

# 激光与光电子学进展

## 基于小发散角 LED 的光源优化布局

赵太飞<sup>1,2\*</sup>, 马壮<sup>1</sup>, 李星善<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

<sup>2</sup>陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710000;

<sup>3</sup>湖北航天技术研究院总体设计所, 湖北 武汉 430040

**摘要** 光源布局是影响室内 LED 光通信照明和通信性能的关键因素之一。相比传统布局使用的大发散角朗伯型 LED, 小发散角 LED 具有反射面积小、中心光强度高优点。以小发散角 LED 为光源, 以最优光照度均匀性、最少 LED 数量为目标, 对正方形和长方形房间的光源布局进行了优化设计, 并分析了优化布局的系统性能。结果表明, 两种房间中优化布局的照度均匀率均大于 90%, 接收光功率均大于 -2 dBm。在正方形房间中将 LED 数量减少 16 个时, 用本方法优化后的系统性能优于传统布局, 平均光照度提高了 7.7%, 平均信噪比提高了 0.89 dB, 信噪比均方差降低了 0.04 dB。

**关键词** 光通信; 小发散角 LED; 光源布局; 光照度; 信噪比

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0106002

## Optimal Layout of Light Source Based on LED with Small Divergence Angle

Zhao Taifei<sup>1,2\*</sup>, Ma Zhuang<sup>1</sup>, Li Xingshan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

<sup>2</sup>Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

<sup>3</sup>System Research Institute of Hubei's Space Technology Academe, Wuhan, Hubei 430040, China

**Abstract** Light source layout is one of the key factors that affects indoor LED optical communication lighting and communication performance. Compared with the large divergence angle Lambertian LED used in the traditional layout, small divergence angle LED has the advantages of small reflection area and high central light intensity. This article uses LED with small divergence angle as light source, and aiming at the optimal uniformity of illumination and the minimum number of LEDs, the light source layout of square and rectangular rooms are optimized, and the system performance of the optimized layout is analyzed. The results show that the illuminance uniformity of the optimized layout in both rooms are greater than 90%, and the received optical power is also greater than -2 dBm. Moreover, in the square room, under the premise of reducing the number of LEDs by 16, the system performance is better than the traditional layout, the average illumination is improved by 7.7%, the average signal-to-noise ratio is improved by 0.89 dB, and the mean variance of signal-to-noise ratio is reduced by 0.04 dB.

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-05-29; 录用日期: 2020-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(61971345)、陕西省教育厅科研计划项(17-JF024)、西安市科学计划(CXY1835(4))、西安市碑林区科技计划(GX1921)、榆林市科技计划(2019-145)

\*E-mail: zhaotaifei@163.com

**Key words** optical communications; LED with small divergence angle; light source layout; illumination; signal-to-noise ratio

**OCIS codes** 060.4510; 060.2605; 230.3240

## 1 引言

LED 光通信是一种以 LED 为信号源、以光波为载波的高速无线通信技术,具有带宽大、无需频谱许可、传输速率快、保密性高、环保节能等优点。但受功率和传输距离的限制,LED 光通信通常应用于室内场景中,如室内定位、家庭物联网、智能工厂<sup>[1-4]</sup>。

室内白光 LED 通信需要兼顾照明和通信双重功能<sup>[5-8]</sup>,而 LED 光源的布局会直接影响照明亮度的均匀性以及通信的稳定性和可靠性,因此研究光源的布局具有重要意义。丁德强等<sup>[9]</sup>提出了以光功率方差为优化目标的光源布局模型,得出 4 光源阵列下光功率方差的最优结果。Do 等<sup>[10]</sup>分析了光源阵列中 LED 的发射方向对光照度、接收光功率、信噪比(SNR)等系统参数的影响。El-Garhy 等<sup>[11]</sup>对比了多种调制方式下多 LED 阵列的光功率,结果表明, $M$ 元可变脉冲位置调制(PPM)的效率是最高的。Gismalla 等<sup>[12]</sup>提出了一种光源布局均匀性的改进方法,仿真结果表明,该方法可以有效提高平均接收功率和 SNR。王丽等<sup>[13]</sup>设计了光源椭圆型布局,有效改善了长方形房间 LED 光通信系统的性能。赵黎等<sup>[14]</sup>构建了基于照度方差的优化函数,并设计了 4+1 的矩形布局方案。陈泉润等<sup>[15]</sup>提出了方阵+圆环布局模型,并通过功率分配改善了接收面照度的均匀性和 SNR。王加安等<sup>[16-17]</sup>以照度均方差作为评价标准,构建了矩形和圆形布局优化模型函数,并采用粒子群优化算法,设计了能耗最小的圆形布局方案。

上述光源优化布局中采用的 LED 均为朗伯发光模式,半功率角一般为  $60^\circ$  或  $70^\circ$ ,最大发散角为  $90^\circ$ ,属于大发散角 LED。相比大发散角 LED,小发散角 LED 具有中心亮度高、反射面积小等优点。因此,本文利用小发散角 LED 进行了光源优化布局,以最优光照度均匀性、最少 LED 数量为目标,设计了小发散角 LED 光源优化布局方案。实验结果表明,在正方形和长方形房间中,本优化方案均能取得良好的照明和通信效果;且相比传统布局方案,在使用更少数量 LED 的前提下,本方案在正方形房间的系统性能更好。

## 2 室内光照度分析

### 2.1 光照度建模

研究室内 LED 光通信光源的布局时,需要考虑房间的尺寸、接收端的位置等参数,因此,首要任务是建立室内平面模型。图 1 为室内平面模型,其中,LED 光源分布在天花板上。根据绝大多数家用卧室和办公室的房间尺寸,将天花板的高度设为 3 m;考虑到部分家具的高度(如办公桌),将光电二极管(PD)所在的接收平面与地板的距离设为 0.85 m。

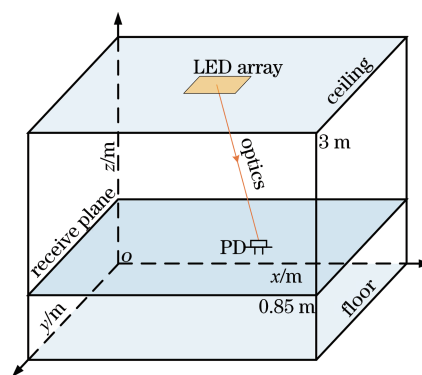


图 1 室内平面模型

Fig. 1 Model of the indoor plane

室内 LED 光通信是在保证室内照明的前提下进行通信,为了保护人眼的健康,同时满足眼睛的视觉亮度需求,国际标准化组织(ISO)关于室内照明的相关规定表明,室内光照度必须在 300~1500 lx 之间<sup>[18]</sup>。为了准确分析室内光照度,需对光照度进行建模,图 2 为光照度分析模型。

通过 LED 的发光强度得到 LOS(Line-of-sight)

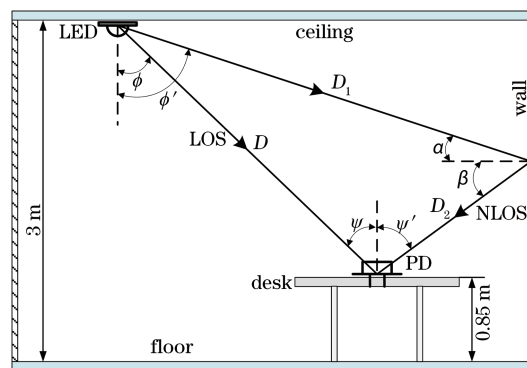


图 2 光照度分析模型

Fig. 2 Model of the illuminance analysis

链路的光照度为

$$E_{\text{LOS}} = I_0 R(\phi) \cos \psi / D^2, \quad (1)$$

式中,  $I_0$  为 LED 的中心发光强度,  $R(\phi)$  为表征发光模式的相对发光强度分布函数,  $\phi$  为 LED 的辐射角,  $\psi$  为 PD 的入射角,  $D$  为 LED 到 PD 的距离。

叠加两次 LOS 链路可得到一次反射 NLOS (Non-line-of-sight) 链路的光照度为

$$E_{\text{NLOS}} = \int_{X_{\text{wall}}} \frac{\rho I_0 R(\phi') \cos \alpha \cos \beta \cos \psi'}{\pi D_1^2 D_2^2} dA_{\text{wall}}, \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为墙面的反射系数,  $\alpha$  为反射点的入射角,  $\beta$  为反射点的辐射角,  $dA_{\text{wall}}$  为微分反射面元,  $D_1$  为 LED 到反射点的距离,  $D_2$  为反射点到 PD 的距离,  $\phi'$  为 LED 照射至反射点的辐射角,  $\psi'$  为 PD 接收反射点反射光的入射角,  $X_{\text{wall}}$  为所有墙面的面积。

接收平面的总光照度可表示为

$$E = \sum (E_{\text{LOS}} + E_{\text{NLOS}}). \quad (3)$$

### 2.2 光照度均匀性

照明是室内 LED 光通信的前提, 因此设计的 LED 光源阵列需满足人们对各种场合下的亮度要求; 同时还要使接收平面光照度分布更加均匀, 从而有效提高照明的安全性和通信的可靠性。因此, 需要一个衡量光照度均匀性的参数。均方差可以用来衡量样本的波动程度, 室内光照度的均方差  $M_E$  可表示为

$$M_E = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^S (E_k - \bar{E})^2}{S}}, \quad (4)$$

式中,  $E_k$  为各微分面元的光照度,  $\bar{E}$  为接收平面的平均光照度,  $S$  为微分面元总数。

多 LED 阵列布局的光照度均方差通常比单 LED 阵列布局小, 即亮度更均匀。但多 LED 阵列相当于多个通信发射端, 导致同一个接收器可能会接收到多个 LED 阵列的光信号。不同 LED 到达接收器的光程差不同, 进而产生码间干扰, 降低通信系统的性能。因此, LED 的数量既要满足照明亮度的要求, 又要考虑对通信性能的影响。可以用照度均匀率 (IUR) 作为室内亮度均匀性的评判标准, 可表示为

$$X_{\text{IUR}} = \frac{E_{\text{mean}}}{E_{\text{max}}} \times 100\%, \quad (5)$$

式中,  $E_{\text{mean}}$  为接收平面的平均光照度,  $E_{\text{max}}$  为接收平面的最大光照度。

### 2.3 传统布局光照度分析

传统光源布局方案中, 房间形状一般为正方

形, 尺寸为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ , LED 阵列  $N \times N$  的方阵, 如图 3 所示。可以看出, 室内接收平面的光照度主要受阵列中 LED 的数量  $N \times N$ , 阵列边缘与房间边缘墙壁的距离  $L$ , 阵列中每个 LED 间隔距离  $i$  的影响。

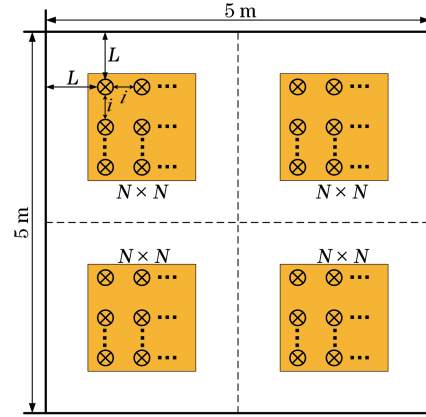


图 3 传统方阵布局 LED 阵列分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of traditional square matrix layout LED array distribution

传统光源布局方案的仿真参数如表 1 所示, 其中, LED 为朗伯发光模式, PD 放置在接收平面且方向垂直向上, 仿真时仅考虑 LOS 链路和一次反射 NLOS 链路的光照度。

表 1 传统布局的仿真参数

Table 1 Simulation parameter of traditional layout

Parameter	Value
Single optical power/W	0.5
Half power angle/(°)	60
Center luminous intensity/cd	21.5
Photodiode responsivity/( $\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$ )	0.53
Refractive index of a lens at a PD	1.5
Field of view at receiver/(°)	70
Photosensitive area size of PD/ $\text{cm}^2$	1
Gain of an optical filter	1
Noise bandwidth factor	0.562
Reflectivity of wall	0.8
Background noise current/ $\text{mA}$	0.62
Load resistance / $\text{k}\Omega$	10
Equivalent noise bandwidth /MHz	200

当  $N = 8, L = 1 \text{ m}, i = 0.04 \text{ m}$  时<sup>[15]</sup>, 传统方阵布局在满足室内照明标准规定的同时, 接收平面光照度的均匀性最优, 此时光照度分布如图 4 所示。其中, 光照度的最小值为  $372.39 \text{ lx}$ , 最大值为  $551.23 \text{ lx}$ , 平均值为  $507.68 \text{ lx}$ , 均方差为  $23.64 \text{ lx}$ ,

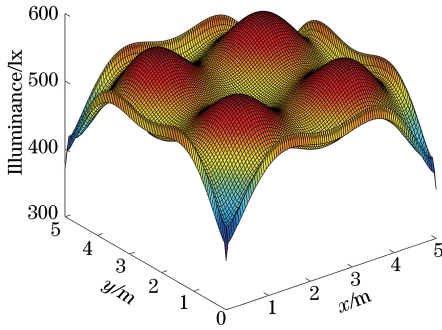


图 4 传统方阵布局的最优光照度分布  
Fig. 4 Optimal illuminance distribution of traditional square array layout

照度均匀率为 92.1%。

### 3 小发散角 LED

#### 3.1 小发散角 LED 的发光模式及优点

小发散角 LED 的发光模式也被称为类高斯模式<sup>[19]</sup>,根据 LED 光子辐射机理可将小发散角 LED 的相对辐射强度分布函数  $R(\phi)$  用高斯函数描述为

$$R(\phi) = \sum_{i=1}^N a_i \times \exp\left[-\left(\frac{\phi - b_i}{c_i}\right)^2\right], \quad (6)$$

式中,  $a_i, b_i, c_i$  为与 LED 相对光强度分布有关的常数。

类高斯型 LED 的光束发散角较小,典型的发散角有  $7^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  等。类高斯型 LED 在室内光通信方面的优点:类高斯型 LED 的中心光照度在辐射光通量相等的情况下远远大于朗伯型 LED (照明方面);类高斯型 LED 辐射的光束基本照射不到墙面上,几乎不存在反射导致的非直视链路

(通信方面)。因此,PD 接收到的光信号绝大部分来自于直视链路,从而大幅度减小反射引起的多径效应。

#### 3.2 类高斯型 LED 参数

实验设计的优化布局方案中使用类高斯型 LED,而传统布局方案中使用朗伯型 LED,为了对布局方案的性能进行对比,假设类高斯型 LED 和朗伯型 LED 的光功率和光通量相同。由表 1 可知,传统布局方案中朗伯型 LED 的参数:光功率为 0.5 W,中心光强度为 21.5 cd,半功率角为  $60^\circ$ ,其光通量  $\Phi$  可表示为<sup>[17]</sup>

$$\Phi = \frac{2\pi}{m+1} I_0, \quad (7)$$

式中,  $m$  为朗伯辐射阶数,由半功率角可知  $m=1$ 。将  $I_0, m$  代入 (7) 式,得到朗伯型 LED 的光通量为 67.54 lm。

考虑到一般房间的尺寸和各种类高斯型 LED 的辐射面积,选用两种类高斯型 LED,分别为 TO-39 封装、发散角为  $15^\circ$  的 LED 和 2835 封装、发散角为  $30^\circ$  的 LED。 $15^\circ$  发散角 LED 的发光模式  $R_{15}(\phi)$  和  $30^\circ$  发散角 LED 的发光模式  $R_{30}(\phi)$  可表示为

$$R_{15}(\phi) = \sum_{i=1}^4 a_{i,15} \times \exp\left[-\left(\frac{\phi - b_{i,15}}{c_{i,15}}\right)^2\right], \quad (8)$$

$$R_{30}(\phi) = \sum_{i=1}^6 a_{i,30} \times \exp\left[-\left(\frac{\phi - b_{i,30}}{c_{i,30}}\right)^2\right], \quad (9)$$

式中,

$$\begin{aligned} a_{i,15} &= [7.166; -6.546; 0.3432; 0.2632] \\ b_{i,15} &= [0.01682; 0.01735; -0.03435; -1.694 \times 10^5] \\ c_{i,15} &= [0.02964; 0.02861; 0.02758; 0.2012] \\ a_{i,30} &= [-5.206; -9.579; -0.512; -0.7179; 0.2808; 14.76] \\ b_{i,30} &= [-0.1023; 0.002643; -0.07442; -0.2072; 0.2987; -0.03845] \\ c_{i,30} &= [0.1409; 0.1585; 0.2381; 0.1104; 0.1053; 0.1855] \end{aligned} \quad (10)$$

假设  $15^\circ, 30^\circ$  两种类高斯型 LED 的光通量都为 67.54 lm,其中心光强度可通过光通量和发光模式表示为

$$I_0 = \frac{\Phi}{2\pi \int_0^{\theta_{1/2}} R(\phi) \sin \phi d\phi}, \quad (11)$$

式中,  $\theta_{1/2}$  为 LED 的最大光束半角,根据两种 LED 的实际相对光强度分布,可分别设为  $\pi/9, \pi/6$ 。将

对应的  $\theta_{1/2}$  和相对发光强度分布函数  $R(\phi)$  代入 (10) 式,得到  $15^\circ, 30^\circ$  发散角 LED 的中心光强分别为 1843.02 cd, 241.11 cd。

## 4 类高斯型 LED 的光源优化布局

#### 4.1 光源优化布局设计

考虑到房间的形状为对称的正方形或长方形,

为了简化光源的布局设计,采用对称设计的思想。光源布局为四阵列布局方式。将接收平面平分成四个小区域,每个小区域放置一个LED阵列,对一个阵列进行设计,其他阵列进行对称设计,即可得到完整的室内光源布局。以最优光照度均匀性、最少LED数量为优化目标,对类高斯型LED光源布

局进行优化设计,具体的设计思路如下。

1) 估计单个阵列的LED数量。根据类高斯型LED的辐射面积、光照度分布和室内接收面积等参数,对光源阵列所需的LED数量进行估计,得到15°、30°发散角类高斯型LED辐射示意图,如图5所示。

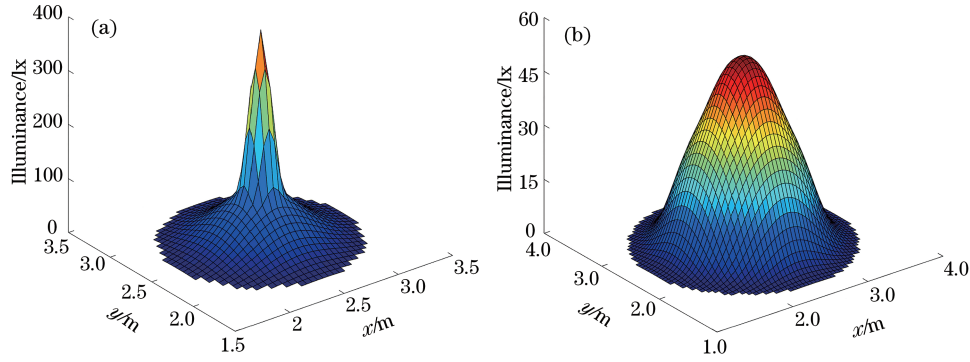


图5 不同发散角下类高斯型LED的辐射示意图。(a)15°;(b)30°

Fig. 5 Radiation diagram of Gaussian-like LED under different divergence angles. (a) 15°; (b) 30°

从图5可以看出,15°发散角LED的中心光照度较高,光照度变化剧烈;30°发散角LED的中心光照度相对较低,光照度变化缓慢,辐射面积相对较大。根据两种LED的光照度分布情况,用15°发散角LED提高房间角落处的光照度,用30°发散角LED作为阵列中的主要光源。30°发散角LED的辐射中心光照度为52.15 lx,辐射面积约为4.83 m<sup>2</sup>,辐射面积内的平均光照度为13.97 lx。由于30°发散角LED的辐射边缘光照度较低,如果将光照度小于5 lx的区域视为无效区域,则30°发散角LED的有效辐射面积约为2.71 m<sup>2</sup>。通过30°发散角LED的平均辐射光照度、有效辐射面积、室内光照度要求和室内接收面积,可大致计算出单个阵列的LED数量。

2) 调整阵列中LED的发射方向。与传统朗伯型LED阵列不同,类高斯型LED阵列中LED的发射方向不能垂直向下。原因是类高斯型LED的发散角较小,发射方向垂直向下会导致光源阵列辐射范围有限,无法照亮室内的全部面积,因此需要调整LED的发射方向。定义LED的发射角为LED中心法线与天花板平面法线的夹角,其中,LED的发射角可用LED中心法线照射到接收平面的坐标(x, y)描述,如图6所示。LED发射角的调整过程:首先,结合单个阵列LED的数量和接收平面区域的形状,对光源阵列的形状进行等比例设计;然后,调整LED的发射角,使LED中心法线的坐标(x, y)平分接收区域;最后,根据接收区域光照度分布和光

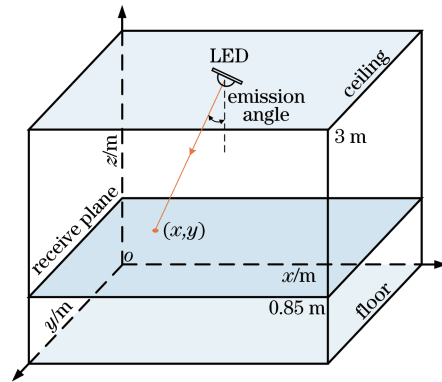


图6 LED发射角示意图

Fig. 6 Schematic diagram of LED emission angle

照度均匀性,动态调整LED的发射角,尽可能地使光照度均匀性最高。

3) 对LED阵列进行更细致的优化,得到最优的光源布局。根据接收区域的光照度分布,对步骤1)和步骤2)得到的阵列进行优化。对于光照度较低的区域,添加新的LED对其进行光照度补偿;对于光照度较高的地方,调整LED的发射角或删除对应的LED。最后,对光源阵列整体进行细微调整,使光照度的均匀性达到最优。

#### 4.2 传统正方形房间优化布局及光照度

对正方形房间的光源布局进行优化设计时,首先将5 m×5 m的接收平面平分成四个小区域,每个小区域的面积为6.25 m<sup>2</sup>。单个30°发散角LED的辐射面积平均光照度为13.97 lx,平均光照度达到

300 lx 时至少需要 21 个 LED; 单个 30° 发散角 LED 的有效辐射面积约为 2.71 m<sup>2</sup>, 照亮一个小区域至少需要 2.3 个 LED。理论上, 一个小区域光照度满足要求时单个 LED 阵列至少需要 49 (21 × 2.3 = 48.3) 个 LED。考虑到 LED 斜射的路径损耗和墙面吸收, 单个阵列至少需要 50 个 30° 发散角 LED。根据计算的 LED 数量和区域形状, 首先设计了 7 × 7 的 49 个 30° 发散角 LED 正方形光源阵列, 并外加 1 个指向角落的 15° 发散角 LED。然后根据光照度分布, 添加适当数量的 LED, 再进行优化调整, 从而得到最优的正方形房间布局。

最终的优化布局参数: 光源阵列排列成正方形; 单个阵列使用 60 个 LED, 包括 1 个 15° 发散角 LED 和 59 个 30° 发散角 LED; 四个光源阵列的坐标 (x, y, z) 分别为 (1.25, 1.25, 3)、(3.75, 1.25, 3)、(1.25, 3.75, 3)、(3.75, 3.75, 3)。正方形房间的 LED 阵列分布如图 7 所示。

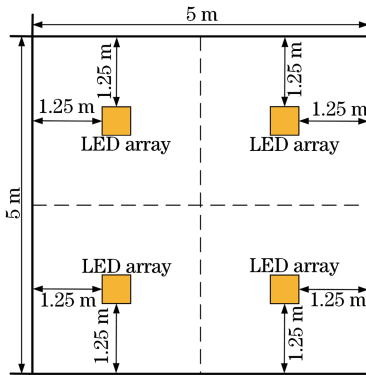


图 7 正方形房间 LED 阵列分布示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the LED array distribution in a square room

设坐标 (x, y, z) 为 (1.25, 1.25, 3) 的阵列为 1 号阵列, 以 1 号阵列为例, 介绍光源阵列中每个 LED 的发射方向。1 号阵列中 59 个 30° 发散角 LED 中的 49 个中心法线坐标 (x, y) 可用  $x_{rz} \times y_{rz}$  的 7 × 7 矩阵表示, 其中

$$x_{rz} = [0, 0.2, 0.45, 1.1, 1.65, 2.2, 2.5],$$

$$y_{rz} = [0, 0.2, 0.45, 1.1, 1.65, 2.2, 2.5]。 \quad (12)$$

4 个 LED 阵列的坐标为 (1.25, 1.25); 2 个 LED 阵列的坐标分别为 (1.25, 2.5)、(2.5, 1.25); 2 个 LED 阵列的坐标为 (0, 1.25); 2 个 LED 阵列的坐标为 (1.25, 0)。1 个 15° 发散角 LED 的中心法线坐标为 (0, 0)。1 号阵列 LED 的中心法线坐标 (x, y) 如图 8 所示, 图中 1、2、4 表示中心法线指向该位置的

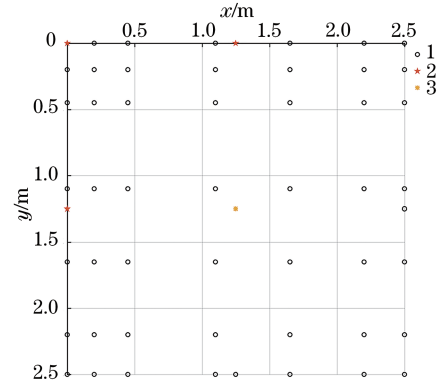


图 8 正方形房间 1 号阵列 LED 中心的法线坐标图

Fig. 8 Normal coordinate map of the LED center of the No. 1 array in a square room

LED 个数, 其他 3 个阵列中 LED 的发射方向与 1 号阵列呈对称分布。

图 9 为传统正方形房间优化布局后接收平面的光照度分布, 其中, 接收平面的光照度最小值为 479.11 lx, 最大值为 599.12 lx, 平均值为 546.60 lx, 均方差为 24.47 lx, 照度均匀率为 91.2%。相比传统布局, 本方案设计的优化布局虽然照度均匀率略低, 但提升了室内的整体光照度强度。光照度的最小值增加了 106.72 lx, 最大值增加了 47.89 lx, 平均值增加了 38.92 lx。优化布局中使用的 LED 总数为 240 个, 比传统布局少了 16 个。这表明本方案的优化布局设计可降低系统的功耗, 减缓码间干扰效应, 提高室内 LED 光通信系统的可靠性。

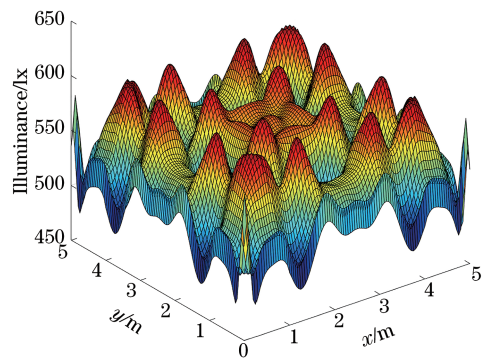


图 9 正方形房间接收平面的光照度分布

Fig. 9 Illuminance distribution of receiving plane in square room

传统布局中使用的朗伯型 LED 发散角较大, 属于半面发光, 其辐射的总能量中有很大一部分经过 LOS 链路和一次反射 NLOS 链路到达接收平面, 还有一部分被墙面等其他反射面吸收, 或经过多次 NLOS 链路传播衰减后无法到达接收平面; 本方案设计的优化布局采用小发散角 LED, 只有光源阵列

外侧的一部分 LED 会照射到四周墙壁,且照射的墙壁面积也相对较小,很大程度上减少了因反射面吸收和多次 NLOS 链路损耗造成的能量浪费,即光源的绝大部分能量可通过 LOS 链路直接到达接收平面。因此,相比传统布局,类高斯型 LED 光源优化布局可使用更少数量的 LED 实现光照度强度更高的室内照明。

### 4.3 长方形房间优化布局及光照度分析

目前,人们对室内光源布局的研究集中在对称的正方形房间,对长方形房间的研究较少。实验通过分析接收平面的光照度最小值、均方差和照度均匀率等参数,探讨类高斯型 LED 优化布局在长方形房间中的适应性。

假设长方形房间的尺寸为  $6\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$ ,将接收平面平分成四个尺寸为  $3\text{ m} \times 2\text{ m}$  的小区域,阵列设置在区域对应的中心位置。光源布局设计过程类似于正方形房间,考虑到长方形小区域的面积略小于正方形房间,其长宽比例为 3:2,因此直接设计了 54( $9 \times 6$ ) 个  $30^\circ$  发散角 LED 长方形光源阵列。最终的优化布局参数:阵列的形状为长方形;单个阵列共包含 55 个 LED (1 个  $15^\circ$  发散角 LED 和 54 个  $30^\circ$  发散角 LED);4 个 LED 阵列的坐标  $(x, y, z)$  分别为  $(1.5, 1, 3)$ 、 $(4.5, 1, 3)$ 、 $(1.5, 3, 3)$ 、 $(4.5, 3, 3)$ 。长方形房间 LED 阵列分布如图 10 所示。

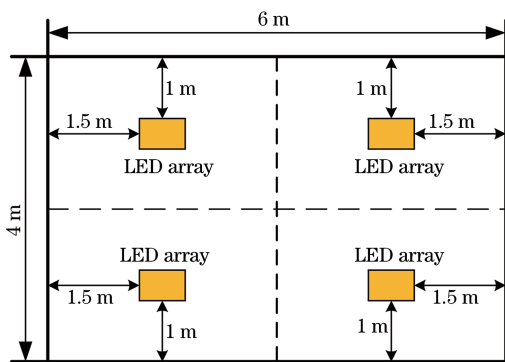


图 10 长方形房间 LED 阵列分布示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the distribution of LED arrays in a rectangular room

设  $(x, y, z)$  为  $(1.5, 1, 3)$  的阵列为 1 号阵列,1 号阵列中  $15^\circ$  发散角 LED 的中心法线坐标  $(x, y)$  为  $(0, 0)$ ,54 个  $30^\circ$  发散角 LED 的中心法线坐标  $(x, y)$  可用  $x_{rc} \times y_{rc}$  的  $9 \times 6$  矩阵表示,其中

$$\begin{aligned} x_{rc} &= [0, 0.25, 0.6, 1, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6, 3] \\ y_{rc} &= [0, 0.3, 0.7, 1.15, 1.6, 2] \end{aligned} \quad (13)$$

1 号阵列 LED 中心法线坐标  $(x, y)$  如图 11 所示,图中 1、2 表示中心法线指向该位置的 LED 个数,其他 3 个阵列中 LED 的发射方向与 1 号阵列呈对称分布。

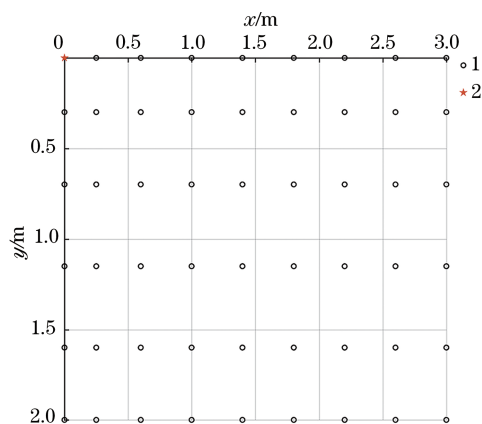


图 11 长方形房间 1 号阵列 LED 中心的法线坐标图

Fig. 11 Normal coordinate map of the LED center of the No. 1 array in a rectangular room

图 12 为长方形房间优化布局接收平面光照度分布,其中,接收平面光照度的最小值为  $438.67\text{ lx}$ ,最大值为  $600.52\text{ lx}$ ,平均值为  $542.91\text{ lx}$ ,均方差为  $35.12\text{ lx}$ ,均匀照度率为  $90.4\%$ 。可以发现,长方形房间光源优化布局下室内接收平面同时满足光照度强度和均匀性的要求,这表明通过合理的调整 LED 阵列的形状、位置等参数,类高斯型 LED 光源布局同样适用于长方形房间。

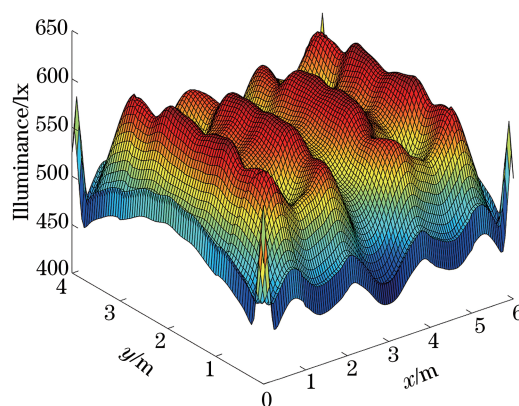


图 12 长方形房间的接收平面光照度分布

Fig. 12 Illuminance distribution of receiving plane in rectangular room

## 5 优化布局通信性能分析

### 5.1 接收光功率分析

LOS 链路的直流增益  $H(0)$  可表示为<sup>[19]</sup>

$$H(0) = \begin{cases} \frac{A_R \cos \psi}{2\pi D^2 \int_0^{\theta_{1/2}} R(\phi) \sin \phi d\phi} R(\phi) T_s(\psi) g(\psi), & 0 \leq \psi \leq X_{FOV} \\ 0, & \psi > X_{FOV} \end{cases}, \quad (14)$$

式中,  $A_R$  为 PD 的感光面积,  $X_{FOV}$  为 PD 的接收视场角,  $T_s(\psi)$  为光学滤波器的增益,  $g(\psi)$  为光学聚焦透镜的增益。

单个反射点一次反射 NLOS 链路的直流增益  $dH_{NLOS}(0)$  可表示为

$$dH_{NLOS}(0) = \begin{cases} \frac{\rho A_R \cos \psi \cos \alpha \cos \beta}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2 \int_0^{\theta_{1/2}} R(\phi) \sin \phi d\phi} R(\phi) T_s(\psi) g(\psi) dA_{wall}, & 0 \leq \psi \leq X_{FOV} \\ 0, & \psi > X_{FOV} \end{cases}. \quad (15)$$

接收平面处 PD 的接收光功率  $P_r$  可通过对所有 LED 发射光功率  $P_t$  求和得到

$$P_r = \sum P_t \left[ H(0) + \int_{x_{wall}} dH_{NLOS}(0) \right]. \quad (16)$$

对于传统光源布局, 当接收平面的光照度性能最优, 即  $N=8, L=1\text{ m}, i=0.04\text{ m}$  时, 接收平面的光功率分布如图 13 所示。其中, 最小接收光功率为  $-2.97\text{ dBm}$ , 最大接收光功率为  $-0.98\text{ dBm}$ , 平均接收光功率为  $-1.44\text{ dBm}$ 。

对于类高斯型 LED 优化布局, 当正方形房间和长方形房间光照度性能最优时, 接收平面的光功率分布如图 14 所示。其中, 正方形房间的最小接收光功率为  $-1.51\text{ dBm}$ , 最大接收光功率为  $-0.24\text{ dBm}$ , 平均接收光功率为  $-0.72\text{ dBm}$ ; 长方形房间的最小接收光功率为  $-1.73\text{ dBm}$ , 最大接收光功率为  $-0.14\text{ dBm}$ , 平均接收光功率为  $-0.64\text{ dBm}$ 。

为了保证通信性能, 室内 LED 光通信系统通常要求接收光功率大于  $-2\text{ dBm}$ <sup>[20]</sup>。从图 13 可以看

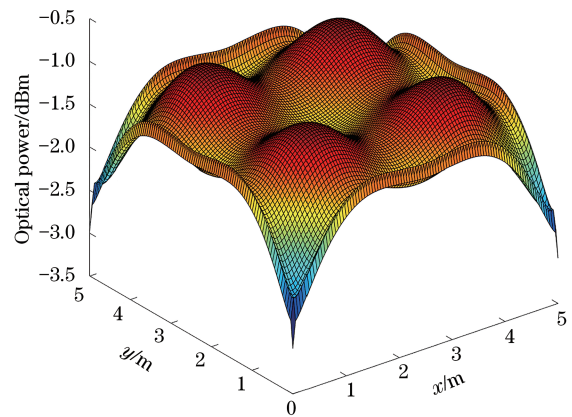


图 13 传统布局的接收平面光功率分布

Fig. 13 Optical power distribution on the receiving plane of the traditional layout

出, 传统布局在房间四个角落的接收光功率较低, 小于  $-2\text{ dBm}$ , 即房间角落处存在通信盲区。而优化布局的正方形和长方形房间接收平面最小光功率均大于  $-2\text{ dBm}$ , 不存在通信盲区, 这表明用本方案优化设计后的系统通信性能更好。

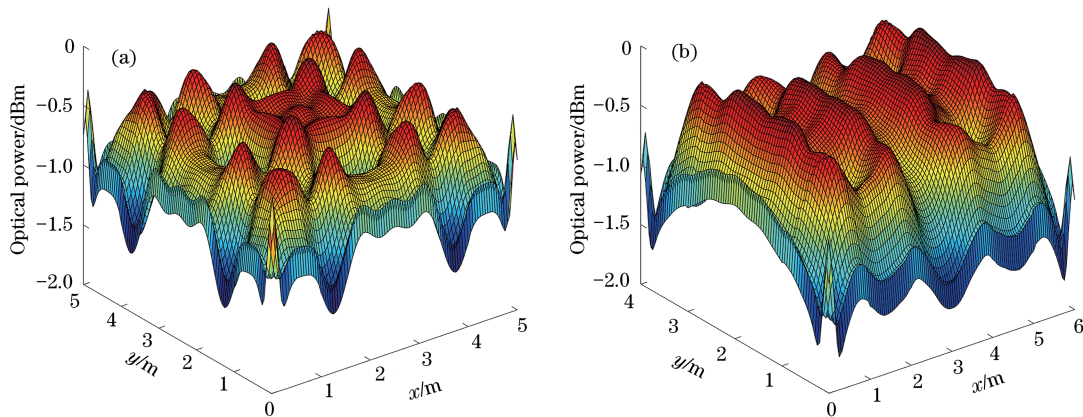


图 14 类高斯型 LED 优化布局的接收平面光功率分布。(a) 正方形房间; (b) 长方形房间

Fig. 14 Optical power distribution on the receiving plane of Gaussian-like LED optimized layout. (a) Square room; (b) rectangular room



### 5.2 信噪比分析

室内 LED 光通信系统中的噪声来源主要有三种:散粒噪声、热噪声和放大器噪声,这三种噪声均可以视为加性高斯白噪声。散粒噪声  $\delta_{\text{shot}}^2$  可表示为

$$\delta_{\text{shot}}^2 = 2q\gamma P_r B + 2qI_{\text{dc}} B, \quad (17)$$

式中,  $q$  为电子电荷量,  $\gamma$  为 PD 的响应度,  $P_r$  为接收光功率,  $B$  为等效噪声带宽,  $I_{\text{dc}}$  为 PD 暗电流。放大器噪声  $\delta_{\text{amplifier}}^2$  可表示为

$$\delta_{\text{amplifier}}^2 = I_a^2 B_a, \quad (18)$$

式中,  $I_a$  为放大器电流的噪声密度,  $B_a$  为放大器的带宽。热噪声  $\delta_{\text{thermal}}^2$  可表示为

$$\delta_{\text{thermal}}^2 = \frac{4kT}{R_L} B, \quad (19)$$

式中,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为热力学温度,  $R_L$  为负载电阻。室内 LED 光通信系统的信噪比  $R_{\text{SN}}$  可表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{\gamma^2 P_r^2}{\delta_{\text{shot}}^2 + \delta_{\text{amplifier}}^2 + \delta_{\text{thermal}}^2}. \quad (20)$$

图 15 为传统布局光照度最优时接收平面的信噪比分布,其中,信噪比的最小值为 17.85 dB,最大值为 20.3 dB,平均值为 19.74 dB,均方差为 0.32 dB。

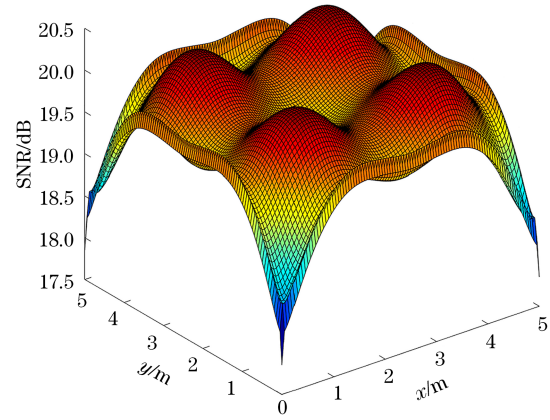


图 15 传统布局的接收平面 SNR 分布

Fig. 15 SNR distribution on the receiving plane of the traditional layout

图 16 为类高斯型 LED 优化布局光照度最优时接收平面的信噪比分布,其中,正方形接收平面的信噪比最小值为 19.66 dB,最大值为 21.17 dB,平均值为 20.61 dB,均方差为 0.28 dB。相比传统布局,优化布局不仅提升了接收平面的整体信噪比强度,且信噪比的波动范围较小。长方形接收平面的信噪比最小值为 19.28 dB,最大值为 21.28 dB,平均值为 20.67 dB,均方差为 0.39 dB。

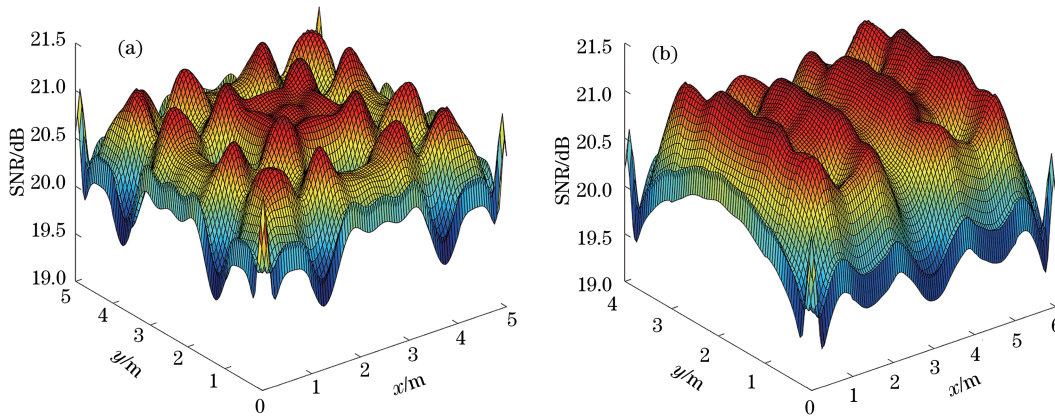


图 16 类高斯型 LED 优化布局的接收平面 SNR 分布。(a) 正方形房间; (b) 长方形房间

Fig. 16 SNR distribution on the receiving plane of Gaussian-like LED optimized layout. (a) Square room; (b) rectangular room

### 5.3 误码率分析

假设室内 LED 光通信系统采用最简单的开关键控(OOK)调制方式,则系统的误码率(BER)可表示为

$$R_{\text{BE}} = Q(\sqrt{R_{\text{SN}}}), \quad (21)$$

其中,  $Q(x)$  函数可表示为

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{\exp(-y^2/2)}{\sqrt{2\pi}} dy. \quad (22)$$

图 17 为传统布局光照度最优时接收平面的

BER 分布,其中,最小误码率为  $3.31 \times 10^{-6}$ ,最大误码率为  $1.19 \times 10^{-5}$ ,平均误码率为  $4.5 \times 10^{-6}$ 。

图 18 为类高斯型 LED 优化布局光照度最优时接收平面的误码率分布,其中,正方形接收平面的最小误码率为  $2.1 \times 10^{-6}$ ,最大误码率为  $4.62 \times 10^{-6}$ ,平均误码率为  $2.85 \times 10^{-6}$ 。可以发现,优化布局误码率的性能明显优于传统布局。长方形接收平面的最小误码率为  $1.98 \times 10^{-6}$ ,最大误码率为  $5.31 \times 10^{-6}$ ,平均误码率为  $2.75 \times 10^{-6}$ 。

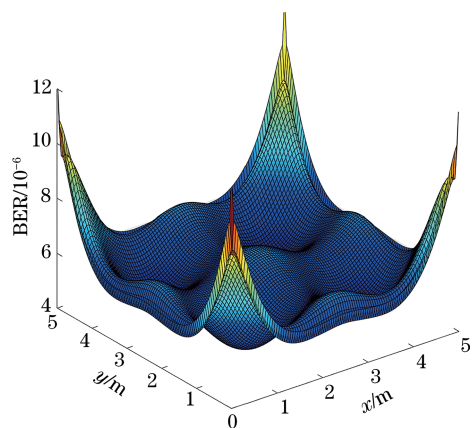


图 17 传统布局的接收平面 BER 分布

Fig. 17 BER distribution on the receiving plane of the traditional layout

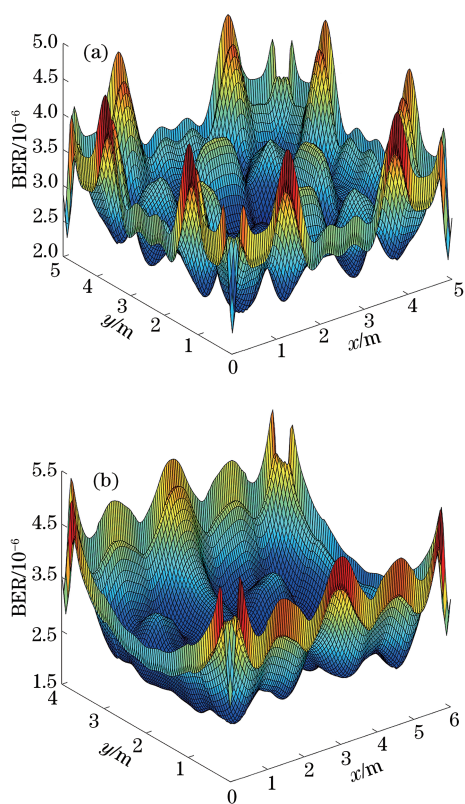


图 18 类高斯型 LED 优化布局的接收平面 BER 分布。  
(a) 正方形房间; (b) 长方形房间

Fig. 18 BER distribution on the receiving plane of Gaussian-like LED optimized layout. (a) Square room; (b) rectangular room

## 6 结 论

主要研究了基于小发散角类高斯型 LED 的光源优化布局, 根据类高斯型 LED 的特点, 设计了 LED 阵列, 优化了正方形房间和长方形房间的光源布局, 并对优化布局的照明性能及通信性能进行了仿真分析。仿真结果表明, 基于类高斯型 LED 阵列

的优化布局具有很好的适应性, 在正方形和长方形房间中都取得了良好的照明和通信效果。照明方面, 在满足光照度强度要求的同时, 照度均匀率都大于 90%; 通信方面, 正方形和长方形接收平面最小光功率均大于 -2 dBm, 两种房间内都不存在通信盲区。且在正方形房间中, 相比传统布局, 优化布局使用的 LED 数量减少了 16 个, 降低了系统的码间干扰和能耗, 并改善了光照度、接收光功率、信噪比和误码率等系统性能。

## 参 考 文 献

- [1] Wu N, Feng L H, Yang A Y. Localization accuracy improvement of a visible light positioning system based on the linear illumination of LED sources[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1-11.
- [2] Chen C W, Wang W C, Wu J T, et al. Visible light communications for the implementation of internet-of-things[J]. Optical Engineering, 2016, 55(6): 060501.
- [3] Chang S H. A visible light communication link protection mechanism for smart factory [C]//2015 IEEE 29th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, March 24-27, 2015, Gwangju, South Korea. New York: IEEE, 2015: 733-737.
- [4] Chi N, Lu X Y, Wang C, et al. High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.  
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [5] Min C Y, Chen X B, Mao X R, et al. A novel method for constructing VLC equalizer with active-passive hybrid network [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1-10.
- [6] Pan T H, Chen X B, Min C Y, et al. Design of visible light-based internet of things terminal under ultralow illumination conditions [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0706003.  
潘天豪, 陈雄斌, 闵成彧, 等. 超低照度下的可见光物联网终端设计[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0706003.
- [7] Azizan L A, Ab-Rahman M S, Hassan M R, et al. Optimization of signal-to-noise ratio for wireless light-emitting diode communication in modern lighting layouts[J]. Optical Engineering, 2014, 53(4): 1031-1039.
- [8] Sharma R, Kumari A C. Performance analysis of rectangular and circular shape building deployment

- for an indoor visible light communication system[J]. International Journal of Computer Network and Information Security, 2017, 9(7): 11-19.
- [9] Ding D Q, Ke X Z, Li J X. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system[J]. Opto-Electronic 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.
- [10] Do T H, Hwang J, Yoo M. Analysis of the effects of LED direction on the performance of visible light communication system [J]. Photonic Network Communications, 2013, 25(1): 60-72.
- [11] El-Garhy S M, Fayed H, Aly M H. Power distribution and BER in indoor VLC with PPM based modulation schemes: a comparative study[J]. Optical and Quantum Electronics, 2019, 51(8): 1-10.
- [12] Gismalla M S M, Abdullah M F L, Niass M I, et al. Improve uniformity for an indoor visible light communication system [J]. International Journal of Communication Systems, 2020, 33(8): e4349.
- [13] Wang L, Guo M T, Tian H. 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.
- [14] Zhao L, Peng K. Optimization of light source layout in indoor visible light communication based on white light-emitting diode [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0706001.  
赵黎, 彭恺. 基于白光发光二极管的室内可见光通信光源布局优化[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0706001.
- [15] Chen Q R, Zhang T. Light source layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0406003.  
陈泉润, 张涛. 室内可见光通信系统的光源布局优化及性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0406003.
- [16] Wang J A, Che Y, Lü C, et al. LED layout for indoor visible light communication based on energy optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0806003.  
王加安, 车英, 吕超, 等. 基于能量最优的室内可见光通信 LED 布局 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0806003.
- [17] Wang J A, Che Y, Guo L Y, et al. LED layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506002.  
王加安, 车英, 郭林扬, 等. 室内可见光通信系统光源 LED 布局优化与性能分析[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506002.
- [18] Yuan Q. CIE standard lighting: lighting indoor workplaces[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2002, 13(4): 55-60.  
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, 13(4): 55-60.
- [19] Zhao T F, Ma Z, Li X S, et al. Research on line-of-sight channel model of short-range LED optical communication[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(1): 0106001.  
赵太飞, 马壮, 李星善, 等. 近距离 LED 光通信直视信道模型研究[J]. 光子学报, 2020, 49(1): 0106001.
- [20] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab [M]. NW, Boca Raton: CRC Press, 2012.