

室内 VLC 系统光源布局设计

赵黎, 彭恺, 焦晓露

(西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 在可见光通信系统中,光源具有照明和通信的双重作用,由于房间的大小以及室内环境各不相同,难免会存在光照射不到或者光线比较微弱的地方,这些地方很有可能成为通信的盲区,这将会大大影响通信的质量,为了解决阴影效应,需合理对光源进行布局设计,以 $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}$ 房间为模型,采用四个 LED 列阵作为室内光源,将单个的 LED 光源看做朗伯光源,服从朗伯辐射模型,通过公式计算结合软件仿真分析对比得出了采用 9×9 大小的 LED 列阵,列阵距离屋顶边缘 0.4 m ,LED 光源间的间距为 0.03 m 时,在满足国际室内照明标准的前提下,在距离屋顶 2.25 m 的 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ 接收平面上光照度分布最均匀,其均匀度达到 90.4% 。该光源列阵布局模型可推广到任意尺寸房间,为室内办公照明中光源的布局提供了一种可行的方案。

关键词: 可见光通信; 光源布局; LED; 阴影效应; 光照度

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1122001

Design of the layout of lighting for indoor VLC system

Zhao Li, Peng Kai, Jiao Xiaolu

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In the visible light communication system, the light source has a double function of illumination and communication. As the size of the room and the indoor environment is different, it is inevitable that there will be somewhere with less light irradiation or the light is weak. These places are likely to become a communication blindzone, which will greatly affect the quality of the communication. In order to solve the shadow effect, a rational layout of the light source is needed. Based on $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}$ room model, four LED array was adopted as indoor lighting. A single LED light source was considered as a lambert illuminant, which obeyed the Lamber tradiation model. Through formula and software simulation analysis, it was known that when the size of LED array was 9×9 and the distance from LED array to the edge of roof was 0.4 m and the spacing between the LED light source was 0.03 m , the illumination distribution was most uniform in the horizontal plane of 2.25 m from the roof on the premise of meeting the international standard of indoor lighting. And the uniformity of illumination is 90.4% in the $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ receiving plane. The model of layout of light source array can be extended to any size of the room in this paper, which provides a feasible solution for the layout of the indoor office lighting source.

Key words: visible light communication; layout of lighting; LED; shadow effect; illumination

收稿日期:2017-03-11; 修订日期:2017-04-13

基金项目:国家自然科学基金(61271362);陕西省科技厅一般项目-工业领域(2017GY-081);

陕西省自然科学基金(2017JM6041);西安市科技计划项目(2017075CG/RC038(XAGY0012));陕西省教育厅科技专项(2017JK0373)

作者简介:赵黎(1981-),女,副教授,博士,主要从事无线光通信关键技术方面的研究。Email:pilly_lily@126.com

0 引言

可见光通信技术作为 21 世纪一种新兴的无线光通信技术,采用白光 LED 作为光源,具有效率高、寿命长、价格低等优点^[1-2]。与射频通信和激光通信相比,室内 VLC 具有保密性好、无电磁干扰、功耗低、能同时实现照明和通信等优点^[3-4]。在室内可见光通信中,光源虽然既能照明又能进行通信,但是照明是前提,在没有满足照明的情况下进行通信是不合理的,这会对人的眼睛造成一定程度的伤害,所以在室内 VLC 系统中,对光源进行布局设计显得尤为重要。对光源布局最重要的是解决一些室内光线照射不到或者光线较暗的地方,如果一味的增加 LED 的数量,使得室内的光照度变高,系统接收到的光信号的功率增大,这虽然能够解决阴影效应的问题,但并不能解决室内光照度分布不均匀的问题,而且随着 LED 数量的增加,系统功耗也随着增加,在通信时不同光路径造成的符号间干扰也越严重,所以在满足通信和照明的前提下,需要使用的 LED 个数应该越少越好。通过对 LED 阵列进行布局优化,一方面要使得室内光照度分布比较均匀,避免通信盲区的出现,另一方面在满足照明和通信的前提下,使用的 LED 数量达到最少。

目前国内外对室内照明光源布局的研究较多^[5-9],但很多都仅在短距离、小范围内实现光照度的均匀分布,文中在已有的光源布局模型下^[10],采用四个 LED 阵列为布局方案,首先根据室内光照度国际标准确定了 LED 阵列大小,在保证国际照度条件下,使得 LED 灯珠的个数达到最小;其次根据接收平面光照度标准差模型函数,找出最优点 (L, i) ,使得接收平面光照度分布最均匀,从而得出最佳的布局方式。实现了距离屋顶 2.25 m 的 4 m×4 m 正方形接收范围内的均匀照明。

1 室内光源布局模型

图 1 为建立一个 4 m×4 m×3 m 的室内空间模型,接收机放在距离地面 $h=0.75$ m 的办公桌上,光源由四个 LED 阵列组成,光源的型号是草帽 8 mm 白光 LED 灯珠,功率 P_0 为 0.5 W,发射功率半角 $\phi_{1/2}$ 为 60° ,每颗 LED 的中心发光强度 I_0 为 21.5 cd,LED

阵列的大小设为 N ,阵列距离房顶边缘的距离设为 L ,阵列中各 LED 灯珠之间的距离设为 i 。

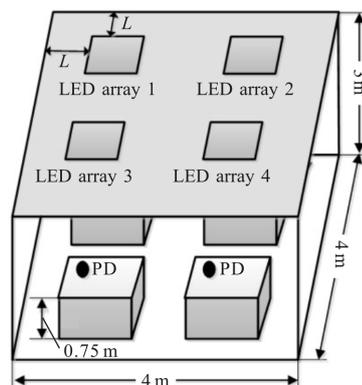


图 1 室内 VLC 空间模型

Fig.1 VLC indoor space model

仿真具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

Name	Parameters
Size/m ³	4×4×3
h/m	0.75
I_0/cd	21.5
P_0/W	0.5
$\phi_{1/2}/(^\circ)$	60
L/m	0.1:0.05:1
i/m	0.01:0.005:0.03
N	8, 9

2 点光源光照度辐射模型

图 2 所示为室内某点的接收功率示意图,该点的接收功率可表示为^[11]:

$$P_r = H(0) \cdot P_t \quad (1)$$

式中: P_t 为光源功率; $H(0)$ 为信道的直流增益,假设 LED 为朗伯源^[12],服从朗伯辐射模型。

则 $H(0)$ 为:

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

式中: m 为光源的辐射模式; A 为 PD 探测区域的物理面积; d 为发送端到接收端的距离; ψ 为 LED 的入

射角; ϕ 为发射角; ψ_c 为接收端光电探测器的 FOV; $T_s(\psi)$ 表示光滤波器的增益; $g(\psi)$ 代表聚光器的增益, 由图 3 所示, $\phi=\psi$, $g(\psi)$ 公式表示如下^[13]:

$$g(\psi)=\begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2\psi_c}, & 0\leq\psi\leq\psi_c \\ 0, & \psi>\psi_c \end{cases} \quad (3)$$

式中: n 表示反射系数。光源的辐射模式 m 可以表示为:

$$m=\frac{-\ln 2}{\ln(\cos\phi_{1/2})} \quad (4)$$

式中: $\phi_{1/2}$ 为发射功率半角; m 值的大小决定光束方向性的好坏, m 越大, 光束方向性越好, 通常应用于直射式链路中。

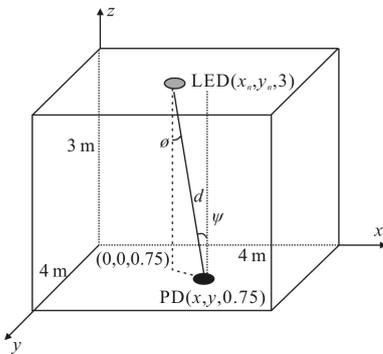


图 2 单个 LED 照射时某点接收示意图

Fig.2 Schematic of a node when single LED illuminated

根据国际照明标准规定^[14], 办公室内的光照度必须保持在 300~1 500 lx 之间, 这种情况下光线对人眼的影响不大, 即不会太刺眼也不会太暗。为了能更直观地与室内国际照明标准相比较, 这里采用光照度的计算公式, 在光源发射角为 ϕ 的情况下, 得到的光强可表示为^[15]:

$$I(\phi)=I(0)\cos(\phi) \quad (5)$$

式中: $I(0)$ 表示 LED 的中心发光强度, 则某一点的水平照度可表示为:

$$E_n=I(0)\cos^m(\phi)/d_n^2 \cdot \cos(\psi) \quad (6)$$

假设点光源的坐标为 $(x_n, y_n, 3)$, 在距离地面 0.75 m 的接收面上某一点坐标为 $(x, y, 0.75)$, 则 d_n 可以表示为:

$$d_n=\sqrt{(x_n-x)^2+(y_n-y)^2+2.25^2} \quad (7)$$

由于 $\cos(\phi)=\cos(\psi)=\frac{3-0.75}{d_n}$, 所以 E_n 可表示为:

$$E_n=\frac{I(0)\times 2.25^{m+1}}{d_n^{m+3}} \quad (8)$$

图 3 为点光源坐标为 $(2, 2, 3)$ 时, 接收机在 $Z=0.75$ 平面上接收到的光照度分布图, 从图中可以看出, 当接收机位于光源正下方时, 此时接收端与光源的距离最短, 接收到的光照度达到最大, 而房间的四个角落离光源的距离最远, 所以接收到的光照度也最小, 在这些位置通常达不到室内照明的标准, 所以在接收平面接收端的 SNR 较低, 最终影响通信的质量。

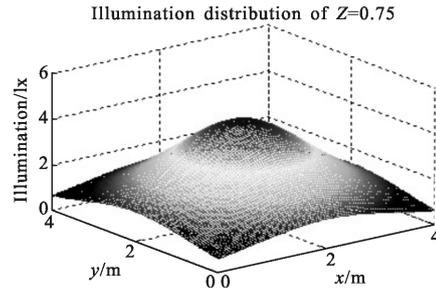


图 3 点光源产生的光照度分布图

Fig.3 Illumination distribution of point light source

3 阵列光源光照度辐射模型

随着 LED 技术的发展, 单个 LED 灯珠的发光效率越来越高, 但还是很难满足室内照明的要求, 在实际应用中, 光源往往是由多个 LED 灯珠组成的阵列。图 4 为四个 LED 阵列在天花板上的分布示意图, 从示意图中可以看出, 影响室内照明的主要因素除了 LED 阵列的大小 N 外, 还与阵列距离房顶边缘的距离 L 和阵列中各 LED 灯珠之间的距离 i 有关。

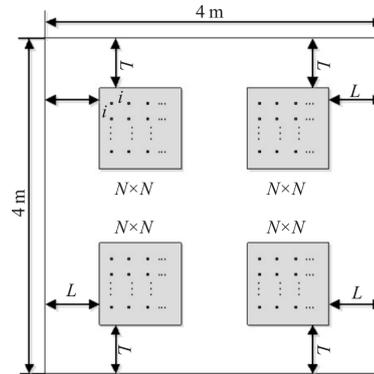


图 4 LED 阵列在天花板上的分布图

Fig.4 Layout of the LED array on the ceiling

随着每个 LED 灯珠的位置不同, 到达接收面上同一点所接收到的光照度也会有所不同, 由于 LED

光源为非相干光源，所以在接收平面上某一点接收到的光照度为各点光源到该点的光照度的叠加。接收平面上某点接收到的光照度为：

$$E(x, y) = \sum_{n=1}^M E_n = I(0) \times 2.25^{m+1} \sum_{n=1}^M \frac{1}{d_n^{m+3}} \quad (9)$$

式中： E_n 为各个点光源在到达接收面某点 $(x, y, 0.75)$ 接收到的光照度； M 为总的光源个数，取 $4 \times N^2$ 颗 LED 作为文中的总光源个数。

接收平面光照度分布的均值 $\overline{E(L, i)}$ 可表示为：

$$\overline{E(L, i)} = \frac{1}{S} \iint_{(x,y)} E(x, y) dx dy \quad (10)$$

接收平面光照度标准差 $\sigma(L, i)$ 可表示为：

$$\sigma(L, i) = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_{(x,y)} [E(x, y) - \overline{E(L, i)}]^2 dx dy} \quad (11)$$

4 光源布局仿真

为了更好地兼顾照明与通信双重功能，文中通过调整 N, L, i 三个参数，对室内光源进行了多种布局设计，布局参数设定为：LED 阵列到房顶边缘的距离 L 的取值范围为 $[0.1, 1]$ ，阵列中各个 LED 灯珠之间的距离 i 取值范围为 $[0.01, 0.03]$ ，取值的间隔分别为 0.05 和 0.005。

图 5(a) 和 (b) 分别为列阵大小 N 取 8 和 9 时，不

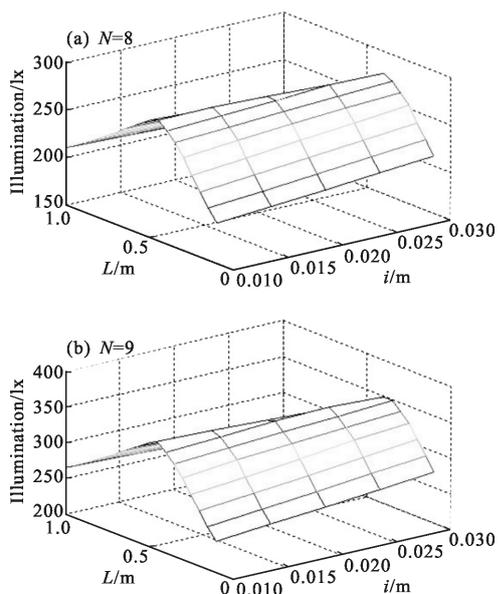


图 5 不同 LED 阵列大小时接收平面光照度最小值分布图
Fig.5 Minimum illumination profile of receiving plane with different LED array size

同的 L, i 取值时接收平面最小值分布图，从图 5(a) 中可以看出取不同 (L, i) 值时接收平面光照度的最小值都没能达到国际照度标准要求的 300 lx，但是已经很接近了，所以当 N 取 9 时，从图 5(b) 中能看出有一些布局方式已经能满足国际照度标准的要求。

虽然当 N 取 9 时已经能够满足光照度的要求，但是满足的 L, i 取值情况有很多种，存在多种布局方式，为了在满足室内照明照度要求的前提下，使得室内光照度分布最均匀，需要接收面接收到的光照度的标准差达到最小，通过数值分析对比，表 2 为当 L, i 取不同值时接收面接收到的最小光照度值，其行表示 L ，列表示 i 。表 3 为当 L, i 取不同值时接收面接收到的光照度的标准差，通过表 2 与表 3 对比分析可知，当 $L=0.40$ m, $i=0.03$ m 时，其接收到的光照度

表 2 不同 L, i 值时接收平面的光照度最小值 (单位: lx)

Tab.2 Minimum illumination of receiving plane with different L, i (Unit: lx)

i/m	L/m				
	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030
0.10	245.7	251.9	258.3	265.0	271.8
0.15	261.5	268.1	275.0	282.0	289.3
0.20	278.3	285.4	292.7	300.3	308.0
0.25	296.3	303.9	311.7	319.7	326.2
0.30	315.5	323.6	328.3	332.8	337.3
0.35	330.5	335.0	339.4	343.8	348.1
0.40	341.5	345.9	350.2	351.6	348.3
0.45	352.3	350.4	347.1	343.7	340.3
0.50	345.7	342.4	339.0	335.5	332.0
0.55	337.5	334.1	330.6	327.1	323.6
0.60	329.1	325.6	322.2	318.7	315.2
0.65	320.6	317.1	313.7	310.2	306.8
0.70	312.1	308.7	305.3	301.9	298.6
0.75	303.7	300.4	297.1	293.8	290.6
0.80	295.5	292.2	289.0	285.9	282.8
0.85	287.5	284.4	281.3	278.3	275.4
0.9	279.8	276.8	273.9	271.1	268.3
0.95	272.5	269.7	266.9	264.2	261.6
1.00	265.5	262.9	260.3	257.8	255.3

既能满足国际标准,其标准差也最小,为 22.10。图 6 为当 $L=0.40\text{ m}$, $i=0.03\text{ m}$ 时,在接收面接收到的光照度的分布。其接收到光照度的最小值为 348.28 lx , 最大值为 462.58 lx 。在垂直距离为 2.25 m ,接收端为 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ 平面上光照度分布的均匀度(照度均值/照度最大值)可达到 90.4%。

表 3 不同 L, i 值时接收平面的光照度标准差

Tab.3 Illumination standard deviation with different L, i in the receiving plane

i/m	L/m				
	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030
0.10	43.6	42.7	41.6	40.4	39.1
0.15	41.2	40.1	38.8	37.5	36.0
0.20	38.4	37.1	35.7	34.2	32.6
0.25	35.2	33.7	32.2	30.6	29.0
0.30	31.6	30.0	28.5	27.0	25.5
0.35	28.0	26.6	25.2	24.0	22.9
0.40	24.8	23.7	22.8	22.3	22.1
0.45	22.7	22.3	22.4	22.9	23.9
0.50	22.7	23.5	24.7	26.3	28.4
0.55	25.5	27.4	29.6	32.2	35.1
0.60	30.9	33.6	36.6	39.9	43.3
0.65	38.2	41.6	45.1	48.9	52.8
0.70	46.9	50.8	54.7	58.8	63.1
0.75	56.7	60.9	65.2	69.6	74.1
0.80	67.4	71.8	76.4	81.0	85.7
0.85	78.7	83.4	88.1	92.9	97.8
0.9	90.6	95.4	100.3	105.3	110.3
0.95	102.9	107.9	112.9	118.0	123.0
1.00	115.6	120.7	125.8	130.9	135.9

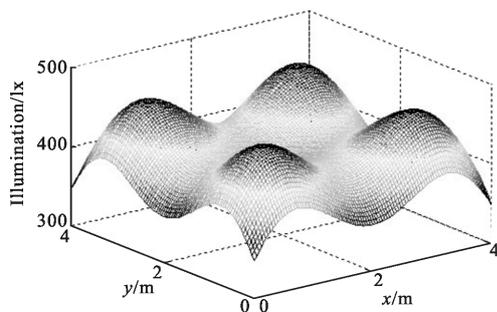


图 6 $L=0.4\text{ m}$, $i=0.03\text{ m}$ 时接收面光照度分布

Fig.6 Illumination distribution of receiving plane when L is 0.4 m and i is 0.03 m

5 结论

文中通过仿真分析比较得出了在 $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}$ 房间模型系统中,当 $N=9, L=0.4\text{ m}, i=0.03\text{ m}$ 时,在这种布局方式下,既能满足室内照明的标准,也实现了在 0.75 m 高的接收平面上光照度的最均匀分布。在距离为 2.25 m 时, $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ 的接收平面上光照度分布的均匀度达到 90.4%。文中光源列阵布局模型通过合理配置参数,可推广到任意尺寸房间,通过这种方法,当房间为任意地 $M\times M\times h$ 模型时,也能得出一组 L, N, i 值,使得此房间在满足照度要求和通信的同时,使得到达接受面的光照度分布最均匀,使用的 LED 数量最少,这为室内办公照明中光源的布局提供了一种可行的方案,具有一定的实际应用场景区及意义。然而,文中光源阵列具有对称分布特性,仅适用于常见的办公照明环境,在后续的工作中,可以结合不同的应用场景、不同光源布局分布结构特性、不同房间模型做出一种自适应的光源布局模型,使其具有更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Guo Qian, Lan Tian, Zhu Qi, et al. Design and implementation of indoor light communication avalanche photodiode detecting circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 731-735. (in Chinese)
郭倩, 蓝天, 朱祺, 等. 室内可见光通信 APD 探测电路的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 731-735.
- [2] Ding Deqiang, Ke Xizheng. Visible light communication and research on its key techniques [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, 27(2): 114-117. (in Chinese)
丁德强, 柯熙政. 可见光通信及其关键技术研究 [J]. 半导体光电, 2006, 27(2): 114-117.
- [3] Shen Zhenmin, Lan Tian, Wang Yun, et al. Simulation and analysis for indoor visible-light communication based on LED [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (8): 2496-2500. (in Chinese)
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.
- [4] Ding Jupeng, Huang Zhitong, Ji Yuefeng. Evolutionary algorithm based uniform received power & illumination rendering for indoor visible light communication [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(6): 971-979.

- [5] Li Yuanxing, Long Yongbing, Liang Wenyue, et al. Optically designing COB LED based transmitter with uniform luminous intensity distribution for visible light communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1022002. (in Chinese)
李远兴, 龙拥兵, 梁文跃, 等. 基于 COB LED 的均匀光强分布可见光通信发射端光学设计 [J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1022002.
- [6] Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, et al. Lens design for uniform illumination with LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222002. (in Chinese)
李林, 王光珍, 王丽莉, 等. 实现均匀照明的 LED 系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222002.
- [7] Fu Yuqing. Optimization of LED array distribution in visible light communication based on genetic [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2015, 36(6): 632–635. (in Chinese)
傅玉青. 采用遗传算法的可见光通信 LED 阵列分布优化 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 632–635.
- [8] Ding J P, Huang Z, Ji Y. Evolutionary algorithm based power coverage optimization for visible light communications [J]. *Communications Letters, IEEE*, 2012, 16(4): 493–441.
- [9] Zixiong W, Yu Changyuan. Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication system[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4564–4573.
- [10] Ding Deqiang, Ke Xizheng, Li Jianxun. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(1): 131–134. (in Chinese)
丁德强, 柯熙政, 李建勋. VLC 系统的光源布局设计与仿真研究[J]. 光电工程, 2007, 34(1): 131–134.
- [11] Barry J R. *Wireless Infrared Communications* [M]. Berlin: Springer, 1994.
- [12] Weast R C. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* [M]. Boca Raton: CRC Press, 1983.
- [13] Kahn J M, Barry J R. *Wireless infrared communications* [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(2): 265–298.
- [14] Yuan Qiao. CIE standard lighting-lighting indoor workplaces [J]. *China Illuminating Engineering*, 2002, 4: 55–60. (in Chinese)
袁樵. 国际照明委员会照明标准--室内工作场所照明[J]. 照明工程学报, 2002, 4: 55–60.
- [15] Wang Jiayuan. Research on the key technologies of transmitter and receiver for LED lighting communication system [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2013. (in Chinese)
王佳媛. LED 照明通信系统发射与接收关键技术研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2013.