

基于自适应链路切换的双 LED 室内可见光通信系统

乔琪¹, 闻凯²

(1. 淮安信息职业技术学院 计算机与通信工程学院, 江苏 淮安, 223003

2. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘要: 为了提高室内可见光通信(VLC)系统的通信链路质量与全移动性, 设计了基于自适应链路切换的双 LED 室内可见光通信系统。提出一种用于高效室内 VLC 的综合光照布局方法, 在照明、接收功率和信噪比(SNR)的约束条件下实现对移动性和链路切换的支持。在移动场景中实现全连通性, 强调了视场角(FoV)的设置对连接性能的重要性, 使得系统更具实际意义。为了维持和提升移动性场景, 在接收功率超出了滞后余量时, 启动提出的自适应链路切换, 以降低链路切换量和往复率。采用两个 LED 进行了仿真实验, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 可见光通信; 链路切换; 双 LED; 滞后余量; 光照布局

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)02-0050-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.02.014

Two-LED indoor visible light communication system based on adaptive link switching

QIAO Qi¹, WEN Kai²

(1. School of Computer and Communication Engineering, Huaian College of Information Technology, Huaian Jiangsu 223003, China; 2. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To improve the communication link quality and mobility of indoor visible light communication system, a dual LED indoor visible light communication (VLC) system based on adaptive link switching is designed. Firstly, a comprehensive illumination layout method for efficient indoor VLC is proposed, which supports mobility and link handover under the constraints of illumination, receiving power and signal to noise ratio (SNR). The realization of full connectedness in a mobile scene emphasizes the importance of the setting of the field of view (FoV) to the performance of the connection, and this makes the system more practical. In order to maintain and enhance the mobility scenario, the proposed adaptive link handoff is initiated to reduce link handover and reciprocating rate when the power goes beyond the lag margin. The simulation experiment was carried out with 2 LEDs, the effectiveness of the proposed method is verified.

Key words: visible light communication; link switch; two-LED; hysteresis margin; light distribution

0 引言

由于带宽限制和电磁干扰, 现有无线电频率越来越难以满足室内无线传输的速率和网络连通性要

收稿日期: 2017-07-18。

基金项目: 江苏省科技支撑计划项目(BE20132190)资助; 江苏省科技厅应用基础研究基金(BJ98057)资助; 江苏高校品牌专业建设资助项目(201511)资助。

作者简介: 乔琪(1983-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为光通信系统、智能信号与图像处理。

求。得益于发光二极管(LED)的研究进展, 可见光通信(VLC)^[1]与无线电频率实现了技术上的互补^[2]。LED的优点有功耗低、使用寿命长、尺寸较小和工作温度较低等。然而, 由于 LED 照明标准、通信性能和移动性的严格要求, 如何对点对点通信系统进行配置, 使其适应真实场景(特别是室内场景), 依然是一个亟待解决的难题。对于移动场景来说, 连通性和链路切换在 VLC 中也是至关重要的, 文献[3~9]中已有详细描述或

论证,但这些方案中或多或少存在不足。本文提出一种双 LED 系统模型,研究 LED 布局与视场(FoV)角的设置对系统连接性、链路切换性能、照明和链路质量的影响。

1 双 LED 系统模型

在传统的室内 VLC 中,考虑到设计的简单性,为了得到均匀光照和重叠区域,一般采用规则且对齐的多个(>2)LED 分布^[10]。本文仅采用两个 LED,其室内 VLC 系统模型如图 1 所示。两个 LED 安装在大小为

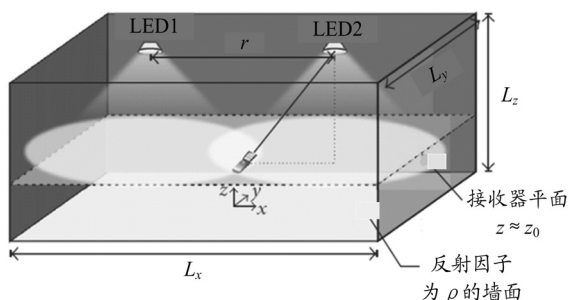


图 1 室内 VLC 系统模型

$L_x \times L_y \times L_z$ (长×宽×高)的房屋天花板上,其距离为 r ,每个 LED 的半功率角为 $\Phi_{1/2}$,传输功率为 P_t , I_0 为每个 LED 的中心光照强度,VLC 的接收器为一个移动终端(MT),接收器平面 $z=z_0$,墙面的

表 1 双 LED 系统参数设定

参数和符号	数字(单位)
房间大小 $L_x \times L_y \times L_z$	5(m)×2.5(m)×2.5(m)
LED 之间的距离 r	2.5(m)
接收器平面 z_0	0.85(m)
半功率角 $\Phi_{1/2}$	70(°)
传输光功率 P_t	72(W)
中心光照强度 I_0	2628(cd)
墙面反射因子 ρ	0.8
位元周期 T	10(ns)
光学滤波器增益 $T_s(\Psi)$	1.0

反射因数为 ρ 。参数说明及具体数值如表 1 所示。

1.1 带一次反射的光照分布

国际标准化组织(ISO)制定了普通室内环境的照明标准。按照这套标准,在设计一个集成 VLC 的室内工作环境时,房间内所有地方的照明强度需要达到 300~1500lx。本文提出的双 LED 系统模型中 LED1 和 LED2 位于 $(-1.25, 0, 2.5)$ 和 $(1.25, 0, 2.5)$,接收器平面位于 $z_0=0.85\text{m}$ 。两 LED 的照明情况如图 2 所示,照明分布是:每个 LED 下方区域的照明度最高,离角落越近,照明度越低。最弱照明强度为 300lx,满足最低通信要求,房间中大部分地方的接收功率为 $-1\sim 4\text{dBm}$ 。

为了简单起见,本文只考虑一次反射,图 3 为 VLC 系统带一次反射的链路传播示意图。图 3 中, α 为

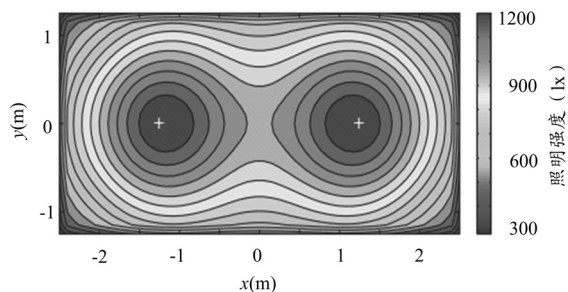


图 2 两个照明度情况

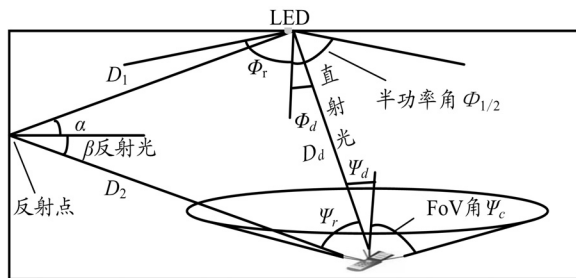


图 3 VLC 系统带一次反射的链路传播

该较小区域到一个反射点的光照角, β 为该区域到接收器的光照角, Ψ_r 为入射角, D_1 为 LED 与反射点之间的距离, D_2 为反射点与接收器之间的距离。

为了从理论上分析本文室内 VLC 系统的照明情况,假设每个 LED 遵循朗伯辐射,朗伯指数设为 m ,该指数取决于 LED 的半功率角 $\Phi_{1/2}$,即 $m=-1/\log_2(\cos\Phi_{1/2})$ 。某一点处的视线水平照明 E_{hor} 取决于朗伯指数 m 、入射角 Ψ_d 、光照角度 ϕ_d 、中心照明强度 I_0 以及 LED 与接收器表面之间的距离 D_d ,探测器的表面始终与天花板的平面保持垂直,即:对于视线链路,入射角 Ψ_d 始终与光照角 ϕ_d 保持垂直。因此,水平照明 E_{hor} 为:

$$E_{\text{hor}}=I_0 \frac{\cos^{m+1}(\Psi_d)}{D_d^2} \quad (1)$$

参数和图例说明如图 3 和表 1 所示,由于在 z_0 接收器平面的照明满足 ISO 的标准(图 2),因此满足该双 LED 系统模型通信要求。

1.2 接收功率与信噪比(SNR)

任何通信系统都希望达到适当的接收功率水平,但这经常会带来功耗上升或干扰问题。在 VLC 中,要计算接收功率,需要对信道进行研究。光链路中的信道直流增益计算如下:

$$H(0)=\begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^{m+1} \Psi_d T_s(\Psi_d) g(\Psi_d), & 0 \leq \Psi_d \leq \Psi_c \\ 0, & \Psi_d > \Psi_c \end{cases} \quad (2)$$

其中, A 为接收器中的探测器(通常为光电二极管)的

物理面积, $T_s(\Psi_d)$ 为光滤波器的增益。本文将该增益设为 1, $g(\Psi_d)$ 为光学集中器的增益, Ψ_c 表示移动终端的 FoV 角。

一般来说, 较高的 SNR 能够带来较低的误码率 (BER), 从这个意义上说, SNR 决定了通信链路的质量^[11]。在室内 VLC 中, 由光学通道差异所生成的码间干扰 (ISI) 对 SNR 有着重要影响。为了正确处理 ISI, 需要采用较为复杂的过程^[12]。出于简单考虑, 本文将 ISI 功率加入到噪声功率, 将 ISI 视为噪声, 并假定噪声模型为加性高斯白噪声。而在处理 ISI 的过程中需要明确墙面反射和遮挡物的数量。通常情况下, VLC 中的墙面反射和遮挡物越多, 则 ISI 的影响越大。至于 ISI, 如果接收器处的脉冲展宽越大, 则对传输符号进行正确解调的难度越大。因此, 当存在反射和 ISI 的情况下, BER 可能会迅速增加。

2 连接性和链路切换

2.1 连接性

在照明功能上, LED 的半功率角 $\phi_{1/2}$ 是确定光照覆盖区域和照明均匀性的重要参数。一般来说, 半功率角应该保持较大的角度以覆盖整个工作区域, 因此其通常为一个固定参数。尽管如此, 但依然可以通过接收器平面的变动来改变 LED 的覆盖区域。在通信功能方面, 必须对接收器的视场角 Ψ_c 进行考虑, 该角度是从 LED 到接收器可接收的光信号角度, 存在两种可能情况, 即 $\Psi_c \leq \phi_{1/2}$ 或 $\Psi_c > \phi_{1/2}$ 。本文仅考虑 $\Psi_c \leq \phi_{1/2}$ 的情况。在这种情况下, 与 LED 覆盖区域相比, 接收器能够接收到信号的区域较小。此外, 与 LED 所形成的重叠区域相比, 两个相邻接收器的可视区域形成的重叠区域同样较小。

2.2 链路切换算法

VLC 中的链路切换可以理解为无线电通信中的“切换过程”, 它是一个独立的过程。文献[13]研究了 LED 覆盖区域的优化, 并通过切换过程所耗费的时间, 实现较高的数据传输速率。一般情况下, VLC 系统需要快速且灵活的链路切换算法^[14]。较为合适的算法是带滞后的相对接收功率算法, 该算法能够降低链路切换量和往复率。根据该算法, 当 MT 从 LED1 的覆盖区域向 LED2 的覆盖区域移动时, 如果 LED2 的接收功率比 LED1 的接收功率超出了滞后余量 H (单位为 dB), 则在可视重叠区域中启动链路切换过程。 H 的数值是链路切换性能的关键参数, 该参数会影响到链路切换量以及可视重叠区域。通常, 较高的 H 值能够降

低不必要的链路切换量, 但要求较大的可视重叠区域。本文在不同 LED 间的距离下, 对滞后余量 H (dB) 和可视重叠区域 A_{vo} 之间的关系进行分析。

假设移动终端 (MT) 沿着由两个 LED 投影所连接的一条直线移动。在这种情况下, MT 在可视重叠区域中的移动距离最大, 该距离被称为可视重叠距离 d_{OA} , 具体如图 4 所示。假定 MT 能够识别和区分来自 LED1 和 LED2 的信号功率, 当 MT 移动到可视重叠区域中时, 会持续计算来自 2 个 LED 的信号强度。

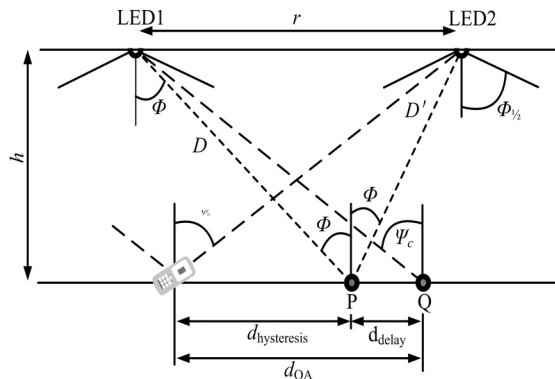


图 4 2 个 LED 的可视重叠区域

假设在点 P 处能够启动链路切换。MT 需要从该点移动一段额外的距离, 以成功完成链路切换。该距离取决于链路延迟时间 T_d 和 MT 的速度 v , 即

$$d_{\text{delay}} = T_d \times v \quad (3)$$

且图 4 中的链路性能关键参数满足:

$$\frac{D^2 \cos^{m+1}(\varphi)}{D'^2 \cos^{m+1}(\varphi)} \geq 10^{H/10} \quad (4)$$

基于式 (4), 可以得到可视重叠区域 d_{OA} 的条件:

$$d_{OA} \geq h \tan \Psi_c - \sqrt{\frac{h^2 + (h \tan(\Psi_c) - T_d \times v)^2}{\frac{(m+3)/2}{\sqrt{10^{H/10}}}} - h^2} + T_d \times v \quad (5)$$

上述条件当且仅当满足式 (6) 时成立:

$$\frac{h^2 + (h \tan(\Psi_c) - T_d \times v)^2}{\frac{(m+3)/2}{\sqrt{10^{H/10}}}} - h^2 \geq 0 \quad (6)$$

式 (5) 和式 (6) 给出了 3 个参数, 即滞后余量 H (dB)、可视重叠距离 d_{OA} 和 MT 的 FoV 之间的关系。

随后, 可以使用图 4 中的几何关系, 将式 (5) 中的可视重叠距离 d_{OA} 转换为 LED 之间的距离 r :

$$r \leq h \tan(\Psi_c) + \sqrt{\frac{h^2 + (h \tan(\Psi_c) - T_d \times v)^2}{\frac{(m+3)/2}{\sqrt{10^{H/10}}}} - h^2} - T_d \times v \quad (7)$$

这些参数之间的关系可用于确定链路切换过程

所需的最小可视重叠距离和 LED 之间的最小间隔距离。给定 LED 间距离的系统, 则可以使用式(5)确定合适的滞后余量。

3 数值仿真结果

本文在仿真实验中使用了不同的 LED 距离, 以研究不同的照明布局。最初, LED1 和 LED2 被放置于天花板中央, 随后以 0.2m 的步长向墙壁方向移动。首先检查每个照明布局的全连接要求; 然后计算所有满足连接性条件的照明布局的平均接收功率和接收 SNR 均值; 最后, 给出照明布局与滞后余量之间的关系为了体现所提系统的优越性, 将文献[6]和文献[13]提出的室内可见光通信系统作为对照组。所有实验均以不同的 FoV 角 Ψ_c ($\Psi_c \leq \Phi_{l2}$) 进行比对。仿真实验使用的所有参数如表 1、表 2 所示。

表 2 额外的系统参数

参数和符号	数值(单位)
链路切换延迟时间 T_d	0.15(s)
MT 的速度 v	1(m/s)
滞后余量 H	3~12(dB)
移动终端的视场角 Ψ_c	18~60°

3.1 链路质量和连接性

设计 VLC 系统时, 需要实现等级较高且波动较小的接收功率和 SNR。当设计包含两个 LED 的系统时, 本文仅考虑实现较高等级的接收功率和 SNR, 因此本文对平均接收功率和 SNR 进行了仿真实验。LED1 和 LED2 之间的距离将在 0.2~4.8m 之间变化 (步长为 0.2m)。以设定的 FoV 角计算每一步的连接性和链路质量。下面就一些实验结果进行分析和讨论。

当 FoV 角 Ψ_c 小于 48° 时, 不存在能够提供全连接性的照明布局; 换言之, 当 FoV 角小于 48° 时, 任何一个照明布局均存在盲点区域。当 $\Psi_c=48^\circ$ 时, 为实现全连接, LED 之间的距离在 2.4~2.6m 之间。随着 Ψ_c 的角度增大, 选择到能够满足全连接性的照明布局的概率也越高, 即 FoV 角为 55° 时, LED 之间的距离应该为 2~3m 之间; 当 FoV 角为 55° 时, LED 之间的距离在 1.5~4m 之间就可满足全连接要求。

全连接性的照明布局中 FoV 角度与平均 SNR 关系如图 5 所示。图中最上面的线为 48° 视场角, 最下面的线为 60°, 从上到下, 每个间隔为 1°。由图 5 可知, 在所有能够提供全连接性的照明布局中, 当 FoV 角为 48° 时, 平均接收功率和平均 SNR 达到最高值, 并随着 FoV 角的降低而下降。当 FoV 角为 48° 时, 平均接收功率约为 2.8dBm, 平均 SNR 约为 31dB。这是因为当 FoV 增大时, 探测器处的光学集中器的增益会下降, 从而造成接收功率的下降。接收功率的下降, 以及 ISI 的上

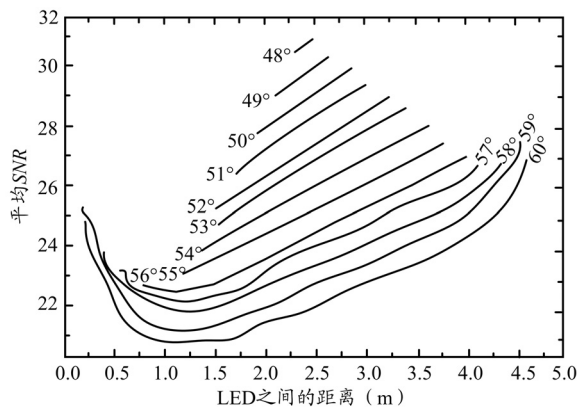


图 5 全连接性的照明布局中 FoV 角度与平均 SNR

升, 会造成 SNR 等级的下降。当两个 LED 被安装在距离彼此较远且靠近房间边缘的位置时, 则平均接收功率非常小, 约为 0.15dBm。此外, 当 SNR 增大时, 接收功率将被降低; 反之亦然。尤其是当 LED 之间的距离较大且 FoV 角较小时, 这种情况更加明显。当 FoV 较大时, 可以将两个 LED 安装在某些位置上, 来得到较高的平均接收功率与平均 SNR。

在本文的仿真实验中, 当 FoV 角超过 60° 时表现出了相同的趋势。任何一个通信系统都希望得到较高等级的接收功率和 SNR。因此, 在链路质量和连接性方面, 本文推荐的场景为 48° FoV 角、LED 之间的距离约为 2.5m, 此时的布局能够提供最大化的接收功率和 SNR。

3.2 带各种不同的滞后余量的链路切换

式(5)~式(7)给出了滞后余量、可视重叠距离、FoV 角和 LED 间距离之间的关系, 本文将对这些关系的对等性进行仿真。在支持链路切换的条件下, 两个 LED 之间的最小可视重叠距离、与不同滞后余量的 FoV 角度之间的关系如图 6 所示。

由图 6 可知, 当滞后余量 H 增加时, 所需的可视重叠距离也随之增大。此外, 当 H 增大时, 最小 FoV 角度也随之增大。当滞后余量 $H=3$ dB 时, FoV 角须大于 38°, 因为在更小的 FoV 角度下不存在能够满足链路切换条件的照明布局(见式(7))。与之类似, 当 H 为 6dB、9dB 和 12dB 时, 满足链路切换条件的最小 FoV 角分别为 50°、56° 和 63°。对任何数值的滞后余量, 即使 FoV 增大, 最小重叠距离始终变化不大。当 $H=3$ dB 时, 所有大于 38° 的 FoV 角其最小重叠距离大约为 1.2m; 当 H 分别为 6dB、9dB、12dB 时, 其最小重叠距离则分别为 1.6m、2.4m、3.1m。与文献[6]和文献[13]中的最小重叠距离 2.3m 和 1.5m 相比, 非常接近本文滞后余量 H 为 9dB 和 6dB 时的最小重叠距离, 明显大于

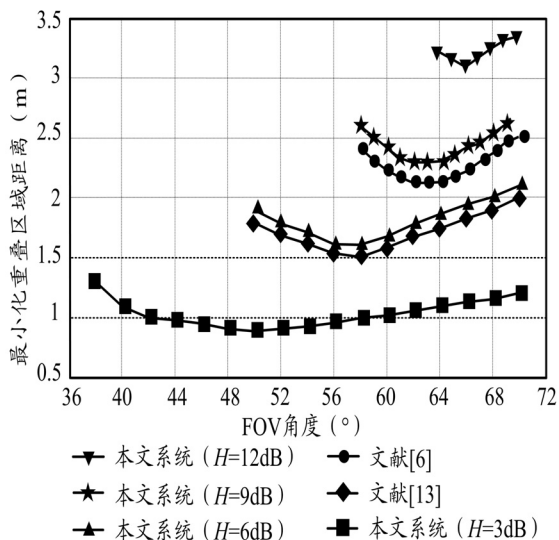


图6 不同的 FoV 角度下的最小重叠距离的测试结果

$H=3\text{dB}$ 时的最小重叠距离。因此, 本文系统在最小重叠距离上更具优势, 即能够更好地满足全连接性的照明布局。

图7给出了不同的滞后余量下, 不同 VLC 系统满足链路切换条件的两个 LED 之间的最大距离。由图7可知, 在所有数值的滞后余量下, FoV 角度的增加都会导致 LED 之间最大距离的增加。在相同的 FoV 下, 较高的滞后余量通常对两个 LED 之间的最大距离的要求较小。当 FoV 角为 48° , 两个 LED 之间的距离 $r=2.5\text{m}$ 时, 可以在滞后余量为 3dB 的情况下应用链路切换过程。而文献[6]和文献[13]中进行切换时, 需要更大的最大 LED 距离。

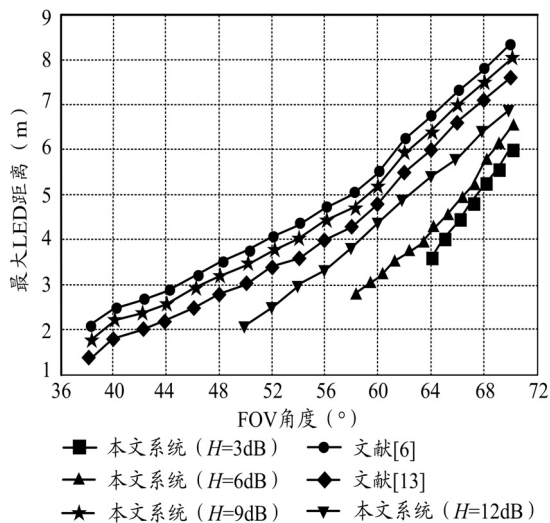


图7 不同的 FoV 角度下的最大 LED 距离测试结果

4 结束语

本文基于照明和通信两个方面, 将 VLC 系统整合

到室内环境中。本文的室内 VLC 系统采用了 2 个 LED, 其关键在于 FoV 对连接性的影响及链路切换算法。如果将其扩展到更大空间中, 则需要更多的 LED, 此时要求的半功率角更大, 以满足照明需求; 同时, FoV 角应该设置更小, 具体数值必须通过实验确定。另外, 由于不同的排列方式会造成不同的重叠区域, 因此 LED 的排列也是需要考虑的。相应的链路切换算法启动的时机也会变化。总之, 不同的场景模型会产生不同的结果, 后续将对此进行深入研究。

仿真实验结果验证了本文系统的有效性, 实现了较高的链路质量和连接性, 完全支持链路切换过程。

参考文献:

- [1] 王旭颖, 梁忠诚. 基于 MIMO 技术的可见光通信系统的研究[J]. 光通信技术, 2013, 37(1): 60-63.
- [2] KARUNATILAKA D, ZAFAR F, KALAVALLY V, et al. LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(3): 1649-1678.
- [3] 姬雨初. 协作通信系统中分布式空时编码及相关技术的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [4] 陈天华, 潘伟. 直调型正交频分复用多模光纤链路性能研究[J]. 光通信研究, 2010, 36(3): 20-22.
- [5] 栾新源. 基于 LED 可见光通信的室内定位关键技术研究 [D]. 上海: 上海大学, 2016.
- [6] BURTON A, GHASSEMLOOY Z, RAJBHANDARI S, et al. Design and analysis of an angular-segmented full-mobility visible light communications receiver [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2014, 25(6): 591-599.
- [7] 杨宇, 刘博, 张建昆, 等. 一种基于大功率 LED 照明灯的可见光通信系统[J]. 光电子·激光, 2011, 22(6): 803-807.
- [8] WU D, GHASSEMLOOY Z, ZHONG W D, et al. Cellular indoor OWC systems with an optimal lambertian order and a handover algorithm[C]// International Symposium on Telecommunications. IEEE, 2015: 777-782.
- [9] NGUYEN T, CHOWDHURY M Z, JANG Y M. A novel link switching scheme using pre-scanning and RSS prediction in visible light communication networks[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2013, 43(1): 1-17.
- [10] 王惠琴, 曹明华, 陈海燕, 等. 无背景噪声时光多输入多输出系统的信道容量[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 28-33.
- [11] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [12] 王辉宇, 张钦宇, 张乃通. I-UWB 码间干扰的抑制方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(1): 28-30.
- [13] PERGOLONI S, BIAGI M, COLONNESE S, et al. Optimized LEDs Footprinting for Indoor Visible Light Communication Networks [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(4): 532-535.
- [14] 沈振民, 蓝天, 王云, 等. 基于 LED 灯的室内可见光通信系统仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2496-2500.