

# 基于能量最优的室内可见光通信 LED 布局

王加安<sup>1</sup>, 车 英<sup>1</sup>, 吕 超<sup>2</sup>, 王馨兰<sup>3</sup>, 郭林扬<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>3</sup> 长春理工大学微纳光学制造实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** LED 兼具照明和数据通信功能, 在室内可见光通信(VLC)中, LED 的布局对维持接收面上接收功率的稳定分布有重要作用。室内 LED 矩形布局下的接收功率分布并不能覆盖整个接收面, 存在接收功率中断区, 无法实现最优的 VLC 系统性能。考虑室内墙面及地板的一次反射, 研究 LED 在不同位置的布局方案, 采用粒子群优化(PSO)算法分析 LED 布局方案, 设计了能耗最小的 LED 圆形布局方案。仿真分析了 LED 矩形布局和圆形布局下的接收功率分布、信号中断率、能量损耗以及信噪比分布, 仿真结果表明 LED 圆形布局的 VLC 系统性能优于矩形布局, 需要的 LED 数量几乎为矩形布局的一半, 减小了 VLC 系统的码间干扰。

**关键词** 光通信; 发光二极管; 可见光通信; 圆形布局

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0806003

## LED Layout for Indoor Visible Light Communication Based on Energy Optimization

Wang Jiaan<sup>1</sup>, Che Ying<sup>1</sup>, Lü Chao<sup>2</sup>, Wang Xinlan<sup>3</sup>, Guo Linyang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>3</sup> Laboratory of Micro/Nano-Photonic Manufacturing, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** LED can provide both illumination and data communication in indoor visible light communication (VLC). LED layout plays an important role in maintaining stable optical power distribution on receiving plane. LED rectangular layout can not provide a full coverage on the receiving plane in which receiving optical power interruption area exists, and can not achieve optimal performance of VLC system. Layouts of LED at different positions considering the first reflection of each wall and floor are studied. LED layouts are analyzed by particle swarm optimization (PSO) algorithm, and a LED circular layout with optimal energy consumption is designed. Rectangular layout and circular layout of LEDs are analyzed through simulation of the received optical power distribution, signal interruption rate, energy consumption and signal noise ratio distribution. The results show that, for the VLC system, the performance of the LED circular layout is better than that of the LED rectangular layout, and the LED circular layout can reduce the inter symbol interference with almost half number of LEDs used in the LED rectangular layout.

**Key words** optical communications; light emitting diodes; visible light communication; circular layout

**OCIS codes** 060.2605; 060.4080; 060.4510

**收稿日期:** 2017-03-16; **收到修改稿日期:** 2017-04-22

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(61605016)、长春理工大学校内基金(cust201504089)

**作者简介:** 王加安(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: wangjiaangood@126.com

**导师简介:** 车 英(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事光通信、精密测控技术方面的研究。E-mail: cheying@cust.edu.cn

## 1 引 言

随着人们对信息高速传递技术要求的不断提高,无线通信技术在日常生活中扮演着越来越重要的角色,各种各样的通信方法被提出、研究和使用的,其中包括可见光通信(VLC)技术<sup>[1]</sup>。与传统射频通信(RF)技术及其他无线通信技术相比,VLC技术具有频谱带宽大、信噪比(SNR)高、抗电磁干扰能力强、保密性好等优势。VLC技术的这些特点为未来办公室及家庭环境下5G网络的搭建提供了可能<sup>[2-3]</sup>。

基于发光二极管(LED)的VLC受到了国内外研究人员的广泛关注,Nakagawa等<sup>[4]</sup>仿真分析了基于二进制开关键控(OOK)调制的VLC系统。Sugiyama等<sup>[5]</sup>改进了脉冲相位调制(PPM)方式,提出了副载波反相脉冲相位调制(SCI-PPM)。Sivabalan等<sup>[6]</sup>发现单个光源发射器会导致功率分布不均匀,采用扩展递归法对接收器接收功率分布(ROPD)进行了计算。

中国科学院半导体研究所Yang等<sup>[7]</sup>采用OOK调制配合RS-485协议,搭建了基于白光LED的室内光通信系统,实现了2.5 m距离内的快速通信,速度达到115.2 kbit·s<sup>-1</sup>,误码率(BER)为1×10<sup>-7</sup>。波士顿大学Wu等<sup>[8]</sup>在理论分析的基础上,采用六角形收发器计算仿真了视距链路(LOS)场景下信号遮挡问题的两种光源分布方案。Komine等<sup>[9]</sup>研究了多个LED光源下室内VLC的比特误码率,在通信速度为800 Mbit·s<sup>-1</sup>时,3个LED是信号发射源的最佳选择,此时系统的BER最小。贾科军等<sup>[10]</sup>将非对称限幅光正交频分复用(ACO-OFDM)和多输入多输出(MIMO)相结合,建立了MIMO-ACO-OFDM系统,提出了针对室内VLC-MIMO多径信道建模方法,仿真结果表明当调制阶数小于64时,最小均方误差比迫零检测方法更具优势,且将接收器置于房间中心时,可减小接收器视场角和多径干扰,提升系统性能。Lee等<sup>[11]</sup>通过实验分别测得了高亮度的红、绿、蓝LED的调制带宽,比较了单一和复合LED的眼孔图样,发现蓝光LED的通信速率最高,在12 cm距离内实现了10 Mbit·s<sup>-1</sup>的传输速度,且系统BER小于8×10<sup>-6</sup>。Komine等<sup>[9]</sup>研究发现最佳的LED光源数量能够减小遮蔽效应,但该研究未给出光源的位置。文献[12-14]研究了提高VLC系统的ROPD及SNR的方法,但同样未研究LED光源的阵列方式及最佳位置。沈振民等<sup>[15]</sup>提出了以照度均方差最小化为原则的LED排列布局,研究了LOS和非视距链路(NLOS)下的照度分布、SNR分布及ROPD。以上对于VLC的研究主要集中于信道模型的建立、短距离内的高速通信、比特BER、ROPD及SNR等,而对室内VLC光源的排列布局研究较少。

本文提出了在能量损耗最小的情形下采用较少数量的LED光源使接收功率分布达到最优的LED圆形布局的方案。采用平均中断面积率(AOAR)来评价信号码间干扰,同时利用粒子群优化(PSO)算法在能量损耗最小、成本最低条件下取得了整个VLC系统的AOAR极小值及最大的ROPD,提升了VLC系统的性能。

## 2 室内VLC系统模型

为了便于分析,采用ACO-OFDM技术建立简单的ACO-OFDM系统<sup>[16]</sup>,同时假设系统的通信环境为5 m×5 m×3 m的室内模型。典型的VLC系统模型如图1所示,建立室内坐标系,以地板平面中心为坐标原点O,分别以地板平面的宽度和长度的中点与原点的连线作为x轴和y轴,xoy平面与地板平面重合。LED分布在天花板上,光电二极管、摄像头或其他接收终端分布在距离地面0.85 m的桌面上。为了更加精确地对家庭和办公室环境下的VLC进行仿真,需要遵守国际标准化组织(ISO)关于室内灯光的标准<sup>[17]</sup>。

表征LED光源特性的2个重要参数是辐射功率和发光强度。在VLC系统中假设LED光源辐射满足朗伯辐射强度模型<sup>[16]</sup>,光源LED的辐射强度函数为

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

式中 $R(\phi)$ 为辐射角度为 $\phi$ 时的辐射强度, $m$ 为与LED辐射半功率角有关的辐射模式数<sup>[16]</sup>, $P_s$ 为LED辐射功率。 $P_s$ 和 $m$ 可分别表示为

$$P_s = \frac{\phi_s}{K}, \quad (2)$$

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})}, \quad (3)$$

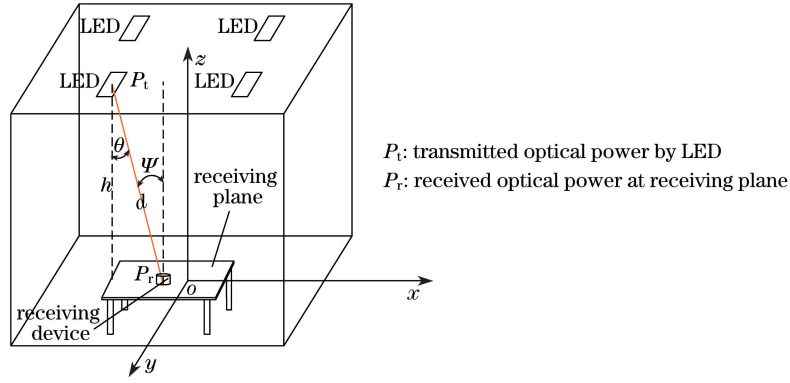


图 1 VLC 系统模型

Fig. 1 VLC system model

式中  $K$  为光视效能,  $\phi_s$  为光通量,  $\phi_{1/2}$  为半功率角。

LED 的发光强度为

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

式中  $I(0)$  表示 LED 的中心光强。接收面上某一点的照度为

$$E_{\text{hor}} = I(0) \cos^m \phi \cos \psi / D^2, \quad (5)$$

式中  $\psi$  为接收面的入射角,  $D$  为 LED 与接收器之间的距离。根据 ISO 标准, 办公室的平均照度为  $300 \sim 800 \text{ lx}^{[17]}$ 。图 2 所示分别为水平桌面上的光照度示意图, 包括 LOS 和 NLOS 下的照度。

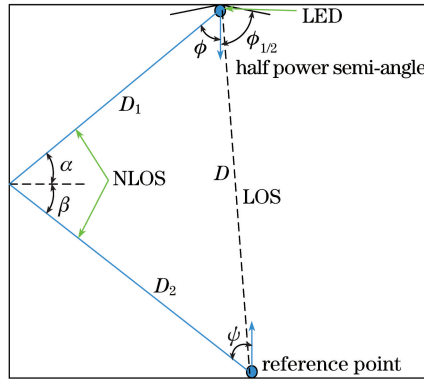


图 2 LOS 和 NLOS 示意图

Fig. 2 Diagram of LOS and NLOS

(5)式在应用于 LOS 中时仅考虑了直射的情况, 而 NLOS 下接收面上的照度为

$$E_{\text{hor,NLOS}} = \frac{(m+1)}{2\pi D_1^2 D_2^2} I(0) \rho dA_{\text{wall}} \cos^m \phi \cos \alpha \cos \beta \cos \psi, \quad (6)$$

式中  $D_1$  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,  $\rho$  为反射系数,  $dA_{\text{wall}}$  为墙壁微小反射面源,  $\alpha$  为 LED 与反射点之间的辐射角,  $\beta$  为反射点与接收器之间的辐射角。

同样地, 接收功率分布也包括 LOS 和 NLOS 下的功率分布。为了计算接收功率分布, 假设通信信道为无线光信道。在一个光链路中, 直射增益表示为

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m \phi T_s(\phi) g(\phi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c, \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $A$  为接收面积,  $D_d$  为 LED 与接收平面上某点的距离,  $T_s(\phi)$  为光学滤波器的增益,  $g(\phi)$  为光学集中器的增益,  $\Psi_c$  为接收器视场。光学集中器增益  $g(\phi)$  可表示为

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c, \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $n$  为折射率。接收功率  $P_r$  可以用发射功率  $P_t$  表示,即

$$P_r = H(0)P_t. \quad (9)$$

(9)式适用于只存在直射时的 LOS 中。当存在反射时,接收功率  $P_r$  可表示为

$$P_r = \sum [P_t H(0) + \int P_t dH_{\text{ref}}(0)], \quad (10)$$

式中  $dH_{\text{ref}}(0)$  为一次反射的信道增益,可表示为

$$dH_{\text{ref}}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_1^2 D_2^2} \rho dA_{\text{wall}} \cos^m \phi \cos \alpha \cos \beta T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c. \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

AOAR 是评价室内信号盲区的因素之一,对于通信系统,需要其 AOAR 尽量小。基于图 1 中的位置关系,假设 LED 的位置坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ ,接收器的位置坐标为  $(x, y, z)$ ,并采用三角法计算  $\cos \theta$ ,得到

$$\cos \theta = \frac{z_i - z}{\sqrt{(z - z_i)^2 + (y - y_i)^2 + (x - x_i)^2}}. \quad (12)$$

将(12)式代入(7)式可得

$$H(0) = \frac{T_s g(\psi) A (m+1) (z_i - z)^{m+1}}{2\pi [(z - z_i)^2 + (y - y_i)^2 + (x - x_i)^2]^{m+3/2}}. \quad (13)$$

基于 ACO-OFDM 系统的误码率  $P_{\text{BER}}$  可表示为

$$P_{\text{BER}} = \frac{4}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \text{erfc} \left[ \sqrt{\frac{3S_{\text{SNR}}}{2(M-1)}} \right], \quad (14)$$

式中  $\text{erfc}()$  为误差函数; $S_{\text{SNR}}$  为信噪比,可表示为

$$S_{\text{SNR}} = \frac{P_r^2}{\sigma^2 + \frac{\sigma_n^2}{2h^2 \xi^2}}, \quad (15)$$

式中  $\xi$  为接收器的响应率, $\sigma^2$  为噪声方差, $\sigma_n^2$  为散粒噪声和热噪声之和, $h$  为接收器的高度。系统中的噪声主要为高斯白噪声,散粒噪声  $\sigma_{\text{shot}}^2$  和热噪声  $\sigma_{\text{thermal}}^2$  的总和用  $\sigma_{n(k)}^2$  表示,即

$$\sigma_{n(k)}^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2, \quad (16)$$

其中

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2q\xi P_r B + 2qI_{\text{bg}} B, \quad (17)$$

$$\sigma_{\text{thermal}}^2 = \frac{4kT}{R_L} B, \quad (18)$$

式中  $q$  为电荷数, $I_{\text{bg}}$  为暗电流, $B$  为带宽, $T$  为绝对温度, $R_L$  为负载, $k$  为玻耳兹曼常数。

基于以上公式,将 AOAR(用  $A_{\text{OAR}}$  表示)定义为当 BER 大于阈值  $P_{\text{th}}$  时接收功率与总接收功率  $P$  的比值,即

$$A_{\text{OAR}} = \frac{EP_r}{P}, P_{\text{BER}} > P_{\text{th}}. \quad (19)$$

由(19)式可以看出 AOAR 与码间干扰直接相关,优化 LED 布局的目的是使 AOAR 取得最小值  $V$ ,可表示为

$$V = \min_{(x,y)} \{A_{\text{OAR}}\}, \quad (20)$$

式中  $x, y$  分别为房间的宽度和长度。LED 的位置会影响 AOAR 的值,因此需研究 LED 的布局。为了推导出 AOAR 的表达式,将接收面细分为小的均匀网格,分别计算每个小网格的 AOAR,用(19)式来判断 AOAR 的值是否低于阈值,通过 PSO 进行结果的比较和数值优化。



### 3 LED 布局优化

为了在物体表面产生足够的照度,需要将多个 LED 进行组合排列。由于 LED 的尺寸小,因此可以采用任意尺寸和形状(正方形、三角形和矩形等)对其进行封装。每个 LED 有确定的辐射图,能够在目标体表面产生照度,因此发射器和接收器之间的距离决定了接收面上的总照度。最初,VLC 系统中的多个 LED 采用 LED 中心布局的方式,随后逐渐变为以一定偏移量安装在房间角落的矩形布局,这样的布局方式被认为是仿真 VLC 系统的默认布局,这里将这种布局方式与更加经济、高效节能的 LED 圆形布局方式进行比较。

自上而下看 LED 辐射图为一个圆形,所以将 LED 的照度模式看作朗伯模式。如果采用正方形 LED 阵列,尽管 LED 被看作朗伯模型,正方形 LED 阵列的辐射图仍然为正方形,两个相邻 LED 芯片中心之间的距离用  $d$  表示,通常该值小于  $2\text{ cm}^{[15-18]}$ 。当 LED 的发光角度为  $10^\circ\sim 30^\circ$  时,会产生辐射重叠,导致码间干扰,从而给数据接收和多用户使用带来困难。为了解决这个问题,可采用 LED 圆形布局,其优点是:采用数量较少的 LED 就能满足一定区域的照明要求;通过使用高功率的 LED 或者改变布局半径可使任意 LED 之间的距离可调;减少 LED 的数量及布局半径可以减小码间干扰和平均均方根延时。LED 圆形布局与 LED 矩形布局示意图如图 3 所示。

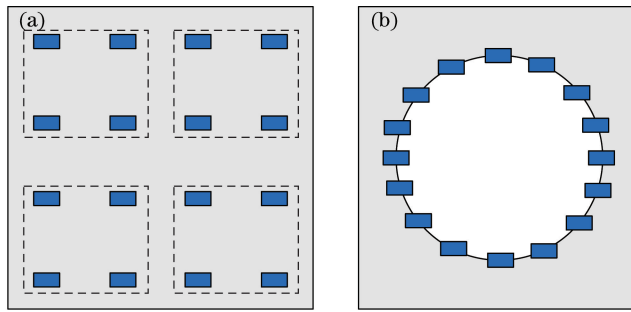


图 3 (a) LED 矩形布局;(b) LED 圆形布局

Fig. 3 (a) LED rectangular layout; (b) LED circular layout

为了仿真上述布局的 AOAR,采用 PSO 算法优化 LED 布局,使室内的接收功率达到最高。PSO 由单个粒子组成,每个粒子可看作一个潜在的解,每个粒子在  $n$  维空间以一定的速度运动,通过相应的函数判断粒子的优劣,粒子会根据自身及其他粒子的经验动态调整运动速度,并朝着群体中最优粒子的位置运动,从而获得需要优化问题的最优解。将该算法应用于本研究中,即转化为平面  $xoy$  内  $x$ 、 $y$  坐标轴的优化问题。设粒子数为  $Q$ ,每次从接收平面随机选择粒子的初始位置和速度随机插入, $\mathbf{X}_Q(t)$ 和 $\mathbf{V}_Q(t)$ 分别表示粒子的位置向量和速度向量,可表示为

$$\mathbf{X}_Q(t) = [x_{Q,1}(t), x_{Q,2}(t), \dots, x_{Q,Z}(t), y_{Q,1}(t), y_{Q,2}(t), \dots, y_{Q,Z}(t)]^T, \quad (21)$$

$$\mathbf{V}_Q(t) = [v_{Q,1}(t), v_{Q,2}(t), \dots, v_{Q,Z}(t)]^T, \quad (22)$$

式中下标  $Z$  表示接收平面。

$\mathbf{V}_Q(t)$ 用来更新当前粒子的位置。根据 PSO 算法更新  $\mathbf{X}_Q(t)$ 和 $\mathbf{V}_Q(t)$ 规则,即

$$v_Q(t+1) = \omega_t v_Q(t) + c_1 \epsilon [P_Q^{\text{local}} - x_Q(t)] + c_2 \eta [P^{\text{global}} - x_Q(t)], \quad (23)$$

$$x_Q(t+1) = x_Q(t) + v_Q(t+1), \quad (24)$$

式中  $v_Q(t)$ 为粒子速度, $x_Q(t)$ 为第  $Q$  个粒子经过  $t$  次迭代的位置, $t$  为迭代次数, $P_Q^{\text{local}}$  为粒子本身的最优解, $P^{\text{global}}$  为整个种群的最优解, $\epsilon$  和  $\eta$  为  $[0,1]$ 之间的随机数, $c_1$  和  $c_2$  为学习因子, $\omega_t$  为惯性权重。根据经验调整迭代次数, $\omega_t$  可以表示为<sup>[19]</sup>

$$\omega_t = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{I_{\max} - 1}(t - 1), \quad (25)$$

式中  $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$  分别表示惯性权重的最大值和最小值, $I_{\max}$  表示最大迭代次数。

POS 算法流程如图 4 所示。具体优化过程为:1)从接收平面  $Z$  上的任意一点随机开始,基于目标函数

评估 AOAR 的值;2)评估网格内所有点的值,找出最优解;3)如果计算结果为当前网格的最小值,更新粒子本身的解并进行下一次迭代,如果计算结果优于粒子本身的解和整个种群的解,那么同时更新粒子本身的解和整个种群的解;4)迭代结束后,整个种群的解即为系统的最优解。每次迭代后速度向量和位置向量都会得到更新。如果最优解满足目标函数,那么系统存在最优解,否则系统不存在最优解。

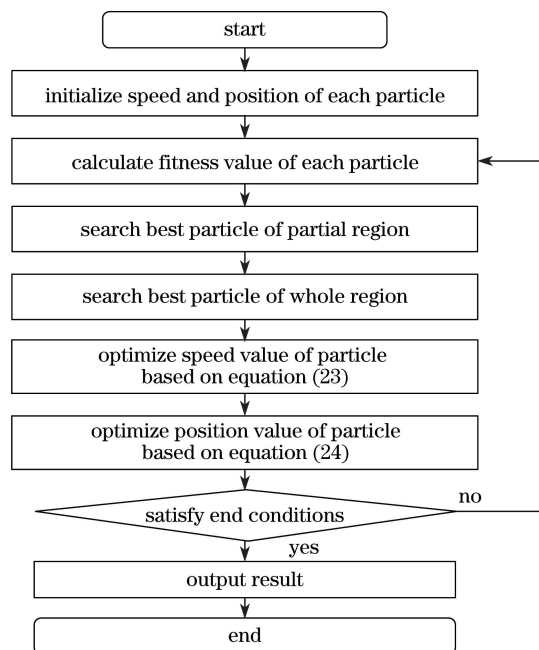


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow diagram of algorithm

## 4 结果与分析

从 4 个方面进行分析:1)仿真 LED 圆形布局方式的接收功率分布,并与传统的 LED 布局方式进行比较;2)研究 AOAR 对不同 LED 布局方案的影响;3)研究所设计的 LED 圆形布局方案的能量损耗及其相对于传统 LED 布局方案在能量损耗上的改善;4)仿真 LED 圆形布局方式的 SNR 分布,并将其与传统的 LED 布局方式进行比较。

### 4.1 接收功率分布仿真

VLC 系统的接收功率分布仿真使用的仿真环境为  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$  的房间,将 LED 采用不同的布局方式安装在天花板上,接收平面的高度为  $0.85\text{ m}$ ,将用于接收 VLC 信号的光电二极管(接收器)安装在接收平面上。系统接收功率包括 LOS 和 NLOS(墙壁一次反射),详细仿真参数如表 1 所示,表中 QAM 为正交幅度调制。

图 5、6 分别为单个 LED 的功率为  $4\text{ W}$  时 4 个 LED 的 LOS 和 NLOS 的 ROPD,对比两图可以看出,由于墙壁及地板的反射作用,接收功率的最小值和最大值都有不同程度的增加,尤其是在房间角落处,该结论与文献[15]的结论一致,因此墙壁及地板(NLOS)的反射作用不可忽略,以下的仿真均为 NLOS 的情形。

从图 6 可以看出,接收功率分布在  $-3\text{ dBm} \sim 2\text{ dBm}$  范围内,平均接收功率在  $0\text{ dBm}$  附近<sup>[20]</sup>。图中给出了接收平面上的等功率线分布,可以看出接收平面上的接收功率并不是均匀分布的,尽管输出功率很高,但房间角落处的接收功率小于  $0\text{ dBm}$ ,存在通信盲区。为了解决这一问题,将 LED 的数量由 4 个增加到 16 个,结果如图 7 所示。可以看出,通过增加 LED 的数量可增加接收功率,房间角落处的接收功率增加了  $2\text{ dBm}$ ,但是通信盲区仍然存在。为了进一步研究矩形布局方案,将单个 LED 的功率由  $4\text{ W}$  增加到  $8\text{ W}$ ,结果如图 8 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simultaion parameters

Parameter	Value
Room size	5 m×5 m×3 m
Modulation	64-QAM ACO-OFDM
Center luminous intensity /cd	0.73
Photodiode area $A_r$ /cm <sup>2</sup>	1
Semi-angle at half power /( $^{\circ}$ )	70
Photodiode responsivity	0.4
Field of view at receiver /( $^{\circ}$ )	85
Reflective index of concentrator	1.5
Single LED bulb power /W	4, 8
Radius of circular layout /m	1, 2
Background noise current /mA	0.62
Load resistance $R_L$ /k $\Omega$	10
Absolute temperature $T$ /K	295
Reflectivity of wall and floor	White concrete wall: 0.8; normal floor: 0.3
Height of receiving plane /m	0.85

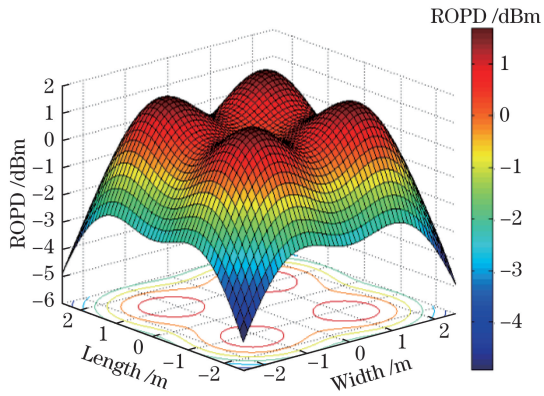


图 5 单个 LED 的功率为 4 W 时 4 个 LED 在矩形布局下的 LOS-ROPD

Fig. 5 LOS-ROPD of four LEDs with rectangular configuration when power of single LED is 4 W

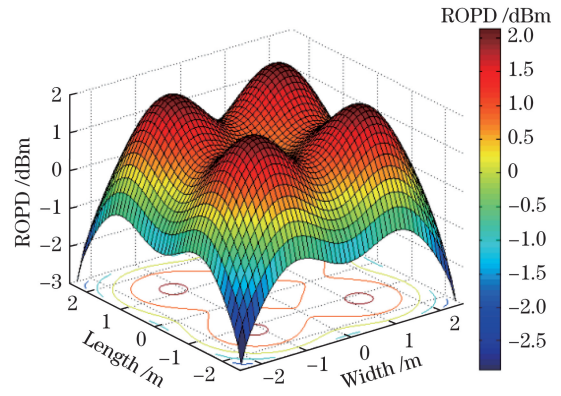


图 6 单个 LED 的功率为 4 W 时 4 个 LED 在矩形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 6 NLOS-ROPD of four LEDs with rectangular configuration when power of single LED is 4 W

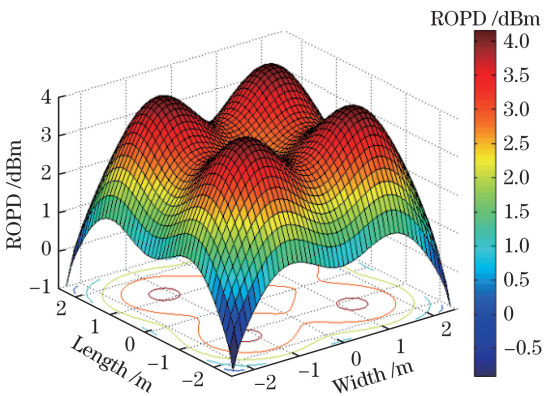


图 7 单个 LED 的功率为 4 W 时 16 个 LED 在矩形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 7 NLOS-ROPD of sixteen LEDs with rectangular configuration when power of single LED is 4 W

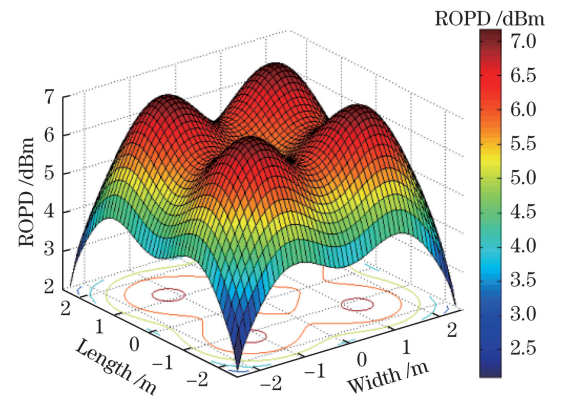


图 8 单个 LED 的功率为 8 W 时 16 个 LED 在矩形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 8 NLOS-ROPD of sixteen LEDs with rectangular configuration when power of single LED is 8 W

由图 8 可以看出,接收平面上的接收功率得到显著提高,但是角落处的信号依然较弱,尽管 LED 矩形布局将最低接收功率由  $-3$  dBm 提高至  $2$  dBm,但在房间角落仍然存在通信盲区。为了提高房间角落的接收功率,这里提出 LED 圆形布局方案,该方案仍采用如表 1 所示的仿真参数,将半径作为变量,圆心为房间中心。

图 9 为半径为  $1$  m、LED 数量为 4 个时圆形布局的 ROPD,每个 LED 的功率为  $4$  W。比较图 6 与图 9 可以看出,图 6 的 ROPD 分布优于图 9,图 9 中最大的接收功率在  $7$  dBm 左右,高于图 6 中的  $2$  dBm,且最大接收功率仅分布在房间中心。将 LED 的功率由  $4$  W 增加到  $8$  W,结果如图 10 所示。与图 9 相比,图 10 中的接收功率有所增加。

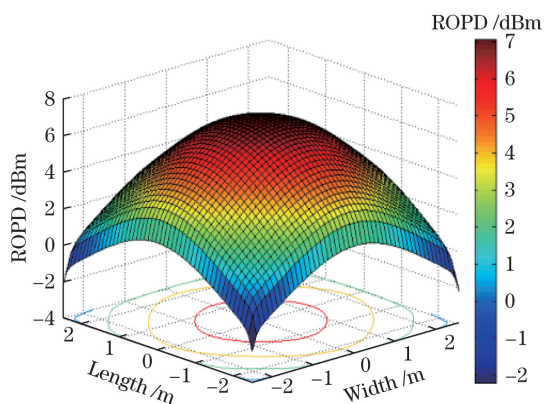


图 9 单个 LED 的功率为  $4$  W、半径为  $1$  m 时 4 个 LED 在圆形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 9 NLOS-ROPD of four LEDs with circular configuration when power of single LED is  $4$  W and radius is  $1$  m

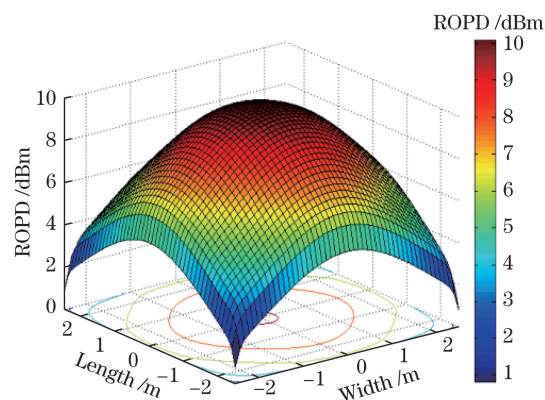


图 10 单个 LED 的功率为  $8$  W、半径为  $1$  m 时 4 个 LED 在圆形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 10 NLOS-ROPD of four LEDs with circular configuration when power of single LED is  $8$  W and radius is  $1$  m

综上,无论是增加 LED 的功率还是增加 LED 的数量都会提高整个系统的接收功率。图 11 为 LED 的数量由 4 个增加至 16 个且单个 LED 的功率为  $4$  W 时的 ROPD,图 12 为在 LED 数量增加到 16 个后将单个 LED 的功率由  $4$  W 增加至  $8$  W 时的 ROPD。

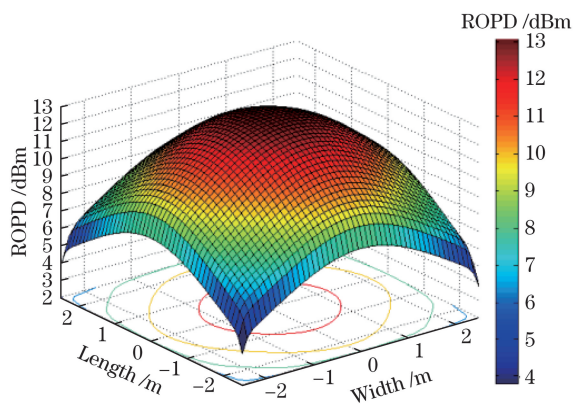


图 11 单个 LED 的功率为  $4$  W、半径为  $1$  m 时 16 个 LED 在圆形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 11 NLOS-ROPD of sixteen LEDs with circular configuration when power of single LED is  $4$  W and radius is  $1$  m

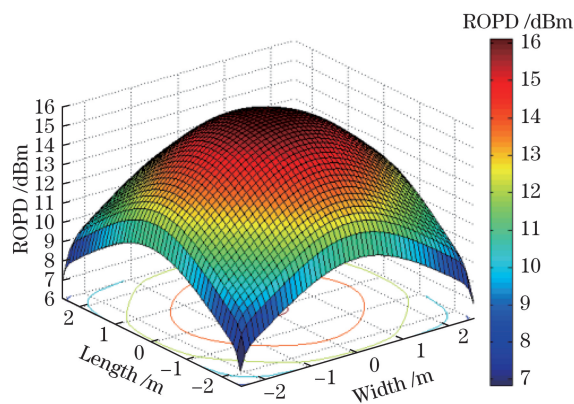


图 12 单个 LED 的功率为  $8$  W、半径为  $1$  m 时 16 个 LED 在圆形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 12 NLOS-ROPD of sixteen LEDs with circular configuration when power of single LED is  $8$  W and radius is  $1$  m

为了研究半径对接收功率分布的影响,将圆形布局的半径由  $1$  m 增加到  $2$  m,仿真结果如图 13、14 所示。由图 13 可以看出,当半径增加到  $2$  m 时,仅需 4 个 LED 就能实现接收面的全覆盖,最大接收功率随 LED 间距离的增大而有所降低,这样的结构布局实现了较好的接收功率分布,提升了系统的性能。增加 LED 的数量会进一步提高接收功率,图 14 为 LED 数量由 4 个增加到 16 个后的 ROPD,最大接收功率和角



落处接收功率都有显著提高。图 15 为 LED 的数量为 4 个、单个 LED 的功率为 8 W 时的 ROPD。图 16 为 LED 数量为 16 个、单个 LED 的功率为 8 W 时的 ROPD, LED 数量的增加使接收功率的覆盖范围增大,最大接收功率也发生变化。

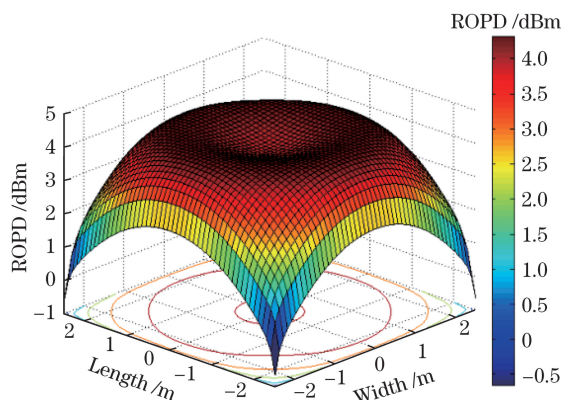


图 13 单个 LED 的功率为 4 W、半径为 2 m 时 4 个 LED 在圆形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 13 NLOS-ROPD of four LEDs with circular configuration when power of single LED is 4 W and radius is 2 m

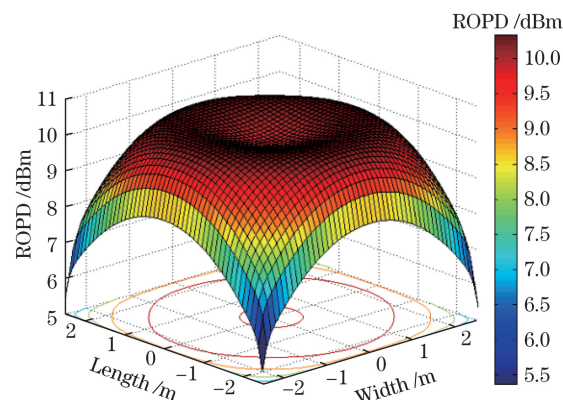


图 14 单个 LED 的功率为 4 W、半径为 2 m 时 16 个 LED 在圆形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 14 NLOS-ROPD of sixteen LEDs with circular configuration when power of single LED is 4 W and radius is 2 m

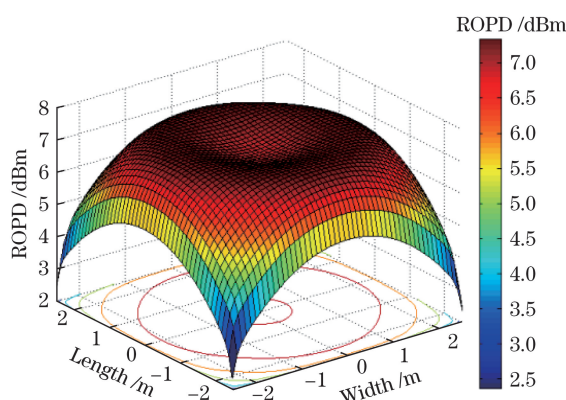


图 15 单个 LED 的功率为 8 W、半径为 2 m 时 4 个 LED 在圆形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 15 NLOS-ROPD of four LEDs with circular configuration when power of single LED is 8 W and radius is 2 m

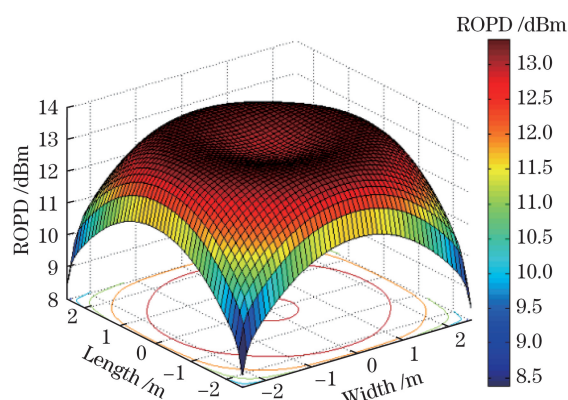


图 16 单个 LED 的功率为 8 W、半径为 2 m 时 16 个 LED 在圆形布局下的 NLOS-ROPD

Fig. 16 NLOS-ROPD of sixteen LEDs with circular configuration when power of single LED is 8 W and radius is 2 m

由上述仿真结果可以看出,通过增加半径可以增加接收平面上接收功率的覆盖范围,房间角落处的接收功率得到显著提高,整个房间不存在明显通信盲区。此外,使用 4 个功率为 4 W 的 LED 圆形布局便可以达到 16 个 LED 矩形布局的效果。

#### 4.2 AOAR 仿真

研究 LED 圆形布局的 VLC 系统性能。运用优化算法计算 LED 圆形布局下的 AOAR,与单个 LED 布局 and LED 矩形布局方案的结果进行比较,并给出最佳结果。仿真参数的设置如表 1 所示。增加概率变量  $a$  有利于优化 LED 在天花板的位置,概率变量的取值为 1 至网格与接收平面比值之间的任意值。当  $a=1$  时,意味着接收器接收到该网格的概率非常小,因此结果的收敛需要更多的迭代次数;当  $a=5$  时,意味着结果快速收敛的概率更大,因为接收器在该网格位置出现的可能性更大,因此可采用优化算法更快、更精确地找到最优解。

图 17 所示为不同 LED 布局方案下 LED 数量对 AOAR 的影响。可以看出,单个 LED 布局的性能最差,AOAR 的值最大;LED 矩形阵列和圆形阵列的性能要优于单个 LED 布局。若已知接收器在接收平面的位置,显然圆形布局的性能更好,当 LED 数量相同时其 AOAR 的值更小。

图 18 所示为优化算法的迭代次数对 AOAR 的影响。当  $a=1$  时,需要的迭代次数为 80;当  $a=5$  时,需要的迭代次数为 50。当  $a$  相同时,圆形布局下结果的收敛比其他布局方案下的收敛更快,表明在相同条件下圆形布局的系统性能更优。

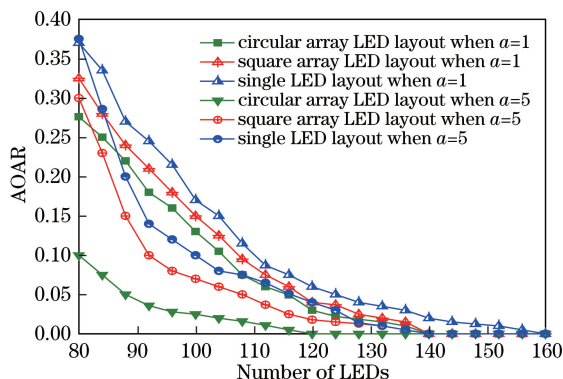


图 17 LED 数量与 AOAR 的关系

Fig. 17 AOAR versus number of LEDs

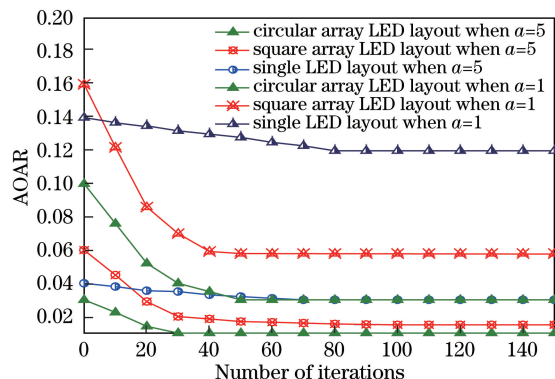


图 18 迭代次数与 AOAR 的关系

Fig. 18 AOAR versus number of iterations

### 4.3 能量损耗仿真

为了研究圆形布局方案的能量损耗,基于 EN12464-1:2011 国际标准进行仿真,该标准包括木头、玻璃和任何办公室或家庭设备默认的反射系数。使用不正确的反射系数会得到光在房间里的任何物体上不准确的反射和漫射照度分布及能量损耗。仿真选择的时间范围是 8:00—18:00,计算包括日光在内的噪声对房间照度分布及能量损耗的影响。LED 布局方式分为 4 种,其中 2 种布局方案为 4 个和 16 个 LED 的矩形布局;另外 2 种布局方案为 4 个和 16 个 LED 在半径为 2 m 下的圆形布局。仿真采用光线追迹模型,图 19、20 为得到的能量损耗数据。为方便比较,仿真了平均照度和最小照度,照度值范围设置为 400~700 lx,满足国际标准化组织(ISO)标准,能量损耗阈值设置为  $540 \text{ kWh}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

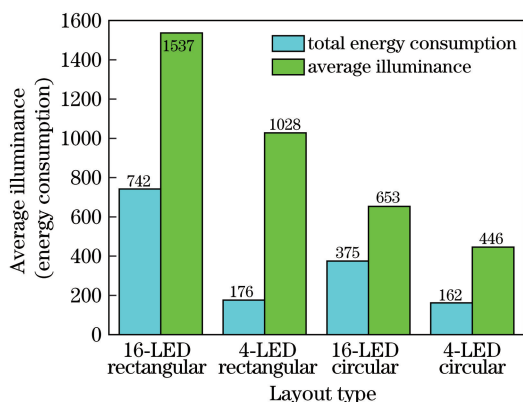


图 19 平均照度和总能量损耗

Fig. 19 Average illuminance and total energy consumption

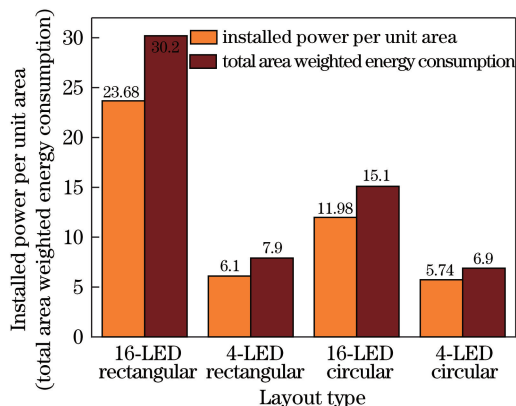


图 20 单位面积安装功率和总面积加权能量损耗

Fig. 20 Installed power per unit area and total area weighted energy consumption

由图 19 可以看出,16 个 LED 的矩形布局接收面的平均照度很高,达到了 1537 lx,远超过 ISO 标准的阈值,4 个 LED 矩形布局接收面的平均照度也已达 1028 lx,而 4 个和 16 个 LED 圆形布局的照度值均在 ISO 标准以内。根据 ISO 标准得到总能量损耗的阈值为  $540 \text{ kWh}\cdot\text{a}^{-1}$ ,因此除了 16 个 LED 矩形布局外,其他布局方案均满足这个标准,且 4 个 LED 圆形布局的能量损耗最小。图 20 所示为不同布局下单位面积安装功率和总面积加权能量损耗,16 个 LED 矩形布局的总面积加权能量损耗为  $30.201 \text{ kWh}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ,远超过 ISO 的标准值  $17 \text{ kWh}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。当 LED 的数量相同时,圆形布局的单位面积安装功率和总面积加权能量损耗均小于矩形布局的。



#### 4.4 SNR 分布仿真

SNR 作为评价通信链路通信质量的重要标准,可为通信链路的搭建提供参考。基于上述仿真及分析,对 LED 矩形布局和圆形布局的 SNR 分布进行仿真分析。图 21、22 分别仿真了 4 个和 16 个 LED 矩形布局下的 SNR 分布。可以看出,与 4 个 LED 矩形布局相比,16 个 LED 矩形布局的 SNR 并没有像接收功率分布一样随 LED 数量的增加而增加,而是随 LED 数量的增加而减小。此外,SNR 的波动随 LED 数量的增加而减小。

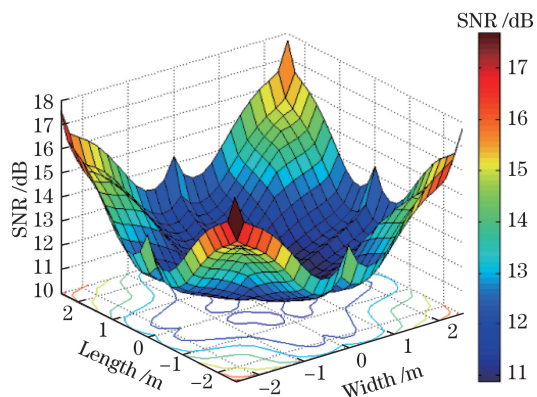


图 21 4 个 LED 矩形布局的 SNR

Fig. 21 SNR of four LEDs with rectangular configuration

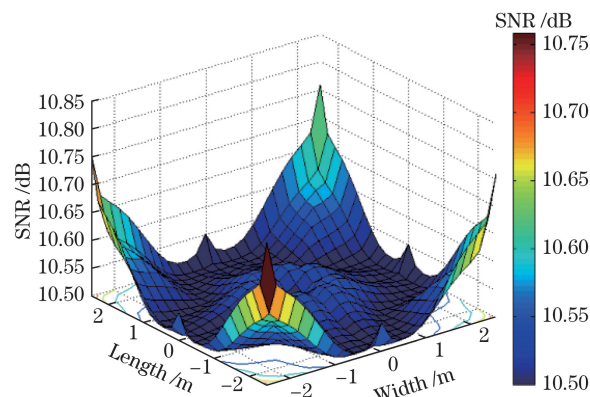


图 22 16 个 LED 矩形布局的 SNR

Fig. 22 SNR of sixteen LEDs with rectangular configuration

为了研究 LED 矩形布局与圆形布局的差异,对半径为 1 m 和 2 m 的圆形布局进行了仿真。图 23、24 分别为半径为 1 m 的 4 个和 16 个 LED 圆形布局的 SNR 分布。与 4 个 LED 矩形布局相比,4 个 LED 圆形布局中 LED 之间的距离减小,房间中心的 SNR 很大,除房间中心外整个房间的 SNR 分布较平均。当 LED 的数量增加到 16 时,房间中心的 SNR 同样随 LED 数量的增加而降低,SNR 波动减小。

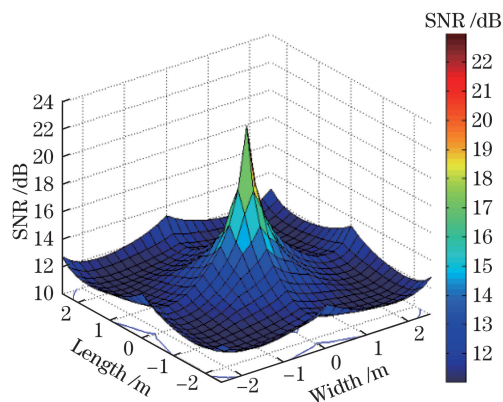


图 23 半径为 1 m 时 4 个 LED 圆形布局的 SNR

Fig. 23 SNR of four LEDs with circular configuration when radius is 1 m

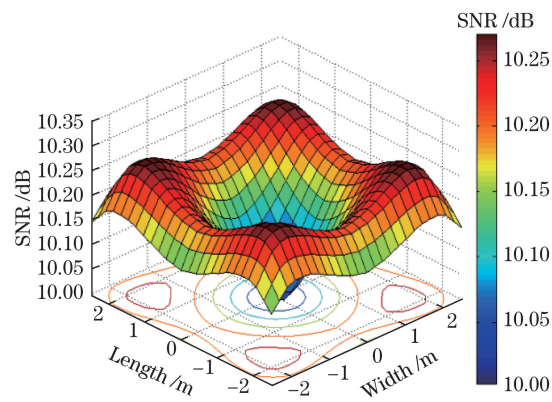


图 24 半径为 1 m 时 16 个 LED 圆形布局的 SNR

Fig. 24 SNR of sixteen LEDs with circular configuration when radius is 1 m

为了研究半径对 SNR 分布的影响,将半径增加至 2 m。图 25、26 分别为半径为 2 m 时 4 个和 16 个 LED 圆形布局的 SNR 分布。与半径为 1 m 时 4 个 LED 圆形布局的 SNR 分布相比,半径为 2 m 时 4 个 LED 圆形布局下的 SNR 随半径的增大而减小;由于反射,4 个墙面的 SNR 高于房间中心,但 SNR 的波动减小。当 LED 的数量增加到 16 时,与半径为 1 m 的情形相比,LED 码间干扰对房间中心区域 SNR 的影响变小,房间中心区域的 SNR 呈圆环分布。

由上述仿真结果可知,16 个 LED 矩形布局的系统性能最差,消耗的功率大于其他布局方案的,而 4 个 LED 矩形布局的平均照度较高,如果能对 4 个 LED 矩形布局进行优化,对 VLC 系统而言是一种较好的替代方案。考虑到硬件成本和能量损耗,两种圆形布局方案对 VLC 系统而言都是非常好的选择。

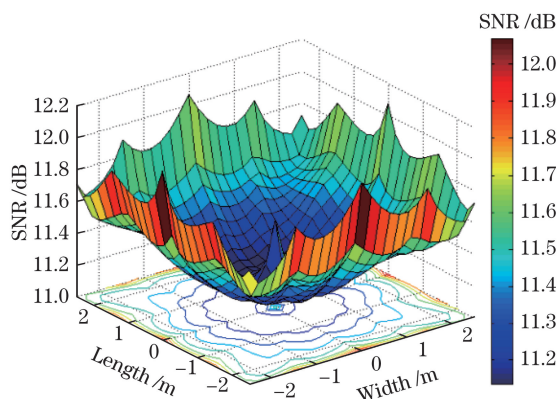


图 25 半径为 2 m 时 4 个 LED 圆形布局的 SNR

Fig. 25 SNR of four LEDs with circular configuration when radius is 2 m

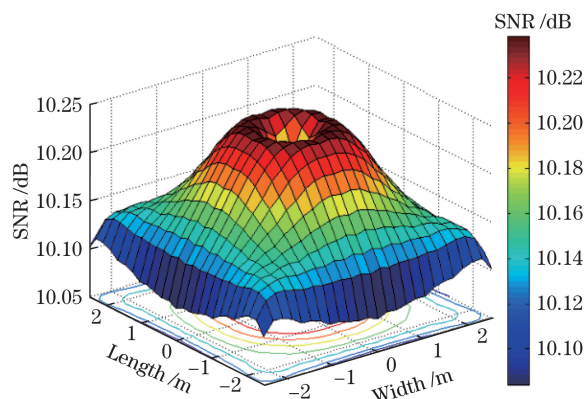


图 26 半径为 2 m 时 16 个 LED 圆形布局的 SNR

Fig. 26 SNR of sixteen LEDs with circular configuration when radius is 2 m

## 5 结 论

对室内 VLC 系统 LED 光源的布局进行了仿真,提出了与传统 LED 矩形布局相比更加经济高效的 LED 圆形布局方案,分析比较了当 LED 数量和功率相同时矩形布局和圆形布局的接收功率分布、功率中断率、系统能量损耗及信噪比分布。仿真结果表明,运用 PSO 算法可降低系统的功率中断率,减小通信盲区;当接收功率分布满足室内 VLC 要求时,圆形布局所需的 LED 数量仅为矩形布局的一半;圆形布局使用的 LED 数量较少,可减小系统的码间干扰,优化信噪比分布,同时减小整个系统的能量损耗。在 ISO 标准下,该研究结果可以应用于照明设备的开发,同时还可以为任意规模、任意类型的室内 LED 布局提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Chen Quanrun, Zhang Tao, Zheng Weibo, *et al.* Present research situation and application prospects of VLC based on white LED[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(4): 455-460.  
陈泉润, 张涛, 郑伟波, 等. 基于白光 LED 可见光通信的研究现状及应用前景[J]. *半导体光电*, 2016, 37(4): 455-460.
- [2] O'Brien D C, Zeng L B, Le-Minh H, *et al.* Visible light communications: Challenges and possibilities[C]. *IEEE 19<sup>th</sup> International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2008: 10410773.
- [3] Armstrong J, Green R J, Higgins M D. Comparison of three receiver designs for optical wireless communications using white LEDs[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(5): 748-751.
- [4] Nakagawa M, Tanaka Y, Komine T, *et al.* Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2003, 86(8): 2440-2454.
- [5] Sugiyama H, Haruyama S, Nakagawa M. Experimental investigation of modulation method for visible-light communications[J]. *IEITC Transactions on Communications*, 2006, 89(12): 3393-3400.
- [6] Sivabalan A, John J. Improved power distribution in diffuse indoor optical wireless systems employing multiple transmitter configurations[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2006, 38(8): 711-725.
- [7] Yang Y, Chen X B, Zhu L, *et al.* Design of indoor wireless communication system using LEDs[C]. *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, 2009: FF5.
- [8] Wu Z Y, Little T. Network solutions for the LOS problem of new indoor free space optical system[C]. *7<sup>th</sup> International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2010: 11535447.
- [9] Komine T, Nakagawa M. A study of shadowing on indoor visible-light wireless communication utilizing plural white LED lightings[C]. *1<sup>st</sup> International Symposium on Wireless Communication Systems*, 2004: 8382636.
- [10] Jia Kejun, Hao Li, Yu Caihong. Modeling of multipath channel and performance analysis of MIMO-ACO-OFDM system for indoor visible light communications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0706005.  
贾科军, 郝莉, 余彩虹. 室内可见光通信多径信道建模及 MIMO-ACO-OFDM 系统性能分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0706005.

- [11] Lee C G, Park C S, Kim J H, *et al.* Experimental verification of optical wireless communication link using high-brightness illumination light-emitting diodes[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(12): 125005.
- [12] Ding D Q, Ke X Z, Xu L P. An optimal lights layout scheme for visible-light communication system[C]. 8<sup>th</sup> International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2007: 9717000.
- [13] Wang Z X, Yu C Y, 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.
- [14] Wang Z X, Zhong W D, Yu C Y, *et al.* A novel LED arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user in visible light communication systems[C]. 8<sup>th</sup> International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS), 2011: 12654506.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Fagerhult Group. Lighting Standard EN12464-1[S/OL]. [2017-02-19]. <http://www.fagerhult.com/Support-center/Light-planning/EN-12464-1/>.
- [18] Liner A, Papes M, Jaros J, *et al.* Software design of optical link for indoor wireless optical communication network used LEDs as source visible light communication[C]. *SPIE*, 2015, 9387: 938710.
- [19] Bai J, Zhang X Y, Guo Y L. Different inertia weight PSO algorithm optimizing SVM kernel parameters applied in a speech recognition system[C]. *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2009: 11239594.
- [20] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. *Optical wireless communications: System and channel modelling with MATLAB*[M]. USA: CRC Press, 2012.