 和 A 分别固定于绝缘体的上、下两端以实现绝缘保护。此外,该方案还引入了光线供电技术,通过高功率激光器将 830 nm 光信号通过多模光纤发送至准直器 A,通过无线光链路将光信号发送至准直器 B,进而将光信号发送至远端单元,并通过内部的充电、供电单元为

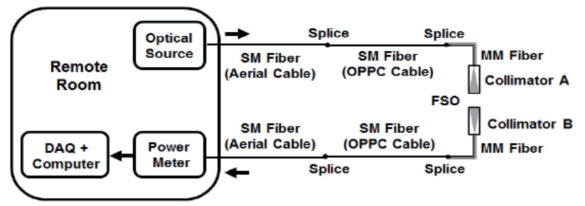


图 11 无线光外场监测装置系统框图^[41]

Fig. 11 Block diagram of wireless optical field monitoring system^[41]

远端单元供电,上述监测装置及其主要组件由图 12 具体给出。该方案通过无线光信号传递高压传感信号,避免了有线方案直接将信号从高电位导引至低电位带来的巨大安全风险,以及为降低风险引入定制空心绝缘体方案的复杂度。

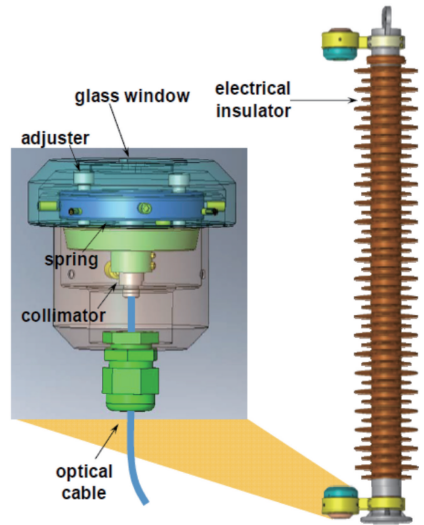


图 12 无线光波长监测装置及其主要组件^[41]

Fig. 12 Wireless optical monitoring device and its main elements^[41]

在上文所述的电力线路无线光监测系统方案的基础上,研究人员进行了原型系统实现并开展了为期 8 个月的外场测试,如图 13 所示。研究人员发现准直器封装中驻留的雨水会显著地影响无线光损耗,特别是耦合损耗。此外,实验结果显示:当光传感技术不是基于幅度变化,而是基于频率或极化变化,则热变化所引入的功率振荡就不会成为关键因素。

在实验室测试阶段,研究人员还重点研究了上述无线光感测传输系统对横向偏移的敏感程度^[41-43]。实验中分别使用了两种类型的商用准直器,型号分别是 F810APC-1550 以及 F260APC-1550。针对两种准直器,分别在纤芯直径为 62.5 μm 的多模光纤以及纤芯直径为 9 μm 的单模

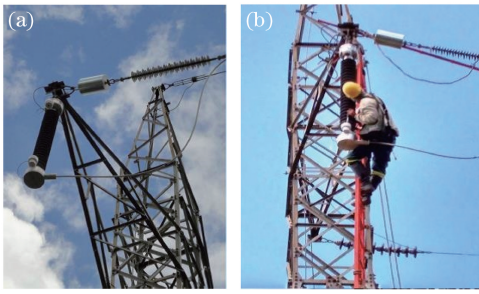


图 13 锚定于传输线铁塔上的 WO 装置,以及技术人员在高压线铁塔上调整准直仪的图片^[41]。(a)锚定于传输线铁塔上的 WO 装置;(b)技术人员在高压线铁塔上调整准直仪的图片

Fig. 13 WO device anchored on tower of transmission line, and picture of technician adjusting collimators on top of high voltage tower^[41]. (a) WO device anchored on tower of transmission line; (b) picture of technician adjusting collimators on top of high voltage tower

光纤的耦合连接条件下进行分类测试。实验结果显示,较之于小直径的准直器 F260APC-1550,通常大直径的准直器 F810APC-1550 可支持更大的横向偏移。具体地,在满足不低于 -10 dBm 接收光功率的约束条件下,准直器 F810APC-1550 可支持大于 3 mm 的水平偏移,准直器 F260APC-1550 能支持的水平偏移仅为 1 mm。与此同时,当大直径准直器与多模光纤组合使用时,系统可支持的偏移量更大。上述结果对于在室外高温、大风等恶劣感测环境下提升无线光感测传输系统的可靠性、减小链路中断频率及中断时长具有重要的现实意义。

3 主要挑战与潜在解决途径

目前,面向智能电力的无线光技术基本上仍然停留于广播式的技术范式。在该技术范式中,电力线将数据源的数据传送到数据驱动模块,数据驱动模块将相同的数据流加载到全部光源上,进而通过光源将信号广播给光信号覆盖的区域。这种范式意味着多个分布式光源的数据传输潜能无法被充分地释放出来。针对上述问题,将多输入多输出技术引入到电力无线光技术领域,其基本思路是通过室内电力线网络将多路数据流分别传送到多个分布式光源,光源通过各自的驱动装置完成各自数据流的加载并将携带不同数据信息的光信号发射出去。在接收端,通过多个探测器将来自不同光源的光信号转换为电信号,进而借助各类解复用技术将原始的多路数据流还原出来。理论上,这种多输入多输出的

技术范式可以成倍地提升系统的传输容量。必须指出的是,不同于当前商用蜂窝网络中的射频多输入多输出技术,基于室内电力配线网络的无线光多输入多输出技术必须综合考虑电力配线网络自身的多输入多输出特性^[44-47]。一般来说,主流的交流供电网络采用三相供电模式,如何消除零线、火线及地线之间的传输干扰,将很可能成为电力无线光多输入多输出技术实用化的关键。

在电力无线光通信信道建模及表征方面,现有的研究工作尚无法充分覆盖国际、国内多样的电网配置,也无法适用于广泛存在的非朗伯无线光链路配置。已有的电力线通信研究显示,由于所采用的电力行业标注不同,不同国家及地区之间的电网传输特性有明显的差异,很难通过单一模型来表征^[47-49]。与此同时,由于电力网络的原始功能并非用于数据传输,不同时段的电网负荷及用电需求有明显的动态差异,因此需对电力线模型进行分地区、分场景、分时段的差异化讨论,并通过整合无线光链路进行针对性的信道测量与统计分析。与此同时,为满足道路、会场、展厅等多样化的照明需求,实际商用 LED 光源通常需要借助封装透镜技术进行光束配光,以提高光效、改善照明均匀性^[50-52]。此类技术处理导致 LED 光源所发出的光波束与现有理论分析中的朗伯模型不再匹配,最终导致电力无线光通信信道建模分析结果准确度降低,甚至使所分析的建模表征无实际意义。因此,在接下来的电力无线光通信信道特性研究中,必须综合考虑电力线模型及非朗伯波束各自特性的多样性,开展一系列针对性的电力无线光通信信道测量工作,通过数据拟合、统计分析等手段构建能够面向一系列典型场景的高可靠性电力无线光通信信道模型,进而为多样化的技术方案评估提供依据。

在电力无线光链路可靠性上,现有的技术方案及原型系统仍有巨大的提升空间。特别是在无线光通信链路部分,光源经常要满足照明功能的需求,波束的半功率较大,使得光源所发出的光信号无法聚焦到数据接收端所在的局部空间位置^[53-55]。与此同时,相当一部分信号功率被投射到没有用户的空间位置,造成事实上的数据资源浪费,降低了系统的整体能效。今后的研究工作可以尝试将波束成型技术引入到电力无线光技术领域^[56-57]。借助上行链路反馈的用户位置信息,远端数据源通过选择动力线路径,将用户数据流加载到与用户空间位置临近的多个光源上。同时,通过算法设计为上述光源进行不

同程度的信号缩放,在保持能耗水平不变的前提下,将更多光信号能量集中到用户所在的区域,从而切实提升用户业务体验,改善系统的整体能效。

4 结 论

随着电力行业对信息通信技术需求的进一步深化,新兴无线光技术具有传输容量大、保密性强、免电磁干扰等天然优势。现有的研究工作更多集中在理论层面,为了加速无线光技术在电力行业的技术转化和大规模应用,未来的研究工作应该更加聚焦电力线通信与可见光通信融合的吉比特传输、高可靠性双向通信、长距离组网等关键技术挑战,提出针对性的解决方案。随着多输入多输出、非朗伯波束表征、波束成型等关键技术的引入,电力无线光技术必将在网络传输及覆盖表现上实现显著的提升,从而为智能电力、智能电网的构建提供有力的基础性技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Komine T, Nakagawa M. Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(1): 71-79.
- [2] Song X Q, Wang M Y, Xing S, et al. Progress of orthogonal frequency division multiplexing based on visible light communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 120008.
宋小庆, 王慕煜, 邢松, 等. 基于可见光通信的正交频分复用技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 120008.
- [3] Jia K J, Zhang S Q. Influence of multiuser interference on performances of direct-current-biased optical orthogonal frequency division multiplexing code division multiple access system for visible light communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110604.
贾科军, 张守琴. 多用户干扰对可见光通信直流偏置光正交频分复用码分多址系统性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110604.
- [4] Yang Y F, Jiang M Z, Zhang Y, et al. Design of full duplex visible light communication system based on single light source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 010603.
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): 010603.

- [5] Ding J P, I C L, Zhang C, et al. Evaluation of outdoor visible light communications links using actual LED street luminaries [M]. *Biometric Recognition*, Cham: Springer, 2018: 572-579.
- [6] 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 & Tutorials*, 2017, 19(4): 2871-2893.
- [7] Ndjiongue A R, Ferreira H C, Song J, et al. Hybrid PLC-VLC channel model and spectral estimation using a nonparametric approach[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2017, 28(12): e3224.
- [8] Nlom S M, Ndjiongue A R, Ouahada K. Cascaded PLC-VLC channel: an indoor measurements campaign[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 25230-25239.
- [9] Kashef M, Abdallah M, Al-Dhahir N. Transmit power optimization for a hybrid PLC/VLC/RF communication system [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2018, 2(1): 234-245.
- [10] Feng S M, Bai T, Hanzo L. Joint power allocation for the multi-user NOMA-downlink in a power-lined VLC network [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(5): 5185-5190.
- [11] Ma H, Lampe L, Hranilovic S. Hybrid visible light and power line communication for indoor multiuser downlink [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(8): 635-647.
- [12] 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.
- [13] Gao S L, Zhang J, Yang H. A reference channel model of indoor integrated power line communication and VLC systems [J]. *Computer Engineering and Science*, 2018, 40(6): 1062-1066.
高树立, 张剑, 阳辉. 室内电力线通信和可见光通信融合信道参考模型[J]. *计算机工程与科学*, 2018, 40(6): 1062-1066.
- [14] Song J, Liu S C, Zhou G X, et al. A cost-effective approach for ubiquitous broadband access based on hybrid PLC-VLC system [C] // 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), May 22-25, 2016, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2016: 2815-2818.
- [15] Chen M C, Feng Y H, You S H, et al. Performance

- analysis of channel estimation for hybrid PLC & VLC system[J]. Study on Optical Communications, 2017 (1): 3-6.
- 陈梦迟, 冯勇华, 游善红, 等. PLC与VLC融合通信系统中的信道估计技术分析[J]. 光通信研究, 2017(1): 3-6.
- [16] Ding W B, Yang F, Yang H, et al. A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications [J]. Computers in Industry, 2015, 68: 170-178.
- [17] Ma X, Gao J N, Yang F, et al. integrated power line and visible light communication system compatible with multi-service transmission [J]. Iet Communications, 2017, 11(1): 104-111.
- [18] Gao J N, Yang F, Ding W B. Novel integrated power line and visible light communication system with bit division multiplexing[C]//2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), August 24-28, 2015, Dubrovnik, Croatia. New York: IEEE Press, 2015: 680-684.
- [19] Yang L W, Li J W, Zhang J N. Hybrid visible light communications (VLC) and PLC system[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), July 31-August 4, 2017, Singapore, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 1-2.
- [20] 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, March 24-27, 2013, Johannesburg, South Africa. New York: IEEE Press, 2013: 291-296.
- [21] Ma H, Lampe L, Hranilovic S. Subcarrier allocation in hybrid visible light and power line communication system[C]//2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), May 22-25, 2016, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2016: 2819-2822.
- [22] Kubjana M D, Shongwe T, Ndjiongue A R. Hybrid PLC-VLC based on ACO-OFDM [C] // 2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC), December 6-7, 2018, Plaine Magnien, Mauritius. New York: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [23] Chen M C, You S H, Wang Y, et al. Performance analysis of pilot-based OFDM channel estimation for hybrid PLC&VLC system [C] // 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), September 24-27, 2016, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [24] Alavi S E, Rezaie H, Supa'At A S M. Application of OFDM on integrated system of visible free space optic with PLC[C]//2010 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE), November 9-11, 2010, Port Dickson, Malaysia. New York: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [25] Ndjiongue A R, Shongwe T, Ferreira H C, et al. Cascaded PLC-VLC channel using OFDM and CSK techniques[C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [26] Ndjiongue A R, Ferreira H C, Shongwe T. Inter-building PLC-VLC integration based on PSK and CSK techniques[C]//2016 International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), March 20-23, 2016, Bottrop, Germany. New York: IEEE Press, 2016: 31-36.
- [27] Nlom S M, Ouahada K, Ndjiongue A R, et al. Evaluation of the SFSK-OOK integrated PLC-VLC system under the influence of sunlight [C] // 2017 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), May 16-18, 2017, Marrakech, Morocco. New York: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [28] Ndjiongue A R, Ferreira H C, Ouahada K, et al. Low-complexity SOCPBFSK-OOK interface between PLC and VLC channels for low data rate transmission applications[C]//18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, March 30-April 2, 2014, Glasgow, UK. New York: IEEE Press, 2014: 226-231.
- [29] Amirshahi P, Kavehrad M. Broadband access over medium and low voltage power-lines and use of white light emitting diodes for indoor communications[C]//CCNC 2006. 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2006, January 8-10, 2006, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2006: 897-901.
- [30] Zhang J K, Yang Y, Liu B, et al. Design of home network based on visible light communication and power line carrier communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 100604.
- 张建昆, 杨宇, 刘博, 等. 基于可见光和电力线载波的家庭网络设计[J]. 激光与光电子学进展, 2011,

- 48(10): 100604.
- [31] Liu Q Y, Sun D D, Zang Z B, et al. Design of visible light and power line communication protocol for electric power tunnel inspection [J]. *Automation & Instrumentation*, 2018(11): 133-137.
刘庆扬, 孙德栋, 臧志斌, 等. 面向电力隧道巡检的可见光和电力线混合通信协议设计 [J]. *自动化与仪器仪表*, 2018(11): 133-137.
- [32] Xu Z. An autonomous intelligent UAV line inspection system with LIDAR navigation [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2017, 36(6): 44-47.
徐展. 一种激光雷达导航的全自主智能无人机巡检系统 [J]. *浙江电力*, 2017, 36(6): 44-47.
- [33] Fan H, Li S H, Meng L, et al. Design and development of communication and positioning system of cable trench based on VLC + PLC [J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2016, 14(6): 105-108.
范辉, 李帅华, 孟良, 等. 基于 VLC+PLC 的电缆隧道通信及定位系统设计 [J]. *电力信息与通信技术*, 2016, 14(6): 105-108.
- [34] Jani M, Garg P, Gupta A. Performance analysis of a co-operative PLC/VLC system with multiple access points for indoor broadcasting [J]. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2019, 103: 64-73.
- [35] Gheth W, Rabie K M, Adebisi B, et al. Performance analysis of integrated power-line/visible-light communication systems with AF relaying [C] // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 9-13, 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates. New York: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [36] Jani M, Garg P, Gupta A. Modeling and outage analysis of DF relay assisted mixed PLC-VLC system [C] // 2018 Twenty Fourth National Conference on Communications (NCC), February 25-28, 2018, Hyderabad, India. New York: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [37] Gheth W, Rabie K M, Adebisi B, et al. On the performance of DF-based power-line/visible-light communication systems [C] // 2018 International Conference on Signal Processing and Information Security (ICSPIS), November 7-8, 2018, DUBAI, United Arab Emirates. New York: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [38] Jani M, Garg P, Gupta A. Outage analysis of an asymmetric dual hop PLC-VLC system for indoor broadcasting [C] // 2019 National Conference on Communications (NCC), February 20-23, 2019, Bangalore, India. New York: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [39] Kashef M, Abdallah M, Al-Dhahir N, et al. On the impact of PLC backhauling in multi-user hybrid VLC/RF communication systems [C] // 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 4-8, 2016, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [40] Kashef M, Torkey A, Abdallah M, et al. On the achievable rate of a hybrid PLC/VLC/RF communication system [C] // 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [41] Rosolem J B, Penze R S, Florida C, et al. FSO applied to optical fiber sensing: a field test demonstration [C] // 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), August 27-30, 2017, Aguas de Lindoia, Brazil. New York: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [42] Rosolem J B, Bassan F R, Penze R S, et al. Optical sensing in high voltage transmission lines using power over fiber and free space optics [J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 26: 180-183.
- [43] Florida C, Rosolem J B, Leonardi A A, et al. Temperature sensing in high voltage transmission lines using fiber Bragg grating and free-space-optics [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8722: 87220N.
- [44] Rende D, Nayagam A, Afkhamie K, et al. Noise correlation and its effect on capacity of inhome MIMO power line channels [C] // 2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, April 3-6, 2011, Udine, Italy. New York: IEEE Press, 2011: 60-65.
- [45] Hashmat R, Pagani P, Zeddani A, et al. MIMO communications for inhome PLC networks: measurements and results up to 100 MHz [C] // ISPLC 2010, March 28-31, 2010, Rio de Janeiro, Brazil. New York: IEEE Press, 2010: 120-124.
- [46] Schneider D, Schwager A, Speidel J, et al. Implementation and results of an MIMO PLC feasibility study [C] // 2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, April 3-6, 2011, Udine, Italy. New York: IEEE Press, 2011: 54-59.
- [47] Cano C, Pittolo A, Malone D, et al. State of the art

- in power line communications: from the applications to the medium[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(7): 1935-1952.
- [48] Laguna G, Barron R. Survey on indoor power line communication channel modeling [C] // 2008 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA'08), September 30-October 3, 2008, New York: IEEE Press, 2008: 163-168.
- [49] Zimmermann M, Dostert K. Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2002, 44(1): 249-258.
- [50] Ding J P, I C L, Chen X F, et al. Asymmetrical emission beams based visible light communication access points design [C] // 2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), May 9-10, 2019, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [51] Ding J P, I C L, Zhang H, et al. Cells planning of VLC networks using non-circular symmetric optical beam [C] // ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20-24, 2019, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [52] 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.
- [53] You C X, Hu Q S, Li S D, et al. Light source distribution for visible light communication in coal mine working face based on position and power co-optimization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0406001.
- 游春霞, 胡青松, 李世党, 等. 基于位置和功率协同优化的煤矿工作面可见光通信光源分布[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0406001.
- [54] Chen Y, Shen Q X, Liu H L. Optimization algorithm of receiver optical power uniformity in indoor visible light communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0506003.
- 陈勇, 沈奇翔, 刘焕淋. 室内可见光通信中接收光功率均匀性优化方法[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0506003.
- [55] Wang J A, Che Y, Lü C, et al. LED layout for indoor visible light communication based on energy optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0806003.
- 王加安, 车英, 吕超, 等. 基于能量最优的室内可见光通信 LED 布局[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0806003.
- [56] Kim S M, Baek M W, Nahm S H. Visible light communication using TDMA optical beamforming [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017, 2017(1): 1-6.
- [57] Mostafa A, Lampe L. Optimal and robust beamforming for secure transmission in MISO visible-light communication links[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(24): 6501-6516.