

## 基于 LED 灯的室内可见光通信系统仿真分析

沈振民, 蓝天, 王云, 王龙辉, 倪国强

(北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 白光 LED 灯几 MHz 到几百 MHz 的调制带宽使其在照明的同时兼具通信功能。首先提出了照度均方差最小化准则来设计 LED 灯在室内的布局问题, 分别考虑了不包含墙壁反射和包含墙壁反射两种情况下对室内照度分布的影响, 分别给出了两种情况下白光 LED 灯的最优布局。然后分析了室内视距链路(不包含墙壁反射)和非视距链路(包含墙壁反射)下的室内照度分布、接收功率分布以及信噪比分布。非视距链路相对于视距链路来说, 室内照度分布和接收功率分布明显增加, 但是信噪比明显下降, 这主要是由于非视距链路下墙壁反射产生的码间干扰所致。

**关键词:** LED; 可见光通信; 信噪比

**中图分类号:** TN929.12    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2496-05

## Simulation and analysis for indoor visible-light communication based on LED

Shen Zhenmin, Lan Tian, Wang Yun, Wang Longhui, Ni Guoqiang

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** LED could be used for both the illumination and the wireless communication simultaneously that owns the modulation bandwidth from several MHz to several hundreds of MHz. The criterion of the minimum mean square deviation was used to design the layout of LED in the room. The indoor illumination distribution was analyzed in the two conditions which were respectively not included the wall reflection and included it. Then the illuminance, the received power for detector and the signal to noise ratio for the line of sight (not including the wall reflection) and the non line of sight (including the wall reflection) were analyzed, respectively. It is concluded that the illuminance and the received power are larger for the non line of sight than the line of sight, but the signal to noise ratio decreases. This is mainly caused by the inter symbol interference from the reflection of the wall of the non line of sight.

**Key words:** LED; visible-light communication; signal to noise ratio

收稿日期: 2014-12-15; 修订日期: 2015-01-13

基金项目: 国家 973 项目(2013CB329200)

作者简介: 沈振民(1983-), 男, 博士生, 主要从事可见光通信及激光测距方面的研究。Email: szm@bit.edu.cn

导师简介: 倪国强(1946-), 男, 教授, 主要从事光电成像技术、光通信等方面的研究。Email: nigq01@sina.com

## 0 引言

近些年来,随着 LED 光源技术的发展和进步,具有高亮度、低功耗、长寿命等优点的白光 LED 已有逐渐取代日光灯和白炽灯的趋势<sup>[1-3]</sup>。白光 LED 除照明优点外,高达几 MHz 到几百 MHz 的调制带宽使其用于通信成为可能,且不需频谱许可<sup>[2,4]</sup>。

目前基于 LED 的可见光通信吸引了国内外研究机构的广泛关注,其聚焦点主要在于如何通过调制方式和均衡等技术来提高通信速率<sup>[5-6]</sup>。参考文献[7]中使用 DMT 调制方式在 30 cm 范围内传输速率可高达 3.4 Gbit/s,但是这只是在较短的距离和单 LED 灯上实现吉比特速率,而与室内照明的实际情况差之甚远。在典型的 5 m×5 m×3 m 的房间内要达到 300~1500 lx 的国际照明标准照度及室内光照度分布的均匀性,仅用一个 LED 灯是不易实现的,一般采用 4 个 LED 灯对称分布在室内。多个 LED 灯会影响信号到达接收器的时间产生时延,从而产生码间干扰。

通过建立典型室内模型,提出了照度均方差最小化的室内光源布局设计,定量分析了室内墙壁反射对照度分布、接收器接收功率和系统信噪比的影响。

## 1 LED 光源布局设计

LED 光源有两个基本特性:发射光功率和光强。在辐射度学中,辐射强度为:

$$R(\phi) = dP_n / d\Omega \quad (1)$$

式中:  $dP_n$  为单位立体角  $d\Omega$  内的辐射功率,对于单面发光的 LED 来说,  $d\Omega = -2\pi \cos\phi$ ,  $\phi$  为 LED 的辐射角。

则 LED 的总辐射功率为:

$$P_s = \int_{SP} dP_n = \int_{SP} R(\phi) d\Omega = \int_0^{\pi/2} [-2\pi R(\phi)] d\cos\phi \quad (2)$$

式中:  $\int_{SP}$  表示对半球的积分。

假设 LED 光源辐射是朗伯模式,由公式(2)可推导出辐射强度为:

$$R(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} P_s \cos^m \phi \quad \phi \in [-\pi/2, \pi/2] \quad (3)$$

式中:  $m$  为辐射模式数,有  $m = \ln(1/2) / \ln(\cos(\phi_{1/2}))$ ,  $\phi_{1/2}$  为 LED 半功率角。根据  $R(\phi) = I(\phi) / K$ ,  $P_s = \phi_s / K$  ( $K$  是光视效能,  $I(\phi)$  是发光强度,  $\phi_s$  是光通量),则从公

式(3)可推导出 LED 发光强度为:

$$I(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} P_s \cos^m \phi = I(0) \cos^m \phi \quad (4)$$

式中:  $I(0) = \frac{m+1}{2\pi} \phi_s$ 。

图 1 表示了辐射功率是 1 W 时,在不同辐射模式数  $m$  下辐射角和辐射强度的关系。可以看出辐射模式数  $m$  越大,辐射的方向性越强,中心辐射强度也越大。

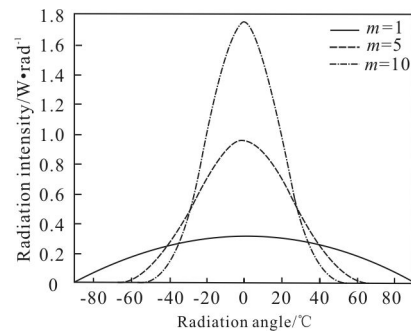


图 1 辐射角和辐射强度的关系

Fig.1 Relation between radiation angle and radiation intensity

如图 2 所示,室内 LED 灯对桌面的光照度分两部分:视距链路(LED 灯直射);非视距链路(墙壁一次反射)。

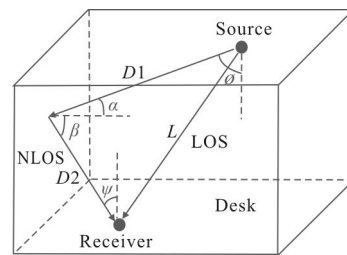


图 2 视距链路和非视距链路示意图

Fig.2 Diagrammatic sketch for line of sight and non line of sight

视距链路下室内桌面水平光照度为:

$$E_{hor(NLOS)} = \rho I(0) \cos^m(\phi) \cos\alpha \cos\beta \cos\psi dA_{wall} / (\pi D_1^2 D_2^2) \quad (6)$$

室内 LED 灯布局如图 3 所示,房间大小 5 m×5 m×3 m,桌面高度 0.85 m,LEDs 灯与地面垂直距离 2.5 m。4 个 LEDs 灯对称分布在房间内,每个 LEDs 灯有 60×60 个 LED 芯片组成。单个 LED 芯片参数:发射光功率 20 mW;半功率角 70°;中心光强 0.73 cd;LED 芯片间隔为 0.01 m。因为 4 个 LEDs 灯对称分布在房

间

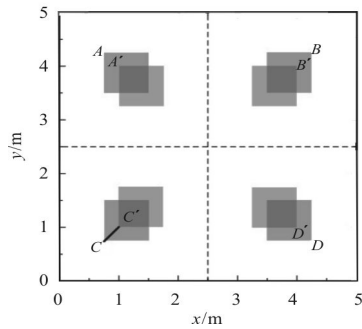


图 3 室内 LED 灯布局

Fig.3 Layout of LED light in room

内,只要确定 C 点位置,A、B、D 的位置即可确定,即 4 个 LED 灯的位置即可确定。A'B'C'D' 为 LEDs 灯在另一对称布局情况下的顶点位置。在这里使用室内照度均方差最小化原则来确定 C 点位置。光照度均方差为:

$$D_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n}} \quad (7)$$

式中: $E_i$  为每个 LED 的照度; $\bar{E}$  为所有 LED 的平均照度; $n$  为 LED 芯片的个数。

图 4(a)显示了视距链路下(只考虑直射而不考虑墙壁反射)C 点在不同位置时的均方差照度。当 C 点坐标是(0.639 m,0.639 m)时,均方差照度最小,为 138.2 lx。室内水平桌面均方差照度最小时的室内光照度分布如图 4(b)所示。

设墙壁反射系数是 0.7,墙壁微小反射面源为  $1 \text{ cm}^2$ ,

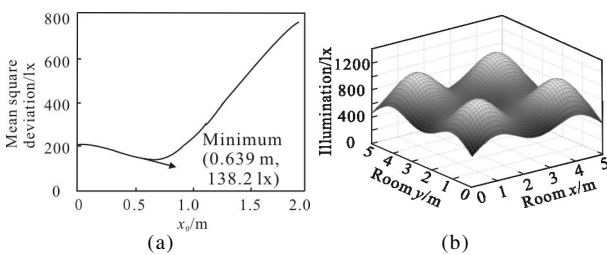


图 4 (a)不考虑墙壁反射时LEDs 灯不同位置时的室内水平桌面均方差照度;(b)均方差照度最小时室内水平桌面光照度分布(最大 1073.7 lx,最小 451.8 lx,均值 758.9 lx,均方差 138.2 lx)

Fig.4 (a) Mean square deviation illuminance for different LED layout without reflection;(b) illuminance distribution when the mean square deviation illuminance is mimum in room(Max.1073.7 lx, Min.451.8 lx, Ave. 758.9 lx, Msd. 138.2 lx)

仅考虑墙壁一次反射。图 5(a)表明了在不考虑直射而且考虑墙壁一次反射时 C 点不同位置的均方差照度。当 C 点坐标是(0.733 m,0.733 m)时,均方差照度最小,为 168.6 lx。此时的室内光照度分布如图 5(b)所示。其中墙壁四侧对室内桌面水平光照度贡献量如图 6 所示。

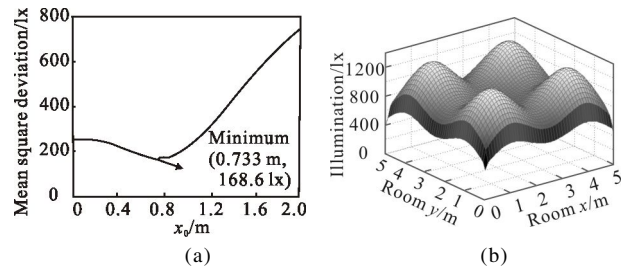


图 5 (a) 考虑墙壁反射时 LEDs 灯不同位置时的均方差照度;(b) 均方差照度最小时室内水平桌面光照度分布(最大 1304.7lx,最小 412.4lx,均值 971.6lx,均方差 168.6lx)

Fig.5 (a) Mean square deviation illuminance for different LED layout with reflection;(b) Distribution of illuminance when mean square deviation illuminance is mimum in room (Max. 1304.7 lx, Min. 412.4 lx, Ave. 971.6 lx, Msd. 168.6 lx)

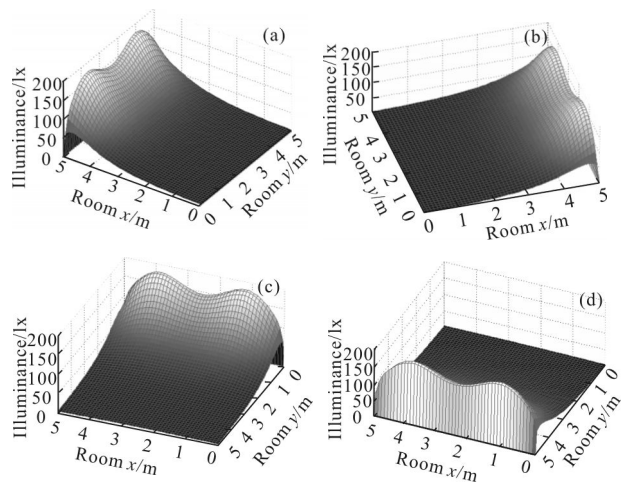


图 6 墙壁四周对桌面水平光照度贡献量(最大 183.7 lx,最小 0 lx,均值 44.6 lx,均方差 47.3 lx)

Fig.6 Distribution of illuminance only for each wall reflection (Max. 183.7 lx, Min. 0 lx, Ave. 44.6 lx, Msd. 47.3 lx)

比较图 4(b)、图 5(b)可以得出,墙壁反射对室内水平桌面光照度有一定的贡献量,因此非视距链路下墙壁反射的光照度不可忽视,LEDs 灯布局应采用该链路时计算得到的 C 点位置,即 C:(0.733 m, 0.733 m)。

## 2 视距链路和非视距链路接收的光功率

视距链路下接收光功率为:

$$P_{NLOS} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{(m+1)A_R}{2\pi L_i^2} \cos^m \phi_i T_s(\psi_i) g(\psi_i) \cos(\psi_i) & 0 \leq \psi_i \leq \Psi_c \\ 0 & \psi_i > \Psi_c \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $g(\psi) = \begin{cases} n^2/\sin(\Psi_c) & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0 & \psi > \Psi_c \end{cases}$ ;  $T_s(\psi)$  为光学滤波增益;  $\Psi_c$  为接收器半视场角;  $n$  为光学接收天线折射率。

非视距链路下接收光功率为:

$$P_{NLOS} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \left[ \int_{\text{walls}} \frac{(m+1)A_R}{2\pi^2 D_1 D_2} P_s \rho \cos^m \phi_i \cos(\alpha) \times \right. \\ \left. \cos(\beta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) dA_{\text{wall}} \right] & 0 \leq \psi_i \leq \Psi_c \\ 0 & \psi_i > \Psi_c \end{cases} \quad (9)$$

在确定了 LEDs 灯的布局后,接收端探测器接收直射时的功率见图 7(最大 3.38dBm,最小-1.35dBm,均值 1.81 dBm)。室内水平桌面上探测器接收墙壁反射的功率如图 8 所示,总的接收功率如图 9 所示。

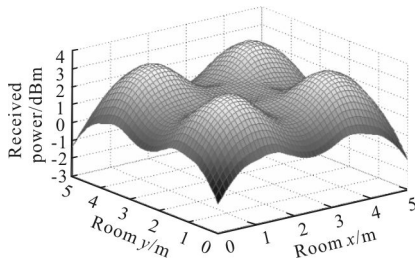


图 7 视距链路室内水平桌面上探测器接收的功率  
Fig. 7 Received power of detector for line of sight

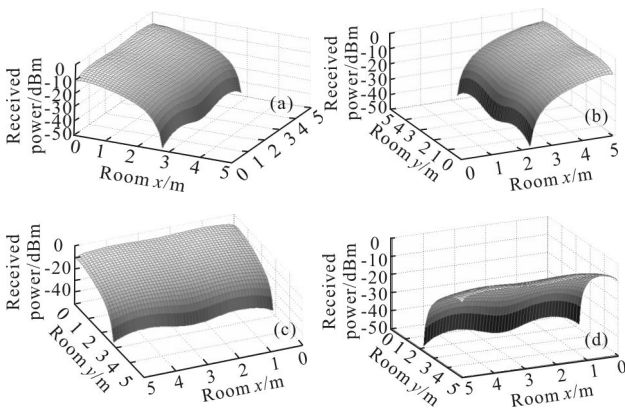


图 8 室内水平桌面上探测器接收墙壁反射的功率  
(最大-5.13 dBm,最小-47.8 dBm,均值-15.1 dBm)

Fig.8 Received power of detector only for reflection(Max. -5.13 dBm, Min. -47.8 dBm, Ave. -15.1dBm)

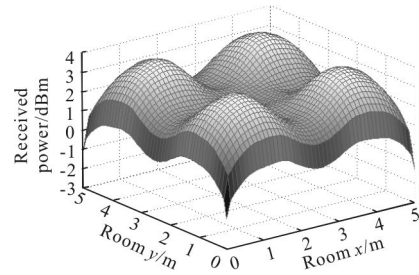


图 9 室内水平桌面上探测器接收的总功率(最大 3.81 dBm,最小-1.35 dBm,均值 2.35 dBm)

Fig.9 Total received power of detector (Max. 3.81 dBm, Min. -1.35 dBm, Ave. 2.35 dBm)

从图 7 和图 9 比较可以看出,墙壁反射对探测器接收功率有一定的贡献量,因此非视距链路下墙壁反射的功率不可忽视。

## 3 视距链路和非视距链路信噪比

信噪比能反映通信系统的通信质量。可见光通信系统的信号可表示为:

$$S = \gamma^2 P_{rsignal}^2 \quad (10)$$

式中:  $\gamma$  为探测器响应;  $P_{rsignal}$  为信号功率。

可见光通信系统的噪声有散粒噪声、热噪声、码间干扰噪声三部分组成,可表示为:

$$N = \delta_{shot}^2 + \delta_{thermal}^2 + \gamma^2 P_{rISI}^2 \quad (11)$$

式中:  $\delta_{shot}^2$  为散粒噪声;  $\delta_{thermal}^2$  为热噪声;  $P_{rISI}$  为码间干扰功率。

接收功率中的信号功率和码间干扰功率的区分是:在接收器接收的所有路径的光能量中,当某一路径光能量到达探测器的时间与第一个到达探测器的光能量的时间差小于等于码元周期的一半时,即认为该路径的光能量为信号功率;如果这个时间差大于符号周期的一半,即认为该路径的光能量是码间干扰功率。即:

$$P_{rsignal} = \sum_j P_r \quad t_j \leq T$$

$$P_{rISI} = \sum_j P_r \quad t_j > T \quad (12)$$

式中:  $j$  表示到达探测器的路径的数目;  $T$  为码元周期。

$$\delta_{shot}^2 = 2q\gamma(P_{rsignal} + P_{rISI})B + 2qI_{bg}I_2B \quad (13)$$

式中:  $q$  为电荷电量;  $B$  为等效噪声带宽;  $I_{bg}$  为暗电流;

$I_2$  为噪声带宽因子。

热噪声具体公式如下：

$$\delta_{thermal}^2 = 8\pi k T_k \eta A_R I_2 B^2 / G + 16\pi^2 k T_k \Gamma \eta^2 A_R^2 I_3 B^3 / g_m \quad (14)$$

式中： $k$  为玻耳兹曼常量； $T_k$  为绝对温度； $\eta$  为光电探测器单位面积的固定电容； $G$  为开环电压增益； $\Gamma$  为沟道噪声因子； $g_m$  为 FET 跨导。

探测器参数： $\gamma=0.53$  A/W,  $I_{bg}=5.1$  mA,  $I_2=0.562$ ,  $T_k=298$  K,  $\eta=112$  pF/cm<sup>2</sup>,  $G=10$ ,  $\Gamma=1.5$ ,  $\Gamma=30$  Ma,  $B=100$  Mbit/s。

图 10 描述了视距链路下系统信噪比在室内水平桌面上的分布图,而图 11 描述了包含墙壁反射在内的系统信噪比的室内水平桌面上的分布图。可以看出:考虑墙壁反射时的信噪比均值比视距链路下的信噪比均值降低了大约一半,说明墙壁反射产生的码间干扰很严重。从图 9 可以看出,在 4 个 LED 灯垂直下方的桌面接收的功率高,但是在图 10 即图 11 中此位置处的信噪比却低于其他桌面位置处的信噪比。这是因为 4 个 LED 灯对应的垂直桌面位置

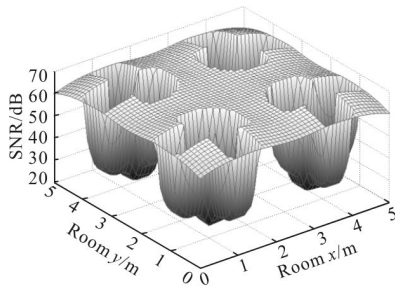


图 10 视距链路室内水平桌面信噪比(最大 67.75 dBm, 最小 25.59 dBm, 均值 54.34 dBm)

Fig.10 Distribution of SNR for line of sight (Max. 67.75 dBm, Min. 25.59 dBm, Ave. 54.34 dBm)

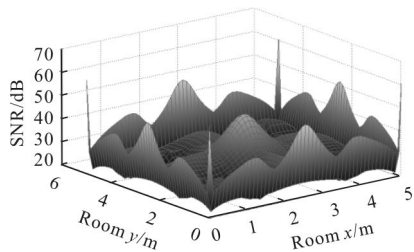


图 11 包含墙壁反射在内的室内水平桌面信噪比(最大 60.14 dBm, 最小 21.53 dBm, 均值 28.64 dBm)

Fig.11 Distribution of SNR for non line of sight (Max. 60.14 dBm, Min. 21.53 dBm, Ave. 28.64 dBm)

处码间干扰引起的噪声相当大的缘故。此仿真分析笔者采用普遍的 OOK 调制方式,而对于 OFDM 调制方式来说能有效地抑制码间干扰。

## 4 结论

通过对室内可见光通信系统的建模和仿真,分析与比较了室内水平桌面均方差照度最小时的直射和考虑墙壁反射两种情况下的室内水平桌面光照度分布、接收器接收功率分布以及信噪比分布。从仿真结果可以看出,墙壁反射对可见光通信的影响不可忽视,尤其是信噪比均值的下降最为明显,说明墙壁反射因路径延迟产生的码间干扰尤为严重。

## 参考文献:

- [1] Kumar N, Lourenco N R. Led-based visible light communication system: a brief survey and investigation [J]. *Eng Appl Sci*, 2010, 5: 297-307.
- [2] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Trans on Consumer Electronics*, 2003, 50(1): 100-107.
- [3] Zhao Taifei, Wang Xiaorui, Ke Xizheng. Design and performance analysis of multi-LEDs UV communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1544-1549. (in Chinese) 赵太飞,王小瑞,柯熙政.多 LED 紫外光通信系统设计与性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1544-1549.
- [4] Wang Y Q, Wang Y G, Chi N, et al. Demonstration of 575-Mb/suplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB led and phosphor-based LED [J]. *Opt Express*, 2013, 21(1): 1203-1208.
- [5] Langer K, Vucic J, Kottke C, et al. Exploring the potentials of optical-wireless communication using white LEDs [C]//13th Annual Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2011: 1-5.
- [6] Wang Hong, Zhang Xiaofan, Wang Haihong, et al. Design for optical freeform reflector of LED streetlight [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 727-731. (in Chinese) 王洪,张小凡,王海宏,等.自由曲面 LED 路灯反射器设计[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 727-731.
- [7] Cossu G, Khalid A M, Choudhury P, et al. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED [J]. *Opt Express*, 2012, 20(26): B501-B506.