

## 采用改进遗传算法的可见光通信光源布局优化

贺锋涛<sup>1\*\*</sup>, 余婕<sup>1\*</sup>, 张建磊<sup>1\*\*\*</sup>, 杨祎<sup>1</sup>, 杨雅伊<sup>1</sup>, 朱云周<sup>2</sup>, 王晓波<sup>2</sup><sup>1</sup>西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121;<sup>2</sup>中国船舶重工集团 705 研究所水下信息与控制重点实验室, 陕西 西安 710077

**摘要** 为改善室内可见光通信中传统光源布局方式造成的接收光功率不均匀从而导致通信盲区的问题, 本文提出了一种局部非均匀的对称型布局方式, 并结合自适应机制及模拟退火算法对遗传算法中的选择、交叉和变异算子进行改进, 在考虑墙面一次反射的情况下利用改进遗传算法对 LED 芯片位置、芯片上的灯珠数目及半功率角进行同步优化。仿真结果表明: 在  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的房间模型中, 采用改进遗传算法对灯源布局进行优化后, 接收光功率均匀度达到了 97.7%, 平均光功率为  $1029\ \mu\text{W}$ , 光照均匀度达到了 0.84。此外, 利用改进的遗传算法针对不同尺寸房间模型中的灯源布局进行了优化, 结果表明, 接收光功率均匀度均得到了提高。

**关键词** 光通信; 可见光通信; 遗传算法; 光源布局; 接收光功率

中图分类号 TN92

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220885

## 1 引言

可见光通信(VLC)是一种将可见光作为信息载体在信道中进行数据传输的技术。相比于传统的射频通信, VLC 技术兼具照明功能, 而且具有传输速率高、无频段限制、安全绿色等优点, 这些优点使得其在高速定位、传感、物联网等领域发挥着重要作用<sup>[1-5]</sup>。发光二极管(LED)因具有能效高、功耗低、寿命长等特点<sup>[6-9]</sup>而被室内 VLC 技术作为光源进行计算机网络与办公设备之间的通信, 但单个 LED 的光功率较低, 所以多采用 LED 阵列作为光源。在室内 VLC 技术中, LED 阵列的布局和参数会影响接收光功率, 进而影响接收平面的通信质量, 影响用户通信的公平性<sup>[10]</sup>。因此, 对 LED 阵列布局进行合理优化, 可以提高接收光功率均匀度, 实现稳定通信。

2018 年, 陈勇等<sup>[11]</sup>对 LED 阵列的半功率角及阵列间距进行优化, 使接收光功率方差从 3.02 dBm 降至 1.16 dBm, 提高了通信稳定性。2020 年, Huang 等<sup>[12]</sup>利用改进的蝙蝠算法(IBA)优化 LED 发光半角和光源布局, 结果表明, 该方法在有限迭代次数内可有效降低接收光功率的波动。优化接收光功率方差虽然可以提高接收光功率均匀度, 但却会导致平均接收光功率降低。2021 年, Wei 等<sup>[13]</sup>使用改进 Firefly 算法对 LED 阵列的布局、功率分配和方向分别进行分步优化和同步优化; 结果显示: 相比于分步优化, 多参数同步优化可

以使接收平面的信噪比更均匀, 但其未考虑非视距链路的影响。

本文提出了一种局部非均匀的对称型布局, 并针对该布局, 将遗传算法(GA)和自适应机制、模拟退火算法相结合<sup>[14]</sup>, 对选择、交叉和变异算子进行了优化; 在考虑一次反射的情况下, 使用改进遗传算法(MGA)对 LED 芯片位置坐标、灯珠数目和半功率角进行多自由度同步优化, 同时对不同房间模型下的 LED 阵列布局进行研究。结果表明, 相对于传统的阵列布局方案, 局部非均匀的对称型布局可以显著提高接收光功率均匀度, 具有良好的实用性。

## 2 VLC 系统模型

## 2.1 室内可见光系统模型

在室内 VLC 系统中, 光源与接收面之间存在视距链路(LOS 链路)和非视距链路(NLOS 链路)。本文主要考虑 LOS、NLOS 链路中一次反射光的影响。

图 1 是尺寸为  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$  的房间模型, 接收平面距地面 0.85 m。接收面中共有  $50 \times 50$  个均匀分布的接收机。图 1 中,  $\varphi$  和  $\varphi_1$  分别为 LED 在 LOS 链路和 NLOS 链路中的发射角,  $\psi$  为接收端处的入射角,  $\psi_1$  为 LED 与反射单元之间的辐射角,  $\varphi_2$  为反射单元与接收机之间的辐射角;  $\psi_c$  为接收机的视场角(接收机不接收入射角超过视场角的 LED 的光功率)。室内 VLC 系统的各项参数设置如表 1 所示。

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-06-27; 录用日期: 2022-07-20; 网络首发日期: 2022-08-01

基金项目: 装备预研教育部联合基金(8091B032130)、陕西省微波光子与光通信创新团队资助专项(2021TD-09)、水下信息与控制重点实验室资助项目(JCKY2021207CD02)

通信作者: \*yj1583126916@163.com; \*\*hefengtao@xupt.edu.cn; \*\*\*zhangjianlei@xupt.edu.cn

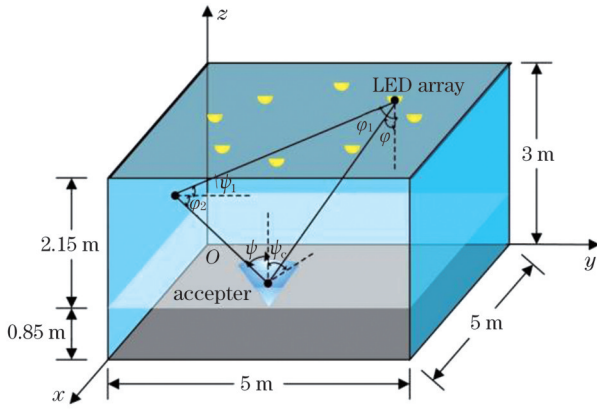


图 1 室内 VLC 系统模型  
Fig. 1 Indoor VLC system model

2.2 室内可见光系统布局方案

文献[13]认为,对 LED 阵列进行多参数高自由度优化后,最优布局中的各项参数具有一定的对称性。因此,笔者设计了一种局部非均匀的对称型布局方式,即:采用算法对局部阵列的 LED 位置、灯珠数目与半功率角进行优化,之后通过翻折映射来优

表 1 室内 VLC 系统参数设置表  
Table 1 Parameter settings of indoor VLC system

Parameter	Value
LED bead power /mW	450
Receiving height $H_{pd}$ /m	0.85
Gain of optical filter $T_s(\psi)$	1
Refractive index of optical lens $n_0$	1.56
Area of photo-detector $A$ /cm <sup>2</sup>	1
Concentrator field angle of view $\psi_c$ /( $^\circ$ )	80
Photoelectric conversion efficiency /( $A \cdot W^{-1}$ )	0.53
Central luminous intensity of LED $I(0)$ /cd	23.81
Wall reflection coefficient $\rho_c$	0.7

化整个发射面,并以优化结果为基础计算接收光功率均匀度,从而寻找最优布局的阵列布局方案。这样做不仅可以保证功率和照度的均匀性,还提高了计算精度和执行效率。图 2 为布局设计方案概念图。

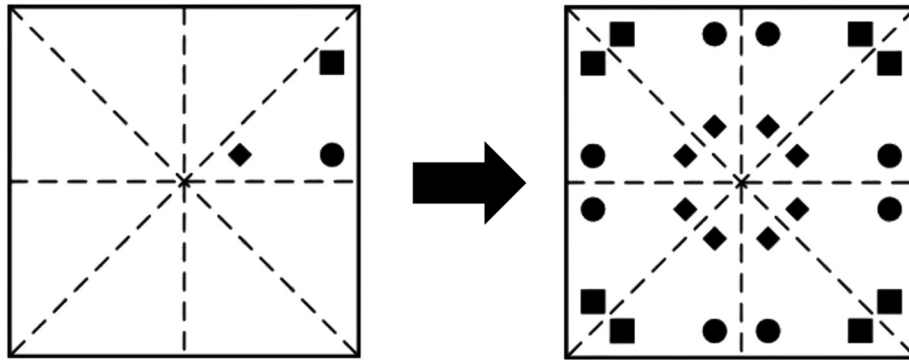


图 2 布局方案概念图  
Fig. 2 Layout scheme

2.3 VLC 系统光功率与光照度分析

2.3.1 LOS 链路模型分析

在 LOS 链路中,信道直流增益  $H_{LOS}(0)$ <sup>[15]</sup> 可以表示为

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

其中,

$$g(\psi) = \begin{cases} n_0^2 / \sin^2(\psi_c), & \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $A$  为光接收器的有效接收面积; $m$  为朗伯辐射系数<sup>[16]</sup>,  $m = \frac{-\ln 2}{\ln[\cos(\Phi_{1/2})]}$ , 其中  $\Phi_{1/2}$  为 LED 的半功率角,即光强为最大光强 1/2 处的光线与法向量的夹角;

$D_d$  为发射端 LED 与接收机之间的距离; $T_s(\psi)$  为接收机的滤波器增益; $g(\psi)$  为接收机端的集中器增益; $n_0$  为光学透镜的折射率。

2.3.2 NLOS 链路模型分析

对于一次反射的 NLOS 链路,信道直流增益  $H_{NLOS}$ <sup>[17]</sup> 为

$$H_{NLOS} = \begin{cases} \frac{A(m+1)\rho_c \cos^m(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \cos(\psi) \cos(\psi_1) T_s(\psi) g(\psi)}{2\pi D_1^2 D_2^2}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $\rho_c$  为反射系数; $D_1$  为 LED 与反射单元之间的距离; $D_2$  为反射单元与接收机之间的距离。

### 2.3.3 系统接收光功率分析

在 LOS 链路中,单个接收机的接收光功率<sup>[11]</sup>为

$$P_{\text{LOS}} = P_1 \times H_{\text{LOS}}(0), \quad (4)$$

式中: $P_1$ 为发射面中单个 LED 的发射光功率。在实际计算中,单个接收机总接收光功率是所有 LED 发射光功率的累加,即

$$P_{r,\text{LOS}}(x, y) = \sum_{n=1}^M P_{\text{LOS}}(n), \quad (5)$$

式中: $P_{r,\text{LOS}}(x, y)$ 为接收平面上点 $(x, y)$ 处的总接收光功率; $M$ 为 LED 的个数。

对于 NLOS 链路,单个接收机的接收光功率<sup>[17]</sup>表达式为

$$P_{\text{NLOS}} = \begin{cases} P_1 \frac{(m+1)A}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho_c \cos^m(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \cos(\psi) \cos(\psi_1) T_s(\psi) g(\psi) dA_{\text{wall}}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c, \\ 0, & \psi > \psi_c. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $dA_{\text{wall}}$ 为反射面的面积微元。

因此,单个接收机的总接收光功率 $P_{r,\text{NLOS}}$ <sup>[17]</sup>为

$$P_{r,\text{NLOS}} = \int_{A_{\text{wall}}} P_{\text{NLOS}} H_{\text{NLOS}} dA_{\text{wall}} \quad (7)$$

由于接收光功率不具有方向性,因此接收光功率 $P_r$ 可由 LOS 链路与李 LOS 链路光功率之和<sup>[17]</sup>表示为

$$P_r = P_{r,\text{LOS}}(x, y) + P_{r,\text{NLOS}} \quad (8)$$

### 2.3.4 系统光照度分析

在室内 VLC 系统中,发射端辐射照度遵循朗伯辐射照度模型。LED 发光强度的计算表达式<sup>[18]</sup>为

$$I = I(0) \cos^m(\varphi), \quad (9)$$

式中: $I(0)$ 为 LED 中心发光强度。

与接收光功率相似,光照度也分为 LOS 链路和李 LOS 链路。对于 LOS 链路,阵列中第  $n$  个 LED 到接收平面的光照度值 $E_{n,\text{LOS}}$ <sup>[11]</sup>可以表示为

$$E_{n,\text{LOS}} = I(0) \cos(\psi) \cos^m(\varphi) / D_d^2 \quad (10)$$

在 NLOS 链路中,考虑一次反射的影响,光照度值 $E_{n,\text{NLOS}}$ <sup>[19]</sup>可以表示为

$$E_{n,\text{NLOS}} = \frac{1}{\pi D_1^2 D_2^2} I(0) \rho_c dA_{\text{wall}} \cos^m(\varphi_1) \cos(\psi_1) \cos(\varphi_2) \cos(\psi), \quad (11)$$

因此,接收平面上点 $(x, y)$ 处的总光照度 $E$ <sup>[19]</sup>可以表示为

$$E(x, y) = \sum_{n=1}^M [E_{n,\text{LOS}}(n) + E_{n,\text{NLOS}}(n)] \quad (12)$$

### 2.4 VLC 系统光照均匀度分析

在室内 VLC 中,一般采用光照均匀度(UIR)<sup>[20]</sup>定量表示照度均匀性,其表达式为

$$U_{\text{UIR}} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{mean}}}, \quad (13)$$

式中: $E_{\text{min}}$ 和 $E_{\text{mean}}$ 分别为接收平面上光照度的最小值和平均值。室内照明标准规定,作业区光照均匀度不能低于 0.7<sup>[21]</sup>。

## 3 改进遗传算法设计

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程来搜索全

局最优解的算法,其以运算简单、解决问题能力出众等优点被广泛使用<sup>[22]</sup>。然而,该算法存在易过早收敛的“早熟”问题,容易陷入局部最优解。因此,需要对其进行改进。

遗传算法包括选择、交叉和变异三个步骤。文献<sup>[14]</sup>将其与模拟退火算法、自适应机制结合,基本解决了传统遗传算法中的“早熟”问题,使得该算法获得的解足够接近理论最优解。本文借鉴了此方案并对其加以改进。

### 3.1 种群初始化

在本文中,算法的个体基因编码方式采用的是浮点数编码。该编码方式的基因多样性好,被优化参数的数值精度高,而且操作相对便捷。单个基因被初始化为 $[0, 1)$ 区间内的一个随机数,基因数取决于被优化的参数数目。本文同时优化了目标平面上  $n$  个 LED 芯片的位置 $(x, y)$ 、灯珠数目 $M_{\text{LED}}$ 和半功率角 $\Phi_{1/2}$ ,因此单个个体的基因数为 $4n$ ,分别映射为 $x$ 、 $y$ 、 $M_{\text{LED}}$ 和 $\Phi_{1/2}$ 。LED 参数的取值范围如表 2 所示。

表 2 LED 参数的取值范围  
Table 2 LED parameter value range

Parameter	Value
$x$	$[0, L/2]$ , $L$ is side length of ceiling
$y$	$[0, x]$
$M_{\text{LED}}$	$1^2, 2^2, \dots, 14^2$
$\Phi_{1/2}$	$[20^\circ, 80^\circ]$

### 3.2 惩罚函数的构建

在改进遗传算法中,每个个体的编码映射的取值范围由 LED 参数的取值范围决定。在此基础上,还需要满足两个约束条件。

首先,按照国际照明标准,接收面上任意点的光照度必须在 300~1500 lx 范围内。此外,须保证每个 LED 芯片都完全处于天花板内,且芯片与芯片之间不重合。出于实际应用和散热性能的考量,本文采用的 LED 芯片上的 $N_{\text{lamp}} \times N_{\text{lamp}}$ 个灯珠呈正方形均匀排布,单个 LED 芯片的占用面积由其包含的灯珠数目决定。一个



含有  $N_{\text{lamp}}$  个灯珠的 LED 芯片边长为  $(7N_{\text{lamp}} + 3)$  mm。

据此设计了两种惩罚函数:光照度范围 ( $R_E$ ) 和 LED 各芯片位置 ( $L$ )。对于解空间中无对应可行解的个体,将其淘汰的同时生成一个新的初始个体,重复这一操作,直到种群中的所有个体均在可行域内。该操作贯穿整个算法的始终,以保证所有个体都符合约束条件。

### 3.3 选择操作和算子改进

选择操作是算法的首要步骤,其目的是筛选出优良个体并将其留存于种群中。本文使用轮盘算法作为选择的基础,采用自适应机制对选择概率加以改进。个体  $x_i$  的适应值  $f(x_i)$  由适应度函数基于个体的基因计算得出。个体  $x_i$  被选择的概率为  $f'(x_i) / \sum_{i=1}^n f'(x_i)$ 。

其中,  $f'(x_i)$ <sup>[14]</sup> 可以表示为

$$f'(x_i) = af(x_i) + \frac{e - \exp(k/k_{\max})}{e + \exp(k/k_{\max})} (f_{\max} - f_{\min}), \quad (14)$$

式中:  $f_{\max}$  和  $f_{\min}$  分别表示当前种群中最大和最小适应值;  $k$  为当前遗传代数;  $k_{\max}$  为算法最大遗传代数;  $a$  为大于 0 的常数。此方法在遗传迭代初期保留了种群多样性,但在整个迭代过程中,如果一个优秀个体建立了数量优势,那么后出现的优秀个体类型被留存的概率就会降低。

基于上述原因,笔者设计了服从正态分布的系数  $a = 1 - \mu + a'$ 。其中,  $\mu = \frac{e-1}{e+1}$ ,  $a' \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,  $\sigma = \mu/8$ 。该系数在迭代后期不改变个体的被选择期望,因此不影响算法的末期收敛速度,同时也提高了优秀个体的留存概率,进一步丰富了前中期迭代过程中的种群多样性。

### 3.4 适应度函数构建

适应度函数  $F$  是算法的关键函数,用于计算种群中每个个体的适应值,以表征其优劣程度<sup>[23]</sup>,从而量化个体在选择操作中的留存概率。本文中的适应度函数包含 4 个子适应度函数,这 4 个子适应度函数分别对 LED 阵列的光功率均匀度 ( $H_p$ )、光功率利用率 ( $E_{\text{EffP}}$ )、光功率大小 ( $P_{\text{total}}$ ) 和光照度均匀度 ( $H_E$ ) 进行优化。光功率利用率的子适应度函数表示为  $E_{\text{EffP}} = P_{\text{total}}/N$ ,  $N$  是 LED 灯珠总数。光照度均匀度的子适应度函数如式 (13) 所示。 $H_p$  是本文最重要的优化参数,采用方差来评价  $H_p$  的优劣会导致优化后的 LED 阵列接收面的总接收光功率降低<sup>[24]</sup>;而使用接收光功率最大值和最小值的偏差来构建适应度函数<sup>[25]</sup>,虽然可以简化运算,但也会导致绝大多数接收器的数据被弃用,因而不能作为整个接收面的光功率均匀度的评判标准。基于上述原因,本文采用 CV (RMSE), 即均方根误差的变化系数来表征光功率均匀度,即

$$H_p = \frac{\sigma}{\bar{P}}, \quad (15)$$

式中:  $\bar{P}$  为接收平面上接收光功率的平均值(接收面分成  $M_r \times N_r$  个部分), 可表示为

$$\bar{P} = \frac{1}{M_r \times N_r} \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N P_r(X_p, Y_q, Z); \quad (16)$$

$\sigma$  为接收光功率的标准差, 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M_r \times N_r} \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N [P_r(X_p, Y_q, Z) - \bar{P}]^2}. \quad (17)$$

综上所述, 适应度函数可以表示为

$$F = \alpha_1 \cdot H_p + \alpha_2 \cdot E_{\text{EffP}} + \alpha_3 \cdot P_{\text{total}} + \alpha_4 \cdot H_E, \quad (18)$$

其中,  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为各个子适应度函数的权值, 与各适应度函数的重要性成正比, 与各子函数值的可变化幅度成反比。

### 3.5 交叉、变异操作和算子的改进

在传统遗传算法中, 交叉率 ( $P_c$ ) 和变异率 ( $P_m$ ) 为常数。然而, 在迭代的不同时期, 对于不同的个体而言, 最佳的交叉率和变异率是不同的。在迭代进程中, 个体在种群中比较优秀或种群多样性好时, 交叉率和变异率不应太大; 反之, 交叉率和变异率应取较大值。种群的样本差异性<sup>[14]</sup> 可以表示为

$$E_1 = \frac{f_{\max} - f_{\text{avg}}}{f_{\max}}, \quad (19)$$

个体差异性可以表示为

$$E_2 = \frac{f - f_{\text{avg}}}{f_{\max}}, \quad (20)$$

式中:  $f_{\max}$  和  $f_{\text{avg}}$  为当前种群中个体的最大适应值和平均适应值;  $f$  为当前个体的适应值。

本文利用差异性算子  $E_1$  和  $E_2$  对交叉率和变异率在可调区间内进行线性调整。交叉率和变异率的表达式为

$$P_c = 0.5 + 0.5s, \quad (21)$$

$$P_m = 0.001 + 0.004s, \quad (22)$$

式中:  $s$  为调节系数, 其表达式为  $s = \frac{e_1 - E_1}{e_1} + \frac{E_{\max} - E_2}{E_{\max} - E_{\min}}$ ,

$e_1$  是截至当前迭代过的  $E_1$  的最大值,  $E_{\min}$  为本次迭代种群中  $E_2$  的最小值,  $E_{\max}$  为本次迭代种群中  $E_2$  的最大值。调节系数  $s$  的值域为  $[0, 1]$ , 当  $E_1 = 0$ ,  $E_2 = E_{\min}$  时,  $s = 1$ ,  $P_c = 1$ ,  $P_m = 0.005$ ; 当  $E_1 = e_1$ ,  $E_2 = E_{\max}$  时,  $s = 0$ ,  $P_c = 0.5$ ,  $P_m = 0.001$ 。在每轮迭代中, 每个个体的  $P_c$  和  $P_m$  随着差异性算子分别在  $[0.5, 1]$  和  $[0.001, 0.005]$  区间内变化, 以达到自适应调整交叉率和变异率的目的。

另外, 参考模拟退火算法中的关键思想——玻尔兹曼机制, 采用  $P_{\text{bol}}$  作为劣化允许率<sup>[14]</sup>, 即

$$P_{\text{bol}} = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{(f_{x_{\text{new}}} - f_{x_{\text{old}}})}{T}\right]}, \quad (23)$$

式中:  $f_{x_{new}}$  和  $f_{x_{old}}$  分别为所对应个体的适应值;  $T$  为当前温度。当老个体  $x_{old}$  的适应值优于交叉或变异操作得到新的个体  $x_{new}$  的适应值时,  $x_{new}$  仍有  $P_{bol}$  的概率取代  $x_{old}$ 。温度  $T$  的初值设为总代数的  $1/2$ , 每一次迭代后降温, 降温速率为  $0.9$ , 即  $T_{new} = 0.9T_{old}$ 。

## 4 仿真结果与分析

基于表 1 和表 2 所示参数, 采用 MATLAB R2018 软件, 使用改进遗传算法对 LED 位置坐标、灯珠数目和半功率角进行优化。

### 4.1 5 m×5 m×3 m 房间内 VLC 系统的 LED 阵列布局

图 3 为 5 m×5 m×3 m 尺寸房间内 VLC 系统的 LED 阵列布局。优化后的 LED 阵列布局中有 4 种不同半功率角的 LED, 即 LED<sub>1</sub>、LED<sub>2</sub>、LED<sub>3</sub> 和 LED<sub>4</sub>。

表 3 为 4 种 LED 芯片的半功率角、灯珠数目和部

表 3 5 m×5 m×3 m 房间模型中的 LED 芯片参数  
Table 3 LED chip parameters in 5 m×5 m×3 m room model

LED type	Half power angle / (°)	Number of lamp beads	X-coordinate / m	Y-coordinate / m
LED <sub>1</sub>	41.09	16	0.8584	2.4727
LED <sub>2</sub>	79.86	25	1.1433	1.4301
LED <sub>3</sub>	37.45	25	0.2872	1.2945
LED <sub>4</sub>	41.96	36	2.0664	2.4645

经改进遗传算法优化后的 LED 阵列的接收光照度和接收光功率分布如图 4 所示。在图 4(a) 中,  $E_{min} = 1089.9$  lx,  $E_{max} = 1341$  lx,  $U_{UIR} = 0.84$ , 光照度符合国际标准化组织 (ISO) 规定的范围 (300~1500 lx)。

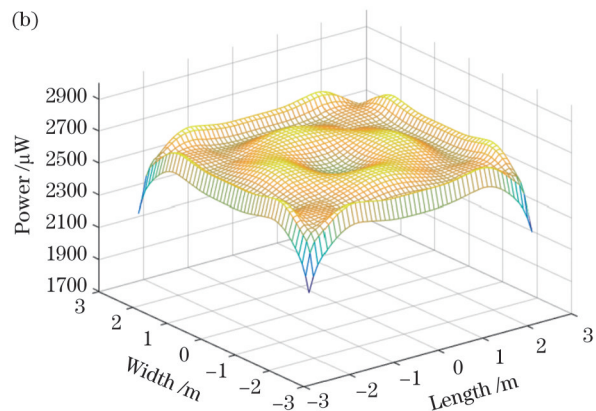
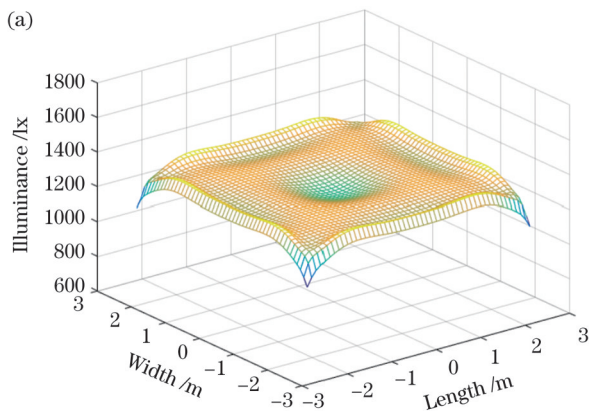


图 4 5 m×5 m×3 m 房间模型中接收平面上的参数分布。(a) 接收光照度; (b) 接收光功率

Fig. 4 Parameters distribution on receiving plane in 5 m×5 m×3 m room model. (a) Received illuminance; (b) received optical power

图 5 是改进遗传算法和遗传算法的比较图。改进遗传算法随机产生的最初种群虽然劣于遗传算法, 但其结果更好, 说明改进遗传算法具有更好的全局最优解搜索能力。此外, 从图 5 中可以看出遗传算法有严重的“早熟”问题, 而改进遗传算法则不存在该问题。

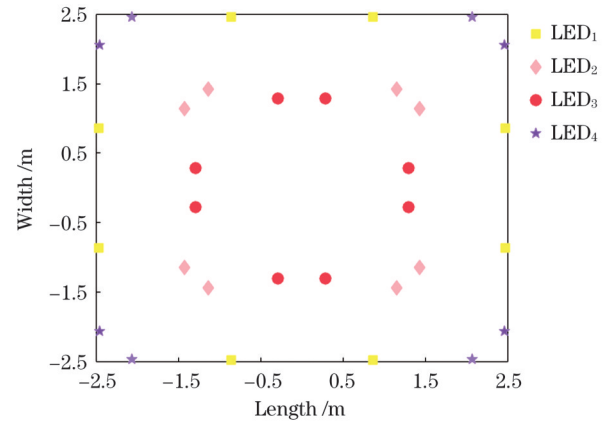


图 3 5 m×5 m×3 m 房间模型内的 LED 阵列布局

Fig. 3 LED array layout in 5 m×5 m×3 m room model

分坐标, 其余 LED 芯片坐标可以按照前述布局方案得到。

图 4(b) 是接收光功率的分布图,  $P_{r,max} = 1062 \mu\text{W}$ ,  $P_{r,min} = 876.6 \mu\text{W}$ , 平均功率为  $1029 \mu\text{W}$ , 接收光功率均匀度达到了 97.7%。结果显示, 该 LED 阵列布局在接收面上的光功率分布均匀性极高。

### 4.2 不同房间模型中室内 VLC 系统的 LED 阵列布局

目前, 室内 VLC 系统的研究大多只在一种房间尺寸下进行 LED 阵列设计, 方法的泛用性未得到验证。鉴于此, 本文分别研究了不同房间模型中室内 VLC 系统的 LED 阵列布局。

图 6 所示为 3 m×3 m×3 m 和 7 m×7 m×3 m 房

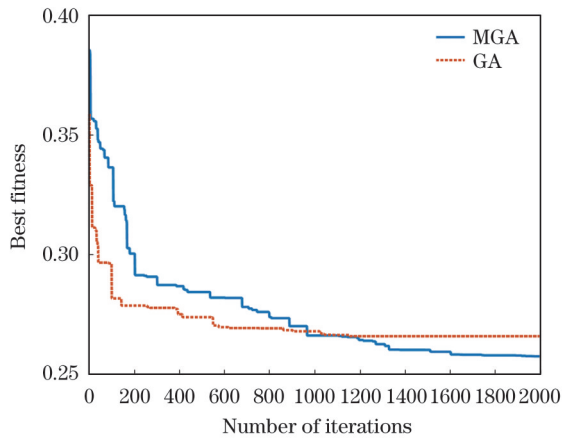


图 5 两种算法的迭代曲线图  
Fig. 5 Iterative curves of two algorithms

间中的 LED 阵列布局,优化后的布局都有 4 种不同半

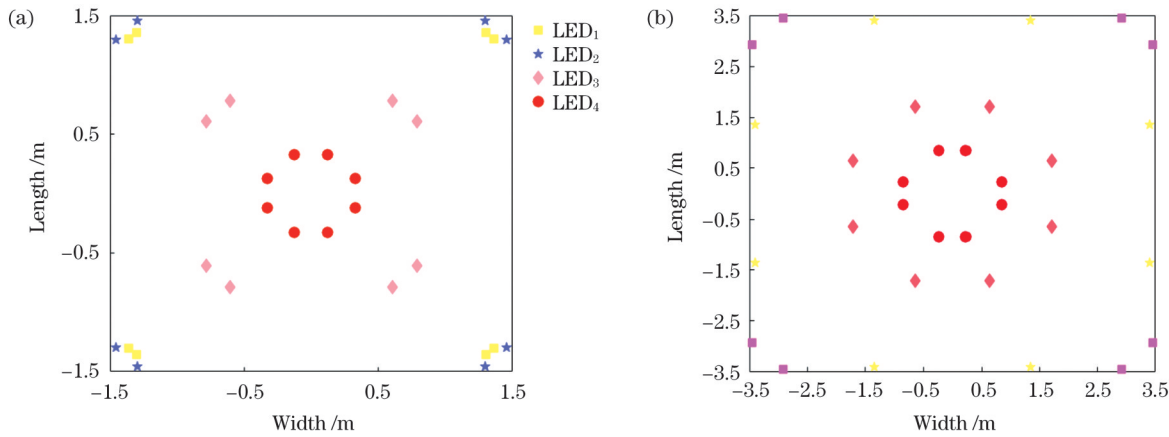


图 6 不同房间模型中的 LED 阵列布局。(a)  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型中的 LED 阵列布局;(b)  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型中的 LED 阵列布局

Fig. 6 LED array layout in different room models. (a) LED array layout in  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  room model; (b) LED array layout in  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  room model

表 4  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型的 LED 芯片参数  
Table 4 LED chip parameters of  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  room model

LED type	Half power angle /( $^{\circ}$ )	Number of lamp beads	X-coordinate /m	Y-coordinate /m
LED <sub>1</sub>	62.28	16	1.3079	1.3629
LED <sub>2</sub>	33.17	36	1.3015	1.4609
LED <sub>3</sub>	74.96	9	0.6057	0.7863
LED <sub>4</sub>	26.78	14	0.1230	0.3244

表 5  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型的 LED 芯片参数  
Table 5 LED chip parameters of  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  room model

LED type	Half power angle /( $^{\circ}$ )	Number of lamp beads	X-coordinate /m	Y-coordinate /m
LED <sub>1</sub>	50.23	16	0.2290	0.8505
LED <sub>2</sub>	56.72	36	2.9294	3.4664
LED <sub>3</sub>	47.91	64	1.3490	3.4118
LED <sub>4</sub>	33.82	16	0.6385	1.7112

功率角的 LED。

表 4 为  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型中 4 种 LED 阵列的坐标等参数,表 5 为  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型中 4 种 LED 阵列的坐标等参数。

图 7(a)、(b)分别为  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型中 LED 阵列布局的接收光照度和接收光功率分布图。在图 7(a)中,  $E_{\min}=1247.1\text{ lx}$ ,  $E_{\max}=1458.2\text{ lx}$ ,  $U_{\text{UIR}}=0.88$ , 光照度符合 ISO 规定的范围(300~1500 lx)。在图 7(b)中,接收光功率均匀度达到了 97.22%。

图 7(c)、(d)分别为  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型中 LED 阵列布局的接收光照度和接收光功率分布图,其中,  $E_{\min}=880.9\text{ lx}$ ,  $E_{\max}=1177.2\text{ lx}$ ,  $U_{\text{UIR}}=0.9$ , 光照度符合 ISO 规定的范围(300~1500 lx)。通过计算可以得出接收光功率均匀度达到了 95.54%。



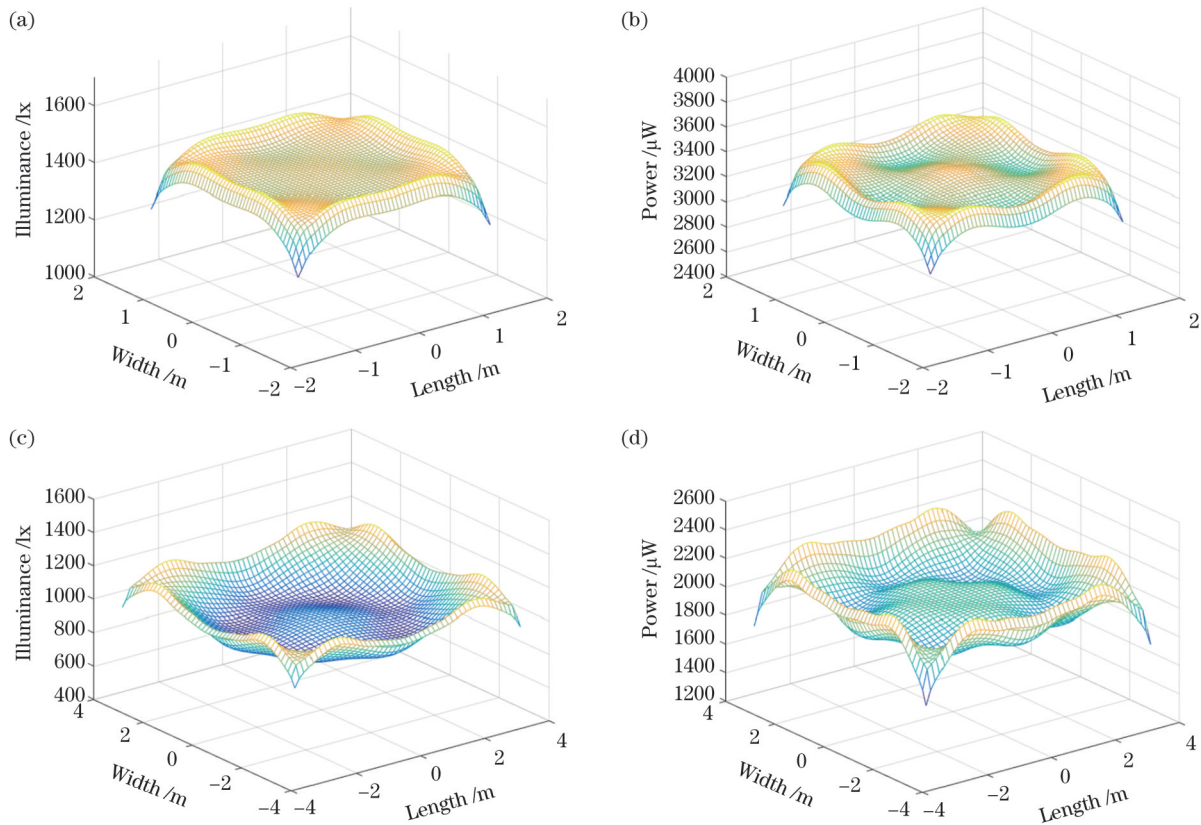


图 7 不同房间模型的接收光照度和接收光功率分布。(a)  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型的接收光照度; (b)  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型的接收光功率; (c)  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型的接收光照度; (d)  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型的接收光功率

Fig. 7 Received illuminance and received optical power distributions of different room models. (a) Received illuminance of  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  room model; (b) received optical power of  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  room model; (c) received illuminance of  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  room model; (d) received optical power of  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  room model

在对  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  和  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$  房间模型进行研究后,笔者又对更多不同房间模型内的 LED 阵列布局进行了优化及总结。图 8 是对房间平面边长以  $0.5\text{ m}$  为步长进行优化后的接收光功率均匀度与接收光照均匀度结果,可以看出,虽然房间的空间尺寸不同,但接收光功率均匀度都在  $95\%$  以上,且接收光照均匀度 (UIR) 都大于  $0.7$ 。这说明本文所提优化方法具有较强的泛用性。

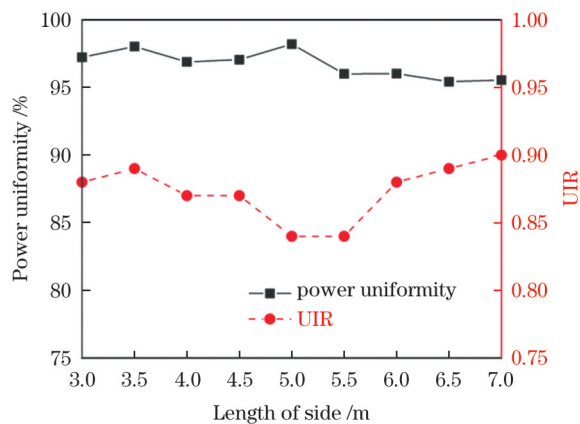


图 8 不同房间模型的接收光功率均匀度和接收光照均匀度  
Fig. 8 Received optical power uniformity and received illumination uniformity of different room models

## 5 结 论

针对室内 VLC 系统,本文提出了一种局部非均匀的对称型布局方案。使用改进遗传算法对 LED 的位置坐标、灯珠数目和半功率角进行同步优化。结果表明:在考虑一次反射的前提下,在  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$  的房间内,接收光功率均匀度达到了  $97.7\%$ ,而且保证了通信系统具有较高的接收光功率,增强了室内通信质量的稳定性。同时,所提方案具有符合室内工作场景的光照度。最后,对不同尺寸房间中的 LED 阵列布局进行了研究和优化,提高了接收光功率均匀度,证实了所提方法可在不同房间模型下提高通信的稳定性和可靠性。本方案有望显著增强室内通信系统的性能,在实际应用中具有广阔的前景。

## 参 考 文 献

- [1] Zhuang Y, Hua L C, Qi L N, et al. A survey of positioning systems using visible LED lights[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 1963-1988.
  - [2] 洪哲扬, 薛凌云, 钱依凡. 基于光电热理论和 BP 神经网络的 LED 阵列光功率计算方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0523002.
- Hong Z Y, Xue L Y, Qian Y F. Calculation method of LED array optical power based on photoelectric thermal theory and BP neural

- network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0523002.
- [3] 刘焕淋, 朱平鑫, 陈勇, 等. 改进遗传模拟退火算法优化室内 VLC 覆盖均匀性[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0106001.  
Liu H L, Zhu P X, Chen Y, et al. Optimization of indoor VLC coverage uniformity by improved genetic simulated annealing algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0106001.
- [4] 张慧颖, 于海越, 王凯, 等. 基于 KPCA-K-means++ 和 GA-LMS 模型的改进 RBF 神经网络室内可见光定位[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1906001.  
Zhang H Y, Yu H Y, Wang K, et al. Indoor visible light positioning of improved RBF neural network based on KPCA-K-means++ and GA-LMS model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1906001.
- [5] 赵黎, 韩中达, 张峰. 基于神经网络的可见光室内立体定位研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0706004.  
Zhao L, Han Z D, Zhang F. Research on stereo location in visible light room based on neural network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0706004.
- [6] Ren J W, Zhu Y J, Zhang Y Y, et al. Optimization of multi-receiver SNRs for indoor visible light communication based on modified evolutionary algorithm[J]. *Optik*, 2021, 228: 166158.
- [7] Haas H, Yin L, Chen C, et al. Introduction to indoor networking concepts and challenges in LiFi[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(2): A190-A203.
- [8] Haas H, Cogalan T. LiFi opportunities and challenges[C]//2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), August 27-30, 2019, Oulu, Finland. New York: IEEE Press, 2019: 361-366.
- [9] Blinowski G. Security of visible light communication systems: a survey[J]. *Physical Communication*, 2019, 34: 246-260.
- [10] 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.  
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.
- [11] 陈勇, 沈奇翔, 刘焕淋. 室内可见光通信中接收光功率均匀性优化方法[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0506003.  
Chen Y, Shen Q X, Liu H L. Optimization algorithm of receiver optical power uniformity in indoor visible light communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0506003.
- [12] Huang L, Wang P, Wang J Y, et al. Optimized design of the light source for an indoor visible light communication system based on an improved bat algorithm[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(34): 10638-10644.
- [13] Wei Z Y, Hu H Y, Huang H M, et al. Optimization of location, power allocation and orientation for lighting lamps in a visible light communication system using the Firefly algorithm[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8796-8808.
- [14] 彭勇刚, 罗小平, 韦巍. 一种新的模糊自适应模拟退火遗传算法[J]. *控制与决策*, 2009, 24(6): 843-848, 853.  
Peng Y G, Luo X P, Wei W. New fuzzy adaptive simulated annealing genetic algorithm[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(6): 843-848, 853.
- [15] Wang J A, Xu A C, Ju J T, et al. Optimization lighting layout of indoor visible light communication system based on improved artificial fish swarm algorithm[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(3): 035701.
- [16] 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.
- [17] 杨智群. 室内可见光通信调制技术与功率分布优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2019: 21-22.  
Yang Z Q. Research on modulation and optimization of power distribution for indoor visible light communication[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019: 21-22.
- [18] Qin Z, Wang K, Chen F, et al. Analysis of condition for uniform lighting generated by array of light emitting diodes with large view angle[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 17460-17476.
- [19] 王加安, 车英, 郭林焯, 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.  
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.
- [20] Wang X L. LED ring array light source design and uniform illumination properties analysis[J]. *Optik*, 2017, 140: 273-281.
- [21] 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.  
Yuan Q. Lighting standard of international lighting commission: indoor workplace lighting[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2002, 13(4): 55-60.
- [22] Kamalakis T, Dogkas L, Simou F. Application of a genetic algorithm to optimize the performance of a visible light communications system: key concepts and preliminary results[C]//11th Hellenic Conference on Artificial Intelligence, September 2-4, 2020, Athens, Greece. New York: ACM Press, 2020: 129-134.
- [23] Zhao H M, Zhao X, Han F L, et al. Cobalt crust recognition based on kernel Fisher discriminant analysis and genetic algorithm in reverberation environment[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(1): 179-193.
- [24] 陈勇, 尹辉, 刘焕淋, 等. LED 通信中利用蚁群算法优化光功率[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(3): 462-467.  
Chen Y, Yin H, Liu H L, et al. Received optical power optimization based on ant colony algorithm for LED communications[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(3): 462-467.
- [25] 杨智群, 梁继然, 毛陆虹. 蚁群算法优化室内可见光通信功率均匀性的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 220601.  
Yang Z Q, Liang J R, Mao L H. Power uniformity optimization in indoor visible light communication based on ant colony algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 220601.

## Optimization of Light Source Layout in Visible Light Communication Using a Modified Genetic Algorithm

He Fengtao<sup>1\*</sup>, Yu Jie<sup>1\*</sup>, Zhang Jianlei<sup>1\*\*\*</sup>, Yang Yi<sup>1</sup>, Yang Yayi<sup>1</sup>, Zhu Yunzhou<sup>2</sup>, Wang Xiaobo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Underwater Information and Control, China Shipbuilding Industry Corporation 705 Research Institute, Xi'an 710077, Shaanxi, China*

### Abstract

**Objective** Visible light communication (VLC) technology is crucial in high-speed positioning, sensing, internet of things (IoT),



and other fields because of its characteristics of high transmission rate, no band limit, safety, and eco-friendliness. With the development of VLC technology, indoor VLC technology has also received increased attention. The LED array is used as the transmitting unit in an indoor VLC system. However, the layout and parameters of a LED array affect the received illumination and optical power, thus changing the communication quality of receiving plane and affecting the fairness of user communication. Therefore, to solve the problem of uneven communication performance caused by conventional array layout, we propose a partial-nonuniform symmetrical layout by using a modified genetic algorithm. Considering the primary reflection of the wall, the number of light beads on the chips, the half power angles, and array layouts that can further improve the received optical power uniformity are designed to synchronously optimize the position of LED chips.

**Methods** In this study, by studying and summarizing the common LED array layouts used in indoor VLC systems worldwide, a partial-nonuniform symmetrical array layout scheme was developed. The scheme was used to optimize the position of LED chips, number of light beads on the chip, and half power angles of the partial array. Thus, the entire surface of emission was obtained by folding the optimized nonuniform part before the optical power uniformity of the receiving surface was calculated based on the optimized array layout scheme. Thereafter, the VLC model with either non-line of sight link (NLOS) or line of sight (LOS) link was constructed. In addition, the crossover and variation operators in a genetic algorithm (GA) were modified via combination with the simulated annealing algorithm and self-adaption. Based on the LOS link and NLOS link models, an objective function that can synchronously optimize the position of LED chips, the number of light beads on the chip, and the half power angles was constructed. Finally, using the room model as the research object, the array layout was optimized by a modified genetic algorithm. Different side lengths of the room model, with a step length of 0.5 m, were considered. The LED array layouts in the room models of sizes  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$ ,  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$ , and  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 7\text{ m}$  were examined, and the according parameters were determined; this demonstrated the versatility of the proposed scheme.

**Results and Discussions** The proposed scheme was used to optimize the LED array. In the room model of size  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ , considering the primary reflection, the optimized LED array layout (Fig. 3) was obtained. The position of LED chips, number of light beads on the chip, and half power angles of the LED chip are shown in Table 3. The received optical power uniformity reaches 97.7%, the maximum received illuminance is 1341 lx, the minimum received illuminance is 1089.9 lx, and the illumination uniformity is 0.84 [Fig. 4 (a)]. The illuminance conforms to the specified international standardization range (300–1500 lx). The maximum received optical power is  $1062\ \mu\text{w}$ , and the minimum received optical power is  $876.6\ \mu\text{w}$  [Fig. 4 (b)], thus ensuring a high received optical power of the communication system. In the room models of sizes  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  and  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$ , the optimized LED array layouts (Fig. 6) have four different LED chips. Their parameters are listed in Tables 4 and 5. In the  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$  room model, the illumination uniformity of is 0.88 [Fig. 7 (a)] and the received optical power uniformity is 97.22% [Fig. 7 (b)]. In the room model of size  $7\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$ , the received illumination uniformity of is 0.9 [Fig. 7 (c)], and the received optical power uniformity is 95.54% [Fig. 7 (d)]. The received illuminance values of the two aforementioned layouts also meet the lighting standards. Moreover, the received optical power and illumination uniformity after the optimization of the room model were noted with a step length of 0.5 m (Fig. 8). The results indicate that even if the room size varies, the received optical power uniformity maintains more than 95%, and the received illumination uniformity is always greater than 0.7, indicating that the proposed optimization method has strong versatility.

**Key words** optical communications; visible light communication; genetic algorithm; light source layout; received optical power