

室内可见光通信系统光源 LED 布局优化与性能分析

王加安, 车英, 郭林炆, 王馨兰

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 在室内可见光通信系统(VLC)中,为解决传统光源布局方式中因照度分布不均匀而存在通信盲区的问题,提出考虑墙面反射的光源 LED 优化方案。以照度均方差作为评价标准分析 LED 布局,通过积分推导出接收面照度和功率的表达式,构建了矩形布局优化模型函数 $F(l, x, y)$ 和圆形布局优化模型函数 $F(r, x, y)$,并根据优化函数研究了照度均方差与房间尺寸、最佳布局与视场角的关系。仿真结果表明:LED 矩形布局光源的位置存在最优值 $l=1.6$ m,视场角为 $\psi_{\text{FOV}}=80^\circ$,照度均匀性由传统布局的 80.5% 提升到 84.3%;圆形布局光源的位置存在最优半径 $r=2$ m,视场角为 $\psi_{\text{FOV}}=80^\circ$,当 LED 位于最优半径时,圆形布局的照度均匀性随着光源 LED 数量的增加由 85.2% 增加到 89.2%。

关键词 光通信; 室内; 可见光通信; 照度均方差; 发光二极管; 矩形布局; 圆形布局

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0506002

LED Layout Optimization and Performance Analysis of Indoor Visible Light Communication System

Wang Jiaan, Che Ying, Guo Linyang, Wang Xinlan

School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Jilin, Changchun 130022, China

Abstract The traditional LED layout has the problem of uneven illumination in indoor visible light communication (VLC) system, which brings blind effect with communication. To solve these problems, we propose a light source LED optimization scheme that considers wall reflections and analyze LED layout by using the mean square error of illumination as evaluation criterion. Then, the expressions of received illumination and power are deduced by integrating, which are used to build optimization model function $F(l, x, y)$ of rectangular layout and optimization model function $F(r, x, y)$ of circular layout. The relationships between the mean square error of illumination and the room size, and between the optimal layout and field of view ψ_{FOV} are researched based on optimization model function. It is clear from the results that the $F(l, x, y)$ can reach the minimum value when $l=1.6$ m and $\psi_{\text{FOV}}=80^\circ$, and the illumination uniformity is increased from 80.5% of traditional layout to 84.3%; the $F(r, x, y)$ could also obtain the minimum value when $r=2$ m and $\psi_{\text{FOV}}=80^\circ$, and the illumination uniformity is increased from 85.2% to 89.2% with the increase of the number of LED.

Key words optical communications; indoor; visible light communication; mean square error of illumination; light emitting diodes; rectangular layout; circular layout

OCIS codes 060.2605; 060.4080; 060.4510

1 引 言

随着 LED 照明技术的不断发展和进步,亮度高、功耗低、使用时间长的 LED (light emitting diodes) 已渐渐取代白炽灯^[1-2]。而白光 LED 除了

可以提供照明外,其较高的调制带宽为利用 LED 通信提供了可能^[3]。基于白光 LED 的可见光通信技术,是一种高速的无线接入技术,是光通信和无线通信相结合的产物^[4-5],是众多专家学者研究的热点。

早在 2003 年,日本 Keio 大学的 Nakagawa 等^[2]

收稿日期: 2017-10-19; 收到修改稿日期: 2017-12-04

基金项目: 国家 973 计划(2013CB329204)、国家自然科学基金(61375083)、国家自然科学基金青年科学基金(61605016)

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: 2015200040@mails.cust.edu.cn

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

就开始研究基于室内照明灯和室外交通灯的低速率可见光通信(VLC)和定位。迟楠等^[6]对 VLC 技术进行了总结,提出了未来 VLC 的研究发展方向。Sivabalan 等^[7]采用扩展递归法分析了单个 LED 发射功率不均匀的问题,对接收功率分布进行了计算分析。贾科军等^[8]提出了多输入多输出的多径衰落信道建模,并对系统进行了分析。丁德强等^[9]以接收功率的方差作为布局标准、王丽等^[10]以信噪比波动为布局参考、Liu 等^[11]利用改进型基因遗传算法、赵黎等^[12]采用光照补偿技术、王加安等^[13]基于能量损耗分别对光源位置及布局进行了研究。这些研究对象均是特定大小空间中的光源布局。本文提出以照度

均方差为准则的室内可见光系统光源布局方案,通过积分推导出接收面照度和功率的一般表达式,构建出矩形和圆形两种布局方式的优化模型函数。

1 室内 VLC 系统模型

1.1 传统布局方案

传统室内可见光通信模型为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$, 如图 1 所示。建立了如下坐标系,以地板的中心作为坐标系的原点 O ,分别连接原点与房间宽度和长度的中点,其连线作为 x 轴和 y 轴, xOy 平面与地板重合。光源 LED 分布于天花板上,接收器位于高 0.85 m 的接收平面上^[13]。

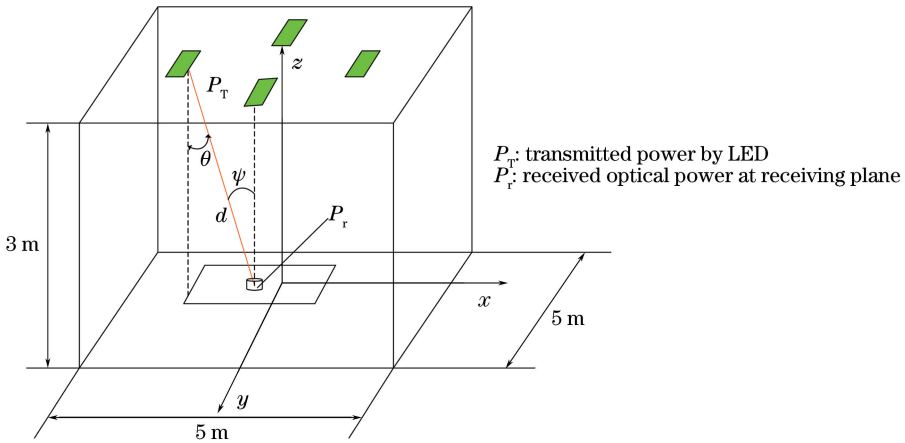


图 1 可见光通信系统模型图
Fig. 1 VLC system model

LED 光源有两个基本的特性:发射光功率和光强。假设 LED 光源辐射为朗伯辐射,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: $R(\phi)$ 为辐射强度; ϕ 为 LED 的辐射角; P_s 为辐射功率; m 为与 LED 辐射半功率角有关的辐射模式数^[2],表达式为

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

故单个 LED 的发光强度为

$$I(\phi) = I(0) \cos^m \phi, \quad (3)$$

式中: $I(0)$ 为 LED 的中心光强。

1.2 照度模型

国际照明标准^[14]规定办公室内的光照度的范围为 $300 \sim 1500\text{ lx}$,以避免光线强弱对眼睛的损伤。而室内可见光通信系统中,接收面上的光照度包括视距链路(line of sight, LOS)和非视距链路(nonline of sight, NLOS),如图 2 所示。

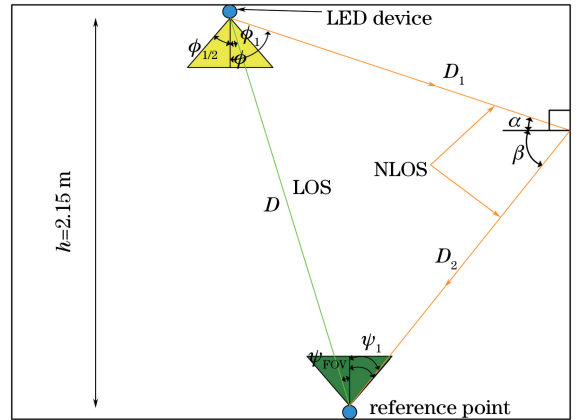


图 2 视距链路和非视距链路示意图
Fig. 2 Schematic for LOS and NLOS

对于 LOS 链路,接收面上某一点的照度为

$$E_{\text{LOS}} = I(0) \cos^m \phi \cos \psi / D^2, \quad (4)$$

式中: ψ 为接收面的入射角; D 为 LED 与接收器之间的距离。

对于 NLOS 链路,需要考虑反射对于接收面照度的影响,其照度为

$$E_{\text{NLOS}} = \frac{1}{\pi D_1^2 D_2^2} I(0) \rho dS_{\text{wall}} \cos^m \phi \cos \alpha \cos \beta \cos \psi, \quad (5)$$

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; ρ 为反射系数; dS_{wall} 为墙壁微小反射面元; α 为 LED 与反射点之间的辐射角; β 为反射点与接收器之间的辐射角。

根据图 2 中的位置关系, 假设光源 LED 的坐标

为 $(x_T, y_T, 3)$, 反射点的坐标为 (x_r, y_r, z_r) , 接收器的坐标为 $(x, y, 0.85)$ 。对(4)式积分, 得到整个接收面 LOS 照度为

$$E_{\text{LOS}} = \iint_{(x,y)} I(0) (2.15)^{m+1} / [(2.15)^2 + (y_T - y)^2 + (x_T - x)^2]^{(m+3)/2} dx dy, \quad (6)$$

对(5)式积分, 得到整个接收面 NLOS 照度为

$$E_{\text{NLOS}} = \iint_{(x,y)} \frac{I(0) \rho dS_{\text{wall}} (2.15)^m (z_r - 0.85) [(y_T - y_r)^2 + (x_T - x_r)^2]^{1/2} [(y_r - y)^2 + (x_r - x)^2]^{1/2}}{\pi [(3 - z_r)^2 + (y_T - y_r)^2 + (x_T - x_r)^2]^{(m+3)/2} [(z_r - 0.85)^2 + (y_r - y)^2 + (x_r - x)^2]^2} dx dy. \quad (7)$$

接收面上的总照度为

$$E = \sum (E_{\text{LOS}} + E_{\text{NLOS}}). \quad (8)$$

1.3 照度均匀性

接收面照度均匀性是室内可见光通信系统光源布局需要考虑的问题, 通常用接收面照度的方差表示:

$$f(l) = [E(x, y) - \bar{E}(l)]^2 / N, \quad (9)$$

式中: l 为光源与房间中心之间的距离; $E(x, y)$ 为

单个 LED 照度; $\bar{E}(l)$ 为全部 LED 的平均照度; N 为 LED 的数量。

根据文献[15]给出的传统矩形布局方式, 即 $l = 1.2$ m, 具体仿真参数见表 1, 其接收面照度分布如图 3 所示。

由图 3 可知, 该布局照度的最小值为 313.63 lx, 最大值为 1081.51 lx, 接收面的照度均匀度为 80.5%。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Electron charge $q / (10^{-19} \text{ C})$	1.6
Dark current $I_{\text{dc}} / \text{mA}$	0.62
Channel noise factor Γ	1.5
Detector responsivity $\sigma / (\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	0.4
Boltzmann's constant $k / 10^{-23}$	1.38
Equivalent noise bandwidth B / MHz	400
Noise bandwidth factors ζ_2, ζ_3	$\zeta_2 = 0.562, \zeta_3 = 0.0868$
Open-loop voltage gain G	10
Absolute temperature T / K	295
Transconductance $g_m / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	30
Bandwidth of the optical filter $\Delta\lambda / \text{nm}$	400 (from 380 to 780)
Background spectral irradiance $E_{\text{bs}} / (10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1})$	5.8
Fixed capacitance of photo detector $\eta / (\text{pF} \cdot \text{cm}^{-2})$	112
Transmitted optical power P_T / W	4 and 8
Half intensity angle $\phi_{1/2} / (^\circ)$	70
Central luminous intensity $I(0) / \text{cd}$	0.73
Reflectivity of walls ρ	0.8 for white concrete wall; 0.3 for normal floor
Field of view $\phi_{\text{FOV}} / (^\circ)$	80
Detector effective area S / cm^2	1
Filter gain G_f	1

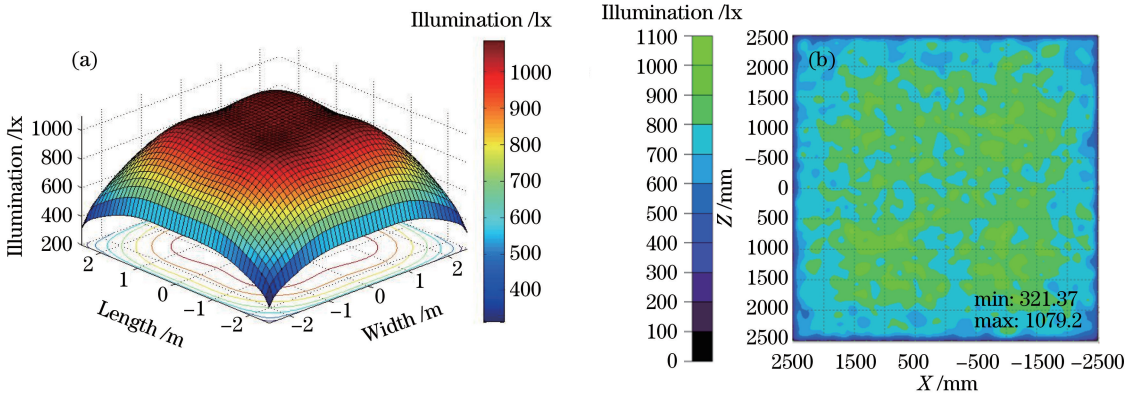


图 3 传统布局照度分布。(a) MATLAB;(b) TracePro

Fig. 3 Illumination distributions of traditional layout. (a) MATLAB; (b) TracePro

2 光源布局优化

2.1 矩形布局优化方案

2.1.1 优化模型

在传统光源布局方式下,房间角落的照度较低,而房间中心的照度则相对较高,系统照度均匀性低。为提高系统接收面照度的均匀性,本文提出以照度均方差为准则的光源矩形布局,如图 4 所示。

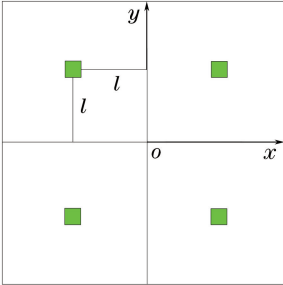
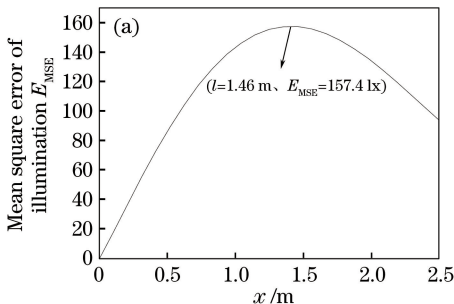


图 4 光源矩形布局图

Fig. 4 Rectangular layout of LED

根据图 4 建立基于照度均方差的矩形布局优化函数:



$$F(l, x, y) = \sqrt{\frac{\sum_{(x,y)}^N \iint [E(x, y) - \bar{E}(l)]^2 dx dy}{N}}, \quad (10)$$

式中: x, y 为接收器的坐标值,同时其各自的最大值亦代表房间尺寸。

根据(10)式绘制矩形布局的照度均方差值与房间尺寸之间的曲线,如图 5 所示。当光源 LED 采用矩形布局时,由于对称性,LED 的位置,即 x, y 的绝对值是相同的,用 l 表示。文献[13,15-16]已说明了室内可见光通信链路中反射对于通信链路的影响,基于此,本文考虑包含墙面反射的情形。

分析图 5 可知:1)在矩形布局中,接收面照度均方差的最大值出现在 $l=1.46$ m 处,即光源 LED 在天花板的位置为(1.46 m,1.46 m),该位置不会随 LED 数量的增加而改变;2)对比发现,LED 数量由 4 增加到 16 时,尽管照度均方差最大值的位置没有改变,但照度均方差的最大值由 157.4 lx 增加至 629.5 lx,说明矩形布局中照度均方差随 LED 数量的增加波动增大;3)照度均方差出现最大值的光源 LED 的位置(1.46 m,1.46 m),是房间中心

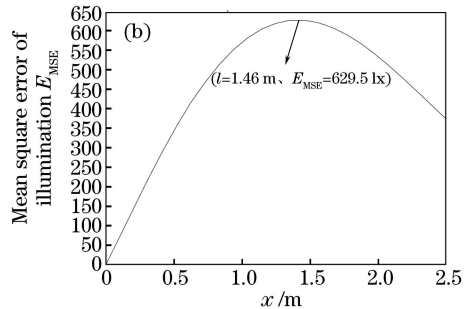


图 5 矩形布局照度均方差。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 5 Mean square error of illumination for rectangular layout. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

照度和 4 个角落处照度的平衡点,即 LED 在此位置上,接收面上的照度最优,即可避免因 LED 之间距离靠近引起的房间中心照度过于集中,又可避免因 LED 之间距离增加引起的房间中心照度不足。

2.1.2 优化照度均匀性分析

为进一步分析基于照度均方差的光源矩形布局,对 LED 在最优位置时矩形布局的接收面照度分布进行研究,如图 6 所示。利用 TracePro 软件仿真的照度分布如图 7 所示。

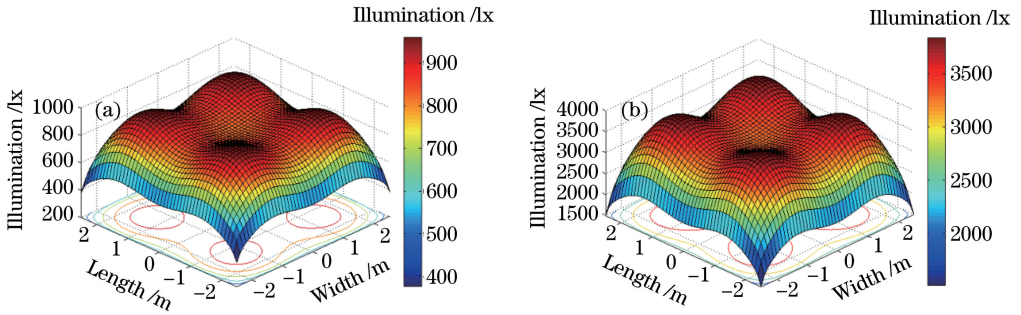


图 6 矩形布局照度分布。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 6 Illumination distributions for rectangular layout. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

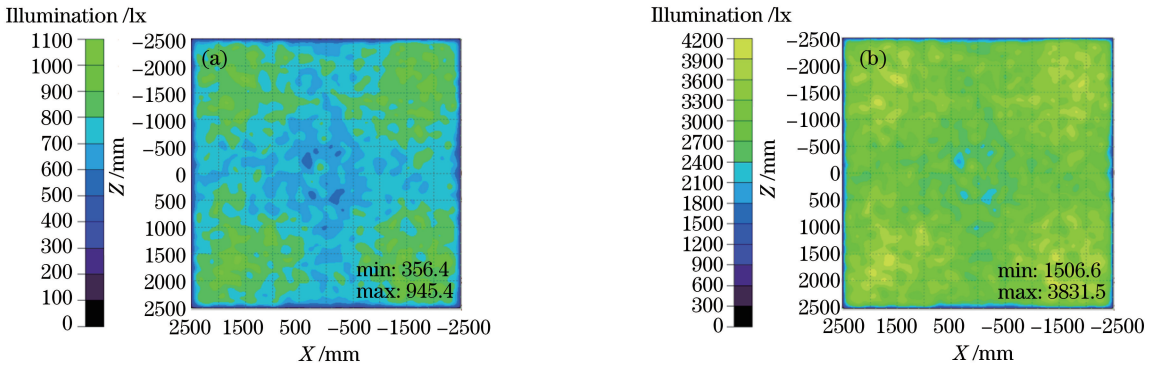


图 7 矩形布局照度均匀性分布。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 7 Distributions of illumination uniformity for rectangular layout. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

由图 6(a)、图 7(a)可知,LED 在最优位置,LED 数量为 4 时,照度最小值为 376.19 lx,最大值为 958.87 lx,均匀度为 84.3%。与传统的矩形布局相比,基于照度均方差的矩形布局提升了房间角落处的照度值,同时也提高了接收面照度的均匀性。为进一步研究 LED 数量与矩形布局之间的关系,将 LED 的数量增加到 16,结合图 6(b)、图 7(b)发现,当 LED 的数量为 16 时,照度最小值为 1504.74 lx,最大值 3835.51 lx,均匀度为 84.3%,且随着 LED 数量的增加,照度的最小值和最大值也显著增大,但均匀度却没有改变。

2.2 圆形布局优化方案

2.2.1 优化模型

为提高接收面照度的均匀度,提出基于照度均方差光源圆形布局方案,如图 8 所示。

根据图 8 建立基于照度均方差的圆形布局优化函数:

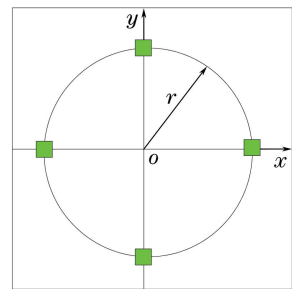


图 8 光源矩形布局图

Fig. 8 Circular layout of LED

$$F(r, x, y) = \sqrt{\frac{\sum_{(x,y)}^N \iint [E(x, y) - \bar{E}(r)]^2 dx dy}{N}}, \quad (11)$$

式中: x, y 为接收器的坐标值,同时其各自的最大值又代表了房间的尺寸。

根据(11)式绘制圆形布局的照度均方差值与房

间尺寸之间的曲线,如图 9 所示。

同样对图 9 进行分析:1)在圆形布局中,接收面照度均方差依然存在最大值,与矩形布局不同,其最大值的光源半径与 LED 的数量有关,当 LED 的数量为 4 时,半径值 r 为 1.98 m,LED 的数量为 16 时,半径值 r 为 2.05 m;2)比较发现,与矩形布

局不同,当 LED 的数量由 4 增加到 16,照度均方差的最大值波动不大,由 147.5 lx 增加至 161.3 lx,说明圆形布局的接收面照度波动小;3)与矩形布局相似,圆形布局中照度均方差同样出现最大值,即出现最大值时的半径为房间中心照度和 4 个角落处照度的平衡点。

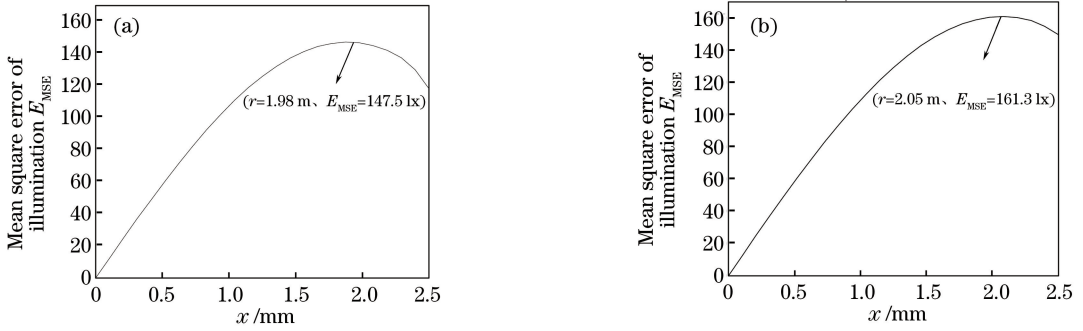


图 9 圆形布局照度均方差。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 9 Mean square error of illumination for circular layout. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

2.2.2 优化照度均匀性分析

为进一步分析基于照度均方差的光源圆形布局,

对 LED 在最优位置时圆形布局的接收面照度分布进行了研究,如图 10 所示,照度均匀性分布如图 11 所示。

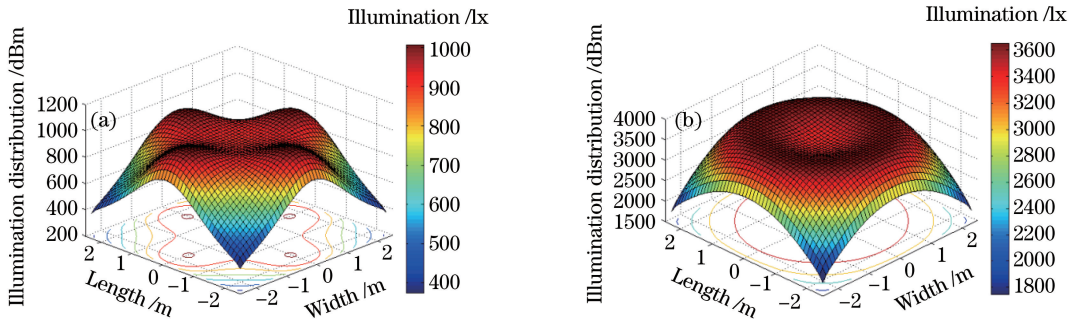


图 10 圆形布局照度分布。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 10 Illumination distributions for circular layout. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

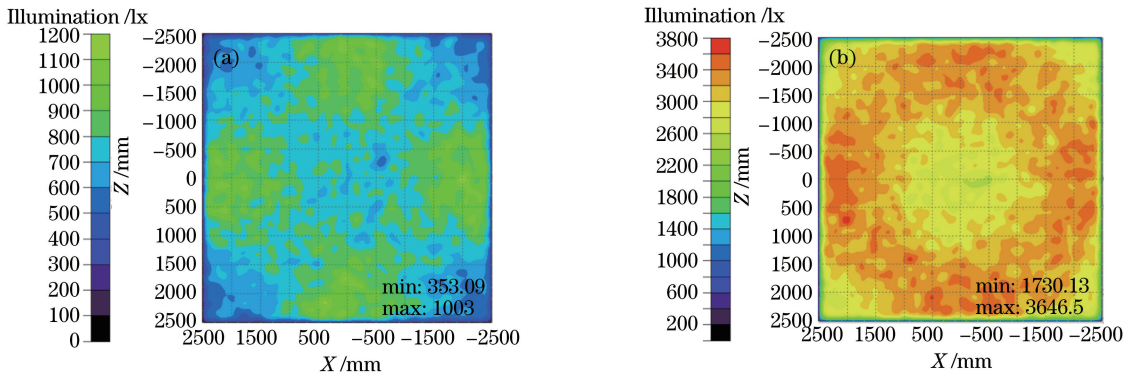


图 11 圆形布局照度均匀性分布。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

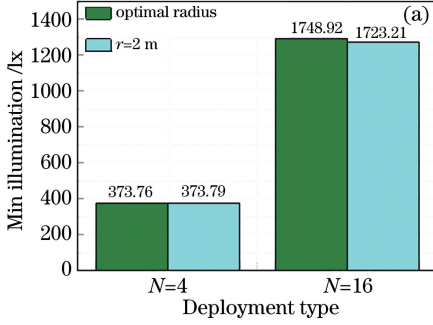
Fig. 11 Distributions of illumination uniformity for circular layout. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

图 10、图 11 分别给出了在圆形布局中当 LED 分布在最优半径位置时,接收面照度的分布。与矩形布局相比,当 LED 的数量为 4 时,照度最小值为

373.76 lx,最大值为 1003.56 lx,均匀度增加至 85.2%;当 LED 的数量为 16 时,最小值为 1748.92 lx,最大值为 3644.7 lx,均匀度为 89.2%。综合对比矩形布局与

圆形布局,圆形布局在房间角落处的照度稍低,但房间中心处的照度明显提升,总体呈圆环分布,且随着LED数量的增加,接收面照度的最大值和最小值虽然也有所增加,但增加的幅度远远小于矩形布局,圆形布局的照度均匀性显著提升。当LED的数量相同时,圆形布局的照度分布优于矩形布局。

虽然圆形布局的最优半径随着LED数量的增



加在改变,但对比发现其半径值 r 约为 2 m,故本文提出基于接收面照度均方差光源LED圆形布局的最优半径值 r 为 2 m。

图12(a)、图12(b)分别为两种半径下,LED数量相同时,其照度最小值和最大值,两者照度差值与各自照度相比非常小,故本文提出基于照度均方差的光源LED圆形布局的最佳布局半径为 $r=2$ m。

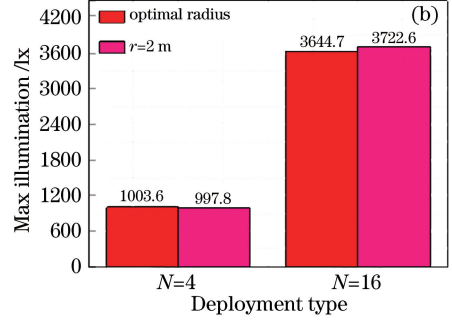


图12 不同半径圆形布局照度分布。(a)最小照度值;(b)最大照度值

Fig. 12 Illuminance for circular layouts with different radii. (a) Min illumination; (b) max illumination

3 系统性能分析

3.1 接收功率分析

接收平面上的功率分布(ROPD),也分为LOS链路和NLOS链路。在室内可见光通信链路中,LOS链路上一点的接收功率为

$$P_{\text{LOS}} = \begin{cases} P_T \frac{(m+1)S}{2\pi D^2} \cos^m \phi G_f(\psi) G(\psi) \cos \psi, & \psi \leq \psi_{\text{FOV}} \\ 0, & \psi > \psi_{\text{FOV}} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: P_T 为发射功率; S 为接收器面积; $G_f(\psi)$ 为光学滤光器的增益; $G(\psi)$ 为光学集中器的增益; ψ_{FOV} 为接收器视场角。光学集中器的增益 $G(\psi)$ 为

$$G(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi}, & \psi \leq \psi_{\text{FOV}} \\ 0, & \psi > \psi_{\text{FOV}} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: n 为折射率。对(12)式积分,LOS链路接收面接收功率为

$$P_{\text{LOS}} = \begin{cases} \iint_{(x,y)} P_T \frac{G_f G S (m+1) (2.15)^{m+1}}{2\pi [(2.15)^2 + (y_T - y)^2 + (x_T - x)^2]^{(m+3/2)}} dx dy, & \psi \leq \psi_{\text{FOV}} \\ 0, & \psi > \psi_{\text{FOV}} \end{cases}. \quad (14)$$

在NLOS链路中,一点的接收功率为

$$P_{\text{NLOS}} = \begin{cases} P_T \frac{(m+1)S}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho dS_{\text{wall}} \cos^m \phi \cos \alpha \cos \beta G_f(\psi) G(\psi) \cos \psi, & \psi \leq \psi_{\text{FOV}} \\ 0, & \psi > \psi_{\text{FOV}} \end{cases}. \quad (15)$$

对(15)式积分,NLOS链路接收面接收功率为

$$P_{\text{NLOS}} = \begin{cases} \iint_{(x,y)} \frac{U (3 - z_r)^m (z_r - 0.85) [(y_T - y_r)^2 + (x_T - x_r)^2]^{1/2} [(y_r - y)^2 + (x_r - x)^2]^{1/2}}{[(3 - z_r)^2 + (y_T - y_r)^2 + (x_T - x_r)^2]^{(m+3)/2} [(z_r - 0.85)^2 + (y_r - y)^2 + (x_r - x)^2]^2} dx dy, & \psi \leq \psi_{\text{FOV}} \\ 0, & \psi > \psi_{\text{FOV}} \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $U = P_T (m+1) G_f G S \rho dS_{\text{wall}} / (2\pi^2)$ 。

接收面的总接收功率为

$$P_R = \sum_N (P_{LOS_N} + P_{NLOS_N}). \quad (17)$$

3.1.1 矩形布局 ROPD 分析

当 LED 位于矩形布局的最佳位置时,其 ROPD 如图 13 所示。

从图 13 可以看出:1)图 13(a)为 LED 的数量为 4、单个 LED 功率为 4 W 时的 ROPD,ROPD 的范围为-4 dBm~0 dBm(对于通信系统来说,功率

在-2 dBm以上可用^[16]),平均值约为-0.71 dBm,图底部分布的等功率线显示,ROPD 的分布不均匀,角落处较低,存在功率中断区;2)将 LED 的数量增加 16,如图 13(b)所示,接收面的 ROPD 有了显著增强,但角落处的 ROPD 仍然较低。为进一步研究矩形布局,将单只 LED 的功率由 4 W 增加至 8 W,结果如图 14 所示。

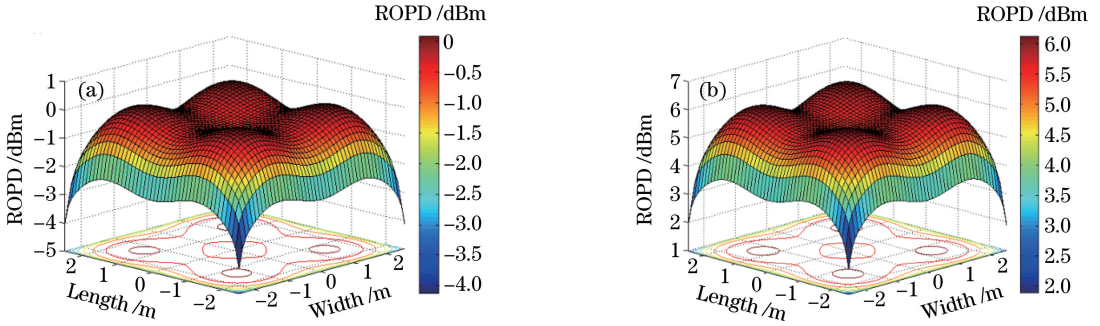


图 13 单个 LED 功率为 4 W 的矩形布局接收功率分布。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 13 ROPD with rectangular layout when power of single LED is 4 W. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

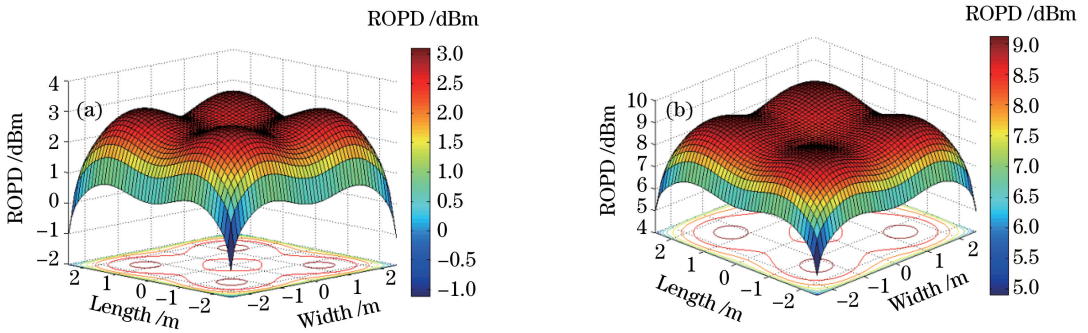


图 14 单个 LED 功率为 8 W 的矩形布局接收功率分布。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 14 ROPD with rectangular layout when power of single LED is 8 W. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

由图 14 可以看出,增大单个 LED 的功率,接收平面的功率也显著增强,尽管将最低的接收功率由-4 dBm提高至 5 dBm,但房间角落处的接收功率仍然有待提高。

3.1.2 圆形布局 ROPD 分析

为提高矩形布局角落处的接收功率,对当 LED 位于圆形布局的最优半径时的 ROPD 进行分析,如图 15 所示。

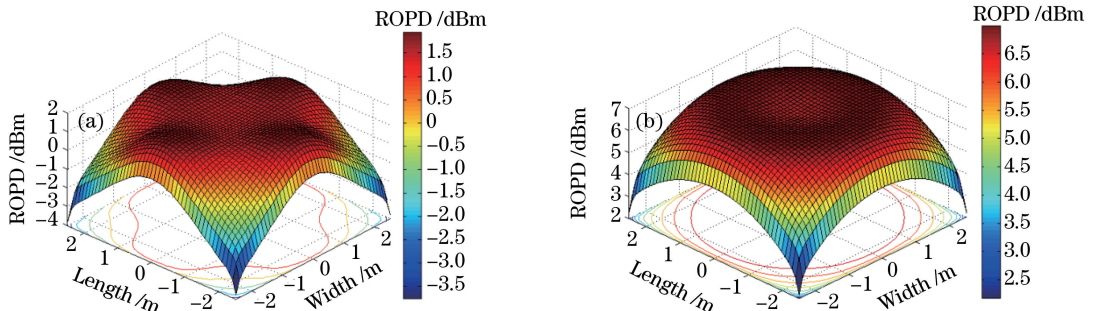


图 15 单个 LED 功率为 4 W 的圆形布局接收功率分布。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 15 ROPD with circular layout when power of single LED is 4 W. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

将图 15(a)、图 15(b)与图 13(a)、图 13(b)进行比较发现:1)当 LED 的数量相同时,与矩形布局相比,圆形布局的整体接收功率增强,房间角落处的接收功率得到提升;2)从图底部的等功率线可

以看出,圆形布局接收功率的分布较平均,呈圆环状分布。为进一步研究圆形布局的接收功率的分布,将单个 LED 的功率由 4 W 增加至 8 W,结果如图 16 所示。

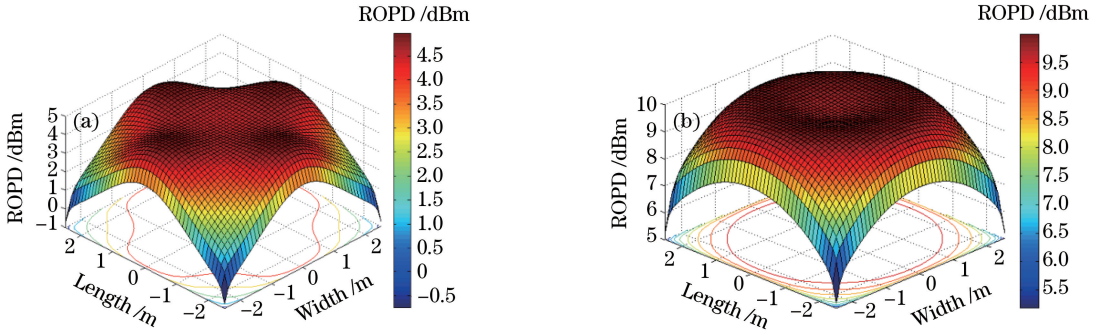


图 16 单个 LED 功率为 8 W 的圆形布局接收功率分布。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 16 ROPD with circular layout when power of single LED is 8 W. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

由图 16 可知,增加单个 LED 的功率后,系统的接收功率也得到很大提升,房间角落的接收功率明显增强,这样也进一步减少通信盲区。

超过信号间隔时间,两个相邻信号到达接收器时会发生信号混淆,导致信号错误,产生码间干扰。接收器同时接收到信号功率和 ISI 功率,在计算室内可见光通信接收面信噪比(SNR, R_{SN})时,需区分信号功率和 ISI 功率,ISI 功率被看作是系统噪声。第一个信号到达接收器之后,任意一个信号到达接收器的延迟时间小于等于码元周期 T 的一半,那么该信号可认为是信号功率,其他信号为 ISI 功率^[2]。

通过对两种布局的 ROPD 研究发现:1)在室内可见光通信系统中,无论是增加 LED 的数量,还是增加单个 LED 的功率,都会增强室内可见光通信系统的接收功率,提升系统的通信能力;2)当 LED 的数量及单个 LED 的功率参数相同时,与矩形布局相比,圆形布局能够增强房间角落处的接收功率,减少通信盲区。

(18)式给出了散粒噪声的表达式,通过分析可知,主要由 3 种噪声组成:背景辐射 δ_{bg} 、接收信号 δ_{rs} 以及暗电流 δ_{dc} ,将(18)式转换为^[2,19-20]

3.2 信噪比分析

在室内可见光通信中主要存在 3 种噪声:散粒噪声、热噪声、码间干扰(ISI),这些噪声可以被看作加性高斯白噪声,信号的传输质量受到散粒噪声的影响。随着信号传输时间的变化,信号每一比特所包含的散粒噪声光子数为 $10^4 \sim 10^5$ 。当强环境光照到信号探测器上时,即使加入了窄带滤光片,也会产生 $10^7 \sim 10^8$ 数量的散粒噪声光子。因此,当存在强环境光时,不能忽视散粒噪声对于传输信号的影响。而当环境光很弱,或者没有环境光时,噪声的主要来源为接收器中的放大器带来的噪声^[2]。散粒噪声的表达式为

$$\delta_{shot}^2 = \delta_{bg}^2 + \delta_{rs}^2 + \delta_{dc}^2 = 2q\sigma I E_{bs} S \Delta\lambda B + 2q\sigma P_R B + 2q\sigma I_{dc} B, \quad (19)$$

式中: E_{bs} 为背景辐射度; $\Delta\lambda$ 为滤光片的带宽。

热噪声的表达式为

$$\delta_{thermal}^2 = 8\pi k T_K \eta S \zeta_2 B^2 / G + 16\pi^2 k T_K \Gamma \eta^2 S^2 \zeta_3 B^3 / g_m, \quad (20)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; T_K 为绝对温度; η 为接收器的固定电容; G 为开环电压增益; Γ 为沟道噪声因子; g_m 为场效应晶体管(FET)跨导; ζ_3 为噪声带宽因子。

室内可见光通信系统总噪声为

$$N_{total} = \delta_{shot}^2 + \delta_{thermal}^2 + \sigma^2 P_{R(ISI)}, \quad (21)$$

那么,室内可见光通信系统的 R_{SN} 的表达式为

$$R_{SN} = \frac{\sigma^2 P_{R(signal)}^2}{N_{total}} = \frac{\sigma^2 P_{R(signal)}^2}{\delta_{shot}^2 + \delta_{thermal}^2 + \sigma^2 P_{R(ISI)}}. \quad (22)$$

式中: q 为电荷量; σ 为接收器响应率; B 为等效噪声带宽; I_{dc} 为暗电流; $P_{R(signal)}$ 为信号功率; $P_{R(ISI)}$ 为码间干扰功率; ζ_2 为噪声带宽因子。

信噪比作为评价通信链路通信质量的一个评价标准,可为通信链路的搭建提供参考。本小节对室内可见光通信的矩形布局及圆形布局的接收面信噪

在室内可见光通信系统中,光信号可通过不同的途径到达接收器,导致信号延迟。当延迟的时间

比分布进行了研究。

图 17 分别仿真了矩形布局下,LED 数量为 4 和 16 时的 R_{SN} 分布。对比分析发现,随着 LED 数量的增加, R_{SN} 的分布并没有像接收功率一样随着 LED 数量的增加而增加,而是与之成反比,即随着

LED 数量的增加而减小,且从图片底部的等信噪比曲线可见,其分布也是不均匀的;同时, R_{SN} 的波动也随着 LED 数量的增加而减小。为对比圆形布局与矩形布局 R_{SN} 分布的差异,图 18 对 LED 数量为 4 和 16 的圆形布局进行了仿真。

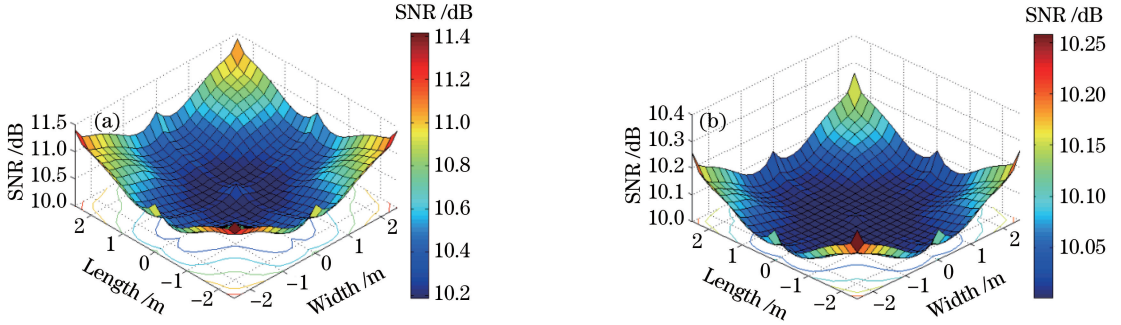


图 17 矩形布局信噪比分布。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 17 R_{SN} distributions with rectangular layout. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

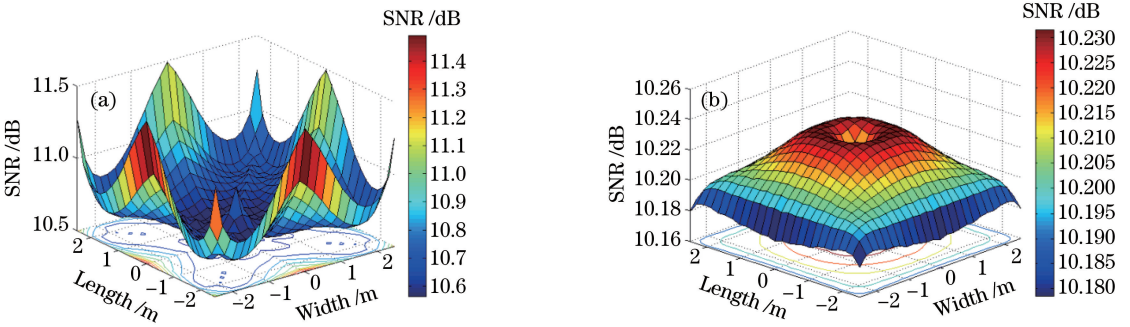


图 18 圆形布局信噪比分布。(a) LED 数量为 4;(b) LED 数量为 16

Fig. 18 R_{SN} distributions with circular layout. (a) Number of LED is 4; (b) number of LED is 16

图 18 分别仿真了 LED 圆形布局下,LED 数量为 4、8 和 16 时的 R_{SN} 分布。对比分析发现,随着 LED 数量的增加, R_{SN} 值逐渐减小,但当 LED 数量为 8 和 16 时,房间中心的 R_{SN} 值高于 4 个墙面处的 R_{SN} 值;而 R_{SN} 的波动随着 LED 数量增加而减小。

置及最佳半径之间的关系。

通过对两种布局的 R_{SN} 分布研究发现:1)在矩形布局和圆形布局中,LED 数量的增加会减小接收面上 R_{SN} 值(无论是最小值、最大值还是平均值),这说明 LED 数量的增加会增强 LED 之间的码间干扰,从而影响通信质量;2)当 LED 数量相同时,圆形布局的 R_{SN} 分布优于矩形布局的 R_{SN} 分布,尤其提升了房间角落处的 R_{SN} 值,同时,圆形布局的 R_{SN} 波动也小于矩形布局的 R_{SN} 值波动。

由图 19 可知,在矩形布局中, ϕ_{FOV} 从 10° 增加至 30° 的过程中, l 值的增加速度较快,且随着 ϕ_{FOV} 进一步增加, l 值的增加速度变慢,当 ϕ_{FOV} 增加到 80° 时, l 值达到最大,即最佳位置,进一步增加 ϕ_{FOV} 值, l 值不再变化;与矩形布局相比,圆形布局中随着 ϕ_{FOV} 的增加, r 值的增加速度小于 l 值的增加速度,说明圆形布局的波动性更小,当 ϕ_{FOV} 为 80° 时, r 值最大,即最佳半径。

3.3 视场角分析

5 结 论

根据上述两种布局的优化函数模型,确定了当 $\phi_{FOV} = 80^\circ$ 时矩形布局的最佳位置和圆形布局的最佳半径。研究发现,不同的 ϕ_{FOV} 值对优化函数模型的结果会产生影响。本小节研究了 ϕ_{FOV} 与最佳位

对可见光通信系统的光源布局方式进行研究,为解决传统布局照度均匀性差的问题,提出以接收面照度均方差为准则的光源 LED 布局方案,通过积分推导出接收面照度和功率的一般表达式,构建了基于照度均方差的矩形和圆形布局优化函数 $F(l, x, y)$ 和 $F(r, x, y)$,研究了光源 LED 的位置与房间尺寸、两种布局最优位置与视场角之间的关系。

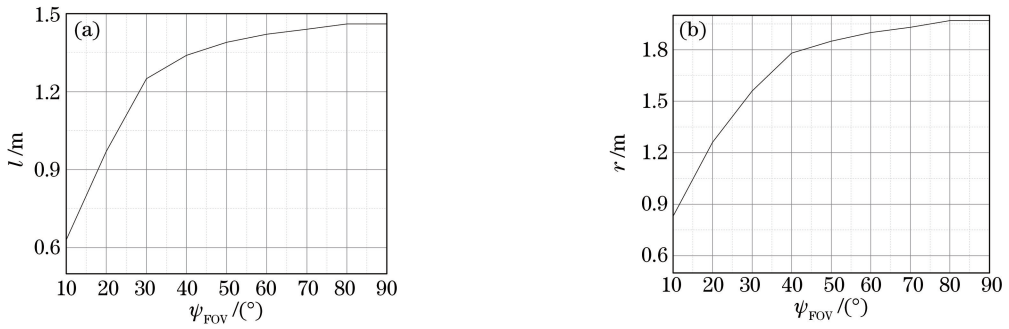


图 19 ψ_{FOV} 与最佳布局之间的关系。(a)矩形布局;(b)圆形布局

Fig. 19 Relationship between ψ_{FOV} and optimal layout. (a) Rectangular layout; (b) circular layout

结果表明:矩形布局光源 LED 的最优位置 $l = 1.46 \text{ m}$ 、 $\psi_{FOV} = 80^{\circ}$,圆形布局光源 LED 的最优半径 $r = 2 \text{ m}$ 、 $\psi_{FOV} = 80^{\circ}$ 。当光源为最优布局时,16 个 LED 的矩形布局性能最差,4 个 LED 的矩形布局,如果能对其接收功率的分布进行优化,也是不错的选择。而基于照度均方差准则下的圆形布局室内可见光通信系统的性能,无论是在照度分布、接收功率分布还是信噪比分布,都优于矩形布局。

参 考 文 献

- [1] Kumar N, Lourenco N R. LED-based visible light communication system: a brief survey and investigation[J]. Journal of Engineering & Applied Sciences, 2012, 5: 297-307.
- [2] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 50(1): 100-107.
- [3] Zhao T F, Wang X R, Ke X Z. Design and performance analysis of multi-LEDs UV communication system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1544-1549.
赵太飞, 王小瑞, 柯熙政. 多 LED 紫外光通信系统设计及性能分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1544-1549.
- [4] Guo Q, Lan T, Zhu Q, *et al.* Design and implementation of indoor visible light communication avalanche photodiode detecting circuit [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 731-735.
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.
- [5] Zhou H, Mao S W, Agrawal P. Optical power allocation for adaptive transmissions in wavelength-division multiplexing free space optical networks[J]. Digital Communications and Networks, 2015, 1(3): 171-180.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Jia K J, Hao L, Yu C H. 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.
- [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] 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.
- [11] Liu H L, Wang X, Chen Y, *et al.* Optimization lighting layout based on gene density improved genetic algorithm for indoor visible light communications [J]. Optics Communications, 2017, 390: 76-81.
- [12] Zhao L, Peng K. Optimization of layout of lighting for indoor VLC based on white-LED [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0706001.
赵黎, 彭恺. 基于白光 LED 的室内 VLC 光源布局优化[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0706001.

- [13] 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. 基于能量最优室内可见光通信 LED 布局 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0806003.
- [14] Yuan Q. CIE standard lighting-lighting indoor workplaces[J]. *China Illuminating Engineering*, 2002(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(4): 55-60.
- [15] Do T H, Wang J H, 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.
- [16] Zhang X L, Duan J Y, Fu Y G, *et al.* Theoretical accuracy analysis of indoor visible light communication positioning system based on received signal strength indicator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(21): 3578-3584.
- [17] Shen Z M, Lan T, Wang Y, *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.
- [18] Elkarim M A, Mohammed N A, Aly M H. Exploring the performance of indoor localization systems based on VLC-RSSI, including the effect of NLOS components using two light-emitting diode lighting systems[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(10): 105110.
- [19] Shrestha A. Visible-light communication demonstrator: system modeling and analogue distribution network[J]. *Svn. eecs. jacobs*, 2009.
- [20] Sohár G, Mécs L, Wellinger K, *et al.* Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelength[C]. *The 22nd Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, Tel-Aviv, Israel. 2003: 287-289.