

引用本文: 贾佳, 黄娅, 陈默, 等. 一种可见光网络的入网与网络维护设计[J]. 光通信技术, 2024, 48(5): 30–34.

一种可见光网络的入网与网络维护设计

贾佳¹, 黄娅¹, 陈默¹, 周云龙¹, 楼韬²

(1. 北京特种工程设计研究院, 北京 100028; 2. 浙江时空道宇科技有限公司, 上海 200233)

摘要: 为了简单有效地提升室内可见光网络有限带宽资源分配性能, 设计了一种基于时分多址(TDMA)机制的入网与网络维护方法, 详细描述了用户竞争入网流程和网络维护机制。通过设计具体的帧结构, 分析了用户入网概率。实验结果表明: 提入网与网络维护方法能够支持多个移动用户的灵活接入和资源动态分配, 5个终端全部接入所需的总时间仅为 25 ms, 该方法工程实现简单, 能有效提升资源利用率。

关键词: 可见光通信; 时分; 竞争入网; 网络维护; 动态分配

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)05-0030-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Visible light network access and network maintenance design

JIA Jia¹, HUANG Ya¹, CHEN Mo¹, ZHOU Yunlong¹, LOU Tao²

(1. Beijing Special Engineering Design and Research Institute, Beijing 100028, China;

2. Zhejiang Geespace Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: In order to improve the limited bandwidth resource allocation performance of indoor visible light networks in a simple and effective manner, a network access and maintenance method based on time division multiple access (TDMA) mechanism was designed, and the user competition network access process and network maintenance mechanism were described in detail. By designing specific frame structures, the probability of users accessing the network was analyzed. The experimental results show that the network access and maintenance method can support flexible access and dynamic resource allocation for multiple mobile users. The total time required for all five terminals to access is only 25 ms. This method is easy to implement in engineering and can effectively improve resource utilization.

Key words: visible light communication, time-division, competition access, network maintenance, dynamic allocation

0 引言

可见光通信(VLC)系统不仅满足了室内照明的需求,还兼具无线通信功能,具有无射频电磁辐射、无需频谱认证、低成本、高保密性、高调制带宽和高速传输速率^[1-3]等优势,这促使了该技术的迅速发展,并吸引了国内外学者的广泛研究与关注^[4-8]。

2000年,庆应义塾大学和索尼计算机科学实验室提出了可用室内LED灯进行通信^[1]。2003年,日本成立了可见光通信协会(VLCC)。随后的几年里,美国国

收稿日期: 2023-11-17。

作者简介: 贾佳(1981—),男,博士,助理研究员,毕业于国防科技大学,主要研究方向为信息应用和工程智能化。



家科学基金会(NSF)成立的照明系统研究与应用中心(LESA)成功研制了全球首个具有高速率、零误差、可长距离传输特性的可见光全集成微芯片接收机链路。我国复旦大学、中科院半导体研究所等高校和科研单位,在先进调制均衡技术和高速可见光传输方面取得了一系列显著的成果^[9-10]。VLC速率从几十 Mb/s 发展到2013年复旦大学研发出的 3.25 Gb/s 离线数据传输速率,再到2015年,中国工信部测试认证的可见光实时通信速率达到 50 Gb/s^[11],可见光传输速率在短短十几年间得到了很大的提升。但在实际应用场景中,由于VLC的覆盖面积有限,且传输链路易被干扰,其更适用于室内短距通信部署。因此,人们尝试将VLC与其它通信技术结合,构建融合系统,目前在与电力线通信、WiFi、以太网、长期演进(LTE)网络、第五代/第六代(5G/6G)移动通信技术融合方面取得了很大进展^[12]。

无线接入技术通常包括频分多址(FDMA)、码分多址(CDMA)和时分多址(TDMA)。FDMA 技术虽然能够提供较大的连续带宽,但需要收发硬件单元对光信号进行不同波长的滤波处理,这增加了硬件的复杂度并且不易灵活配置,从而限制了接入节点的数量;CDMA 技术要求信号载波具有丰富的相位细节,而本文的 VLC 系统采用的是开关键控(OOK)调制技术,该调制方式并不具备足够的相位变化以满足 CDMA 的要求。因此,TDMA 方式被选为多用户接入的首选方案,因为它能够灵活配置用户接入数量,理论上既可通过调整数据吞吐量和时延性能来支持更多用户接入,又可按需灵活设置各用户的数据速率。

针对多样化的室内实际应用场景,通过规划光源的密度与功率配置,不仅能充分满足照明需求,还能实现通信与定位的双重功能。此外,在细致考量成本与工程实施难易度的前提下,构建一个互联网相互融合的 VLC 网络显得尤为关键且必要。因此,本文设计一种基于 TDMA 机制的 VLC 网络入网与网络维护方法,以实现 VLC 网络内有限带宽资源的动态分配,提升资源利用率。

1 室内 VLC 网络

图 1 为 VLC 网络架构示意图。该系统主要由管理服务器、多个 VLC 单元组成。其中,每个 VLC 单元包括 LED 阵列灯端、终端两部分,LED 阵列灯端的集中式处理单元全部采用网络与管理服务器连接。在每个 VLC 单元内部,通过实施 TDMA 机制,确保了灯端覆

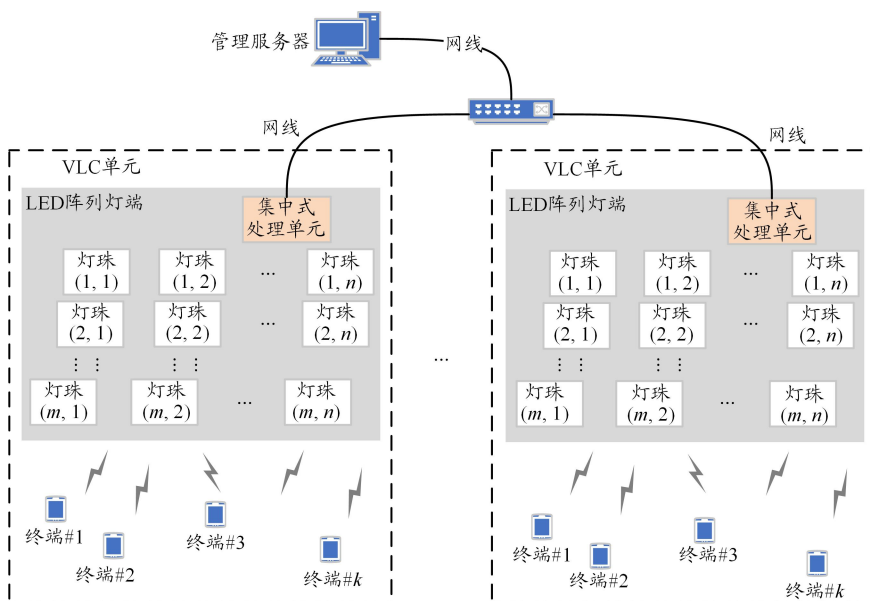


图 1 室内 VLC 网络

盖区域下的所有终端设备都能成功接入。

为了降低 LED 灯端的整体成本、实现高精度控制阵列灯珠信号的时序、便于后续模块化升级以及集中管理硬件架构的散热,VLC 单元内部采用类似移动通信中的射频拉远单元(RRU)与基带处理单元(BBU)相结合的架构。这种设计使得灯珠得以远程分布,而所有信号则由统一的集中式处理单元进行集中管理和控制。

每个 LED 阵列灯端包含 $m \times n$ 个灯珠和多套集中式处理单元。LED 阵列灯端通过灯珠发送下行信号;同时通过 $m \times n$ 个光电接收器接收终端上行数据。终端实时监听下行信道的系统信息、同步信息等,在空闲时隙随机接入上行信道。

2 入网与网络维护方法

2.1 入网与网络维护的设计原理

本文的入网方式为竞争入网方式。当移动终端间无法预知是否应启动竞争时,由各自本地生成的伪随机码以概率方式决定其是否发起入网竞争。若多个移动终端同时发起入网请求,这会对灯端构成同频干扰,导致灯端无法立即提取正确的信息。因此,灯端会持续将时隙标记为竞争状态并广播,直至仅有一个移动终端成功发送了可靠的入网请求信息。一旦确认,灯端将该终端注册到入网节点表中,并通过广播通知所有移动终端。此后,被注册的终端将不再参与入网竞争。通过这种机制,可以逐一将各个节点注册入网。

网络维护通过采取定时刷新的方式进行。当灯端在设定时间内未接收到来自某一移动终端的任何信息时,系统会自动将该移动终端在入网节点表中的节点注销,并随之释放该节点所占用的带宽和时隙资源。

2.2 入网与网络维护的时帧结构设计

对于本文的室内 VLC 系统,终端入网与网络维护时所采用的帧结构如图 2 所示。

该时帧由 50 个时隙组成,其中时隙 1~时隙 10 专门用于处理需要入网的终端 1 的发起请求。以此类推,时隙 11~时隙 50 分别用于处理终端 2~终端 5 的发起请求。此外,在每个轮询周期中,10 个时隙会分别用于轮询访问 10 盏 LED。

贾佳,黄娅,陈默,等:一种可见光网络的入网与网络维护设计

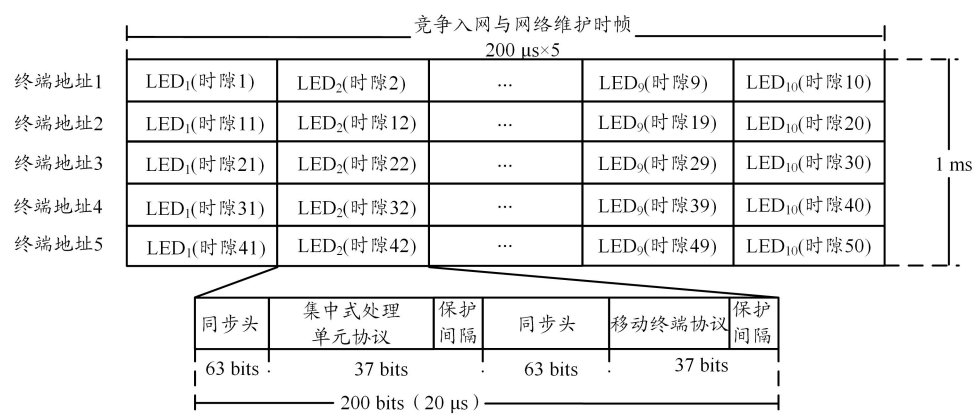


图2 入网与网络维护时帧结构

本文所提系统的所有终端均采用竞争入网模式。入网协议在每个时帧的各个时隙中重复发送,此过程由集中式处理单元发起,并通过2种协议格式与移动终端进行交互,移动终端则进行回复。具体的协议内容如表1、表2所示。

表1 集中处理单元入网时隙协议

bit 序号	名称	内容	说明
1~63	同步头	M 序列	用来做捕获且作为位同步的起始位置
64~79	目的 MAC 地址	目的 MAC 地址	集中处理单元发送的目的地址,若为 0xffff,则表示该时隙为空闲时隙,可以被竞争入网;否则,填入一个已经占用了该时隙的移动终端的媒体访问控制(MAC)地址
80~87	时隙编号	时隙编号	高 4 bits 表示轮询的周期,低 4 bits 表示 LED 编号
88~95	累加和校验	累加和校验	对 64~87 bit 按照字节进行累加和校验

表2 移动终端入网时隙协议

bit 序号	名称	内容	说明
1~63	同步头	M 序列	用来做捕获且作为位同步的起始位置
64~79	本地 MAC 地址	终端本地 MAC 地址	移动终端若判定竞争有效,则发送本地 MAC 地址;或是当解调出该时隙的目的地址为本地时,则以应答的方式发送本地 MAC 地址
80~87	时隙编号	时隙编号	将收到的集中式处理单元的时隙编号填入该协议字段
88~95	累加和校验	累加和校验	对 64~87 bits 按照字节进行累加和校验

管理服务软件能够调整 VLC 网络可接入的节点数量。当上位机设置的可接入节点数超过 5 个时,网络维护时隙结构和接入终端的容量都会相应增加,同时竞争入网与网络维护时隙占用的总时长也会随之增长。为了实现对更大范围内 LED 灯终端的有效管理,每套集中式处理单元可以管理 10 盏 LED 灯终端。若要扩大室内的通信覆盖范围,可以通过部署更多的集中式处理单元来实现。这些新增的单元能够轻松地通过路由器连接到上位机,进而灵活适应并满足各种规模室内场景下的应用需求。

2.3 入网与网络维护流程

入网与网络维护的处理流程如图 3 所示。具体流程如下:

- 1)集中式处理单元(灯端)内置有一个定时器,该定时器每 25 ms 循环执行一次。每当定时器计数在 0~1 ms 时,便会启动竞争入网与网络维护的流程处理。
- 2)灯端在这 1 ms 内轮询 5 个周期,每个周期对应的终端地址不同。在每个周期内,又平均分为 10 个时隙,对应于 1~10 号的 LED 灯。依次让每个 LED 灯端发送表 1 中的协议。
- 3)在每个轮询周期(1~5)内,系统会判定当前周期是否存在已入网的移动终端节点或空闲时隙。若判定为空闲时隙,则启动竞争入网流程;若已存在节点,则转而进行网络维护流程。
- 4)当进入竞争入网流程时,灯端会将时隙编号和目的地址 0xFFFF 填入集中式处理单元协议,并根据时隙编号的 LED 序号,发送到与其匹配的 LED 灯上,通过该 LED 发送本协议报文。
- 5)移动终端接收并解调捕获到的该报文,随后判定累加和校验是否正确,如果正确则进行下一步,否则结束流程。
- 6)移动终端首先检查接收到的协议中目的 MAC 地址字段是否为 0xFFFF,如果是,则代表本节点有资格参与网络竞争入网。随后,系统需判定本节点是否已入网;若已入网,则流程结束;若未入网,则需进行网络竞争入网操作。
- 7)当移动终端判定需要入网时,它会生成一个本地随机序列。如果这个随机序列匹配了预设的特定

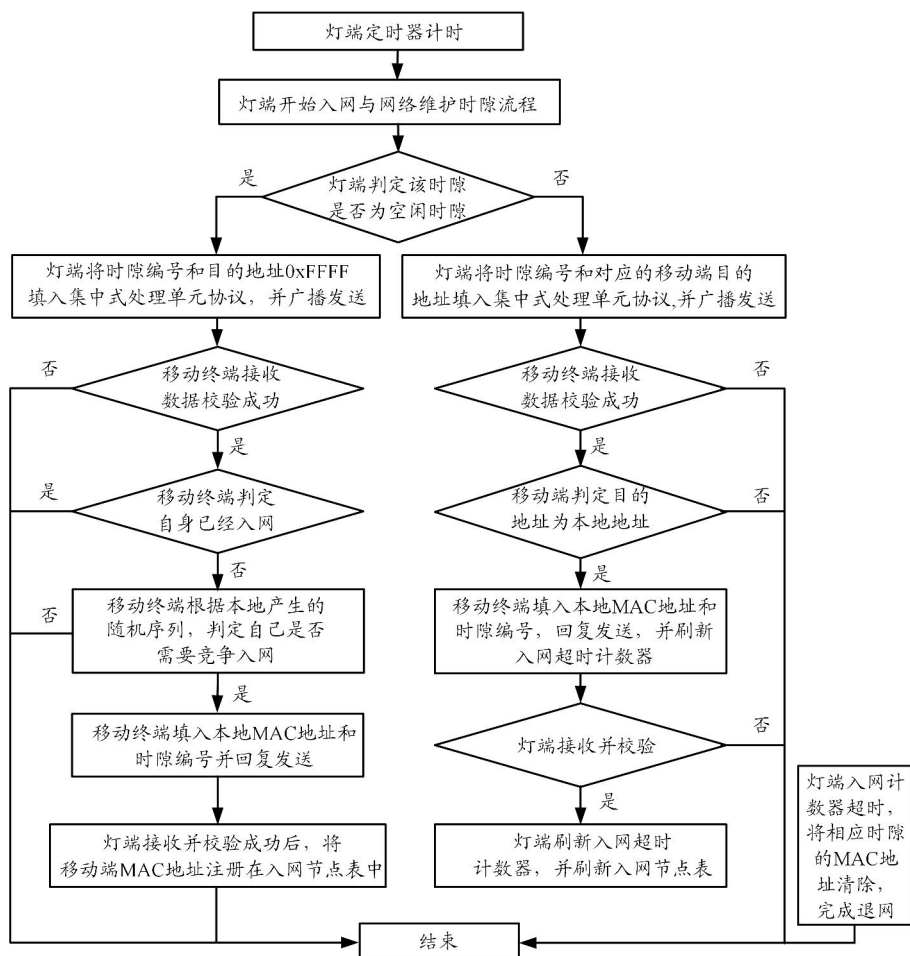


图3 入网与网络维护流程

值,表示允许发送入网协议,那么终端将把本地 MAC 地址和接收到的时隙编号填入协议的相应字段中,并最终将这份协议发送给灯端。

8)灯端在接收到移动终端发送的协议并校验成功后,便将该移动终端的 MAC 地址注册到入网节点表中,该表的序号由时隙号与轮询周期编号共同确定。此后,当再次轮询到该时隙时,系统会发现表中已存在该移动终端的注册信息。

9)当灯端判定本时隙不是空闲时隙,即灯端检测到该时隙下已有注册好的移动终端的信息时,灯端会转入网维时隙流程,它会将该移动终端的 MAC 地址填充到集中式处理单元的协议中,并根据时隙编号对应的 LED 序号,将该协议报文发送到相应的 LED 灯上,由该 LED 灯负责发送此协议报文。

10)移动终端在接收到该报文后,会首先执行累加和校验。若校验通过,则进一步检查报文中的目的地址是否匹配本地的 MAC 地址。若不匹配,则流程终止;若匹配,则更新网络超时计数器,并向移动终端回复相应的协议响应。

11)当灯端接收到来自移动终端的回复报文时,首先进行校验。若校验无误,则将其发送的目的 MAC 地址与接收到的移动终端的源 MAC 地址进行对比。若两者匹配,则立即刷新网络超时计数器,并随之结束当前处理流程。

12)若灯端网络超时计数器在预设的时间阈值内未得到更新,系统随即会将该节点的占用状态标记为未使用,并相应地将其发送的 MAC 地址重置为 0xFFFF。

2.4 入网概率分析

当灯端上电时,其网络节点表全部处于未被使用状态。此时,若有几个移动终端需要接入网络,则需要计算它们的入网概率和所需时间。本文设定每个移动终端的竞争概率为 $1/2$ 。

5 个移动终端同时竞争入网,其中任何 1 个能竞争上的概率为

$$C_5^1 \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{2}\right)^4 = 0.15625 \quad (1)$$

因为任何 1 个移动终端入网的期望值为 6.4,所以经过 7 个时隙便可以实现 1 个移动终端入网。

如果是 4 个移动终端同时竞争入网,其中任何 1 个能竞争上的概率为

$$C_4^1 \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{2}\right)^3 = 0.25 \quad (2)$$

可得期望值为 4,所以需要 4 个时隙实现其中 1 个移动终端入网。

如果是 3 个移动终端同时竞争入网,其中任何 1 个能竞争上的概率为

$$C_3^1 \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 0.375 \quad (3)$$

所以,需要 3 个时隙实现其中 1 个移动终端入网。

如果是 2 个移动终端同时竞争入网,其中任何 1 个能竞争上的概率为

$$C_2^1 \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{2}\right)^1 = 0.5 \quad (4)$$

所以,需要 2 个时隙实现其中 1 个移动终端入网。

若是 1 个移动终端竞争入网,其能竞争上的概率为

贾佳, 黄娅, 陈默, 等: 一种可见光网络的入网与网络维护设计

$$C_1^1 \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{2}\right)^0 = 0.5 \quad (5)$$

所以, 需要 2 个时隙实现其入网。

考虑到 5 个移动终端, 每个节点的轮询周期设定为 10 个时隙, 当任何一个节点被成功注册入网后, 灯端会立即将该节点的轮询状态更新为已入网状态。在理想情况下, 若 5 个移动终端同时竞争入网且系统为串行处理, 理论上总共需要 50 个时隙来完成所有节点的入网过程。因此, 预计最长入网时间为 25 ms。

2.5 多接点同时入网实验仿真分析

本文对 5 个移动终端同时竞争入网情况进行了 2 次仿真分析。首先, 为这 5 个移动终端分别配置了 MAC 地址, 依次为 0x1111、0x2222、0x3333、0x4444、0x5555。随后, 每个移动终端利用其自身的 MAC 地址作为生成本地伪随机码的种子。在入网时隙中, 灯端会对每个 LED 灯下的移动终端进行轮询广播, 发布入网节点信息。若广播的网络节点状态表 `net_state_list` 值为 0xFFFF, 则表明当前时隙为空闲状态, 可供移动终端竞争入网; 若非 0xFFFF, 则表明该时隙已被特定地址的移动终端占用, 因此所有节点无法竞争此时隙入网。当移动终端解析广播信息得知当前时隙为空闲时隙后, 便提取伪随机序列结果, 从而判断是否竞争入网。仿真结果显示, 在轮询到达时隙 03 (当 `led_num` 等于 03) 时, 移动终端 1、2、5 同时发出响应, 这表明这 3 个移动终端的伪随机码均判定为需要竞争接入网络。然而, 由于灯端接收到的信号是这 3 个移动终端光信号的线性叠加, 导致灯端在解析数据时进行校验失败, 因此未能将时隙 03 分配给任何一个移动终端。此外, 若时隙 03、05、21 都出现多于 1 个移动终端同时竞争入网的情况, 则灯端因为解析数据失败, 并未做时隙分配的处理。最后, 在时隙 06、11、24、33、44 中, 由于仅有 1 个移动终端的伪随机序列被判定为需竞争入网, 灯端接收到的数据因此未受干扰, 能够正常解析。一旦数据校验通过, 系统即将网络状态节点表更新为该入网节点的 MAC 地址。此后, 这些时隙内将不再有其它节点进行入网竞争。

在第二次仿真实验中, 本文更改了移动终端伪随机码的多项式, 这导致了竞争入网的顺序发生变化; 然而, 这一变化并未对入网的最终结果产生实质性影响。从仿真结果可以观测到入网过程耗时约 1 ms, 鉴于一个时元周期为 25 ms, 且考虑到各移动终端开机时间的差异性, 因此每个移动终端的最长入网时间理论上可延长至一个完整的时元周期, 即 25 ms。

3 结束语

针对室内 VLC 系统, 本文设计了一种基于 TDMA 机制的 VLC 网络入网与网络维护方法。该方法详细阐述了竞争入网与网络维护的流程, 并深入分析了其入网概率。实验结果表明: 5 个终端全部接入所需的总时间为 25 ms。本文设计的入网与网络维护方法不仅能够有效支持多用户的灵活接入, 还实现了资源的动态分配, 且工程实现过程简便易行。

参考文献:

- [1] TANAKA Y, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links[C]//11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 18–21, 2000, London, UK. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000, 2: 1325–1329.
- [2] LANGER K D, VUCIC J, KOTTKE C, et al. Advances and prospects in high-speed information broadcast using phosphorescent white-light LEDs [C]//IEEE. Proceedings of 11th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Azores: IEEE, 2009: 1–6.
- [3] CUI K, CHEN G, XU Z, et al. Line-of-sight visible light communication system design and demonstration [C]//IEEE. Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2010. Newcastle: IEEE, 2010: 621–625.
- [4] MINH H L, BRIEN D O, FAULKNER G, et al. Faulkner et al. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization[J]. IEEE Photonics Technology Letters. 2008, 20(14): 1243–1245.
- [5] VUCIC J, KOTTKE C, NERRETER S, et al. 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(24): 3512–3518.
- [6] CHI N, WANG Y Q, WANG Y G, et al. Ultrahigh-speed single red-green-blue light-emitting diode-based visible light communication system utilizing advanced modulation formats[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(1): 22–25.
- [7] KHALID A M, COSSU G, CORSINI R, et al. 1 Gb/s transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete multitone modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5): 1465–1473.
- [8] COSSU G, KHALID A M, CHOUDHURY P, et al. 3.4 Gb/s visible optical wireless transmission based on RGB LED[J]. Optics Express, 2012, 20(26): B501–B506.
- [9] 王世举. 基于白光 LED 的室内可见光通信系统研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [10] 迟楠, 石蒙, 哈依那尔, 等. LiFi: 可见光通信技术发展现状与展望[J]. 照明工程学报, 2019, 30(1): 1–9, 14.
- [11] 史俊庭, 张卫东. 可见光通信速率提高至每秒 50G[N]. 中国科学报, 2015–11–15.
- [12] 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.