引用本文：张慧颖，李月月，盛美春，等：光功率与通信质量优化的室内可见光 LED 布局研究[J]. 光通信技术，2024，48(5)：20-29.

光功率与通信质量优化的室内可见光 LED 布局研究

张慧颖，李月月，盛美春，梁士达，马成宇
（吉林化工学院，信息与控制工程学院，吉林 吉林 132022）

摘要：针对室内可见光灯源布局功率分布不平坦及通信质量差的问题，提出了一种对称米字型灯源布局方案。该方案通过构建与接收功率相关的目标函数，并融合 Logistic 混沌、反向策略、非线性函数以及自适应机制，在考虑一次反射的条件下，采用基于混沌逆初始化自适应权重哈里斯鹰优化算法（简称 LRNA-HHO 算法），实现了发光二极管（LED）位置及功率参数的最优设计。仿真结果表明：在 5 m×5 m×3 m 房间区域内，采用 LRNA-HHO 算法设计的灯源布局在功率分布上更均匀，接收功率方差为 0.018 dBm，光照度均匀度达到 0.925；信噪比范围为 23.62~23.91 dB，通信质量得到明显改善。

关键词：可见光通信；灯源布局；对称米字型布局；功率均匀性；通信质量
中图分类号：TN929.1　**文献标志码**：A　**文章编号**：1002-5561(2024)05-0020-10
DOI：10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.004　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)**：

Research on indoor visible light LED layout for optimizing optical power and communication quality

ZHANG Huiying, LI Yueyue, SHENG Meichun, LIANG Shida, MA Chengyu
(College of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin Jilin 132022, China)

Abstract: Symmetrical the meter-shaped lighting layout scheme is proposed to address the issues of uneven power distribution and poor communication quality in indoor visible light sources. This scheme involves creating an objective function related to the received power and integrates logistic chaos, reversal strategies, nonlinear functions, and adaptive mechanisms. Considering single-reflection conditions, it employs a chaotic reverse initialization adaptive weight Harris Hawk optimization algorithm (referred to as the LRNA-HHO algorithm) to achieve the optimal design of light emitting diode (LED) positions and power parameters. Simulation results show that the lighting layout designed using the LRNA-HHO algorithm distributes power more evenly within a 5 m×5 m×3 m room area, with a received power variance of 0.018 dBm and illumination uniformity reaching 0.925, the signal-to-noise ratio ranges from 23.62 to 23.91 dB, significantly improving communication quality.

Key words: visible light communication, light source layout, symmetrical the meter-shaped layout, power uniformity, communication quality

0 引言

随着信息技术的快速发展，频谱资源日益稀缺。室内可见光通信(VLC)因其成本低、覆盖范围广和安全性高等特点，受到了国内外研究者的广泛关注[1]。VLC 技术被认为是面向第六代(6G)通信系统最具发展潜力的技术之一[2]。

在室内 VLC 系统中，发光二极管(LED)的布局对其通信性能和照明效果至关重要，这要求接收面上的光照度和接收功率分布足够均匀。近年来，国内外学者对室内 LED 的布局进行了大量的研究。文献[3]提出了以光照度均匀度(UIR)最大化为目标的设计准则来确定 LED 布局，并分别针对视距链路(LOS)和非视距链路(NLOS)进行了讨论。然而，该方案仅考虑了 4 个 LED 对称分布的情况。文献[4]提出了一种以能量效率最优化为目标的准则，并使用粒子群算法对 LED 的圆形布局进行了优化。这一方案虽然能够减少所需的

收稿日期：2023-12-13。
基金项目：吉林省科技发展计划项目国际科技合作项目(20210402078GH)资助。

作者简介：张慧颖(1982—)，女，吉林四平人，工学博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向为室内可见光通信技术及其定位应用，并深入探索室内灯源优化排布的相关研究。负责完成省部级项目 1 项；获省部级科学技术奖 1 项。

LED 数量,并有效降低系统中的码间干扰。但是,该方案并未充分考虑到室内照明的强度与均匀性。文献[5]为了确保同一接收面上的接收功率和信噪比(SNR)分布均匀,引入了功率调节因子来确定一组最优的功率调节系数,并采用改进的布谷鸟搜索算法对灯源布局的功率调节因子进行了优化,从而得到了最优的灯源布局分布,但该文献并未优化灯源的具体分布位置。文献[6]针对室内 VLC 系统接收平面接收功率分布不平坦的问题,以接收功率作为目标函数,提出了基于改进的蚁群算法对 16 个灯源布局的位置进行寻优,最终改善了通信性能,但该方案仅针对灯源位置进行优化。文献[7]针对室内光照度不均匀导致的通信性能不平衡的问题,提出了采用鲸鱼优化算法对 4 个灯源布局进行优化的方法,但该方法仅对基于传统的 4 个灯源布局进行了优化。文献[8]在考虑一次反射的基础上,结合传统布局模型和经典室内 VLC 模型,提出了一种利用参数 Q 来确定信道质量最优布局的方案,但该方案仅针对 4 个灯源布局模型下的灯源位置进行优化。文献[9]提出了一种使用改进人工鱼群算法来优化光源布局的方法。仿真结果显示,与方形、矩形和圆形的布局相比,经过该算法优化后的布局在接收功率均匀性方面都有所提高,但也仅针对灯源位置进行优化。文献[10]以 20 个灯为例,提出了一种基于多种群遗传算法的 LED 布局方法,该方法虽然能够实现任意分布,并解决了室内光照度和接收功率分布不均的问题,但未能充分考虑灯源数量过多会给室内节能带来不利影响。文献[11]使用改进的粒子群算法对灯源位置和灯源参数进行了联合优化,找到了室内 VLC 的最佳灯源布局。然而,该方案仅在总功率不变的前提下,基于传统的 4 个灯源布局进行优化,因此存在一定的局限性。文献[12]提出了一种基于改进的灰狼优化算法的对称优化策略。该方法虽然提高了传统布局的接收功率和 SNR 的均匀性,降低了误码率,并提升了信道容量,但未进行在同一灯源布局方案下不同尺寸房间的优化对比。文献[13]提出了一种混合免疫克隆蝙蝠算法,通过优化 LED 位置参数和半功率角来达到优化室内 VLC 灯源布局的目的,但并未考虑光的反射情况。文献[14]提出了一种针对矩形平面立体空间的多边形布局方法,并利用粒子群算法分别对多边形布局的位置和功率进行了优化,优化后的多边形布局在 UIR 和 SNR 质量因子方面均有所提高,但该方案的房间灯源总数为 17,未从节能角度考虑灯源数量的影响。

基于上述分析,本文提出一种室内 VLC 对称米字型灯源布局方案,实现基于混沌逆初始化自适应权重哈里斯鹰优化算法(下文简称 LRNA-HHO 算法)的灯源布局设计。

1 室内 VLC 系统

1.1 室内 VLC 系统模型

室内 VLC 系统模型如图 1 所示。房间大小为 5 m×5 m×3 m,以房间中心为坐标系原点建立三维坐标系,LED 分布在天花板上,LED 辐射特性服从朗伯辐射模型,接收机位于距地面 0.85 m 的接收面上[4],用于显示接收平面的光照度和接收功率分布情况。室内 VLC 系统主要分为 2 种传输链路:LOS 链路和 NLOS 链路。本文仅考虑这 2 种链路中的一次反射情况。

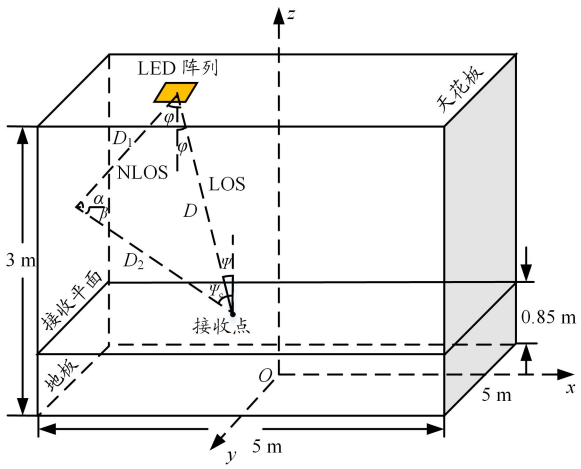


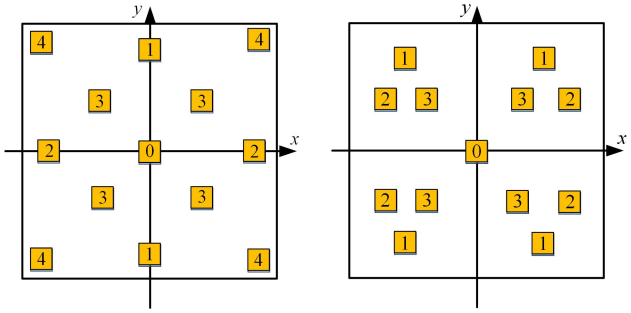
图 1 室内 VLC 系统模型

图 1 中,φ 为单个 LED 的发射角,D 为 LED 到接收机的距离,Ψ 为接收机的入射角,Ψ_c 为接收机视场角(Ψ 最大值为 Ψ_c)。D_1 为 LED 到墙壁某反射点距离,D_2 为该反射点到接收点距离,α 和 β 分别为 LED 与反射体、反射体与接收点连线之间的夹角。

1.2 对称米字型灯源布局设计

本文设计的室内 VLC 对称米字型灯源布局方案由 13 个 LED 组成,如图 2(a)所示。可以看出,天花板上的 LED 灯按照对称米字型布局排列。以第一象限为例,布局规则如下:1 号灯位于 y 轴正半轴,2 号灯位于 x 轴正半轴,3 号灯放置在 $x=y$ 的对角线上,4 号灯放置在任意位置,中心位置放置 0 号灯。基于正方形的对称性,在其它相应位置放置 LED,以形成一个完整的对称米字型灯源布局。

13 个 LED 的一般灯源布局方案[12]如图 2(b)所示。本文基于改进的哈里斯鹰优化(HHO)算法对这 2 种灯源布局方案的光照度和接收功率等参数进行分析。



(a) 对称米字型灯源布局　　(b) 一般灯源布局

图 2　2 种灯源布局方案

1.3 光照度与接收功率分析

仅考虑 LOS 链路时，接收机接收来自 LED 的光照度为

$$E_{\mathrm{LOS}}=I(0)\cos^{m}\varphi\cos\Psi/D^{2} \tag{1}$$

其中，$I(0)$为 LED 的中心光照强度；m 为朗伯辐射系数[15]，其表达式为

$$m=-\frac{\ln 2}{\ln(\cos\Phi_{\frac{1}{2}})} \tag{2}$$

其中，$\Phi_{\frac{1}{2}}$为 LED 半功率角。一次反射链路的光照度如式(3)所示。

$$E_{\mathrm{NLOS}}=\sum_{i=1}^{n_1}\int_{0}^{w}\frac{(m+1)\rho I(0)\cos^{m}\varphi\cos\alpha\cos\beta\cos\Psi}{2\pi^{2}D_1^{2}D_2^{2}}\mathrm{d}A_{\mathrm{wall}} \tag{3}$$

其中，ρ 为墙壁的反射系数，$\mathrm{d}A_{\mathrm{wall}}$ 为墙壁上微小反射体面积，n_1 为 LED 总个数，w 为反射点的总数。因为 LED 光源为非相干光源，所以接收平面上的总光照度如式(4)所示。

$$E=E_{\mathrm{LOS}}+E_{\mathrm{NLOS}} \tag{4}$$

在室内 VLC 系统中常用 UIR 来衡量接收面 UIR。UIR 是指最小光照度 E_{min} 与平均光照度 E_{mean} 的比值，其表达式为

$$H_{\mathrm{UIR}}=\frac{E_{\mathrm{min}}}{E_{\mathrm{mean}}} \tag{5}$$

根据国际标准化组织(ISO)的规定[16]，房间光照度应限制在 300~1 500 lx 之间，且 UIR 应大于等于 0.7，并尽可能接近 1。

设单个 LED 发射功率为 P_{t}，LOS 链路中接收机接收功率 P_{LOS} 如式(6)所示。

$$P_{\mathrm{LOS}}=P_{\mathrm{t}}\times H_{\mathrm{d}}(0) \tag{6}$$

其中，$H_{\mathrm{d}}(0)$为直射链路的增益，其表达式为

$$H_{\mathrm{d}}(0)=\frac{(m+1)A}{2\pi D^{2}}\cos^{m}\varphi T_{\mathrm{s}}(\Psi)g(\Psi)\cos\Psi I_{U}(\Psi) \tag{7}$$

其中，A 为接收机接收面积，$T_{\mathrm{s}}(\Psi)$为接收机的光学滤波器函数，$g(\Psi)$为集中器增益，其表达式为

$$g(\Psi)=\begin{cases}-\dfrac{n^{2}}{\sin\Psi_{\mathrm{c}}}, 0\leqslant\Psi\leqslant\Psi_{\mathrm{c}}\\ 0, \mathrm{else}\end{cases} \tag{8}$$

其中，n 为折射率。示性函数 $I_U(x)$的模型[17]表示为

$$I_U(x)=\begin{cases}1, x\in U\\ 0, x\notin U\end{cases} \tag{9}$$

在此函数中，U 为一个集合，集合的取值为

$$U=\{x\mid 0\leqslant x\leqslant\Psi_{\mathrm{c}}\} \tag{10}$$

当链路中含有一次反射时，接收功率表示为

$$P_{\mathrm{r}}=\sum_{i=1}^{n_1}\left[P_{\mathrm{LOS}}+\int_{0}^{w}P_{\mathrm{t}}\mathrm{d}H_{\mathrm{ref}}(0)\right] \tag{11}$$

其中，反射链路的信道增益 $H_{\mathrm{eff}}(0)$计算公式为

$$H_{\mathrm{eff}}(0)=\frac{(m+1)A}{2\pi D_1^{2}D_2^{2}}\rho\mathrm{d}A_{\mathrm{wall}}\cos^{m}\varphi\cos\alpha\cos\beta\times T_{\mathrm{s}}(\Psi)g(\Psi)\cos\Psi I_{U}(\Psi) \tag{12}$$

1.4 SNR、误码率(BER)及信道容量分析

室内 VLC 系统 SNR 计算公式如式(13)所示。

$$V_{\mathrm{SNR}}=\frac{[RP_{\mathrm{r}}]^{2}}{N_1} \tag{13}$$

其中，R 为光电探测器的转换效率，N_1 为系统中的总噪声。室内 VLC 系统中主要存在 2 个噪声[18]：散粒噪声和热噪声。因此，总噪声 N_1 的计算公式为

$$N_1=\sigma_{\mathrm{shot}}^{2}+\sigma_{\mathrm{thermal}}^{2} \tag{14}$$

其中，$\sigma_{\mathrm{shot}}^{2}$为散粒噪声的方差，$\sigma_{\mathrm{thermal}}^{2}$为热噪声的方差，两者分别表示为

$$\sigma_{\mathrm{shot}}^{2}=2qRP_{\mathrm{r}}B+2qI_{\mathrm{dc}}\zeta_2 B \tag{15}$$

$$\sigma_{\mathrm{thermal}}^{2}=(8\pi\mathrm{k}T_{\mathrm{e}}\eta A\zeta_2 B^{2})/G+(16\pi^{2}\mathrm{k}T_{\mathrm{e}}\Gamma\eta^{2}A^{2}\zeta_3 B^{3})/g_{\mathrm{m}} \tag{16}$$

其中，q 为电荷量，I_{dc} 为背景电流，ζ_2 和 ζ_3 为噪声带宽因子，B 为等效噪声带宽，k 为玻尔兹曼常数，T_{e} 为绝对温度，η 为光电探测器单位面积的固定电容，G 为开环电压增益，Γ 为信道噪声因子，g_{m} 是场效应管跨导。

对开关键控(OOK)调制方案，VLC 系统的 BER 与 SNR 的关系[19]如式(17)所示。

$$M_{\mathrm{BER}}=Q(x)(\sqrt{V_{\mathrm{SNR}}}) \tag{17}$$

其中,$Q(x)$表达式为

$$Q(x)=\int_{x}^{\infty}\frac{\exp(-y^{2}/2)}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{d}y \tag{18}$$

在低速率通信系统中,为了使 BER 低于 10^{-6},通常只需要将 SNR 提高到 13.6 dB 以上[20]。

根据香农公式,信道容量 C 的计算公式[12]如式(19)所示(以 bit/Hz 为单位)。

$$C=\log_{2}(1+M_{\mathrm{SNR}}) \tag{19}$$

2 基于 LRNA-HHO 算法的最优灯源布局设计

2.1 LRNA-HHO 算法设计

针对 HHO 算法[21]在搜索过程容易出现陷入局部最优、收敛速度慢等问题,本文提出 LRNA-HHO 算法进行最优灯源布局设计。

2.1.1 优化初始种群

引入 Logistic 混沌映射和反向学习策略来优化初始种群,以此提升种群多样性和均匀性,同时改进初始种群的质量。Logistic 混沌映射的数学表达式[22]为

$$Y_{i}^{\lambda+1}=aY_{i}^{\lambda}(1-Y_{i}^{\lambda}) \tag{20}$$

其中,Y_{i}^{λ} 为混沌序列,$Y_{i}^{\lambda}\in[0,1]$;当前种群的状态 $\lambda=1,2,\cdots,J$(J 为种群维度);$i=1,2,\cdots,N$(N 为初始种群数量);Logistic 参数 $a\in[0,4]$,本文中 $a=4$,此时系统为完全混沌状态。

当 $X=(x_1,x_2,\cdots,x_J)$ 为 J 维空间中的一点时,反向学习对应的反向点为

$$\begin{cases}X'=(x_1',x_2',\cdots,x_J')\\ x_J'=l^b+u^b-x_J\end{cases} \tag{21}$$

其中 $x_J\in[l^b,u^b]$ 时,u^b 和 l^b 分别为种群位置的上限和下限。首先,使用 Logistic 混沌映射生成初始解矩阵 C。接着,依据反向学习理论,为矩阵 C 中的每个初始解生成对应的反向解,从而得到反向解矩阵 O。将矩阵 C 与矩阵 O 合并,得到矩阵 Q。随后,对矩阵 Q 中的 J 个列向量的元素按升序排序,并从每一列中选择前 N 个最小元素作为初始解,组合成优良种群矩阵 P,该矩阵 P 即为优化后的初始种群。初始化种群的过程如图 3 所示。

2.1.2 非线性逃逸能量因子

为了改善 HHO 算法在全局探索和局部开发能力之间的平衡,本文提出了一种新的能量因子 S 的更新方式,如式(22)所示。

$$S=2S_{0}[2\mathrm{rand}(0,1)\times\sin(-\pi T'/2T)] \tag{22}$$

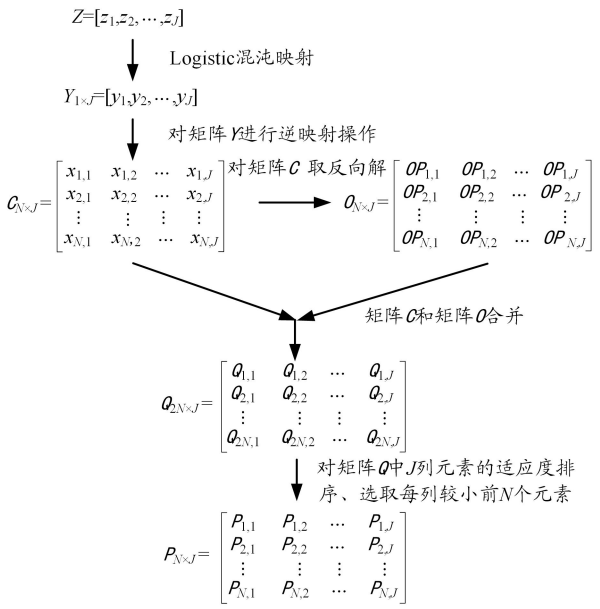


图 3 初始化种群过程

其中,T'表示种群当前迭代次数,T 为种群迭代次数,S 的取值是随种群迭代次数的变化而变化。式(22)能够确保 S 在迭代前期迅速下降,从而增强算法的全局搜索能力;在迭代中期则变化较为平缓,有助于平衡全局搜索与局部开发的能力;而在迭代后期,S 值会快速减小,进而加强局部搜索的能力。

2.1.3 自适应权重

为提高算法局部开采能力,避免陷入局部最优,本文提出自适应权重公式如式(23)所示。

$$w=\cos\left[\sin\left(\frac{\pi\tau}{2T}\right)\frac{\pi}{4}\right] \tag{23}$$

其中,$X_{\mathrm{rabbit}}'(\tau)$为猎物更新位置,其表达式为

$$X_{\mathrm{rabbit}}'(\tau)=w\times X_{\mathrm{rabbit}}(\tau) \tag{24}$$

其中,$X_{\mathrm{rabbit}}(\tau)$为猎物当前位置,$\tau$ 为当前迭代次数。本文通过融合自适应权重因子 w,使 LRNA-HHO 算法具有更好的局部开采能力。

2.2 构建适应度函数

为了保证系统接收平面上的接收功率分布均匀,本文采用群智能算法对灯源的位置和参数进行联合优化。每个 LED 光源阵列引入功率调节因子 $k_i,k_i\in(0,1)$,通过每个单元的归一化发射功率,使接收平面各点的接收功率相近。因此,式(11)可以改写为

$$P_{\mathrm{r}}=\sum_{i=1}^{n_1}\left[k_iP_{\mathrm{LOS}}+\int_{0}^{w}k_iP_{\mathrm{t}}\mathrm{d}H_{\mathrm{ref}}(0)\right] \tag{25}$$

对于具有 n_1 个 LED 阵列的 VLC 系统布局,位置

$[X_1、Y_1、k_1、X_2、Y_2、k_2、\cdots、X_{n1}、Y_{n1}、k_{n1}]$是需要优化的目标。$(X_{n1},Y_{n1},k_{n1})$是第 n_1 个 LED 阵列的位置和功率调节因子，它也被用作猎物的位置。一般来说,(X_{n1},Y_{n1})是在二维坐标系中的位置。最终,通过采用群智能算法进行优化，使得每个接收器获得相同或非常接近的光功率。每个接收器 L 的接收功率可以描述为

$$P_{r,L_1}\approx P_{r,L_2}\approx P_{r,L_3}\approx\cdots\approx P_{r,L_j} \tag{26}$$

由于适应度函数能影响算法整体的收敛性能,为使室内 VLC 系统中接收功率更加均匀,将适应度函数设计为与接收功率有关的函数,其表达式为

$$F=\min\sqrt{E\left\{\left[P_r-E(P_r)\right]^2\right\}} \tag{27}$$

其中,$E(P_r)$为整个接收平面接收功率的均值。

2.3 对称米字型灯源布局方案设计步骤

基于 LRNA-HHO 算法对灯源位置及灯源参数优化后,得到最优灯源布局的具体步骤如下:

1)采用 Logistic 混沌映射和反向学习策略来优化初始种群。对于搜索空间每一维度的上下界,本文根据式(20)和式(21)来初始化每一个个体。

2)计算个体的初始适应度值。使用式(27)来计算每个个体的适应度值,并对其进行排序,将具有最优适应度值的个体的位置确定为猎物的当前位置。

3)更新位置。通过式(22)来更新猎物的逃逸能量。根据逃逸能量和生成的随机数来决定采用局部搜索或是局部开发的方式更新猎物的位置。

4)计算适应度。使用式(27)计算更新位置后的个体适应度，并将其与当前猎物的适应度值进行比较。适应度值更优的个体位置将被作为新的猎物位置。

5)判断算法是否已达到最大迭代次数或满足求解精度要求。如果满足,则算法结束;否则,返回到步骤 2),直至满足终止条件为止。最终,输出 LED 的位置信息、功率参数取值以及目标函数值。

3 实验与分析

3.1 仿真参数设置

为评估所提方案的性能效果,以吉林化工学院实践大楼 1104 实验室为参考依据进行实验仿真。实验室为 5 m×5 m×3 m，灯源排布方案选取基于 LRNA-HHO 算法设计的对称米字型灯源布局方案,实验仿真平台为 Matlab R2018b,仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统及算法仿真参数

仿真类别	参数	数值
VLC 系统	天花板和接受面之间的距离 h/m	2.15
	LED 阵列数量 n_1	13
	LED 中心光照强度 $I(0)$/cd	23.81
	LED 发射功率 P_t /mW	500
	半功率角 $\Phi_{1/2}$/(°)	54
	阵列中的 LED 数量/个	7×7
	PD 物理探测器面积 A /cm^2	1.0
	接收器视野角 Ψ_c /(°)	80
	光学滤波器增益 T_s	1.0
	聚光器折射率 n	1.5
	光电二极管响应度 R/(A/W)	0.54
	墙壁的反射率 ρ	0.8
算法	初始种群 N/个	30
	迭代次数 T/次	200
	问题维度 J	10

3.2 实验分析

首先，采用 HHO 算法对 2 种灯源布局方案进行灯源位置仿真分析,结果如表 2 所示。可以看出,对称米字型灯源布局方案的接收功率方差为 0.023，小于一般灯源布局方案,这说明对称米字型灯源布局方案的整个接收面的接收功率更加平坦;而且,对称米字型灯源布局方案的 UIR 达到 89.53%，比一般灯源布局方案的 UIR 提高了 112.76%,而一般灯源布局方案的 UIR 不符合最低标准 0.7。因此,对称型米字型布局方案更具有实用性。

表 2 2 种布局方案的实验结果

布局方案	接收功率最小值/dBm	接收功率最大值/dBm	接收功率平均值/dBm	接收功率方差/dBm	光照度范围/lx	UIR/%
一般灯源	−2.327	3.002	1.304	1.159	327.59~1 117.10	42.10
对称米字型灯源	−0.110	0.725	0.368	0.023	545.74~661.32	89.53

然后,分别采用 HHO 算法、混沌反向哈里斯鹰优化(L-HHO)算法、自适应权重哈里斯鹰优化(AW-HHO)算法、非线性逃逸增强哈里斯鹰优化(UF-HHO)算法以及 LRNA-HHO 算法对对称米字型灯源布局方案进行灯源位置和灯源参数的联合设计,5 种算法的 LED 排布图如图 4 所示。

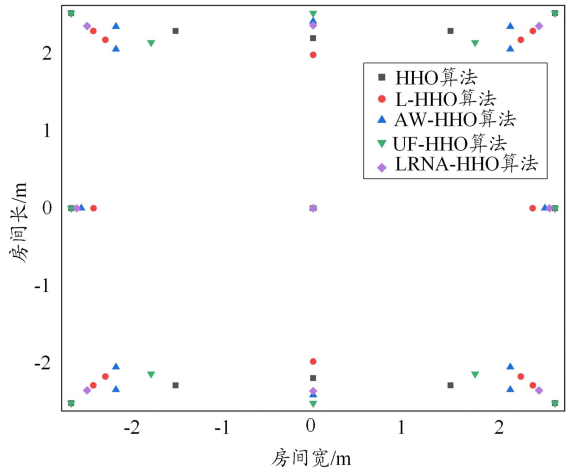


图 4　5 种算法的灯源布局

3.3 光照度仿真分析

在对室内 VLC 系统进行光照度仿真时,通常需要考虑接收平面上的 UIR。本文分别对上述 5 种灯源布局方案进行接收平面光照度的仿真分析，仿真结果如图 5 所示。通过对图 5 中室内光照度分布数据的计算得出，经 HHO 算法、L-HHO 算法、AW-HHO 算法、UF-HHO 算法和 LRNA-HHO 算法设计的灯源布局方案的 UIR 依次为 0.814、0.844、0.886、0.871 和 0.925。相比之下，基于 LRNA-HHO 算法得到的室内光照度分布最为均匀。

此外,5 种算法的灯源布局方案最小光照度均大于 300 lx,符合人眼对照明的需求。其中,HHO 算法的灯源布局方案光照度范围为 494.01~688.45 lx,光照度范围差值为 194.44 lx;相比之下,L-HHO 算法、AW-HHO 算法、UF-HHO 算法和 LRNA-HHO 算法对应的灯源布局方案的光照度范围分别扩展至 529.68~694.01 lx、554.93~708.54 lx、514.50~656.89 lx 和 524.36~663.98 lx;相应的光照度范围差值减少至 164.33 lx、153.61 lx、142.39 lx 和 139.62 lx。由此可见,LRNA-HHO 算法设计的灯源布局方案在光照度范围差值上表现出色,相比其它算法,其差值分别下降了 28.19%、15.04%、9.11% 和 1.95%。因此,LRNA-HHO 算法在灯源布局设计上更能实现室内光功率的均匀分布。

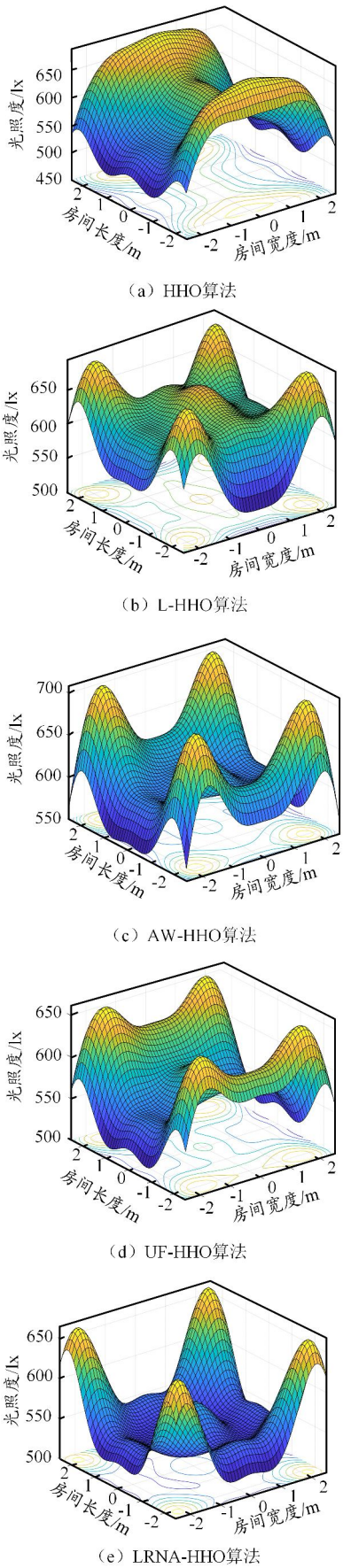
3.4 接收功率仿真分析

在相同的环境条件下,基于 5 种算法设计的 13个灯源布局方案在接收平面上的接收功率实验结果如图 6 所示。通过对图 6 中室内接收功率分布数据的方差计算可得，基于 HHO 算法、L-HHO 算法、AW-HHO 算法、UF-HHO 算法以及 LRNA-HHO 算法设计的最优灯源布局，其接收平面的接收功率方差分别为 0.125、0.038、0.035、0.045 和 0.018。这一结果表明，基于 LRNA-HHO 算法设计的最优灯源布局方案显著降低了接收功率的波动，使得功率分布更加平坦。

为保证通信性能，室内 LED 光通信系统通常要求接收功率大于 -2 dBm。5 种算法设计的方案的接收功率最小值均大于 -2 dBm,均能满足正常通信的要求。经 HHO 算法、L-HHO 算法、AW-HHO 算法、UF-HHO 算法 LRNA-HHO 算法设计的灯源布局方案的接收功率范围分别为 -1.22~0.2 dBm、-0.97~03 dBm、-0.77~0.31dBm、-082~0.19 dBm、1.00~-0.20 dBm，功率范围的差值为 1.42 dBm、1.27 dBm、1.08 dBm、1.01 dBm、0.80 dBm。综上所述,采用LRNA-HHO 算法设计的灯源布局方案，在接收功率的分布上展现出了更为显著的平坦性,相较于其它算法 (如HHO 算法减少 43.66%，L-HHO 算法减少 37.01%，AW-HHO 算法减少 25.93%,UF-HHO 算法减少 20.79%)，这一改进显著优化了通信系统的稳定性与效率。

3.5 SNR 仿真分析

SNR 是用于评估系统信号质量的基本特性。



（a）HHO算法
（b）L-HHO算法
（c）AW-HHO算法
（d）UF-HHO算法
（e）LRNA-HHO算法

图5　5种算法的光照度分布图

SNR 有关仿真参数取值为：G=10，η=112pF/cm^2，Γ=1.5，T_e=295 K，B=100 Mb/s，q=1.6×10^{-19}C，ξ_2=0.562，ξ_3=0.086 8，I_{dc}=0.62 mA，k=1.38×10^{-23}，g_m=30。5种算法设计的13个LED对称米字型灯源布局方案的接收平面SNR 的实验结果如图 7 所示。通过分析整个平面的SNR分布取值得出，HHO算法设计的灯源布局方案的SNR 分布范围为23.62~24.37 dB，差值为0.75，方差为0.029 5；L-HHO算法设计的灯源布局方案的SNR 分布范围为23.95~24.46 dB，差值为 0.51，方差为 0.006 1；AW-HHO 算法设计的灯源布局方案的 SNR 分布范围 23.95~24.43 dB，差值为 0.48，方差为 0.007 4；UF-HHO 算法设计的灯源布局方案的 SNR 分布范围为 23.79~24.32 dB，差值为 0.53，方差为 0.008 7；LRNA-HHO 算法设计的灯源布局方案的 SNR 分布范围为 23.62~23.91 dB，差值为 0.29，方差为 0.002 6。LRNA-HHO 算法设计的灯源布局方案显著降低了 SNR 的最大值与最小值之差，相比 HHO 算法、L-HHO 算法、AW-HHO 算法以及 UF-HHO 算法设计的布局方案，分别降低了 61.33%、43.14%、39.58%和 45.28%，同时实现了最小的方差。这一结果表明，基于 LRNA-HHO 算法的灯源布局方案不仅优化了接收平面的通信质量，还大幅减小了 SNR 的波动范围，从而更有效地保证了信号的稳定传输。

3.6 BER 仿真分析

BER 是衡量 VLC 系统通信质量的重要标准。5种算法设计的对称米字型 13 个 LED布局方案的接收平面 BER 仿真结果如图 8 所示。可以看出，HHO 算法设计的灯源布局方案中，BER的最大值为 5.89×10^{-7}，最小值为 3.97×10^{-7}，两者之间的差值为 1.92×10^{-7}；L-HHO算法设计的灯源布局方案中，BER 的最大值为4.94×10^{-7}，最小值为 3.80×10^{-7}，差值为 1.14×10^{-7}；AW-HHO算法设计的灯源布局方案中，BER 的最大值为4.94×10^{-7}，最小值为 3.86×10^{-7}，差值为1.08×10^{-7}；UF-HHO 算法设计的灯源布局方案中，BER 的最大值为 5.37×10^{-7}，最小值为 4.01×10^{-7}，差值为1.36×10^{-7}；而LRNA-HHO 算法设计的灯源布局方案中，BER的最大值为 5.85×10^{-7}，最小值为5.05×10^{-7}，差值为 0.8×10^{-7}。与 HHO 算法、L-HHO 算法、AW-HHO算法和UF-HHO 算法相比，LRNA-HHO 算法灯源布局方案的 BER 差

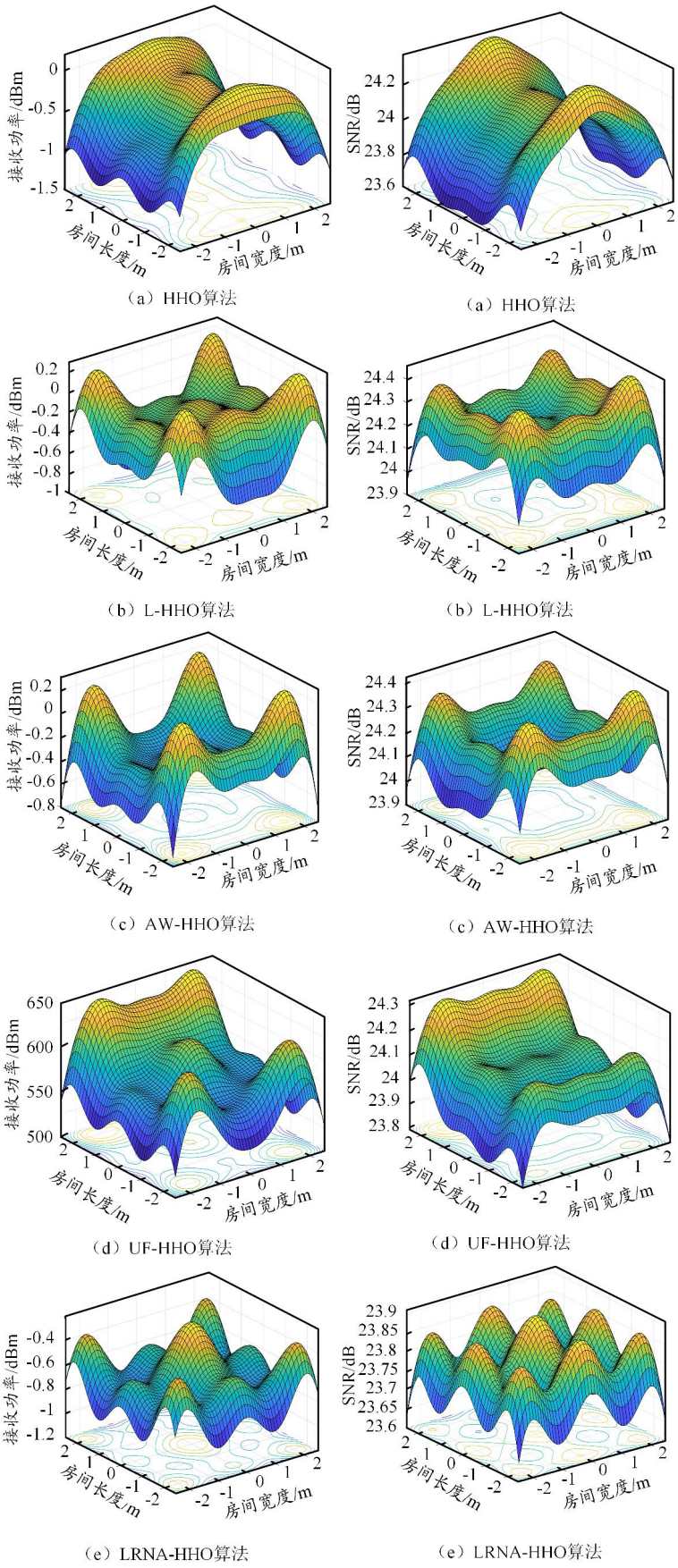


图6 5种算法的接收功率分布图

图7 5种算法的SNR分布图

值分别降低了 58.3%、29.8%、25.9%和 41.2%。结果表明，LRNA-HHO 算法设计的灯源布局方案在接收平面上的 BER 分布更为均匀，使得用户在房间不同位置进行通信时，通信质量的变化达到最小。

因此，在满足照明需求的条件下，LRNA-HHO 算法灯源布局方案能够有效实现室内 VLC 的可靠通信。

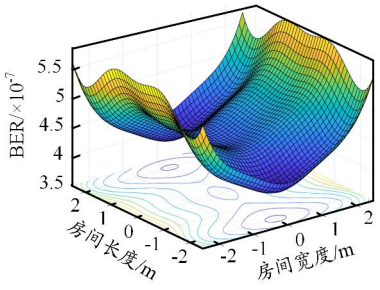
3.7 信道容量仿真分析

基于 5 种算法设计的最优对称米字型 13 个 LED 布局方案的信道容量仿真结果如图 9 所示。可以看出，基于 HHO 算法、L–HHO 算法、AW–HHO 算法、UF–HHO 算法和LRNA-HHO算法设计的灯源布局方案的信道容量范围分别为 7.852~8.102 bit/Hz、8.130~7.963 bit/Hz、7.962~8.120 bit/Hz、7.910~8.083 bit/Hz、7.949~7.854 bit/Hz，差值分别为 0.25、0.167、0.158、0.173、0.095 bit/Hz；LRNA-HHO 算法设计的灯源布局方案虽在最大值上略逊一筹，但其信道容量分布最为均衡。这说明在 LRNA-HHO 算法设计的灯源布局方案下，无论用户位于室内何处，每秒能传输的最大信息量都几乎保持一致，从而在信道容量的均匀性上超越了其它方案，确保了更高的传输效率和更优的通信质量。

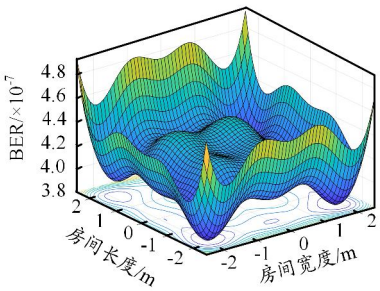
3.8 优化算法比较分析

5 种算法的适应度收敛曲线如图 10 所示。可以看出，随着迭代次数的增加，所有算法的适应度值均会缓慢变化并最终收敛。其中，LRNA-HHO 算法在大约 25 次迭代后就能收敛，HHO 算法在约 110 次迭代后达到收敛，L-HHO 算法在约 130 次迭代后达到收敛，AW-HHO 算法在约 115 次迭代后收敛。因此，LRNA-HHO 算法的收敛速度最快。尽管 UF-HHO 算法在大约 20 次迭代后能够收敛，但其最终的适应度函数值大于 LRNA-HHO 算法的最终适应度函数值。而其它 3 种算法的最终收敛时的适应度函数值都低于 LRNA-HHO 算法，这说明LRNA-HHO算法的局部寻优能力最强。由此可知，LRNA-HHO 算法更适合用于灯源布局的设计。

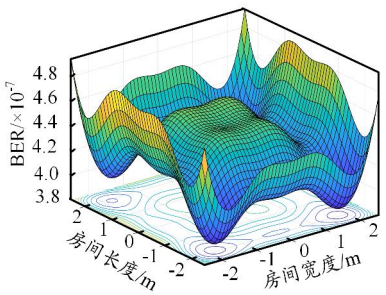
在房间尺寸为 5 m×5 m×3 m 的条件下，本文将优化结果与文献[7]和文献[12]进行深入对比。分析如下：文献[7]采用鲸鱼优化算法优化



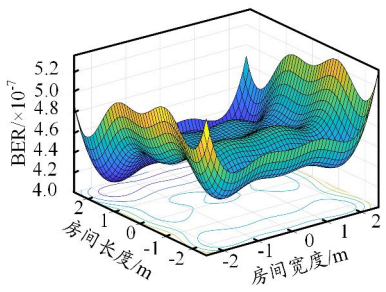
（a）HHO算法



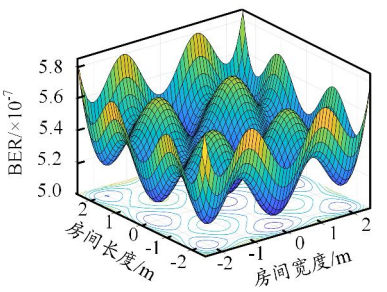
（b）L-HHO算法



（c）AW-HHO算法

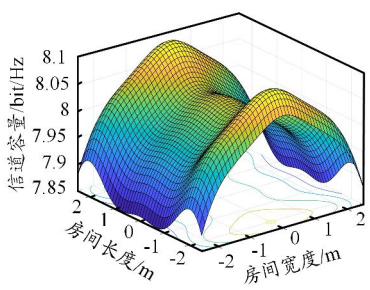


（d）UF-HHO算法

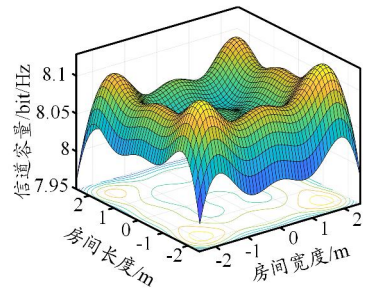


（e）LRNA-HHO算法

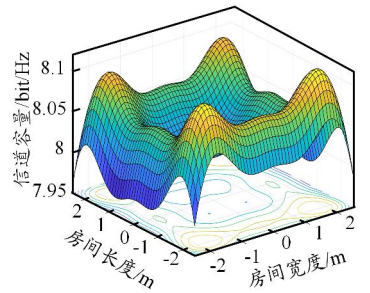
图8 5种算法的BER分布图



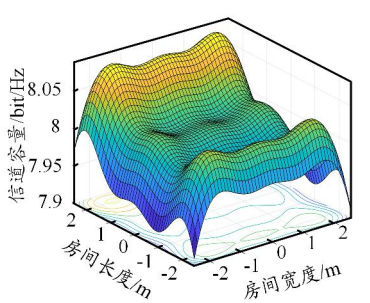
（a）HHO算法



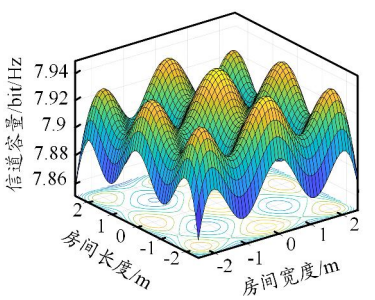
（b）L-HHO算法



（c）AW-HHO算法



（d）UF-HHO算法



（e）LRNA-HHO算法

图9 5种算法的信道容量分布图

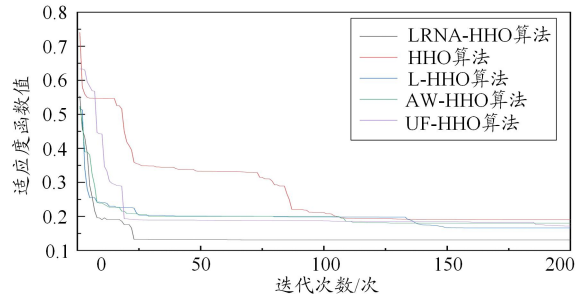
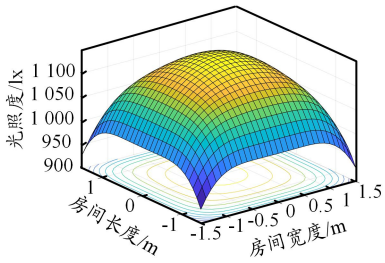
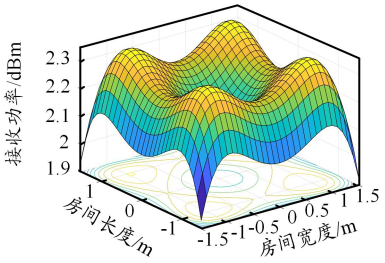


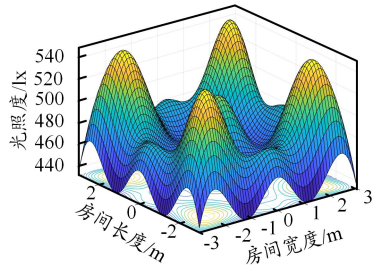
图 10 5 种算法的适应度收敛曲线



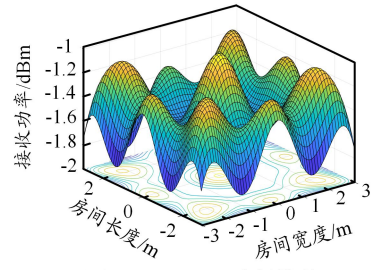
（a）3 m×3 m×3 m房间模型光照度分布图



（b）3 m×3 m×3 m房间模型接收功率分布图



（c）6 m×6 m×3 m房间模型光照度分布图



（d）6 m×6 m×3 m房间模型
接收功率分布图

图 11 不同房间模型下，本文方案的光照度和接收功率分布图

4个 LED布局，所得UIR为0.715；而本文提出的灯源布局方案则将 UIR提升至0.925,显著优于文献[7]。另一方面，文献[12]运用混合免疫克隆蝙蝠算法进行室内灯源布局优化,其光照度范围为333.8~557.5 lx,波动幅度达223.7 lx；相比之下,本文方案实现的光照度范围更稳定，为524.36~663.98 lx,波动幅度缩减至 139.62 lx,光照波动更小。此外，在接收功率分布上，本文方案模型表现优异，接收平面上的接收功率方差由文献[12]的 0.026 降低至 0.018,表明接收功率分布更为均匀。最后,文献[12]方法的 SNR 范围为 18.46~20.89 dB,差值为 2.43 dB,方差为 0.103 7;而本文方案的 SNR 范围缩小至 23.62~23.91 dB,差值仅为 0.29 dB,方差降低至 0.002 6,体现了 SNR 分布的更高均匀性。综上所述,本文方案具有较强谱适性。

3.9 不同房间模型下的灯源布局仿真分析

在 3 m×3 m×3 m 和 6 m×6 m×3 m 不同室内空间下，对基于 LRNA-HHO 算法的最优灯源布局性能进行分析，不同房间模型下的接收功率和光照度的仿真结果如图 11 所示。图 11(a)中,光照度范围为 928.86~1 149.91 lx,UIR 为 0.867,符合国际标准化组织的规定范围;图 11(b)中,接收功率方差为 0.006,接收功率波动性很小,范围为 1.93~2.35 dBm,可确保正常通信;图11(c)中,光照度范围为 433.26~548.91 lx,UIR 为0.894,符合国际标准化组织的规定;图 11(d)中,方差为0.028,接收功率波动性小，接收功率范围为 -1.92~-0.98 dBm,仍能确保正常通信。因此,本文方案具有较强普适性。

4 结束语

本文设计了一种对称米字型灯源布局方案，并引入了 LRNA-HHO 算法以优化室内 VLC 系统的 LED 布局设计，显著提升了接收平面的光功率平坦度及整体通信质量。在充分考虑光线一次反射效应的基础上,同步优化了室内灯源的位置与功率参数。针对 5 m×5 m×3 m 的典型室内环境进行的仿真实验结果表明:经 LRNA-HHO 算法优化后灯源布局方案的接收平面 UIR 达到了 0.925，接收光功率方差为 0.018 dBm,SNR 范围为 23.62~23.91 dB,BER 范围为 5.05×10^{-7}~5.85×10^{-7},信道容量范围为 7.854~7.949 bit/Hz,接收功率波动较小,光照度较为均匀,确保了通信系统光功率分布的平坦性。同时,SNR 波动明显减小,BER 也显著降低,信道容量的波动范围得到了明显的改善,从而增强了室内通信质量的稳定性。此外,本文还进一步探讨了不同房间尺寸对灯源布局的影响,研究结果表明,光照度和接收功率均得到了显著提升。说明本文方案不仅符合室内工作场景的光照度需求，还能提高不同房间模型通信的稳定性和可靠性。本文的研究内容为室内可见光通信灯源布局的理论研究提供了新的思路。

参考文献:

[1] JOVICIC A, LI J, RICHARDSON T. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12): 26–32.

[2] KHAN L U. Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges[J]. Digital Communications and Networks, 2017, 3(2): 78–88.

[3] 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.

[4] 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)：64–76.

[5] SUN G, LIU Y, YANG M, et al. Coverage optimization of VLC in smart homes based on improved cuckoo search algorithm[J]. Computer Networks, 2017, 116: 63–78.

[6] 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)：41–47.

[7] 韩雨，岳殿武. 基于鲸鱼优化算法的室内可见光通信 LED 布局[J]. 光电子技术，2020，40(3)：201–208.

[8] ZHANG X, ZHAO N, AL-TURJMAN F, et al. An optimization of the signal-to-noise ratio distribution of an indoor visible light communication system based on the conventional layout model[J]. Sustainability, 2020, 12(21): 9006-1–9006-16.

[9] 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): 1–9.

[10] 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): 066103-1–066103-17.

[11] 周旭，张业荣. 基于改进粒子群算法的室内可见光通信系统灯源布局[J]. 光通信技术，2021，45(1)：58–62.

[12] ZUO Y, LIU B, SHAO K. Symmetrical indoor visible light layout optimized by a modified grey wolf algorithm[J]. Applied Optics, 2022, 61(20): 6016–6022.

[13] CHE H, WANG P, CHI S, et al. LED layout optimization in visible light communication system by a hybrid immune clonal bat algorithm[J]. Optics Communications, 2022, 520: 128532-1–128532-10.

[14] PEI H, JING L, TONG Z, et al. Layout and optimization of LED light source for indoor visible light communication[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2023, 65(2): 710–716.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 程晓生. 示性函数在概率论中的简单应用[J]. 江苏科技信息，2014(20)：91–92.

[18] VARMA G P, SUSHMA R, SHARMA V, et al. Power allocation for uniform illumination with stochastic LED arrays[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8659–8669.

[19] SHARMA R, AGGARWAL M, AHUJA S. Channel capacity and BER estimation of indoor optical wireless communication system under receiver mobility[J]. Journal of Optical Communications, 2018, 39(4): 413–426.

[20] 谭梦源. 基于深度学习算法的室内可见光通信系统光源布局的动态优化[D]. 南京：南京邮电大学，2020.

[21] HEIDARI A A, MIRJALILI S, FARIS H, et al. Harris hawks optimization: algorithm and applications[J]. Future generation computer systems, 2019, 97: 849–872.

[22] 杨万里，周雪婷，陈孟娜. 基于 Logistic 映射的新型混沌简化 PSO 算法[J]. 计算机与现代化，2019(12)：15–20.