

# 光学学报

## 基于可见光通信的 LED 布局与功率分配的同步优化

陈勇<sup>1\*</sup>, 胡陈毅<sup>1\*\*</sup>, 刘焕淋<sup>2</sup>, 吴志倩<sup>1</sup>, 吴金兰<sup>1</sup>, 王创世<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065;

<sup>2</sup>重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

**摘要** 本文提出了一种基于融合改进策略的快速鲸鱼优化算法(FWOA),用于解决室内可见光通信(VLC)系统中光信号分布不均匀的问题。该算法通过反向学习和非线性收敛因子提升了收敛速度,采取扰动搜索机制实现全局寻优。在考虑发光二极管(LED)部署高度的光源布局和功率分配方面,采取了同步优化方案。实验结果表明,在优化16个LED布局模型后,系统照度均匀度提升了7.39%~109.03%,接收功率的品质因子由5.25提高到12.23,同步优化后进一步提高至15.12。此外,实验发现,当LED数量存在限制时,通过选择合适的LED数量,可以在系统能量和性能之间达到较好的平衡。

**关键词** 光通信; 可见光通信; 鲸鱼优化算法; 光源部署高度; 功率分配; 同步优化

中图分类号 TN929.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230597

### 1 引言

室内可见光通信(VLC)系统中往往存在光信号分布不均匀的情况。然而,均匀接收照度可以提供更舒适的照明环境,同时,均匀接收光功率可以提高VLC系统的通信质量与通信的公平性<sup>[1-3]</sup>。因此,为保证光信号的均匀分布,对系统的均匀性进行优化是不可或缺的。

在室内VLC系统中,为实现室内接收平面上光信号的均匀性覆盖,目前主要针对光源的布局和功率分配进行优化。优化对象也从发光二极管(LED)的位置布局<sup>[4]</sup>扩展到了LED的半功率角<sup>[5]</sup>、LED的方向角<sup>[6]</sup>和LED的功率分配<sup>[7]</sup>。但现有的研究大多局限于房间顶部二维空间的优化,没有结合LED的部署高度进行联合研究,也很难找到全局最优解。2012年,Wang等<sup>[4]</sup>采用了房顶LED矩形+圆形的复杂布局模型,实验结果中光信号的波动也都得到了大幅度的降低,提升了系统的通信公平性,但并未对LED布局模型的位置坐标做进一步的探索,实验结果也有待提高。2017年,王加安等<sup>[8]</sup>对比了室内房顶LED的矩形布局优化模型和圆形布局优化模型,实验结果表明,LED圆形布局模型拥有更好的覆盖面和通信性能,但并未考虑复杂光源布局的使用场景。2018年,Mahfouz

等<sup>[9]</sup>提出了16个LED阵列的新型复杂排列设计,实验结果表明,该模型在接收功率和信噪比(SNR)方面均得到了改善,但未考虑对其开展进一步的优化研究。2019年,陈泉润等<sup>[7]</sup>先通过对比房顶不同LED的间隔,优化LED方阵+圆环的布局模型,再通过试探LED在不同功率下的照度均方差进行功率分配,改善了室内VLC系统接收平面的均匀性,但其优化方法不够智能与全面。2020年,Gismalla等<sup>[10]</sup>提出了一种房顶矩形交错的复杂部署模型,利用更少的LED光源提供更均匀的接收功率和SNR分布,但其部署模型过于复杂。同年,Wang等<sup>[11]</sup>引入并改进了人工鱼群算法(IAFSA),利用算法优化房顶LED分布的横纵坐标,减少接收功率的波动,提高了系统接收功率的均匀性,但优化方案仅考虑了房顶二维平面的研究。Huang等<sup>[5]</sup>利用改进蝙蝠算法(IBA)先优化房顶的光源布局,再优化半功率角,有效降低了接收照度与接收光功率的波动,但其优化方案采取先后分步的形式进行,未能真正寻找到最优解。Zhai等<sup>[1]</sup>提出了一种基于多种群遗传算法(MPGA)的房顶LED任意布局,以解决光照度和接收功率的不均匀分布,其优化效果仍有很大的提升空间。因此,现有的方案常基于房间顶部进行光源布局优化,未考虑光源的部署高度,而且往往采用先后分步的优化方案来优化光源布局,在同步优化上

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-03-15; 录用日期: 2023-03-24; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(51977021)、重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-msxmX0682)、重庆市研究生科研创新项目(CYS22483)

通信作者: \*chenyong@cqupt.edu.cn; \*\*s200331005@stu.cqupt.edu.cn

鲜有研究。

为了解决之前研究中突出的问题,本文提出了一种基于混合改进策略的快速鲸鱼优化算法(FWOA),以同步优化室内LED的光源布局和功率分配。通过考虑LED的部署高度,采用同步优化方法,实现LED布局的最佳方案,并使其达到室内光信号的最佳均匀性。此外,针对同步优化中可能存在的搜索范围大、优化时间长等问题,本文从群体智能的角度引入鲸鱼优化算法(WOA),并通过混合改进策略进一步提高算法的收敛速度和全局寻优能力。

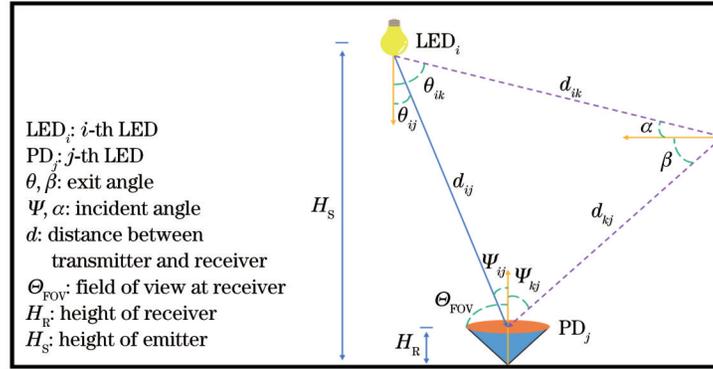


图1 室内LoS链路和NLoS链路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of indoor line-of-sight (LoS) link and non-line-of-sight (NLoS) link

## 2.1 光照强度

光照强度是用来描述照明程度的大小,单位为勒克斯(lx)。发光强度代表光通量的值,单位为坎德拉(cd)。假设每一个LED光源具有朗伯辐射模型,LED<sub>i</sub>的中心发光强度可以表示为

$$I(0)_i = I(\theta_i = 0)_i = \frac{m+1}{2\pi} \Phi_i, \quad (1)$$

式中: $\theta_i$ 为LED<sub>i</sub>的出射角; $\Phi_i$ 表示光通量; $m$ 是朗伯发射的阶数,可以表示为 $m = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_{1/2})$ <sup>[13-14]</sup>, $\theta_{1/2}$ 为LED的半功率角。

可以将光通量近似为 $\Phi_i = \zeta_i P_i$ , $\zeta_i$  (lm/W) 可视对应LED<sub>i</sub>光功率到光通量的转换系数,取决于部署的LED, $P_i$ 是发射功率。所以LoS链路中的照度 $E_{ij}(\text{LoS})$ 为

$$E_{ij}(\text{LoS}) = \frac{(m+1)\zeta_i P_i \cos^m \theta_{ij} \cos \psi_{ij}}{2\pi d_{ij}^2}, \quad (2)$$

式中: $\psi_{ij}$ 为PD的入射角; $d_{ij}$ 表示LED<sub>i</sub>与光电接收器PD<sub>j</sub>之间的欧氏距离。

## 2 系统模型

室内VLC系统模型,考虑房间尺寸为 $L \times W \times H$ ,LED的数量为 $M$ 。由于反射链路中一次反射增益对信道模型的贡献最大<sup>[12]</sup>,本文考虑引入一次反射链路,通过将墙面细分为小面积的类似网格,将每个网格的中心视为辅助光源建模分析。室内接收平面距离地面的高度为 $H_r$ ,接收平面考虑 $K$ 个光电接收器(PD)。室内视距(LoS)链路和非视距(NLoS)链路示意图如图1所示。

考虑墙面的反射,由迭代法可以得到一次反射对接收平面光照度的贡献为

$$dE_{ij}(\text{NLoS}) = E_{ik}(\text{LoS}) \cdot \frac{\rho \cos \beta \cos \psi_{kj}}{\pi d_{kj}^2} dA_{\text{wall}} = \frac{(m+1)\rho \cos^m \theta_{ik} \cos \psi_{kj} \cos \alpha \cos \beta \zeta_i P_i}{2\pi^2 d_{ik}^2 d_{kj}^2} dA_{\text{wall}}, \quad (3)$$

式中: $\rho$ 是墙面的反射率; $dA_{\text{wall}}$ 是墙面微元面积; $d_{ik}$ 是第 $i$ 个发射LED灯到墙面随机点的距离; $d_{kj}$ 为墙面随机点到第 $j$ 个PD的距离; $\alpha$ 是第 $i$ 个发射LED灯到墙面随机点的入射角; $\beta$ 是墙面随机点的出射角。因此,总的照度为

$$E_{\text{total}} = \sum [E(\text{LoS}) + \int_{\text{wall}} dE(\text{NLoS})]. \quad (4)$$

## 2.2 接收功率

LED广义朗伯辐射的辐射强度模式的角分布为

$$R(\theta) = \frac{(m+1) \cos^m(\theta)}{2\pi}. \quad (5)$$

LoS链路中LED和接收器之间的增益<sup>[15]</sup>为

$$H_{ij}(\text{LoS}) = \frac{R(\theta_{ij}) A_{\text{PD}} \cos(\psi_{ij}) T_s(\psi_{ij}) g(\psi_{ij}) \text{rect}\left(\frac{\psi_{ij}}{\theta_{\text{FOV}}}\right)}{d_{ij}^2} = \frac{A_{\text{PD}}(m+1)}{2\pi d_{ij}^2} \cos^m(\theta_{ij}) \cos(\psi_{ij}) T_s(\psi_{ij}) g(\psi_{ij}) \text{rect}\left(\frac{\psi_{ij}}{\theta_{\text{FOV}}}\right), \quad (6)$$

式中:  $A_{PD}$  为探测器的有效区域;  $T_s(\psi)$  表示光学滤光器增益;  $g(\psi)$  为光学集中器增益, 表示为  $g(\psi) = \eta^2 / \sin^2(\Theta_{FOV})^{[16]}$ ;  $\eta$  为光学集中器内部折射率;  $\Theta_{FOV}$  表

示接收器的视场角;  $\text{rect}()$  为矩形函数。

对于 NLoS 链路, 考虑一次反射, 由迭代法可以得到一次反射对信道增益的贡献<sup>[17-18]</sup>为

$$dH_{ij}(\text{NLoS}) = H_{ik}(\text{LoS}) \cdot \frac{A_{PD} \rho \cos \beta \cos \psi_{kj}}{\pi d_{kj}^2} T_s(\psi_{kj}) g(\psi_{kj}) \text{rect}\left(\frac{\psi_{kj}}{\Theta_{FOV}}\right) dA_{\text{wall}} = \frac{A_{PD} (m+1) \rho \cos^m \theta_{ik} \cos \psi_{kj} \cos \alpha \cos \beta}{2\pi^2 d_{ik}^2 d_{kj}^2} T_s(\psi_{kj}) g(\psi_{kj}) \text{rect}\left(\frac{\psi_{kj}}{\Theta_{FOV}}\right) dA_{\text{wall} \circ} \quad (7)$$

总的接收功率  $P_r$  为

$$P_r = \sum [P_r H(\text{LoS}) + \int_{\text{wall}} P_r dH(\text{NLoS})]. \quad (8)$$

在仿真模型中考虑噪声为加性高斯白噪声, 噪声方差为  $\sigma^2$ , 表达式为

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2, \quad (9)$$

式中:  $\sigma_{\text{shot}}^2$  是散粒噪声方差;  $\sigma_{\text{thermal}}^2$  是热噪声方差, 噪声具体参数均能在文献[19]中找到详细解释。因此, SNR 可表示为

$$S_{\text{SNR}} = 10 \lg \frac{(rP_r)^2}{\sigma^2} = 10 \lg \frac{r^2 P_r^2}{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2}, \quad (10)$$

式中,  $r$  是 PD 的光电转换效率。

本文在设计性能指标时, 考虑室内 VLC 系统对用户接收功率的均匀性和照度的波动幅度, 即接收功率的品质因子  $Q_A$ <sup>[9]</sup> 和照度的波动值  $F_E$ , 通过  $(1 - F_E) \times 100\%$  表示照度的均匀度。品质因子和均匀度两者的值越大系统性能越好。  $Q_A$  和  $F_E$  分别由下式表示:

$$Q_A = \frac{\text{mean}(\Lambda)}{2\sqrt{\text{var}(\Lambda)}}, \quad (11)$$

$$F_E = \frac{\max(E_{\text{total}}) - \min(E_{\text{total}})}{\text{mean}(E_{\text{total}})}, \quad (12)$$

式中:  $\Lambda = (rP_r)^2 / \sigma^2$ ;  $\text{mean}(\bullet)$  表示平均值;  $\text{var}(\bullet)$  表示方差;  $\max(\bullet)$  表示最大值;  $\min(\bullet)$  表示最小值。

### 3 FWOA

WOA 是 Mirjalili 等<sup>[20]</sup> 在 2016 年基于群体智能提出的优化算法, 是一种有效的解决方案, 具有参数少、结构灵活和兼容性高等优点。 WOA 在收敛速度和寻优精度上均优于其他传统的优化算法<sup>[21]</sup>, 但仍然存在会陷入局部最优的问题。此外, 本文考虑对光源部署高度的光源布局与功率分配进行同步优化, 需要更快的收敛速度。因此, 本文提出了一种基于混合改进策略的 WOA, 简称快速 WOA (FWOA), 采用反向学习和非线性收敛因子优化其收敛速度, 通过扰动搜索机制使其跳出局部最优。

#### 3.1 算法设计

在 WOA 的寻优过程中, 其中每条鲸鱼代表一种 LED 的位置布局与功率分配方案, 座头鲸为最优方案, 该算法的整个过程包含全局搜索和局部搜索两个

阶段<sup>[22]</sup>。

##### 1) 全局搜索

在算法初期, 全局搜索和局部搜索是随机的, 寻优结果可能在房间内的任何位置, 通过设置一个在  $[0, 1]$  之间的随机数  $p$  实现, 寻优时的搜索方向由两个一维系数向量  $\vec{A}$  和  $\vec{C}$  来控制, 通过  $\vec{A}$  判断算法所处的阶段。当随机数  $p < 0.5$ , 系数向量  $\vec{A} \geq 1$  时, 此时处于算法前期, 开启全局搜索, 当前寻优的方向会随机选择, 当前位置布局与功率分配的更新规则为

$$\vec{D}_{\text{rand}} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_{\text{rand}} - \vec{X}(t) \right|, \quad (13)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{\text{rand}} - \vec{A} \cdot \vec{D}_{\text{rand}}, \quad (14)$$

式中:  $t$  为当前迭代次数;  $\vec{X}$  为位置布局与功率分配的结果, 以向量的形式进行存储, 向量的维度为一维, 依次存储 LED 在三维空间的  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的位置坐标及其功率分配结果, 向量的空间大小根据待优化 LED 的数量确定, 为待优化 LED 数量的 4 倍;  $\vec{X}_{\text{rand}}$  表示从多种优化结果中随机选取的一种方案, 其向量的存储结构与  $\vec{X}$  一致;  $\vec{D}_{\text{rand}}$  表示随机选取方案与最优方案的差值, 即室内部署光源欧氏距离的差值和功率分配的差值, 其向量维度和大小与  $\vec{X}$  保持一致;  $|\cdot|$  表示绝对值。向量  $\vec{A}$  和  $\vec{C}$  的表达式分别为

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a}, \quad (15)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}, \quad (16)$$

$$\vec{a} = 2 - 2t/T_{\text{max}}, \quad (17)$$

式中:  $\vec{r}$  为  $[0, 1]$  间的一维随机向量;  $\vec{a}$  是初始值为 2 的一维控制向量, 随着迭代次数的增加线性递减至 0,  $\vec{r}$  与  $\vec{a}$  的向量大小同样为待优化 LED 数量的 4 倍;  $T_{\text{max}}$  为最大迭代次数。

##### 2) 局部搜索

当搜索到某一最优配置方案时, 通过判断随机数的值和算法所处的阶段, 分别采取不同的搜索方式, 此时, 位置布局与功率分配的更新规则为

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}_1, & p < 0.5, \vec{A} < 1 \\ \vec{D}_2 \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t), & p \geq 0.5 \end{cases}, \quad (18)$$

$$\vec{D}_1 = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right|, \quad (19)$$

$$\vec{D}_2 = \left| \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right|, \quad (20)$$

式中:  $\vec{X}^*$  为当前最优方案的存储向量, 其向量的存储结构与  $\vec{X}$  一致;  $b$  为常数, 用于定义局部搜索的包围机制;  $l$  为  $[-1, 1]$  之间的随机数。此时的 WOA 还存在收敛速度不够快、全局寻优能力不够强的问题。

### 3.2 基于反向学习优化收敛速度的设计

为应对 WOA 存在收敛速度不够快的问题, 本文采取反向学习<sup>[23]</sup>WOA 的初始化阶段, 通过添加具有先验知识的 LED 位置布局与功率分配结果, 使算法快速收敛。在优化算法中, 假设初始化阶段有  $N$  个 LED 位置布局 + 功率分配的选择方案, 由  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  表示, 则反向学习某一方案  $x'_i$  为

$$x'_i = \zeta(x_{\min} + x_{\max} - x_i), \quad (21)$$

式中:  $\zeta$  为反向学习因子, 是区间  $[0, 2]$  上的随机数;  $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  分别为初始选择方案中距离最优解最近和最远的方案。

基于反向学习优化的初始化选择方案的基本步骤如下:

- 1) 随机初始化选择方案  $\{x_i\}$ , 选取前  $N/2$  个系统均匀性较优的方案组成新的方案  $\{\hat{x}_j\}$ ;
- 2) 求出新方案  $\{\hat{x}_j\}$  的反向学习方案  $\{x'_j\}$ ;
- 3) 合并方案  $\{x_i\}$  和  $\{x'_j\}$  得到新的选择方案, 从中选择  $N$  个系统均匀性较优的方案组成新的选择方案。

### 3.3 基于非线性收敛因子优化收敛速度的设计

上述改进方案虽然提升了算法第一次迭代的搜索进度, 但对算法的主体阶段还缺少较大幅度的改善, 因此, 本文通过调整  $\vec{A}$  使寻优阶段尽早进入局部搜索, 以加快算法主体的收敛速度。由式(15)可知,  $\vec{A}$  的每一维均为分布在  $[-\vec{a}, \vec{a}]$  内的随机数,  $\vec{a}$  的分布呈线性递减, 而寻优过程可视为复杂的非线性行为。因此, 本文引入圆的非线性曲线特性来更新收敛因子  $\vec{a}$ , 原线性收敛曲线和圆的非线性收敛曲线如图 2 所示。

由图 2 可知, 原线性收敛因子  $\vec{a}$  是过  $A[0, 2]$ 、 $B[1, 0]$  的线性曲线, 引入过  $A$ 、 $B$  两点但半径不同的圆曲线, 不同半径的圆曲线在  $AB$  区间的非线性是不一样的, 半径越小,  $AB$  区间的曲线越靠近虚轴, 半径越大, 曲线越靠近标准 WOA 中的线性递减曲线。对  $AB$

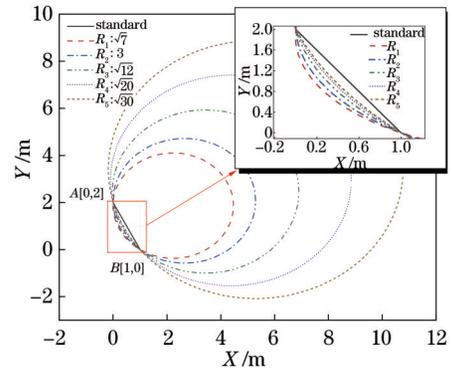


图 2 非线性曲线收敛图

Fig. 2 Nonlinear curve convergence plot

区间的圆曲线通过四参数方程进行拟合, 将拟合后的非线性函数用于更新收敛因子  $\vec{a}$ , 通过梯度下降法确定最优半径。用于圆曲线拟合的四参数方程表达式为

$$Y = (A - D) \sqrt{1 + (X/C)^B} + D, \quad (22)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  均为拟合参数。最优半径选择  $R = 3$ , 拟合后收敛因子  $\vec{a}$  的更新规则为

$$\vec{a} = (A - D) \sqrt{1 + \left( \frac{t}{T_{\max}} \cdot \frac{1}{C} \right)^B} + D. \quad (23)$$

具体拟合参数如表 1 所示。

表 1 拟合参数

Table 1 Fitting parameters

Parameter	Value
$A$	2.008686185862910
$B$	0.745336076479209
$C$	1.787680223756580
$D$	-3.082271544172980

本次改进虽然提升了算法主体的收敛速度, 但过早进入局部搜索的同时, 加剧了算法陷入局部极值寻优的状况。因此, 设计了扰动搜索以优化局部搜索机制。

### 3.4 基于扰动搜索优化局部搜索机制的设计

本文在局部搜索阶段对 LED 位置布局 + 功率分配的更新规则进行改进, 增加全局扰动搜索机制, 将式(18)改进为

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} (1 - \omega) \cdot (\vec{X}_{\text{rand}} - \vec{A} \cdot \vec{D}_{\text{rand}}) + \omega \cdot \vec{X}^*(t), & p < 0.5, \vec{A} < 1 \\ \vec{D}_2 \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t), & p \geq 0.5 \end{cases}, \quad (24)$$

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \sin\left(\kappa\pi \cdot \frac{t}{T_{\max}} + \vartheta\right), \quad (25)$$

式中:  $\omega$  为扰动系数;  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$  分别为  $\omega$  的最大值和最小值;  $\kappa$  和  $\vartheta$  为变换参数。取  $\kappa = 0.5$ 、 $\vartheta = 0$  使  $\omega$  呈

凹函数, 通过对算法前期施加较大的扰动力度, 使算法能够快速跳出局部极值。在算法后期施加较小的扰动, 更好地平衡算法的搜索能力, 通过混合改进策略对算法的性能进行全面提升。

### 3.5 适应度函数的设计

适应度函数作为算法寻优中的关键部分,考虑室内 VLC 系统中接收功率的平坦性和 LED 的利用率,与过往研究中仅选取方差作为适应度函数不同,本文还考虑了使优化结果中的接收功率尽可能更高,以达到更好的通信性能。因此,定义适应度函数  $F_F$  为

$$F_F(P_r) = \frac{\text{std}(P_r)}{\text{mean}(P_r)}, \quad (26)$$

式中,  $\text{std}(\cdot)$  表示标准差。

下面将对基于 FWOA 优化室内 VLC 系统的光源布局与功率分配进行更具体的描述,具体优化流程可分为以下几个步骤:

输入:输入室内 VLC 系统模型固有参数(包括室内房间的尺寸、LED 器件固有参数及其寻优范围、接收机数目、接收机器件固有参数等)和算法执行所需要的参数(包括初始化种群数量、搜索维度、最大迭代次数和随机参数);

输出:每个 LED 的最佳位置坐标和功率分配;

步骤 1:根据输入建立室内 VLC 系统模型和初始化 FWOA 的总群;

步骤 2:利用反向学习重新构建具有先验经验的新总群;

步骤 3:根据当前迭代次数,计算当前非线性收敛因子  $\vec{a}$  和当前扰动系数  $\omega$ ;

步骤 4:根据步骤 3,在算法前期进行全局搜索,算法后期进行局部搜索,通过系数向量  $\vec{A}$  和  $\vec{C}$  控制搜索方向来产生新的解,即每个 LED 的位置坐标和功率分配;

步骤 5:根据 LED 位置坐标和功率分配的调节范围,判断新解是否越界,若是,跳转到步骤 4;否则,继续执行步骤 6;

步骤 6:根据适应度函数,计算当前解的适应度值,适应度值最小的解为当前最优解;

步骤 7:根据输入的最大迭代次数,判断当前迭代次数是否小于最大迭代次数,若是,跳转到步骤 3;否则,继续执行步骤 8;

步骤 8:输出全局最优解作为最终 LED 的位置坐标和功率分配结果。

FWOA 的伪代码由表 2 给出。

## 4 仿真与分析

在实验中,考虑 LED 部署高度的室内 VLC 光源布局模型,采用 LED 阵列,由于 LED 阵列内间距很小,因此,LED 阵列可以被视为一个整体。将室内接收平面平均划分为  $100 \times 100$  个分区,在每个子区域中心部署一个 PD 接收器。表 3 给出了室内 VLC 系统的仿真参数。表 4 给出了 FWOA 的实验参数。

### 4.1 基于同步优化的最优布局

在算法优化部分,通过利用 FWOA 对室内 VLC 系统的光源布局与功率分配进行同步优化,其中光源位置布局考虑 LED 的部署高度,寻找自由空间中 LED 的最优分布模型,探索最佳能效优化方案,以达到超越传统先验位置模型和分布优化方案的系统性能。同步优化在面对多个优化对象时,会同时进行寻优。在优化 LED 的光源布局与功率分配时,将 LED 的光源布局与功率分配联合作为优化对象进行多维度搜索。同步优化方案能够合理地平衡多个优化对象之间的耦合关系,寻找到优化任务的最优解。与此同时,还需要考虑实际使用的场景。在室内办公室中,LED 灯源合适的安装高度为  $2.5 \sim 3 \text{ m}$ <sup>[24]</sup>,室内工作场所需满足  $300 \text{ lx}$  的最低照度标准<sup>[25]</sup>。

图 3 与图 4 展示了同步优化下的最优布局方案及其功率分配结果。通过图 3(a)可以发现,LED 较多地分布在房间的边缘位置,少数 LED 分布在房间的中心区域。这是因为房间中心区域能够接收到更多的光信号,而房间边缘角落常常处于低覆盖率状态。优化结果也显示高度的变化会影响光信号的均匀性。在功率分配后,与传统固定功率方案相比<sup>[4,9-10]</sup>,同步优化后的总发射功率仅为 50%,系统的能效得到了极大的提升,系统的性能得到了进一步改善。

最优布局下 SNR 的分布和接收功率的分布如图 5

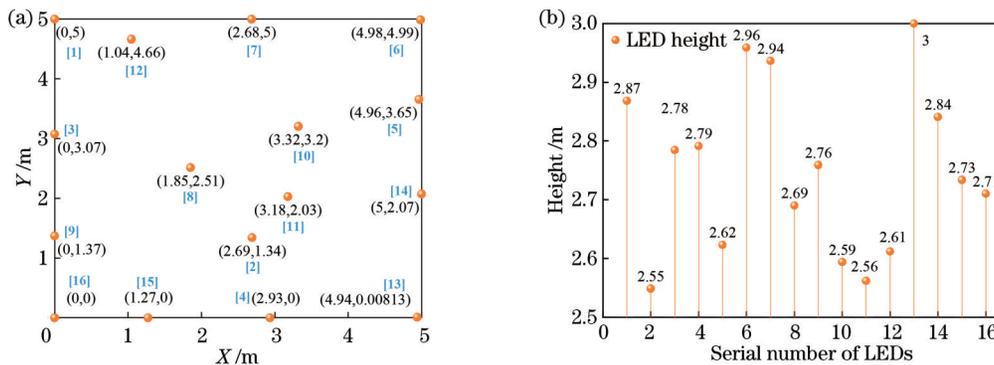


图 3 16 个 LED 灯同步优化后的最优布局示意图。(a) 二维空间内的坐标位置;(b) 16 个 LED 的高度

Fig. 3 Schematic diagram of optimal layout after synchronous optimization of 16 LED lamps. (a) Coordinate positions in 2D space; (b) heights of 16 LEDs

表 2 FWOA 的伪代码  
Table 2 Pseudocode for FWOA

---

**FWOA**

---

**Input:** Room size  $L \times W \times H$ , number of LEDs  $M$ , height of receiving plane  $H_R$ , and fitness function  $F_F$

**Initialize:** Search dimension  $D$ , population size  $N$ , max number of iterations  $T_{max}$ , and other parameters of algorithm

**Reverse learning:** Carry out reverse learning according to Eq. (21), reconstruct initial population and determine that optimal individual in population is humpback whale

**while** ( $t < T_{max}$ )

Update nonlinear convergence factor  $\vec{a}$  according to Eq. (23)

Update coefficient vector  $\vec{A}$  and  $\vec{C}$  according to Eq. (18) and Eq. (16)

Update random disturbance coefficient  $\omega$  according to Eq. (25)

Randomly update parameters  $\vec{r}$ ,  $\rho$  and  $l$

**if** ( $\rho < 0.5$ )

**if** ( $\vec{A} \geq 1$ )

Update whale individual position according to Eq. (14)

**else if** ( $\vec{A} < 1$ )

Update whale individual position according to Eq. (24)

**end if**

**else if** ( $\rho \geq 0.5$ )

Update whale individual position according to Eq. (24)

**end if**

Calculate fitness value  $F_{Fi}$  of individual whales

**if** ( $F_{Fi} < F_{Fpre} \& F_{Fi} \geq 0$ )

Update local optimal solution  $\vec{X}^v$

**end if**

**if** ( $F_{Fi} < F_{Fmin} \& F_{Fi} \geq 0$ )

Update global optimal solution  $\vec{X}^*$

**end if**

Continue to iterate:  $t = t + 1$

**end while**

**Output:** Global optimal solution  $\vec{X}^*$

---

表 3 VLC 系统参数设置  
Table 3 Parameter settings of VLC system

Parameter	Symbol	Value
Room size / m <sup>3</sup>	$L \times W \times H$	$5 \times 5 \times 3$
Number of LEDs	$M$	4-16
Number of PDs	$K$	10 <sup>4</sup>
Height of receiving plane / m	$H_R$	0.85
LEDs in each lamp	$U$	$7 \times 7$
Semi-angle at half-power of LED / (°)	$\theta_{1/2}$	60
Conversion factor of LED light power to luminous flux / (lm·W <sup>-1</sup> )	$\zeta$	90
Emitted light power of LED / (W·M <sup>-1</sup> )	$P_t$	0.01-1
Interval between LEDs / m	$s$	0.01
Area of PD / cm <sup>2</sup>	$A_{PD}$	1
Gain of optical filter	$T_s(\psi)$	1
Optical concentrator gain	$G(\psi)$	1
Photoelectric transformation efficiency / (A·W <sup>-1</sup> )	$r$	1
Reflection coefficient of wall	$\rho$	0.8
Field of view of photoelectric detector / (°)	$\theta_{FOV}$	90

表 4 FWOA 的实验参数

Table 4 Experimental parameters of FWOA

Parameter	Symbol	Value
Population size	$N$	200
Maximum number of iterations	$T_{max}$	120
Maximum value of perturbation factor	$\omega_{max}$	0.95
Minimum value of disturbance factor	$\omega_{min}$	0.15

所示。其中, SNR 的波动范围为 24.72~26.35 dB, 平均 SNR 为 25.96 dB, 系统 SNR 获得了较好的均匀性分布。接收功率的品质因子  $Q_A$  为 15.12, 照度均匀度达到了 82.07%, 照度最小值为 449.51 lx (>300 lx), 因此, 在满足办公室内照度标准的同时, 室内 VLC 系统的照度与接收功率也都处于平坦的覆盖状态。

为了验证同步优化后的系统性能, 选取了 5 种不同的 LED 灯源优化方案与之对比, 表 5 列出了同步优化后的性能指标。其中前 5 种为对比方案, 固定发射功率为 1 W/M, 对各方案的品质因子  $Q_A$ 、照度均匀度、SNR 方差以及平均照度进行对比分析。对比结果表明, 同步优化的光源布局获得的 LED 布局模型具有远超过以往优化模型的系统性能, 其接收功率的品质因子  $Q_A$  相较于文献 [9] 提升了近 133%, 照度均匀度

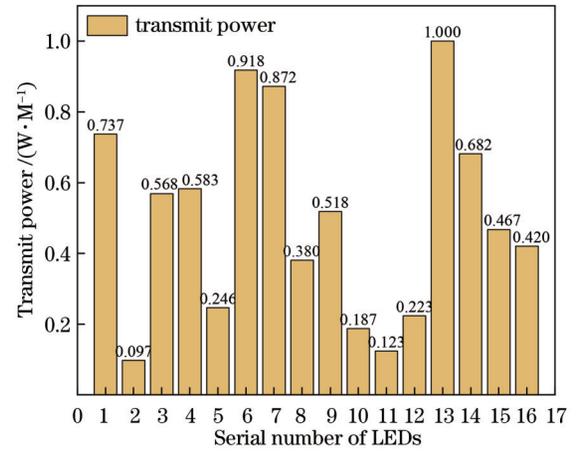


图 4 16 个 LED 灯同步优化后的功率分配示意图

Fig. 4 Schematic diagram of power distribution after synchronous optimization of 16 LED lamps

由 79.06% 提升到了 84.91%, SNR 方差由 0.18 降低到了 0.03。之后, 联合光源布局与功率分配的同步优化方案进一步提升了系统的性能。此外, 还可以发现, 系统均匀性的提升有时会伴随着平均照度的降低, 这是因为优化布局将更多的 LED 部署到房间的角落, 在墙面反射时, 会吸收更多的照度和能量。

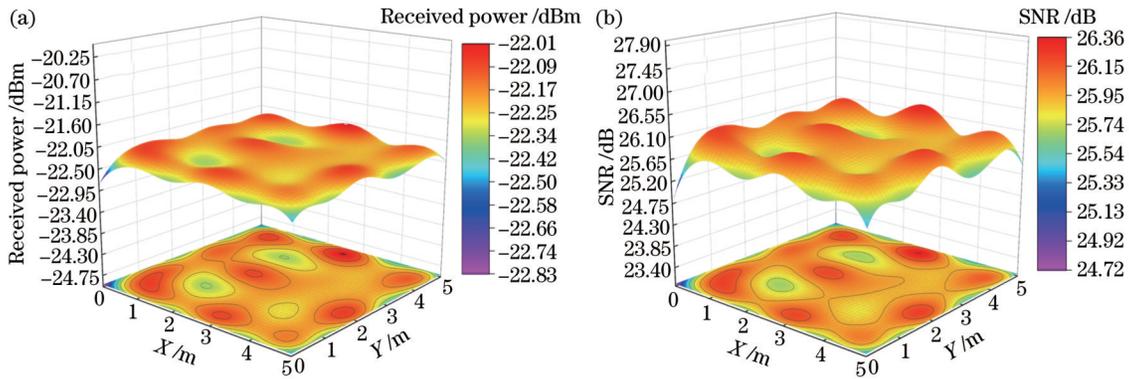


图 5 最优布局下 SNR 与接收功率的分布示意图。(a) 接收功率的分布; (b) SNR 的分布

Fig. 5 Schematic diagram of distributions of SNR and received power under optimal layout. (a) Distribution of received power; (b) distribution of SNR

表 5 同步优化后的性能指标

Table 5 Performance indicators after synchronization optimization

Optimization scheme	$Q_A$	$1 - F_E / \%$	SNR variance	Average illumination / lx
Square-circle <sup>[4]</sup>	3.92	62.84	0.36	1151.78
New layout of 16 LEDs <sup>[9]</sup>	5.25	79.06	0.18	1074.91
IAFSA optimization <sup>[11]</sup>	3.58	54.16	0.39	1121.17
IBA optimization <sup>[5]</sup>	2.07	40.62	1.22	1223.56
MPGA optimization <sup>[1]</sup>	2.56	59.47	0.74	848.11
FWOA location optimization	12.23	84.91	0.03	1104.98
FWOA power + location optimization	15.12	82.07	0.02	518.73

#### 4.2 不同 LED 数量的最优布局

在图 3(a) 16 个 LED 灯的最优布局中, 其角落存在

距离过近的多个 LED 灯的分布, 可以考虑将多个 LED 灯视为一个整体, 利用一个 LED 灯替代。因此, 有必

要探究 LED 灯的数量对于系统性能和能效的影响。本文通过利用 FWOA 对室内 VLC 系统中不同数量的 LED 进行优化研究,采取对不同数量 LED 的光源布局与功率分配进行同步优化,其中光源布局考虑 LED 的

部署高度,选取 LED 数量为 14、12、9 和 6 进行探索,并分析光源最优布局和接收功率的分布情况。图 6 展示了不同 LED 数量下的最优布局。

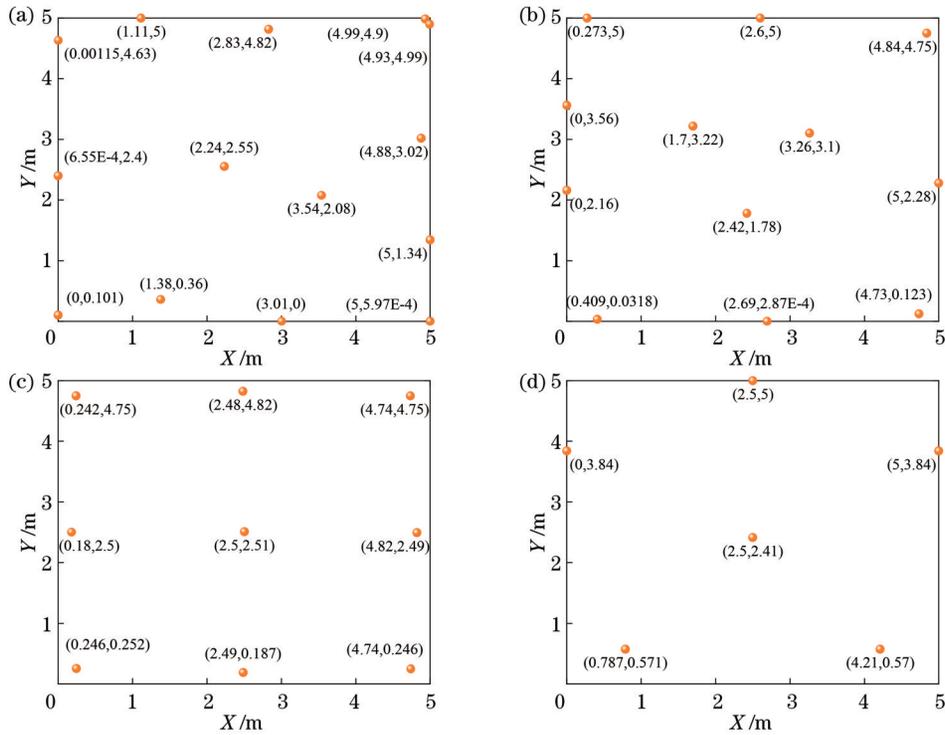


图 6 不同 LED 数量下的最优布局。(a) 14 个 LED; (b) 12 个 LED; (c) 9 个 LED; (d) 6 个 LED  
Fig. 6 Optimal layout under different LED numbers. (a) 14 LEDs; (b) 12 LEDs; (c) 9 LEDs; (d) 6 LEDs

图 7 展示了不同 LED 数量下接收功率的分布图。随着 LED 数量的减少,接收功率的平均值和均匀性也随之降低。表 6 列出了不同 LED 数量下的性能指标,对比发现,当 LED 的数量达到 12 时,再增加 LED 的数量,系统所需的能量开始大幅增长,但系统的性能只能得到较小的改善,系统的能效也逐渐降低。因此,在满

足室内通信与照明的前提下,选取 12 个 LED 灯可以将系统的性能发挥到最佳。此外,通过引入 FWOA,同步寻优的时间也得到了大幅度的缩减,将计算时间优化到了 1 h 以内,验证了提出算法在收敛速度和最优寻优上的优越性能。

表 6 不同 LED 数量下的性能指标

Table 6 Performance indicators under different LED numbers

Optimization scheme	$Q_A$	$1 - F_E / \%$	SNR variance	Average illumination /lx	Total power / W	Computing time / min
6 LEDs optimization	3.29	57.14	0.471	353.29	244.75	8.95
9 LEDs optimization	10.51	84.01	0.043	450.03	331.24	11.81
12 LEDs optimization	13.15	84.23	0.027	456.05	345.94	16.26
14 LEDs optimization	13.25	84.60	0.027	559.48	421.89	17.57
16 LEDs optimization	15.12	82.07	0.021	518.73	392.98	30.12

## 5 结 论

在考虑一次反射的室内 VLC 系统中,本文提出了一种基于融合改进策略的 FWOA,并通过同步优化 LED 部署高度的光源布局 and 功率分配,实现了 LED 的最佳分布模型。研究表明,相较于传统优化模型,该优化分布模型在接收功率、照度和 SNR 方面表现更

优。特别是在接收功率的品质因子方面,提高了近 133%。同时,照度均匀度也从 79.06% 提升到了 84.91%,这意味着该优化分布模型具有更好的照度均匀性和通信公平性。本文还研究了不同数量的 LED 在室内的分布模型。研究表明,随着 LED 数量的增加,系统性能呈正向收敛特性。通过增加 LED 的数量,优化后的光源布局和接收功率可以提升系统性能。

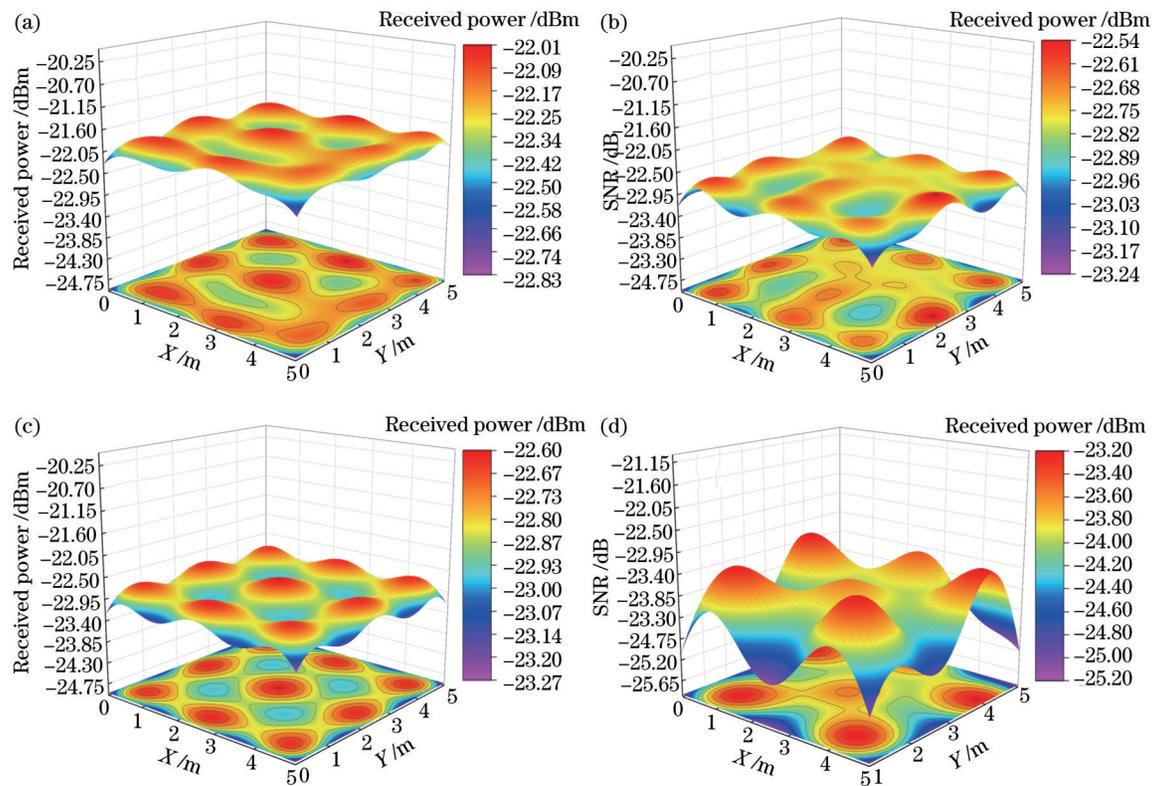


图 7 不同 LED 数量下接收功率的分布图。(a) 14 个 LED; (b) 12 个 LED; (c) 9 个 LED; (d) 6 个 LED

Fig. 7 Distribution diagram of received power under different LED numbers. (a) 14 LEDs; (b) 12 LEDs; (c) 9 LEDs; (d) 6 LEDs

但是,当 LED 数量增加到 12 个时,这种增长关系会进入收敛状态。此时再增加 LED 的数量,已经无法显著提升系统性能,并且会增加系统的能耗和优化时间。因此,当存在对 LED 数量的限制时,合理选择 LED 的数量能够较好地平衡系统的性能和能效。本研究为室内不同尺寸的房间应用 VLC 提供了有价值的参考。

#### 参 考 文 献

- [1] Zhai C, Liu H, Wen Y, et al. Multipopulation genetic algorithm-optimized LED layout in a visible light communication system[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(6): 066103-066103.
- [2] Liu C, Tang Y, Yan W, et al. Optimizing the light source layout of the indoor visible light communication system[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 27223-27229.
- [3] 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, et al. Received optical power optimization based on ant colony algorithm for LED communications[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(3): 462-467.
- [4] Wang Z, Yu C, Zhong W D, et al. Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4564-4573.
- [5] 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.
- [6] Wei Z Y, Hu H Y, Huang H M. 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.
- [7] 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.  
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.
- [8] 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.  
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.
- [9] Mahfouz N E, Fayed H A, El Aziz A A, et al. Improved light uniformity and SNR employing new LED distribution pattern for indoor applications in VLC system[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, 50(9): 350.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 陈永生. 基于白光 LED 的室内可见光通信系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014: 5-25.  
Chen Y S. The study of indoor visible light communication system based on white LED[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014: 5-25.
- [13] Grubor J, Randel S, Langer K D, et al. Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(24): 3883-3892.
- [14] 雷新颖, 王成. 一种多孔径接收器的设计及其可见光通信系统[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2021, 33(1): 59-66.  
Lei X Y, Wang C. Design of a multiple bore diameter receiver and its visible communication system[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science*

- Edition), 2021, 33(1): 59-66.
- [15] 亢令川, 王超, 穆昱, 等. 室内多小区可见光通信系统孔径阵列接收机的优化设计[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1106002.  
Kang L C, Wang C, Mu Y, et al. Optimal design of aperture array receivers for indoor multicell visible light communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1106002.
- [16] 郝少伟, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于非正交多址接入的星间可见光通信最优功率分配研究[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0706002.  
Hao S W, Li Y J, Zhao S H, et al. Optimal power allocation for intersatellite visible light communication based on nonorthogonal multiple access[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0706002.
- [17] 王铠尧, 洪智勇, 曾志强. 可见光通信系统的符号定时偏移估计方法[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0706007.  
Wang K Y, Hong Z Y, Zeng Z Q. Symbol timing offset estimation method for visible light communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0706007.
- [18] 张颖, 雷亚茹, 黄朝军. 车载可见光通信系统工作区间的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1706002.  
Zhang Y, Lei Y R, Huang C J. Working range of vehicle-mounted visible light communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1706002.
- [19] Chen Y, Sung C W, Ho S W, et al. BER analysis for interfering visible light communication systems[C]//2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), July 20-22, 2016, Prague, Czech Republic. New York: IEEE Press, 2016.
- [20] Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [21] 李茹, 范冰冰. 基于混合策略改进的 WOA[J]. 计算机与现代化, 2022(6): 13-20.  
Li R, Fan B B. An improved whale optimization algorithm based on hybrid strategy[J]. Computer and Modernization, 2022(6): 13-20.
- [22] 许德刚, 王再庆, 郭奕欣, 等. WOA 研究综述[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(2): 328-336.  
Xu D G, Wang Z Q, Guo Y X, et al. Review of whale optimization algorithm[J]. Application Research of Computers, 2023, 40(2): 328-336.
- [23] Zhou Y Q, Wang R, Luo Q F. Elite opposition-based flower pollination algorithm[J]. Neurocomputing, 2016, 188: 294-310.
- [24] Filip A, Maier V, Pavel S G, et al. Electrical equipment for indoor lighting installations[J]. Acta Electrotechnica, 2011, 52(4): 203-208.
- [25] Hussein A T, Alresheedi M T, Elmirghani J M H. 20 Gb/s mobile indoor visible light communication system employing beam steering and computer generated holograms[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(24): 5242-5260.

## Simultaneous Optimization of LED Layout and Power Allocation Based on Visible Light Communication

Chen Yong<sup>1\*</sup>, Hu Chenyi<sup>1\*\*</sup>, Liu Huanlin<sup>2</sup>, Wu Zhiqian<sup>1</sup>, Wu Jinlan<sup>1</sup>, Wang Chuangshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Network Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

<sup>2</sup>School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

### Abstract

**Objective** In an indoor visible light communication (VLC) system, it is indispensable to optimize the uniformity of the system, ensuring the flatness of illumination and the fairness of communication. On the one hand, uniform received illuminance can provide a more comfortable lighting environment, which is also the primary purpose of indoor lighting sources. On the other hand, uniform received optical power can improve the communication quality and fairness of the VLC system. However, the layout and configuration parameters of the lighting source will directly affect the uniformity of the light signals. The existing schemes often optimize the lighting source layout based on the top of the room without considering the deployment height of the lighting source and tend to employ a sequential optimization scheme to improve the lighting source layout and power allocation. Besides, little research is conducted on simultaneous optimization. Therefore, it is extremely important to optimize the uniformity of illuminance and received power of the system in view of the uneven distribution of light signals in the indoor VLC system.

**Methods** Given the above problems, a fast whale optimization algorithm (FWOA) based on a fusion improvement strategy is proposed to simultaneously optimize the indoor lighting source layout and power allocation in this study. Considering the lighting source layout and power distribution of the LED deployment height, we adopt a simultaneous optimization scheme to achieve the optimal LED position layout and uniformity of indoor light signals. At the same time, as there may be a wide range of search and long optimization time in simultaneous optimization, the whale optimization algorithm (WOA) is introduced from the perspective of swarm intelligence. The convergence speed and global optimization ability of the algorithm are further improved through the fusion improvement strategy. The specific improvement design is as follows. First, to solve the problem of insufficient convergence speed of the WOA, we employ reverse learning to

optimize the initialization stage of the whale algorithm. Second, although the existing knowledge of LED position layout and power distribution scheme facilitates algorithm convergence, the primary stage of the algorithm has not been greatly improved. Therefore, the coefficient matrix is adjusted so that the optimization stage enters the local search more quickly to accelerate the convergence process of the WOA. Third, entering the local search too early will induce the algorithm to fall into the local extremum search condition. For the problem of the algorithm falling into local optimum, a global perturbation search mechanism is added to better balance the search ability of the algorithm.

**Results and Discussions** After the simultaneous optimization of 16 LED layout models (Fig. 3), five different LED lighting source optimization schemes are selected for comparison (Table 5), and the performance indicators after optimization are listed. The results show that compared with the previous optimization schemes, the illuminance uniformity of the proposed optimization scheme has been improved by 7.39% to 109.03%, and the quality factor of received power has been improved from 5.25 to 12.23, an increase of nearly 133%. After simultaneous optimization of lighting source layout and power distribution, the factor further increases to 15.12. The simultaneous optimization scheme and the proposed FWOA have excellent optimization performance. In addition, the optimal layout (Fig. 6) and received power distribution (Fig. 7) of the system are explored when the number of LEDs is 14, 12, 9, and 6 respectively. It is found (Table 6) that in different scenarios, a better balance between system energy and performance can be achieved by selecting the appropriate number of LEDs. In addition, by introducing the FWOA, the time for simultaneous optimization is also greatly reduced, and the calculation time is shortened to less than 1 h, which verifies the superior performance of the proposed algorithm in terms of convergence speed and optimum search.

**Conclusions** In the indoor VLC system considering one reflection, we propose a FWOA based on the fusion improvement strategy and realize the optimal distribution of LEDs by simultaneously optimizing the lighting source layout and power distribution model of the LED deployment height. The research results show that compared with the traditional optimization models, the uniformity of the received power, illuminance, and signal-to-noise ratio (SNR) of the optimized distribution model is better with excellent communication fairness. Besides, the distribution model of different numbers of LEDs in the room is also studied. The results show that as the number of LEDs increases, the system performance exhibits a positive convergence characteristic. By increasing the number of LEDs, the optimized lighting source layout and received power can improve system performance. However, this growth relationship converges when the number of LEDs increases to 12. Then, increasing the number of LEDs can no longer significantly improve system performance, and will in turn increase system energy consumption and optimization time. Therefore, the performance and energy efficiency of the system can be better balanced by selecting the appropriate number of LEDs. This study can provide a valuable reference for the application of VLC in indoor rooms of different sizes.

**Key words** optical communication; visible light communication; whale optimization algorithm; light source deployment height; power allocation; simultaneous optimization