

基于白光发光二极管的室内可见光 通信光源布局优化

赵 黎, 彭 恺*

西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710032

摘要 传统基于照明的光源布局方式在室内难免会存在光照度不均匀现象,造成通信盲区效应,从而影响通信系统的可靠性。为了解决此问题,以 $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}$ 房间为模型,在常用的室内光源布局模式下,采用光照度补偿技术,对其进行合理的布局优化,得出了一种由 5 个发光二极管阵列组成的光源布局方式,这种布局方式可同时降低系统功耗并提高光照度均匀性。为了兼顾可见光通信(VLC)系统的可靠性,采用室内接收平面的光照度标准差与通信中接收平面的平均误码率(BER)构建系统优化模型函数 $f(L, i)$,当 $f(L, i)$ 达到最小值时可同时满足接收平面的照度要求和通信 BER 要求。仿真结果表明,当 $L=0.35\text{ m}$ 、 $i=0.025\text{ m}$ 时, $f(L, i)$ 取最小值,此时接收平面光照度的最小值为 301.26 lx ,最大值为 389.90 lx ,均匀度为 93.24% ,系统照度标准差为 20.1 ,功耗为 140.5 W ,BER 为 6.39×10^{-7} 。所提系统可同时兼顾室内接收平面光照度分布的均匀性和通信的可靠性,为室内 VLC 光源布局提供了一种优化方法。

关键词 光通信; 可见光通信; 光源布局; 照度补偿; 发光二极管阵列; 误码率

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0706001

Optimization of Light Source Layout in Indoor Visible Light Communication Based on White Light-Emitting Diode

Zhao Li, Peng Kai

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

Abstract The illumination based traditional source layout has the problem of uneven illumination, which results in blind effect of communication and greatly affects the reliability of communication system. In order to solve these problems, a $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}$ room is taken as the model, and the illumination compensation technology is used in the common indoor light source layout to optimize the layout. A kind of light source layout which is composed of five light-emitting diode arrays is obtained. With this kind of layout, the power consumption of the system can be reduced, and at the same time the uniformity of illumination can be improved. In order to balance the reliability of visible light communication (VLC) system, the indoor illumination standard deviation and the average bit error rate (BER) on receiving plane in communication system are used to build a system optimization model function $f(L, i)$. When $f(L, i)$ reaches the minimum value, it can meet the requirements of the receiving plane illumination and the BER. The simulation results show that the $f(L, i)$ can reach the minimum value when $L=0.35\text{ m}$ and $i=0.025\text{ m}$. For the receiving plane, the minimum illumination value is 301.26 lx , the maximum illumination value is 389.90 lx , and the illumination uniformity is 93.24% . At the same time, the illumination standard deviation is 20.1 , the power consumption is 140.5 W , and the BER is 6.39×10^{-7} . The proposed system takes the uniformity of indoor illumination distribution on receiving plane and the communication reliability into account, which provides an optimization method for the light source layout of indoor VLC.

Key words optical communications; visible light communication; light source layout; illumination compensation;

收稿日期: 2016-11-30; **收到修改稿日期:** 2017-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(61671362, 61271362)、陕西省科技厅自然科学基金(2012JK8008)、陕西省教育厅科技专项(2012JK0545)、西安市科技计划[CXY1341(3)]

作者简介: 赵 黎(1981—),女,博士,副教授,主要从事无线光通信关键技术方面的研究。E-mail: pily_lily@126.com

* **通信联系人.** E-mail: 591567812@qq.com

light-emitting diode array; bit error rate

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 220.4830

1 引 言

可见光通信(VLC)技术是一种将信息加载到白光发光二极管(LED)光源上的新型的无线数据传输方式^[1-3],与传统的照明设备相比,白光LED在室内VLC中要同时兼顾照明和通信的任务^[4-5],因此在光源布局时需要同时考虑光照度分布均匀性、通信可靠性及系统功耗等问题。

从室内照明的角度出发,人们通常希望室内各个地方都能获得较好的照度,不存在阴影效应,并且室内各个位置的光照度变化不大;从室内光通信的角度出发,人们通常希望室内没有通信盲区,即在室内接收平面上各个位置通信的稳定性和可靠性要有保障,要求接收平面上误码率(BER)均值越小越好。近年来,已有越来越多的学者展开了室内光源布局方面的研究工作,并取得了一些研究成果^[6-10],但这些研究大多只考虑照明中光照度分布的均匀性问题,很少兼顾VLC中系统的功耗及可靠性。

本文兼顾室内照明和通信,综合考虑系统光照度均匀性、通信可靠性及功耗,通过国际照度标准合理选择LED阵列大小,以降低系统的功耗;根据光照度均匀性确定LED阵列布局方案,将光照度均匀性与系统BER两者线性组合,构造一个新的函数 $f(L, i)$,在满足室内光照度要求的前提下,找到 $f(L, i)$ 的最小值,得出一组最优的 (L, i) 值,从而得出一种同时满足照明及通信的最优光源布局方式,为室内VLC提供了一种可行的光源布局模式。

2 传统室内光源布局模型的光照度分析

2.1 布局方案

图1为传统室内办公房间光源布局模型^[11],房间大小为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$,采用4个LED阵列作为光源,接收机放在距离地面 0.75 m 的办公桌上,以房间一角为坐标原点建立三维坐标系,具体仿真参数为:单个LED的功率为 0.5 W ,发射功率的半角为 60° ,LED的中心发光强度 $I_0 = 21.5\text{ cd}$,光电二极管的探测物理面积为 0.1 cm^2 ,噪声带宽因子 $I_1 = 0.562$,数据速率为 10 Mbit/s ,放大器噪声密度 $I_a = 5\text{ pA/Hz}^{1/2}$,放大器带宽 $B_a = 50\text{ MHz}$,背景光噪声功率 $P_n = 0.2\text{ mW}$,光电二极管响应率 $R = 0.4$ 。

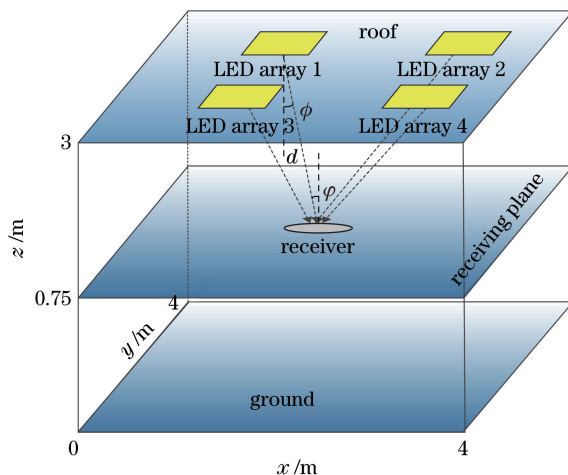


图1 室内光源布局模型

Fig. 1 Layout model of indoor light source

由于技术工艺的限制,单个LED很难满足室内照明的要求,在实际工程应用中,往往将由多个LED灯珠组成的阵列作为室内光源。图2为LED阵列在天花板上的分布示意图,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 (L 的取值范围为 $0.10 \sim 1.00\text{ m}$,取值间隔为 0.05 m ;)和LED阵列中各LED灯珠之间的距离 i (i 的取值范围为 $0.005 \sim 0.030\text{ m}$,取值间隔为 0.005 m)有关。

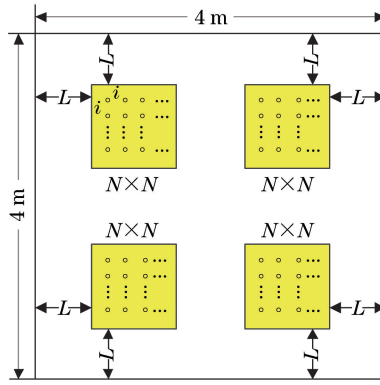


图 2 LED 阵列在天花板上的分布示意图

Fig. 2 Distribution diagram of LED array on ceiling

2.2 光照度建模

根据国际照明标准规定^[12], 办公室内的光照度必须保持在 300~1500 lx 之间, 这种情况下光线对人眼的影响不大, 即不会太暗也不会太刺眼。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, 光源发射角为 φ 时得到的光强可表示为^[13]

$$I(\varphi) = I_0 \cos \varphi. \quad (1)$$

某一点的水平照度可表示为

$$E_n = I_0 \cos^m \varphi \cos \psi / d_n^2, \quad (2)$$

式中 ψ 为接收端光线的入射角; d_n 为点光源到接收端之间的距离 (n 为光源个数); m 为光源的辐射模式, 这里 $m=1$ 。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

$$d_n = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + 2.25^2}. \quad (3)$$

由于 $\cos \varphi = \cos \psi = 2.25/d_n$, 因此 E_n 可简化为

$$E_n = \frac{2.25^{m+1} I_0}{d_n^{m+3}}. \quad (4)$$

由于每个 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, 且 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 $(x, y, 0.75)$ 接收到的光照度为

$$E(x, y) = \sum_{n=1}^M E_n, \quad (5)$$

式中 E_n 为各个点光源在到达接收面后接收到的光照度; M 为总的光源个数, $M=4N^2$ 。图 3 为当 $N=9$ 时, 取不同 (L, i) 值时接收平面光照度最小值的分布, 可以看出当阵列大小为 9×9 时, 能够找出一部分 (L, i) 的取值, 使其满足室内照明的要求。

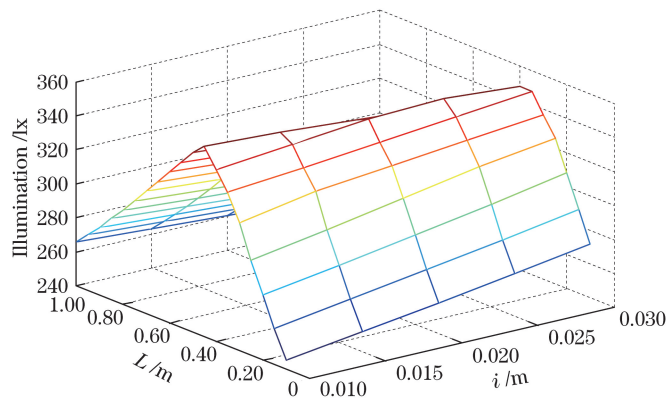


图 3 $N=9$ 时接收平面光照度最小值分布图

Fig. 3 Minimum illumination distribution on receiving plane when $N=9$

2.3 光照度均匀性分析

在满足室内照度要求的前提下,需要考虑照度分布的均匀性问题,因此建立一个新的函数 $f_1(L, i)$ 来表示接收平面光照度的标准差, $f_1(L, i)$ 可表示为

$$f_1(L, i) = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_{(x,y)} [E(x, y) - \overline{E(L, i)}]^2 dx dy}, \quad (6)$$

式中 S 为接受平面的面积, $\overline{E(L, i)}$ 为接收平面的光照度均值。 $\overline{E(L, i)}$ 可表示为

$$\overline{E(L, i)} = \frac{1}{S} \iint_{(x,y)} E(x, y) dx dy. \quad (7)$$

图 4 为不同 L, i 取值时接收平面光照度标准差的分布。

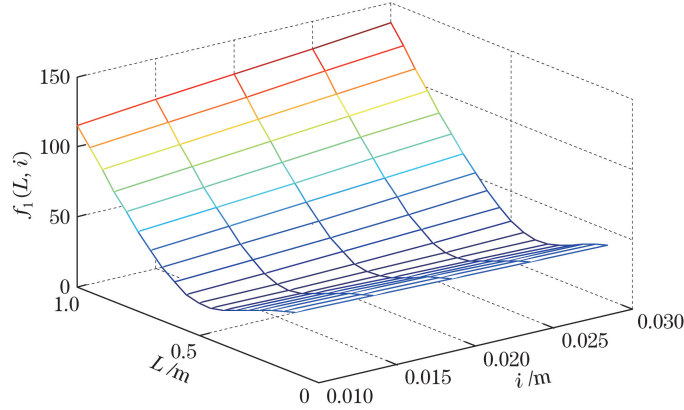


图 4 $N=9$ 时接收平面光照度标准差分布

Fig. 4 Illumination standard deviation distribution on receiving plane when $N=9$

由图 3、4 可以得到,当 $(L, i) = (0.4, 0.03)$ 时,此种布局模式在满足光照度要求前提下,光照度分布最均匀。图 5 所示为此时光照度分布,其中光照度最小值为 348.28 lx,最大值为 462.52 lx,接收平面照度分布的均匀度(照度均值/最大值)为 90.4%。

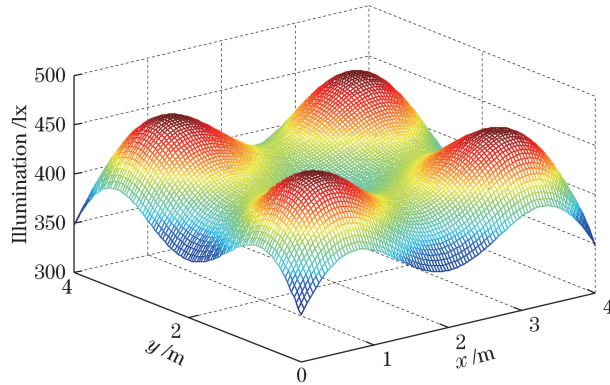


图 5 当 $L=0.40$ m, $i=0.030$ m 时接收平面光照度分布

Fig. 5 Illumination distribution on receiving plane when $L=0.40$ m and $i=0.030$ m

3 光源布局模型优化

3.1 布局方案优化

图 3 所示的布局模式虽然在满足室内照明要求的前提下,能找出使接收平面光照度分布最均匀的布局方式。但是这种方式使用的总光源个数比较多($M=324$),光源数量的增加一方面使系统功耗和成本相应地增加,另一方面增加了系统通信时的码间干扰(ISI),降低了系统通信的可靠性。

由图 5 可以得出,在 LED 阵列下方接收平面接收到的光照度值较大,接收平面中心及 4 个角落接收到的光照度较小,因此这里采用光照度补偿技术设计出一种 4 个 $N_1 \times N_1$ 的 LED 大阵列和 1 个 $m_1 \times m_1$ 的 LED 小阵列相结合的 4+1 光源布局模式,如图 6 所示。

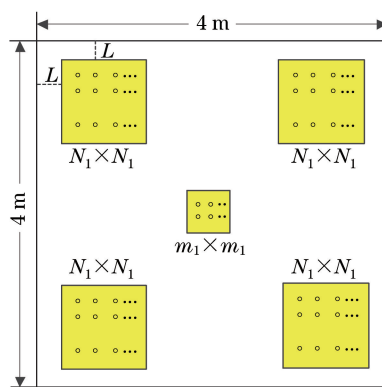


图 6 4+1 光源布局模式

Fig. 6 4+1 layout model of light source

图 7 为在 $N_1=8, m_1=5$ 条件下,不同 (L, i) 时接收平面光照度最小值的分布,可以看出在 4+1 的光源模式下,已经有布局方式能够满足室内照度要求,这种布局模式下使用的 LED 个数为 281,相比较之前传统的 4 个 LED 阵列布局模式,LED 个数减少了 43,降低系统功耗的同时也减小了通信时的 ISI。

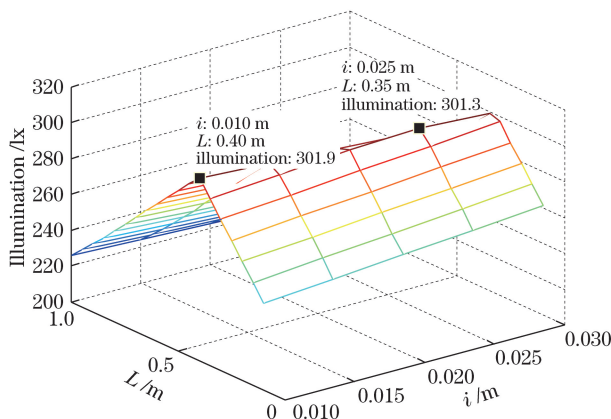


图 7 当 $N_1=8, m_1=5$ 时接收平面光照度最小值分布

Fig. 7 Minimum illumination distribution on receiving plane when $N_1=8$ and $m_1=5$

3.2 模型光照度均匀性分析及优化

图 8 为在 $N_1=8, m_1=5$ 条件下,不同 (L, i) 时接收平面光照度标准差分布,通过对比图 7、8 可得出最优优点为 $(L, i)=(0.4, 0.01)$,图 9 为 $N_1=8, m_1=5, L=0.40 \text{ m}, i=0.010 \text{ m}$ 时接收平面光照度分布,其中光照度最小值为 301.87 lx,最大值为 389.68 lx,均匀度达到 93.19%。与传统布局模式相比较,其均匀度得到明显提高。

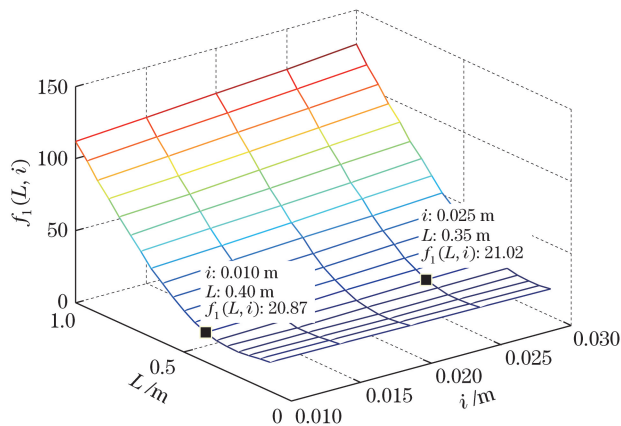


图 8 当 $N_1=8, m_1=5$ 时接收平面光照度标准差分布

Fig. 8 Illumination standard deviation distribution on receiving plane when $N_1=8$ and $m_1=5$

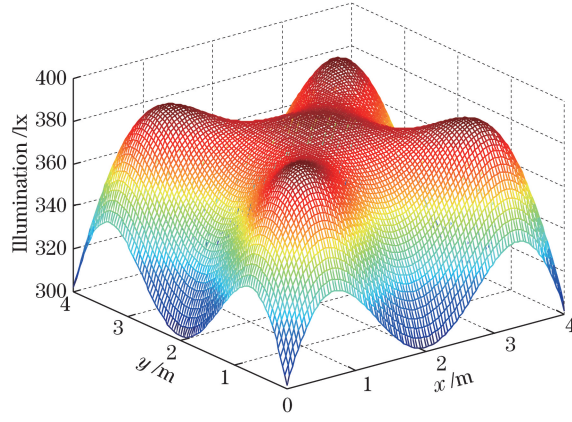


图 9 当 $L=0.40$ m、 $i=0.010$ m 时接收平面光照度分布

Fig. 9 Illumination distribution on receiving plane when $L=0.40$ m and $i=0.010$ m

4 系统可靠性优化

4.1 系统 BER 优化

室内 VLC 中的光源具有照明和通信双重作用,在满足室内照明的同时,还需要考虑通信可靠性问题。一般采用系统的 BER 作为衡量通信可靠性的标准,BER 越小,通信系统可靠性越高。第 3 节只考虑了室内照明中照度分布的均匀性问题,还需考虑通信可靠性问题。点光源作用时接收平面上的接收功率可表示为^[14]

$$P_n = H_n(0)P_t, \quad (8)$$

式中 P_t 为光源功率, $H_n(0)$ 为信道的直流增益。单个 LED 光源可看作朗伯源,服从朗伯辐射模型^[15],则 $H_n(0)$ 可表示为^[16]

$$H_n(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d_n^2} \cos^m \varphi T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c, \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (9)$$

式中 A 为光电探测器(PD)探测区域的物理面积, ψ_c 为接收端 PD 的视场角, $T_s(\psi)$ 为光滤波器的增益, $g(\psi)$ 为聚光器的增益。 $g(\psi)$ 可表示为

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c, \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (10)$$

式中 n 为反射系数。 m 可表示为

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \varphi_{1/2})}, \quad (11)$$

式中 $\varphi_{1/2}$ 为发射功率的半角。由(1)式可以得出接收端探测器接收到 LED 阵列传输的总光源功率 P_{rx} 可表示为

$$P_{rx} = \sum_{n=1}^M P_t H_n(0). \quad (12)$$

系统信噪比(SNR)可表示为^[17-18]

$$R_{SN} = \frac{(RP_{rx})^2}{\sigma^2}, \quad (13)$$

式中 R 为 PD 转换效率, σ^2 为接收端接收到的总系统噪声。 σ^2 可表示为

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2, \quad (14)$$

式中 σ_1^2 为系统散粒噪声,可表示为

$$\sigma_1^2 = 2qR(P_{rx} + P_b)B_b, \quad (15)$$

式中 q 为电子电量, P_b 为周围环境背景光产生的噪声功率, B_b 为噪声带宽。 B_b 可以表示为

$$B_b = I_1 R_b, \quad (16)$$

式中 R_b 为系统数据传输速率^[14]。 σ_2^2 为放大器噪声, 其表达式为

$$\sigma_2^2 = I_a^2 B_a. \quad (17)$$

由(13)式得出系统 SNR 之后, 系统 BER 可表示为

$$R_{BE} = Q(x)(\sqrt{R_{SN}}), \quad (18)$$

式中 $Q(x)$ 可表示为

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{\exp(-y^2/2)}{\sqrt{2\pi}} dy. \quad (19)$$

接收平面的 BER 均值 $\overline{R_{BE}}(L, i)$ 为

$$\overline{R_{BE}}(L, i) = \frac{1}{S} \iint_{(x,y)} R_{BE}(x, y) dx dy. \quad (20)$$

图 10 为不同 (L, i) 取值时接收平面 BER 均值的分布情况, 对比图 7、10 可知, 在满足室内照度的前提下, 当 $(L, i) = (0.35, 0.025)$ 时接收平面的 BER 均值最低, 系统最可靠。

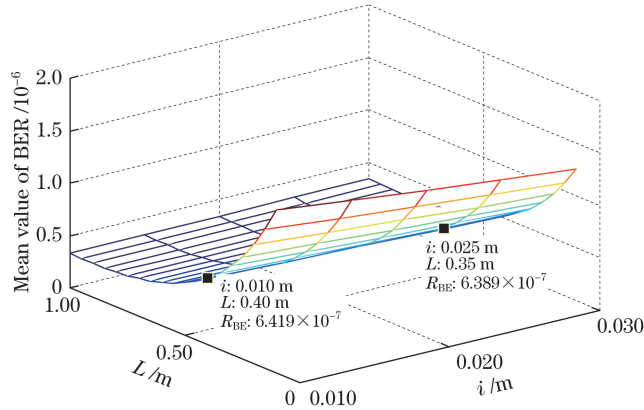


图 10 当 $N_1=8, m_1=5$ 时接收平面 BER 均值分布

Fig. 10 Mean value of BER distribution on receiving plane when $N_1=8$ and $m_1=5$

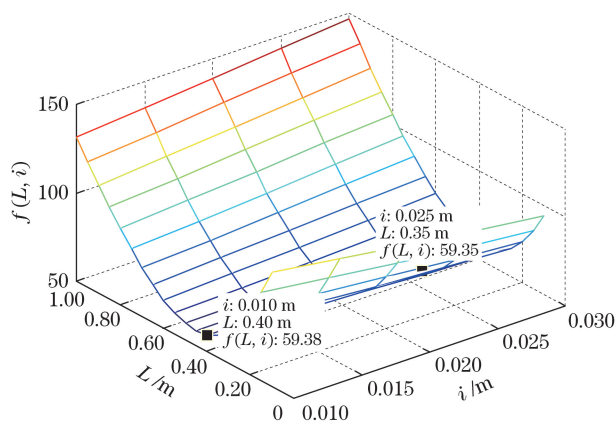
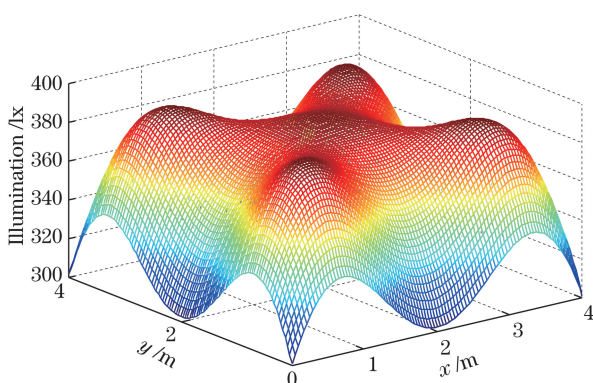
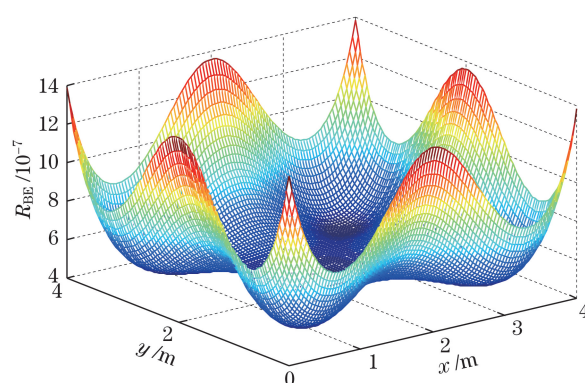
4.2 系统优化兼顾照度均匀性与通信可靠性建模

为了同时考虑室内照度分布的均匀性与通信可靠性, 建立了一个将照度分布均匀性与通信可靠性线性结合起来的优化函数 $f(L, i)$, 此时只需要找出一组 (L, i) 值, 在满足室内照明光照度要求的前提下使 $f(L, i)$ 取值最小, 即可得到最优的布局。 $f(L, i)$ 可表示为

$$f(L, i) = f_1(L, i) + af_2(L, i), \quad (21)$$

式中 $f_2(L, i) = \overline{R_{BE}}(L, i)$, a 为系数。 a 的作用是使 $f_1(L, i)$ 与 $af_2(L, i)$ 的值处于同一数量级, 即 $0.1 \leq f_1(L, i)/[af_2(L, i)] \leq 10$, 使 $f_1(L, i)$ 与 $f_2(L, i)$ 值的变化对 $f(L, i)$ 值的变化带来的影响相同, 这里取 $a = 6 \times 10^7$ 。 图 11 为在 5 个 LED 阵列布局模式下取不同 (L, i) 值时 $f(L, i)$ 取值的变化。

对比图 7、11 可以看出, 当 $(L, i) = (0.35, 0.025)$ 时, 既能满足室内照明照度的要求, 也使得 $f(L, i)$ 的取值最小, 从而在兼顾室内照明与通信的情况下实现最优布局。 图 12、13 分别为当 $L = 0.35$ m, $i = 0.025$ m 时接收平面光照度值分布和接收平面 BER 分布, 其中光照度最小值为 301.26 lx, 最大值为 389.90 lx, 均匀度可达到 93.24%。 BER 最小值为 4.53×10^{-7} 、最大值为 1.39×10^{-6} , BER 均值为 6.45×10^{-7} 。 与未经过 $f(L, i)$ 的布局模式相比, 其照度分布的均匀性有所增加, BER 有所减小, 从而达到兼顾室内照明与通信的目的。

图 11 优化函数 $f(L, i)$ 取值的变化Fig. 11 Variation in value of optimization function $f(L, i)$ 图 12 当 $L=0.35$ m, $i=0.025$ m 时接收平面光照度分布Fig. 12 Illumination distribution on receiving plane
when $L=0.35$ m and $i=0.025$ m图 13 当 $L=0.35$ m, $i=0.025$ m 时接收平面 BER 分布Fig. 13 BER distribution on receiving plane
when $L=0.35$ m and $i=0.025$ m

5 结 论

在 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的室内房间模型中,利用 Matlab 软件在 4+1 的房间布局模式下进行仿真。仿真结果表明:在满足室内照明照度要求的前提下,当 $N_1=8$ 、 $m_1=5$ 时使用的 LED 个数最少。在这种情况下,同时考虑室内照度分布的均匀性和通信中接收端 BER,并将二者进行线性组合,建立了优化函数 $f(L, i)$,得出当 $L=0.35$ m、 $i=0.025$ m 时 $f(L, i)$ 取值最小,从而得出一种最佳的布局方式。这种布局方式既满足了室内照明中光照度分布的均匀性,也使得室内 VLC 系统的可靠性得到了保证,从而为室内 VLC 提供了一种有效的布局方式。在房顶为正方形的情况下对光源进行布局,采用这种布局方式所使用的 LED 个数未必最少,即系统功耗未必最小,但是通过这种优化方法可在任意房间布局模式下找到一组最佳点 (L, i) ,可同时兼顾室内照度分布的均匀性和系统通信的可靠性,而不是单方面的考虑照度分布最均匀或者系统可靠性最好的情况,为室内 VLC 系统中的光源布局提供了一种可行的优化方法。

参 考 文 献

- [1] Yeh C H, Liu Y L, Chow C W. Realtime white light phosphor-LED visible light communications (VLC) with compact size[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26192-26197.
- [2] Lee K, Park H, Barry J R. Indoor channel characteristics for visible light communication[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(2): 217-219.
- [3] Li Rongling, Shang Huiliang, Lei Yu, et al. Research of key enabling technologies for high-speed visible-light communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050003.
李荣玲, 商慧亮, 雷雨, 等. 高速可见光通信中关键使能技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050003.

- [4] Kumar N, Lourenco N R. Led-based visible light communication system: A brief survey and investigation[J]. Journal of Engineering & Applied Sciences, 2010, 5(4): 296-307.
- [5] Ding Deqiang, Ke Xizheng. Visible light communication and research on its key techniques[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(2): 114-117.
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.
- [6] Knoda K R, Conci N. Illumination modeling and optimization for indoor video surveillance[C]. SPIE, 2014, 9020: 902011.
- [7] Wang Li, Guo Maotian, Tian Hui. A visible light communication light source layout model and performance analysis[J]. Laser Journal, 2016, 37(3): 92-94.
王 丽, 郭茂田, 田 辉. 一种可见光通信光源布局模型及性能分析[J]. 激光杂志, 2016, 37(3): 92-94.
- [8] Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2536-2540.
丁德强, 柯熙政. 一种通用白光 LED 数学发光模型研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2536-2540.
- [9] Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.* Lens design for uniform illumination with LED[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222002.
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.
- [10] Su Z, Xue D, Ji Z. Designing LED array for uniform illumination distribution by simulated annealing algorithm[J]. Optics Express, 2012, 20(23): A843-A855.
- [11] 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.
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.
- [12] Yuan Qiao, Zhan Qingxuan. CIE standard lighting - lighting indoor workplaces[J]. China Illuminating Engineering, 2002, 13(4): 55-60.
袁 樵, 詹庆旋. 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, 13(4): 55-60.
- [13] Komine T, Nakagava M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [14] Ding Deqiang, Ke Xizheng, Li Jianxun. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system[J]. Optoelectronic Engineering, 2007, 34(1): 131-134.
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.
- [15] Gfeller F R, Bapst U. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation[J]. Proceeding of IEEE, 1979, 67(11): 1474-1486.
- [16] Ding Deqiang, Ke Xizheng. Design and simulation of wireless LAN based on visible light communication[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007, 23(1): 29-32.
丁德强, 柯熙政. 一种基于可见光通信的无线局域网系统设计与仿真[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(1): 29-32.
- [17] Zeng L, O'Brien D, Le-Minh H, *et al.* Improvement of data rate by using equalization in a indoor visible light communication system[C]. IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications, 2008: 678-682.
- [18] Wang Z, Yu C, Zhong W D, *et al.* Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4564-4573.