

室内可见光通信异构融合系统研究进展

梁静远¹,徐亚欣¹,韩美苗¹,赵黎²,柯熙政^{1*}

(1.西安理工大学 自动化与信息工程学院,西安 710048;2.西安工业大学 电子信息工程学院,西安 710021)

摘要:为了提高可见光通信系统性能,将可见光通信技术与其它通信技术异构融合,能使各类技术取长补短,增强通信系统容量,提高资源利用率。介绍了可见光通信分别与电力线通信(PLC)、WiFi、以太网、长期演进(LTE)网络、第五代/第六代移动通信技术(5G/6G)融合的方法及发展现状,对可见光通信异构融合系统的未来发展做了展望。

关键词:可见光通信;异构融合;以太网

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)01-0046-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of heterogeneous integration system for indoor visible light communication

LIANG Jingyuan¹, XU Yaxin¹, HAN Meimiao¹, ZHAO Li², KE Xizheng^{1*}

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

2. Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to improve the performance of the visible light communication system, the heterogeneous integration of visible light communication technology and other communication technologies can make various technologies learn from each other, enhance the capacity of the communication system and improve the utilization rate of resources. The methods and development status of the integration of visible light communication with power line communication (PLC), WiFi, ethernet, long term evolution (LTE) network and fifth generation/sixth generation mobile communication technology (5G/6G) are introduced. The future development of visible light communication heterogeneous integration system is prospected.

Key words: visible light communication, heterogeneous integration, ethernet

0 引言

可见光通信(VLC)是利用发光二极管(LED)进行高速数据传输的通信方式^[1],具有抗电磁干扰能力强、传输带宽宽、环保节能、无需频谱认证等优点,被用于室内导航、定位及某些电磁敏感环境,例如医院、候车大厅和机舱等^[2]。但在真实场景中,仅由VLC组成的无

线通信网络存在覆盖面较小、上行传输链路不成熟、光路易被遮蔽、LED调制带宽受限等弊端^[3]。于是,人们尝试将VLC与其它通信技术结合,搭建多元化的异构融合系统架构,使各类接入技术取长补短。因此,本文分别介绍VLC与电力线通信(PLC)、WiFi、以太网、长期演进(LTE)网络、第五代/第六代移动通信技术(5G/6G)融合的方法及发展现状。

收稿日期:2022-11-23。

基金资助: 陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)资助;西安市科技创新引导项目(201805030YD8CG14(12))资助;陕西省教育厅科研计划项目(NO.18JK0341)资助。

作者简介: 梁静远(1989—),女,陕西西安人,硕士,助理工程师,主要从事无线光通信系统基础理论及调制解调技术的研究工作。2017年以来,获得省部级科技奖励3项,教学成果奖励7项。

***通信作者:** 柯熙政(1962—),男,博士,二级教授,陕西省教学名师,中国电子学会会士,出版专著10部,主要研究方向为无线激光通信理论与技术、先进导航理论与技术。



1 VLC与PLC异构融合

1.1 VLC与PLC异构融合方案

当前,融合PLC和VLC的技术方案主要分为2种:一种是放大转发/解码转发(DF/AF)模式,即对加载在电力线上的信息进行解调放大后载入LED;另一种是深度融合模式,即对PLC信息不解调,通过耦合器直接把原始电力线信号载入LED。PLC信号经LED发射后,VLC接收端完成信号的解调^[4-5]。

1.2 VLC 与 PLC 异构融合发展现状

VLC 技术在近年来显示出了巨大的发展潜力和实用前景。2002 年, KOMINE T 等人^[9]将 VLC 和 PLC 融合, 自此异构融合网络技术成为越来越多研究人员关注的焦点。2015 年, 为了提高 VLC 系统性能, SONG J 等人^[7]在 PLC 和 VLC 深度融合的基础上提出一种单频网络(SFN)系统设计方案, 并研究了 PLC-VLC 系统的信道模型。2016 年, CHANG J A 等人^[8]将 PLC 与 VLC 系统相结合, 实现了单一空时调制的频率分集, 并评估了 PLC-VLC 融合系统特性。2017 年, 针对 PLC-VLC 系统的双通道频谱估计问题, ALAIN R N 等人^[9]使用非参数窗口 Welch 方法对传输信道统计分析, 探究了抽头数、视距(LOS)链路和非视距(NLOS)链路增益对 PLC-VLC 系统频率响应的影响。陈梦迟等人^[10]研究了 PLC-VLC 融合系统中信道估计技术, 并通过建立 PLC-VLC 融合信道模型来分析梳状和块状导频结构下的最小二乘和奇异值分解。理艳荣^[11]采用放大转发(AF)中继技术, 提出了一种新型融合网络结构, 并利用这种结构的特点, 研究了适用于融合系统的正交频分复用(OFDM)技术。2019 年, 在 PLC 与 VLC 深度融合的系统框架基础上, AYESHA N 等人^[12]提出非正交多址接入(NOMA)技术, 在系统容量和功率效率方面, NOMA 比正交多址(OMA)方案性能更优。2021 年, 刘焕淋等人^[13]提出了一种新的遗传算法, 用于优化用户配对联合子载波分配方法, 采用这种方法可以显著提高室内 PLC-VLC 系统的吞吐量, 并且能够更好地满足用户的需求。杨博瑞^[14]基于 PLC 和 VLC 级联技术, 在 2 个不同的传输信道上采用 OFDM 技术, 避免了多径效应和阻抗衰落等物理层影响。2022 年, 为了确保信号在 PLC 与 VLC 级联系统中有效传输, 杨博瑞等人^[15]提出了一种基于 OFDM 的中心节点解调调制模型, 这种模型有效地实现了 PLC 与 VLC 之间的信息交互。

2 VLC 与 WiFi 异构融合

2.1 VLC 与 WiFi 异构融合方案

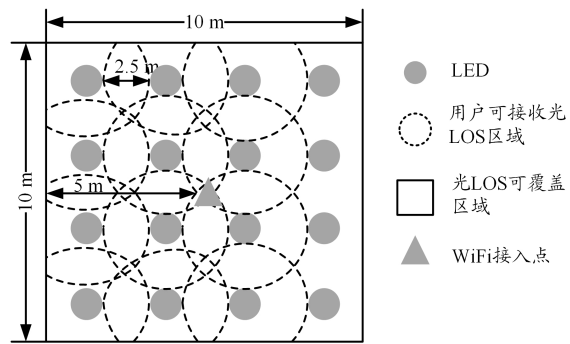
室内用户位置改变和建筑格局都有可能对 VLC 信号质量降低或通信中断, 若使用 WiFi 来辅助 VLC, 即可实现在 VLC 信号中断时切换至 WiFi 继续数据传输^[16]。

VLC-WiFi 异构融合系统中, VLC 接入点以其高发射功率、大带宽等优势为下行链路提供了极高的传输速率。同时, WiFi 接入点也利用其覆盖面积大、抗遮

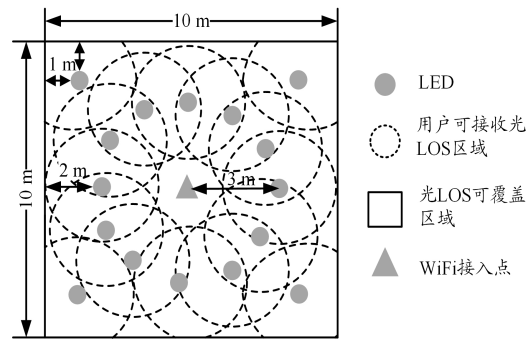
挡能力强和上行传输可控等特点, 实现了异构网络的上行传输^[17]。VLC 与 WiFi 异构融合方案有以下几种: 可见光与 WiFi 同时进行上下行数据传输; 可见光进行上下行数据传输, WiFi 执行上行数据传输; 可见光进行下行数据传输, WiFi 进行上行数据传输; 可见光进行下行数据传输, WiFi 执行上下行数据传输。

室内 VLC-WiFi 异构融合系统设计方案通常取决于 VLC 的部署, 除了考虑室内用户对光照的实际需求外(室内光照强度必须达到国际照明标准 300~1500 lx), 还需要考虑 VLC 中的接入点布局。

室内 VLC 中接入点布局分为规则接入点布局与不规则接入点布局 2 种^[18]。图 1(a)为 VLC-WiFi 异构融合系统规则接入点布局图, 在 10 m×10 m×3 m 的房间内, VLC-WiFi 异构融合系统由 16 个 LED 和 1 个位于天花板中心的 WiFi 接入点组成, 每个 LED 相距 2.5 m, 视场角为 45°。这种布局不存在通信盲区。吴兰^[18]在同样大小的房间引入不规则的接入点部署方案来解决 VLC-WiFi 异构融合系统接入选择问题, 如图 1(b)所示, WiFi 接入点位于天花板中心, 12 个 LED 分布在天花板的中心区域, 形成一个半径为 3 m 的圆, 在距离墙 1 m 处的角落分别安装一个 LED 光源补充光照。此方案中, 当 LED 发射半功率角和用户视场角均为 60°时,



(a) 规则接入点布局



(b) 不规则接入点布局

图 1 室内 VLC-WiFi 异构融合系统中接入点布局

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

室内中心位置和边缘都存在通信盲区,用户处在这些位置时则会发生通信中断。

2.2 VLC 与 WiFi 异构融合发展现状

2016年,为确保用户能够接入到最高传输速率的网络,郑浩天等人^[9]在等效信噪比(SINR)的基础上提出了一种新的VLC和WiFi垂直切换算法,仿真结果验证了该算法更加适用于室内融合VLC异构网络。2017年,吴燕等人^[20]根据室内VLC-WiFi异构融合系统的特点,提出上行链路使用WiFi,下行链路使用VLC和WiFi的传输方案。2019年,刘焕淋等人^[21]提出了一种新的遗传算法,用于解决VLC-WiFi异构融合系统中多接入点布局带来的信道干扰问题。仿真结果表明,此算法显著提升了VLC-WiFi异构融合系统的吞吐量与用户满意度。2022年,为了解决车载VLC中由于移动性、阴影和障碍物引起的切换问题,JARCHLO E A等人^[22]提出了一种上层混合VLC-WiFi异构融合系统切换方案,利用VLC和WiFi的高数据传输速率和链路可用性的优势,以较低的切换中断持续时间和较高的网络吞吐量提供良好的连通性。同年,BABALOLA O等人^[23]提出了一种基于隐马尔可夫模型(HMM)的VLC-WiFi系统自动垂直切换(VHO)算法。与基于阈值、模糊控制器和神经网络的VHO预测方案相比,该算法提高了网络上的停留时间,减少了切换事件的数量。因此,它有效降低了VLC-WiFi异构融合系统中与VHO相关的乒乓效应。

3 VLC 与以太网异构融合

3.1 VLC 与以太网异构融合方案

介质转换模块是将VLC技术和以太网技术融合的核心模块,用于实现互融网络系统中2种传输介质之间的电平极性转换及2种通信方式之间的协议转换。在转换过程中,以太网帧数据包依次通过链路层、IP层、传输层,把帧头、帧尾、IP头、用户数据报协议(UDP)头去掉,再将剩余的Multi-Level Transmitt-3(MLT-3)数据信息存贮到以太网数据缓存区域中,通过介质转换模块将它们全部转换成单极性数据信息后由STM32 I/O口输出^[24]。在融合通信系统中(如文献[24]中的图2-1所示),下行通信链路采用LED光源,上行通信链路采用半导体激光器,并且上行通信链路和下行通信链路上分别设置发射器与接收器,以便顺利完成双向通信^[25]。

3.2 VLC 与以太网异构融合发展现状

2015年,ZWIERKO P等人^[26]提出了一种可用于

10/100 Mb/s以太网信号传输的双向开放空间光链路系统,系统在2个传输方向上都使用照明LED作为光源。2019年,刘洋等人^[25]提出一种VLC和以太网互融技术,实现了网络信息全面覆盖,该融合方式在人工智能领域有较高的应用价值。徐一鸣^[27]设计了一种新型的高速双向VLC系统,采用以太网口作为通用接口,为用户提供了更高效的交互方式。YE X等人^[28]基于现场可编程门阵列(FPGA)技术和以太网协议,提出了一种VLC以太网适配器的设计方案,将以太网应用于VLC信道,实现了两信道间的双向传输,解决了不同编码格式之间的信号转换问题。2020年,SUN G L等人^[29]在基于FPGA的以太网/可见光数据转换系统中,实现了1000 Mb/s以太网数据和625 Mb/s可见光数据的转换。针对传统VLC系统难以实现高速以太网通信的问题,卢霆威等人^[30]提出一种满足高速以太网通信技术要求的全双工VLC系统,该系统中上下行链路之间的信号传输变得透明,无需调制即可实现高速以太网通信。

4 VLC 与 LTE 网络异构融合

4.1 VLC 与 LTE 网络异构融合方案

文献[31]提出了一种VLC与LTE网络异构融合互联的方法(互联功能模块图如文献[31]中的图3-6所示),VLC与LTE网络互连系统由若干LTE网络基站和VLC接入点、服务网关(SGW)以及移动性管理实体(MME)组成,VLC经由网络调度器与LTE网络连接。在LTE网络基站侧,网络调度器保持完全透明,具备LTE网络基站的特性。在VLC网络侧,VLC网络的所有接入点统一由网络调度器管理。除此之外,网络调度器还控制着LTE网络与VLC网络之间的切换操作(切换流程如文献[31]中的图3-7、图3-8所示)。

此方案对LTE网络具有明显优势,切换流程符合现有LTE网络的要求,对其性能影响也较小。VLC采用紧耦合方式与LTE网络连接,更大限度满足了使用者的需求,降低了因系统切换而产生的时延,从而确保系统性能良好。

4.2 VLC 与 LTE 网络异构融合发展现状

2014年,黄治同等人^[32]提出一种VLC-LTE互连系统和切换方法,把VLC网络架构中的调度器引入LTE网络,利用该调度器使VLC与LTE网络进行互联。2019年,OLIVEIRA M等人^[33]提出了一种利用VLC实现LTE网络信号传输的方案,通过使用光无线信道,在3 m的距离内传输下行LTE网络信号。许梦昊^[34]

采用LTE终端直通(LTE-D2D)技术和车辆自身照明系统,实现车辆之间的VLC。该方案大大提高了车辆之间的通信效率,并降低了通信成本。2020年,祖立佳^[35]在用户位置的虚拟小区构造中,将VLC与LTE网络相结合,最大化异构网络总数据吞吐量,根据实际情况决定是否进行网络切换,并仿真验证了该方案在一定程度上能够保证用户的服务质量(QoS),使异构网络的吞吐量和网络资源利用率得到了有效提升。

5 VLC与5G/6G异构融合

5.1 VLC与5G/6G异构融合方案

VLC已成为在电磁干扰环境中传输5G新无线电通信(NR)标准信号的替代方案。文献[36]搭建了同时传输5G NR标准信号和LTE-A三波段信号的VLC-5G融合实验平台。在发射端,以红色、绿色、蓝色、琥珀色(RGBA)LED作为光源,使用SMBV100B矢量信号发生器生成5G NR信号,使用PSGE8267D矢量信号发生器和M9505A任意波形发生器生成LTE-A三波段信号,这些无线信号经偏置三通管转换为电信号,再调制到红色LED中发射出去。在接收端,使用直径和焦距分别为25.4 mm和35.0 mm的平面凸透镜将接收到的光束聚焦在PIN光电探测器的输入端,补偿LED频率响应^[37],最终实现了VLC与5G网络间的互联互通。

为了满足VLC与5G异构融合网络不同的QoS需求,文献[38]研究了在住宅环境中启用5G室内服务的自适应多输入多输出(MIMO)OFDM VLC系统,提出了基于直流偏置光OFDM(DCO-OFDM)的强度调制/直接检测(DM/CC)自适应VLC传输方法。此方法预先计算系统误码率(BER),并基于BER进行自适应调制阶数切换,然后考虑5G室内业务的需求,保证了多媒体应用的QoS。

与5G相比,6G能提供Tb/s的数据速率、1/10倍的低延迟和接近100%的覆盖率。因此,6G技术预计将扩展到所有可用的光谱,包括可见光、太赫兹等。

5.2 VLC与5G/6G异构融合发展现状

2021年,为了实现5G应用的高频谱效率和更高比特率,NAWAWI N等人^[38]在VLC设计系统中嵌入了多频带catenated-OFDM调制技术和光码分多址(OCDMA)技术。但是,超密集部署VLC接入点对用户移动性提出了严峻挑战。为了克服这些挑战,WANG L Q等人^[39]提出一种自适应切换机制,包括无缝切换协议,并且使用了深度强化学习(DRL)优化选择算法。实验

仿真结果表明,该算法的平均下行数据率比传统强化学习(RL)算法提高了48%,比Deep Q-Network(DQN)算法、Sarsa算法、Q-Learning(QL)算法分别提高了8%、13%和13%。2022年,MIRAMIRKHANI F等人^[40]提出了一种新的自适应VLC传输方法,采用直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)技术,提高了BER性能,利用VLC技术实现住宅环境的5G室内服务。

6 结束语

本文总结了几种VLC异构融合系统技术。除上述几种异构融合技术外,KHALID A等人^[41]通过实验演示了将光载射频(RoF)和VLC技术集成到室内通信的混合系统中,搭建了实验平台。因此,VLC与RoF的异构融合也将是未来研究的方向之一。由于异构网络系统在通信过程中会受到不同因素的影响,例如异构网络间的切换机制、数据传输速率等,结合当前VLC异构融合系统的演进和发展趋势,可推断VLC异构融合技术的研究方向如下:

- ①研究InGaN/GaN多量子阱系统材料维纳LED元件,解决VLC双向传输中的困难。
- ②研究可见光和太赫兹、毫米波及微波无线通信之间如何并存和兼容,促进VLC异构融合技术加速发展。
- ③研究如何将基于机器学习的智能算法用于VLC异构融合系统中,满足通信系统处理复杂数据的需求。
- ④研究更加适合异构网络的切换算法,应对数据传输过程中的中断问题,保证VLC异构融合系统的QoS。

参考文献:

- [1] 骆宏图,陈长缨,傅倩,等.白光LED室内可见光通信的关键技术[J].光通信技术,2011,35(2):56-59.
- [2] ABDALLAH K, SIHUA S, AMMAR G, et al. A hybrid RF-VLC system for energy efficient wireless access[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(4): 932-944.
- [3] 刘建辉.室内可见光通信组网关键技术研究[实现][D].郑州:解放军信息工程大学,2015.
- [4] 高树立.室内电力线和可见光通信融合信道模型研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2017.
- [5] MANAN J, PARUL G, AKASH G. Performance analysis of a Co-operative PLC/VLC system with multiple access points for indoor broadcasting [J]. AEUE-International Journal of Electronics and Communications, 2019, 103: 64-73.
- [6] KOMINE T, NAKAGAWA M. Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication[J]. IEEE Transactions

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

on Consumer Electronics, 2002, 4: 1762–1766.

[7] 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.

[8] CHANG J A, YEON H C. Performance enhancement using unitary frequency modulation with PLC and VLC cooperation[J]. IEICE Proceeding Series, 2016, 48: 91–94.

[9] ALAIN R N, HENDRIK C F, JIAN S, et al. Hybrid PLC-VLC channel model and spectral estimation using a nonparametric approach[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2017, 28(12): 168–180.

[10] 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.

[11] 理艳荣. 基于 OFDM 的室内 PLC 与 VLC 的融合系统研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2017.

[12] AYESHA N, SOBIA B, HAFIZ M A. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for broadband communication in smart grids using VLC and PLC [J]. Optik, 2019, 188: 162–171.

[13] 刘焕淋,黄美娜,陈勇,等. 基于 NOMA 技术的 PLC-VLC 用户配对和子载波分配方法[J]. 电子学报, 2021, 49(10): 1952–1959.

[14] 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.

[15] 杨博瑞,赵黎,芦颖. 基于 CNDM-OFDM 的 PLC 与 VLC 级联通信系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 1–18.

[16] 严超,徐赞昊,薛磊冰,等. 基于 VLC+WiFi 协同的室内异构无线接入网络[J]. 光通信技术, 2016, 40(9): 41–43.

[17] 蒲欣. 室内 VLC-WiFi 异构网络的下行链路资源分配方案 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.

[18] 吴兰. 室内可见光通信异构网络中用户接入及资源分配算法研究 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.

[19] 郑浩天,季新生,黄开枝,等. 基于等效 SINR 的 VLC 与 WiFi 垂直切换算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(3): 832–835, 839.

[20] 吴燕,张申. 室内 VLC-WiFi 异构无线接入网络研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(6): 853–856, 861.

[21] 刘焕淋,林振宇,陈勇,等. 基于干扰管理的异构 VLC/WiFi 网络子信道分配[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 214–221.

[22] JARCHLO E A, ESO E, DOROUH H, et al. Li-Wi: an upper layer hybrid VLC-WiFi network handover solution [J]. Ad Hoc Networks, 2022, 124: 102705–1–102705–10.

[23] BABALOLA O, BALYAN V. Vertical handover prediction based on hidden markov model in heterogeneous VLC-WiFi system [J]. Sensors, 2022, 22(7): 2473–2473.

[24] 刘洋. LED 可见光通信网络与以太网互融技术的研究[D]. 黑龙江: 黑龙江大学, 2019.

[25] 刘洋,蔡喜平,林朗,等. LED 可见光通信网络与以太网互融技术的研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(3): 1–4.

[26] ZWIERKO P, MAKSYMIAK L, SIUZDAK J. A system for ethernet signal transmission via VLC lighting LED link[J]. Warsaw Univ. of Technology (Poland), 2015, 9662: 966206–1–966206–8.

[27] 徐一鸣. 双向高速 VLC 系统设计与实现[D]. 北京: 北方工业大学, 2019.

[28] YE X, SUN G, ZHAO W, et al. Design of an ethernet-VLC adapter based on FPGA [J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2019, 19(3): 779–787.

[29] SUN G L, ZHAO W J, WANG R B, et al. Design of ethernet-VLC data conversion system based on FPGA [J]. International Journal of Computer Theory and Engineering, 2020, 12(3): 69–73.

[30] 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.

[31] 张馨跃. 室内可见光网络组网架构与资源分配[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.

[32] 黄治同,张馨跃,纪越峰. 一种长期演进(LTE)和可见光通信(VLC)的互联系统和切换方法: CN103944796A[P]. 2014–07–23

[33] OLIVEIRA M, FERNANDES M A, SANTOS P, et al. Experimental transmission of LTE signal using visible light communications[C]//IEEE. Proceedings of 2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). Aveiro: IEEE, 2019: 1–3.

[34] 许梦昊. 融合 VLC 和 LTE-D2D 技术的异构车联网车辆间通信链路资源分配研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

[35] 祖立佳. 室内蜂窝可见光通信网络虚拟小区及资源管理技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.

[36] BORGES R M, ALEXANDRE L C, LIMA E S, et al. Integrating optical and wireless techniques towards novel fronthaul and access architectures in a 5G NR framework[J]. Applied Sciences, 2021, 11(11): 504801–504815.

[37] HUANG X, SHI J, LI J, et al. 750 Mbit/s visible light communications employing 64QAM-OFDM based on amplitude equalization circuit[C]//The Optical Fiber Communication Conference, March 22–26, 2015, Los Angeles, USA. Los Angeles: IEEE, 2015: 1–3.

[38] NAWAWI N, ABDULLAH S, SYUHADA M, et al. 5G visible light communication-OCMA setup using catenated-OFDM modulation method [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1755 (1): 012016–1–012016–9.

[39] WANG L Q, HAN D H, ZHANG M, et al. Deep reinforcement learning-based adaptive handover mechanism for VLC in a hybrid 6G network architecture[J]. IEEE Access, 2021, 9: 87241–87250.

[40] MIRAMIRKHANI F, KARBALAYGHAREH M, ZEYDAN E, et al. Enabling 5G indoor services for residential environment using VLC technology[J]. Physical Communication, 2022, 53: 101679–1–101679–10.

[41] KHALID A, COSSU G, CORSINI R, et al. Hybrid radio over fiber and visible light (RoF-VLC) communication system [C]//2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 18–22, 2011, Geneva, Switzerland. Geneva: IEEE, 2011: 1–3.