

室内可见光通信中接收光功率均匀性优化方法

陈勇¹, 沈奇翔¹, 刘焕淋²

¹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;

²重庆邮电大学光纤通信技术重点实验室, 重庆 400065

摘要 针对室内可见光通信接收光功率分布不均匀造成通信性能不均衡的问题, 提出一种 LED 阵列独立均匀分布布局, 并运用改进自适应遗传算法优化 LED 阵列间距离和 LED 半功率角。优化遗传算法中的选择算子, 并重新设计算法中的交叉和变异操作, 采用改进自适应遗传算法优化影响系统性能的 LED 半功率角和 LED 阵列间距离。仿真结果表明: 接收平面的接收功率方差从未优化前的 3.02 dBm 降低到 1.16 dBm, 照明强度范围从优化前的 374~862 lx 改善至 417~765 lx。相比现有的接收光功率的优化方法, 该算法的性能与收敛速度均得到改善。

关键词 光通信; 可见光通信; 自适应遗传算法; 半功率角; 阵列间距离; 接收光功率

中图分类号 TN92

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0506003

Optimization Algorithm of Receiver Optical Power Uniformity in Indoor Visible Light Communication

Chen Yong¹, Shen Qixiang¹, Liu Huanlin²

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

²Key Laboratory of Optical Fiber Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract To solve the problem of unbalanced communication performance due to uneven distribution of received optical power in indoor visible light communication, we propose an independent uniform distribution of LED arrays and an improved adaptive genetic algorithm, which is used to optimize the distance between LED arrays and LED half-power angle. The selection operator in genetic algorithm is improved, and the crossover and mutation operations in the algorithm are redesigned. The improved adaptive genetic algorithm is used to optimize the LED half-power angle and the distance between LED arrays. The simulation results show that the received power variance of the receiving plane is reduced from 3.02 dBm to 1.16 dBm and the range of illumination intensity is improved from 374~862 lx to 417~765 lx. Compared with the existing methods of optimizing received optical power, the performance and convergence speed of the algorithm are improved.

Key words optical communications; visible light communication; adaptive genetic algorithm; half-power angle; distance between arrays; received optical power

OCIS codes 060.4510; 350.4600

1 引 言

可见光通信(VLC)技术兼具照明和通信的功能,其安全性高、适用性强、通信性能好,是一种绿色无污染的通信技术。室内 VLC 网络是利用 LED 光

源发出的可见光波段的光作为信息载体。在家庭中,可以通过光信号传输组成局域网;在工作中,可以构建会议通信网络;在公共场所里,可以构建大型商场、宾馆酒店等查询和导购系统。目前,VLC 技术已经成为重要的研究方向^[1-3]。

收稿日期: 2017-11-21; 收到修改稿日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61071117)、重庆市研究生科研创新项目(CYS15172)

作者简介: 陈勇(1963—),男,博士,教授,主要从事可见光通信及传感检测方法方面的研究。

E-mail: chen Yong@cqupt.edu.cn

在室内 VLC 系统中,照明光源发出的光是通信信号载体,光源的布局和参数将直接影响光功率的覆盖。均匀的功率覆盖将提高 VLC 网络系统的通信质量和用户通信的公平性^[4]。为实现接收平面功率的均匀性覆盖,目前主要有两种优化方法,即优化 LED 发射光功率以及优化 LED 布局。张健等^[5]针对圆形布局提出在房间中心处布置一个 LED 阵列,并选用遗传算法(GA)全局优化每个 LED 的发射光功率。然而传统 GA 受收敛性能影响,在实际应用中还需增加光源的驱动部分以调整发射光功率。对此,文献[6]利用改进的 GA 优化经典布局下的 LED 坐标,进而优化接收平面接收光功率的均匀性。由于优化后的布局坐标不规则,故而在现实生活中难以实现。Wang 等^[7]采用独立的大功率 LED 代替 LED 阵列,使得接收平面的照度与信噪比(SNR)分布更加均匀,但是数量众多的大功率 LED 分布在发射端时,会造成过大的码间干扰,影响系统

性能。游春霞等^[8]使用了烟花算法优化每个 LED 的高度,进而降低接收平面 SNR 的波动,然而在室内环境中,光源一般是固定在天花板上,其高度不能随意改变。

针对上述研究中存在的问题,本文将 LED 阵列独立均匀地分布于发射端,分析研究阵列间距离和 LED 半功率角对接收平面功率分布和光照度分布的影响,进而选用 GA 对系统进行优化。针对传统 GA 收敛速度慢、收敛性能差的不足,对适应度函数进行线性放缩,并结合精英保留策略优化传统算法中的选择算子,同时改进算法中的交叉和变异操作,对 LED 灯的参数进行寻优。

2 室内 VLC 系统模型

房间模型如图 1 所示,房间尺寸为 5 m×5 m×3 m,接收平面距离地面 0.8 m。在室内 VLC 系统中,VLC 系统信道直流增益为^[9]

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

式中: A 为光接收器的有效接收面积; m 为朗伯辐射系数, $m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{1/2})}$,其中 $\Phi_{1/2}$ 表示半功率角,是最大光强 1/2 处的光线与法向量的夹角; ϕ 为 LED 的发射角; ψ 为接收端入射角; $T_s(\psi)$ 和 $g(\psi)$ 分别为接收器端的滤波器增益和集中器增益; D_d 为 LED 阵列与 PD 之间的距离; ψ_c 为集中器的视场角。LED 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为

$$I = I(0) \cos^m \phi, \quad (2)$$

式中: $I(0)$ 为 LED 中心发光强度。因为每个 LED 位置不同,所以接收器接收到的光照度为各 LED 到接收器处光照度的叠加,即

$$E(x, y) = \sum_{n=1}^M E_n, \quad (3)$$

式中: $E(x, y)$ 为接收平面点 (x, y) 处的总接收照度; M 为 LED 阵列的个数; E_n 为阵列 n 到接收平面的照度值,其表达式为

$$E_n = I(0) \times \cos \psi \cos^m \phi / D_d^2. \quad (4)$$

接收器总接收功率用 P_r 表示,其表达式为

$$P_r = P_t \times H(0), \quad (5)$$

式中: P_t 表示 LED 的发射光功率。根据文献[10]

的分析可知,VLC 系统中的直射光功率远远高于反射光功率,因此,本研究没有考虑反射链路的情况。

发射端 LED 的平面分布如图 2 所示,LED 灯

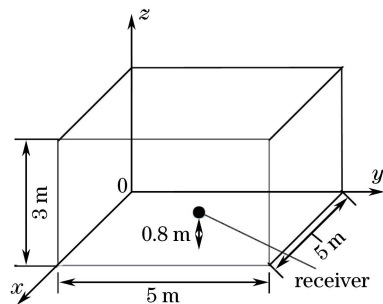


图 1 室内 VLC 模型

Fig. 1 Indoor VLC model

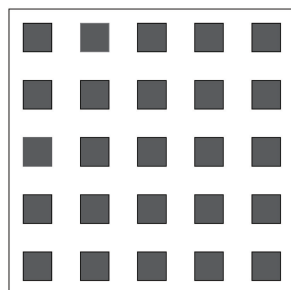


图 2 发射端 LED 平面分布图

Fig. 2 Plane distribution of the emission LED

除了可用于光通信外,其最主要的用途是照明^[11]。选择均匀布局是因为多灯式布局比单灯式布局的照度分布更均匀,将大阵列 LED 划分成均匀的小 LED 阵列,将小 LED 阵列均匀分布在发射端后,既优化了接收平面的功率分布,也使所提出的布局模式简便易行。多 LED 分布时,接收器接收到各个灯信号的光程差不同,当 LED 阵列数过多时,光辐射大量重叠,码间干扰增大;当 LED 阵列数过少时,接收平面的光照度和功率分布不均匀,因此需要合理地设定 LED 阵列数值,既要考虑对通信性能的影响,又要满足照明要求。

根据房间的尺寸,选择了 25 个 LED 阵列进行独立均匀布局,如图 2 所示,黑色矩形代表一个阵列,相邻阵列之间的距离相等,对 25 个阵列进行均匀化的布局。根据朗伯辐射模型,对系统模型的参数进行设置,具体设置值见表 1^[12-13]。接收平面上共有 50×50 个均匀分布的接收机。同时为了有效抑制码间干扰的噪声,本研究采用正交频分多路复用技术(OFDM)调制方法^[14]。

表 1 系统模型参数表

Table 1 Parameters of the system model

Parameter	Value
Room size / m^3	$5 \times 5 \times 3$
Receive height H_{PD} / m	0.8
Transmitted power of lamp P_t / mW	452
Semi-angle at half-power $\Phi_{1/2}$ / ($^\circ$)	70
Number of LED in each lamp	5×5
LED interval / m	0.01
Gain of optical filter $T_s(\psi)$	1
Gain of optical concentrator $g(\psi)$	1
Field-of-view ϕ_{FOV} / ($^\circ$)	55
Physical area of photo-detector A / cm^2	1
Photoelectric conversion efficiency / $(A \cdot W^{-1})$	0.53
Refractive index of lens on PD n	1.5
Central luminous intensity of LED $I(0)$ / cd	23.81
Distance between adjacent arrays d / m	1

根据如表 1 所示的设定参数进行建模仿真,得到图 3 所示光照强度分布图与图 4 所示的接收功率分布图。从图中可以看出,接收平面光照度和接收光功率分布不均匀,房间中心处的照明强度与功率值较大,而房间角落和边缘处的值较小。照明范围为 $374 \sim 862$ lx,最大接收功率为 -0.78 dBm,最小接收功率为 -3.18 dBm,平均接收功率为 -1.68 dBm,接收功率方差为 3.02 dBm。整个系统的通信性能较差,因此需要对系统进行进一步优化。

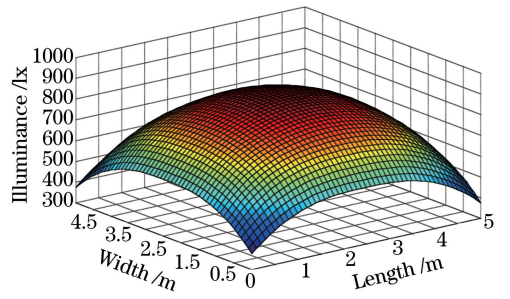


图 3 $d=1$ m, $\Phi_{1/2}=70^\circ$ 下光照度分布图

Fig. 3 Illumination distribution under $d=1$ m, $\Phi_{1/2}=70^\circ$

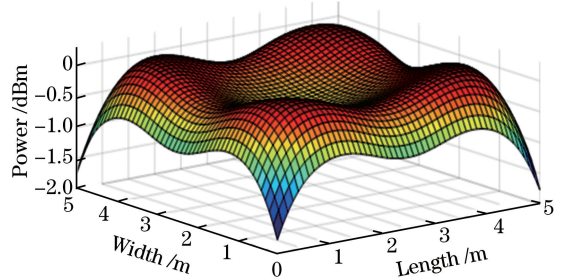


图 4 $d=1$ m, $\Phi_{1/2}=70^\circ$ 下功率分布图

Fig. 4 Power distribution under $d=1$ m, $\Phi_{1/2}=70^\circ$

为此,在文献[15]基础上,通过改变阵列间距离和半功率角来研究接收平面功率分布的变化。以图 3 和图 4 的参数为基础,将相邻阵列距离 d 设为 1.2 m,LED 的半功率角 $\Phi_{1/2}$ 改为 80° ,光照度和功率分布分别如图 5 和图 6 所示,其照明范围为 $351 \sim 737$ lx,最大接收功率为 -0.54 dBm,最小接收功率为 -2.50 dBm,平均接收功率为 -1.34 dBm,接收功率方差为 2.88 dBm。通过与图 3 和图 4 对比发现,将 d 和 $\Phi_{1/2}$ 进行改变后,照明和功率分布的均匀性得到了改善,表明相邻 LED 阵列间距离 d 和 LED 半功率角 $\Phi_{1/2}$ 会影响系统接收光功率的均匀性。为了寻找最优照明和功率分布,有必要对这两个参数进行优化,对此本研究采用 GA 来求解最优解。

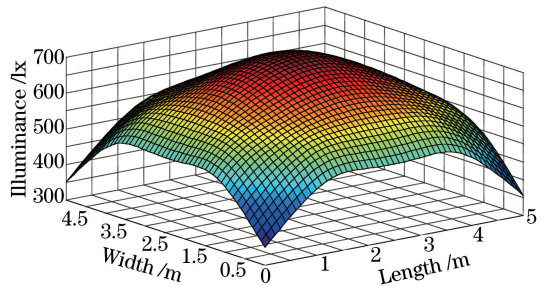


图 5 $d=1.2$ m, $\Phi_{1/2}=80^\circ$ 下光照度分布图

Fig. 5 Illumination distribution under $d=1.2$ m, $\Phi_{1/2}=80^\circ$

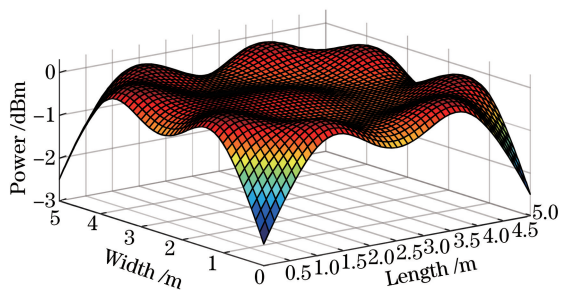


图 6 $d = 1.2 \text{ m}$, $\Phi_{1/2} = 80^\circ$ 下功率分布图

Fig. 6 Power distribution under $d = 1.2 \text{ m}$, $\Phi_{1/2} = 80^\circ$

3 自适应 GA 的改进

GA 稳健性高,收敛速度快,具有良好的收敛性,搜索过程中不需要考虑问题的内在性质。采用 GA 对相邻 LED 阵列间距离和 LED 半功率角进行优化,其优化目标是均匀化接收光功率的分布,目标函数为

$$F = \min[D(P_r)], \quad (6)$$

式中 $D(P_r)$ 表示接收平面接收功率的方差。根据房间和布局的对称性,对称位置可以看成是一个优化目标,将所有 LED 分为 6 组,同一组的 LED 半功率角相等,如图 7 所示。

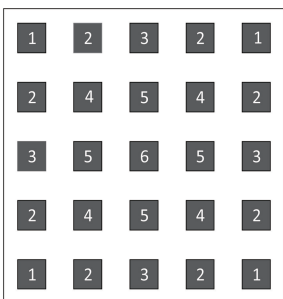


图 7 独立均匀布局下 LED 阵列分组

Fig. 7 Independent uniform layout of LED array

3.1 种群初始化

在本文优化研究中, d 同样表示相邻阵列间距离, $\Phi_{1/2}^{(i)}$ 表示第 i 组 LED 的半功率角 ($i = 1, 2, \dots, 6$),种群中每个染色体表示为: $d, \Phi_{1/2}^{(1)}, \Phi_{1/2}^{(2)}, \Phi_{1/2}^{(3)}, \Phi_{1/2}^{(4)}, \Phi_{1/2}^{(5)}, \Phi_{1/2}^{(6)}$ 。根据房间模型的大小, d 和 $\Phi_{1/2}$ 的取值范围分别为 $0 < d < 1.25 \text{ m}$, $20^\circ < \Phi_{1/2} < 80^\circ$ 。种群规模的设定影响 GA 的收敛性能和收敛速度,本研究考虑实际需要,将种群的规模设定为 100。其中,个体基因中 d 在 $[0, 1.25 \text{ m}]$ 范围内,以 0.1 m 为步长,个体基因中 $\Phi_{1/2}$ 在 $[20^\circ, 80^\circ]$ 范围内,以 1° 为步长,构建适应度函数。

3.2 基于个体差异的适应度函数

适应度函数是评价个体优劣的指标,设定的适

度函数应反映出接收平面接收功率的均匀程度,因此本研究采用接收平面接收功率最大值和最小值的偏差来构建适应度函数,其表达式为

$$F(i) = 100 \times \left\{ 1 - \frac{\max[P_r(i)] - \min[P_r(i)]}{\max[P_r(i)]} \right\}, \quad (7)$$

式中: $\max[P_r(i)]$ 和 $\min[P_r(i)]$ 代表接收平面上所有接收点接收到光功率的最大值和最小值。接收平面上功率分布偏离程度越大,适应度值越小,反之适应度值越大。

3.3 选择算子的改进

GA 中选择操作的目的是选取出优良个体遗传到下一代,其传统的轮盘赌方法在算法运行前期,适应度值很高的个体会以很大概率被选中,降低了种群的多样性,算法易出现“早熟”现象且收敛性能差。在算法运行的后期,随着不断进化迭代,个体间的差异性很小,轮盘赌方法不易选择出种群中最优个体。基于此,本研究采用 Golsberg 等^[16] 提出的对适应度函数线性放缩的方法,其表达式为

$$F'(i) = \frac{(a-1)F_{\text{avg}}}{F_{\text{max}} - F_{\text{avg}}} F(i) + \frac{F_{\text{max}} - aF_{\text{avg}}}{F_{\text{max}} - F_{\text{avg}}} F_{\text{avg}}, \quad (8)$$

式中: $F(i)$ 为原适应度函数,经过线性放缩后得到适应度函数为 $F'(i)$; F_{max} 表示当前种群中适应度值最大的个体; F_{avg} 表示当前种群的平均适应度值; a 为常数,通常取 $1 \sim 2$ 之间的数值。本研究设定的种群数为 100, a 取值为 1.5。同时为了确保种群中最优个体在迭代过程中不会遗失,将精英保留策略加入其中。

3.4 自适应交叉算子和变异算子的改进

Srnivas 等^[17] 提出了一种自适应的 GA(AGA),即

$$P_c = \begin{cases} k_1(f_{\text{max}} - f')/f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_2, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases}, \quad (9)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3(f_{\text{max}} - f)/f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_4, & f < f_{\text{avg}} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: P_c 表示交叉概率值; P_m 表示变异概率值; f 表示变异个体的适应度值,交叉个体的适应度值用 f' 表示; f_{avg} 表示种群个体的平均适应度值; f_{max} 表示种群中个体的最大适应度值; k_1, k_2, k_3, k_4 是 0 和 1 之间的数,算法使 $k_1 = k_2 = k, k_3 = k_4 = k'$ 。

在交叉和变异操作时,将 f' 和 f 与 f_{avg} 进行比较,若前者小于后者,则判定该个体性能不佳,对它给予较大的交叉概率 k_2 和变异概率 k_4 ; 若前者高

于后者,则判定该个体性能优良。依据个体的适应度值,按照(9)式和(10)式给予相应的交叉和变异概率。但是,文献[17]提出的改进方法对种群最大适应度值的个体或较为接近最大适应度值的个体不给

予交叉和变异操作,因而个体在遗传中几乎不发生变化,降低了种群的多样性,使得算法易陷入局部最优,收敛性能受到影响。对此,本研究重新设计了GA中的交叉和变异操作,即

$$P_c = \begin{cases} \frac{P_{c_max}(f_{max} - f')}{f_{max} - f_{avg}} + \frac{P_{c_min}(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg}, \\ P_{c_max}, & f' < f_{avg} \end{cases}, \quad (11)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{P_{m_max}(f_{max} - f')}{f_{max} - f_{avg}} + \frac{P_{m_min}(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg}, \\ P_{m_max}, & f' < f_{avg} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: P_{c_max} 、 P_{m_max} 分别为最大交叉概率和最大变异概率; P_{c_min} 、 P_{m_min} 分别为最小交叉概率和最小变异概率。当 $f' = f_{max}$ 时,变异概率为 P_{c_min} ,而不再为0。当 $f' = f_{avg}$ 时,变异概率为 P_{c_max} 。

当 P_{c_min} 、 P_{c_max} 以及 P_{m_min} 、 P_{m_max} 的值确定,则可以根据个体和种群的适应度值,自适应地调整交叉概率与变异概率。设计的更新公式可使群体中最优个体的 P_c 和 P_m 不为0,使个体在遗传过程中不会处于静滞状态,降低了算法陷入局部最优的概率。同时根据(11)式计算交叉概率,采用的匹配方法是单点交叉,针对本研究第1个基因位上的基因代表相邻LED阵列间距离 d ,其余基因位上的基因表示LED半功率角 $\Phi_{1/2}$,故在交叉时, d 与 d 之间进行交叉, $\Phi_{1/2}$ 与 $\Phi_{1/2}$ 之间进行交叉。再根据给出的自适应调节公式计算变异概率。

3.5 算法的收敛条件的改进

通常情况下,GA经过最大迭代次数 i_{max} 或者连续迭代次数 i_{cont} 后种群最优个体没有变化,即认为最优解被找到,然后终止算法。 i_{max} 和 i_{cont} 值将影响GA收敛速度,本研究将 i_{max} 设置为200, i_{cont} 设置为15代。整个算法的流程图如图8所示。

4 仿真与分析

采用表1所设参数建立系统模型,仿真环境为Matlab R2013b。GA、AGA以及改进的AGA(IGA)的参数设置如表2所示,其中GA和AGA参数取经典值^[18]。为提高算法运行速度和收敛性能,当判定个体为劣质个体时,给予该个体较大的交叉概率和变异概率,即 P_{c_max} 值、 P_{m_max} 值分别设置为0.9和0.05;当个体适应度值高于平均适应度值时,判定该个体为优质个体,给予该个体较小的交叉概率和变异概率,即 P_{c_min} 值、 P_{m_min} 值分别设置为0.1和0.01。

表2 3种算法参数设置

Table 2 Parameter setting of three algorithms

Algorithm	Population size	Number of iterations	Other parameter value
GA	100	200	$P_c = 0.3$, $P_m = 0.05$
AGA	100	200	$k_1 = k_2 = 0.9$, $k_3 = k_4 = 0.05$ $P_{c_max} = 0.9$,
IGA	100	200	$P_{c_min} = 0.1$ $P_{m_max} = 0.05$, $P_{m_min} = 0.01$

1) 光照度和功率分布仿真与分析

图9为GA优化的光照度和功率分布图,使用GA得到最优解为: $d = 1.16$, $\Phi_{1/2}^{(1)} = 32^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(2)} = 40^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(3)} = 47^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(4)} = 80^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(5)} = 77^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(6)} = 79^\circ$ 。从图中可以得出,优化后接收平面光照度和功率分布的均匀性得到提高,然而房间角落部分仍然有所偏差,算法未达到最优解就已收敛。

图10为AGA优化的光照度与功率分布图,使用AGA得到的最优解为: $d = 1.17$, $\Phi_{1/2}^{(1)} = 17^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(2)} = 41^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(3)} = 55^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(4)} = 77^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(5)} = 58^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(6)} = 64^\circ$ 。从图中可以观察到,采用AGA优化后,接收平面光照度和功率分布的均匀性都有明显改善,但房间边缘和角落部分的值相比于房间中心仍然有偏差。

图11为本文所提IGA的光照度和功率分布图,选用IGA得到的最优解为: $d = 1.24$, $\Phi_{1/2}^{(1)} = 35^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(2)} = 41^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(3)} = 42^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(4)} = 80^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(5)} = 63^\circ$, $\Phi_{1/2}^{(6)} = 65^\circ$ 。从图中可以得出,相比于上述两种优化算法,使用IGA优化后的接收平面光照度和功率分布更加均匀,房间角落和边缘偏差值得到明显改善。

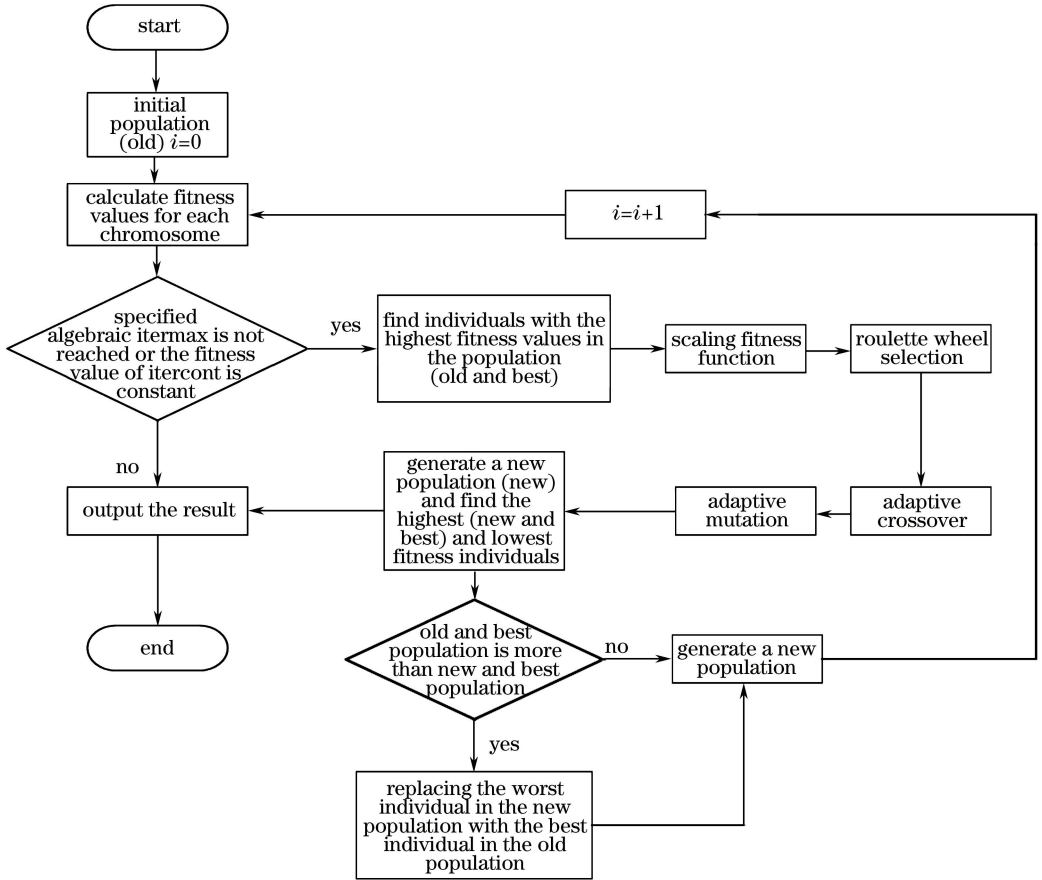


图 8 IGA 流程图

Fig. 8 Flow chart of IGA

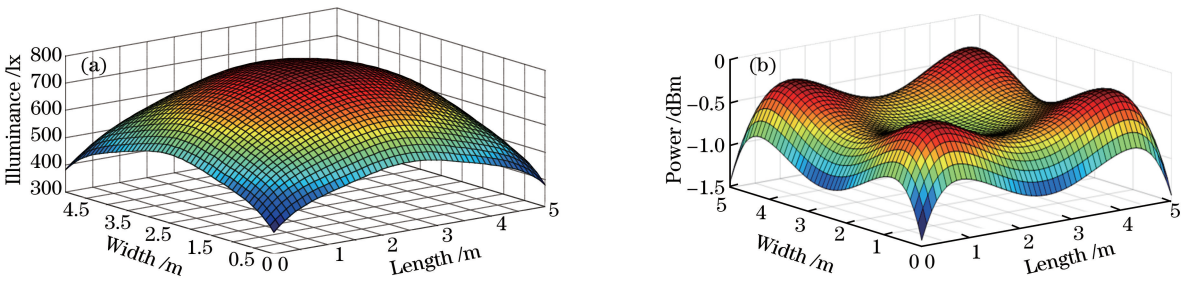


图 9 GA 下的参数分布度。(a)照度；(b)功率

Fig. 9 Distribution of parameters under GA. (a) Illumination; (b) power

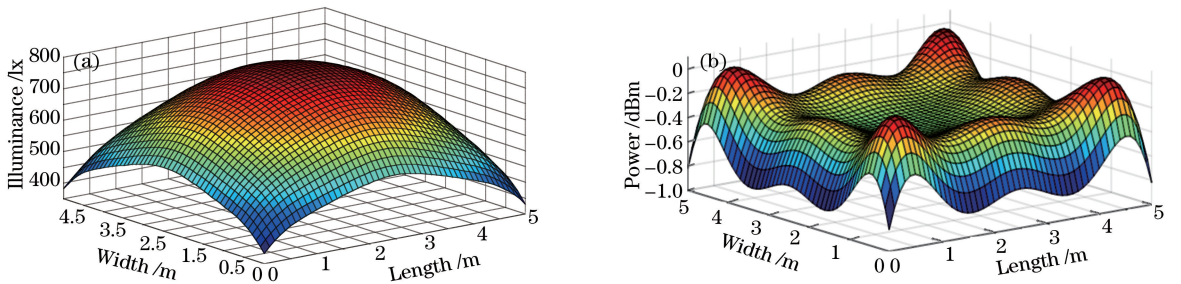


图 10 AGA 下的参数分布度。(a)照度；(b)功率

Fig. 10 Distribution of parameters under AGA. (a) Illumination; (b) power

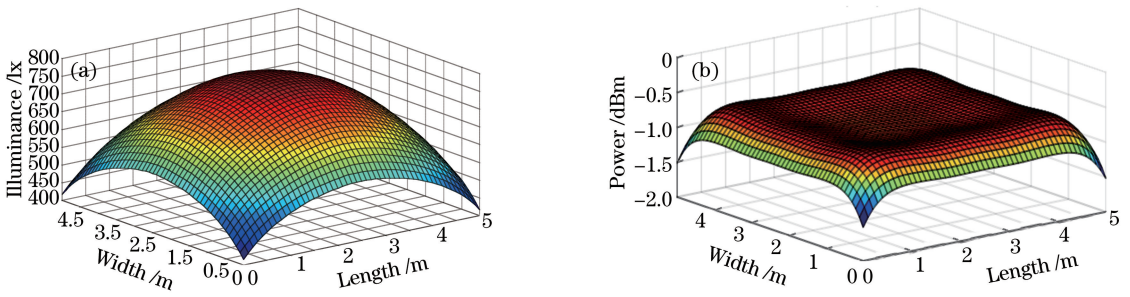


图 11 IGA 下的参数分布度。(a) 照度; (b) 功率

Fig. 11 Distribution of parameters under IGA. (a) Illumination; (b) power

采用 4 种不同方法得到的接收平面光照度分布和接收光功率对比结果如表 3 所示。对表中数据进行分析可知,与未优化前相比,3 种 GA 都降低了功率的波动,相比于其他两种算法,所提算法

的系统性能得到进一步提高,同时 3 种算法得到的照明范围都满足国际标准化组织 (ISO) 的规定范围(300~1500 lx),且所提算法得到的光强度分布最为均匀。

表 3 4 种方法的参数

Table 3 Parameters of the four methods

Algorithm	Minimum receiving power /dBm	Maximum receiving power /dBm	Average receiving power /dBm	Received power variance /dBm	Illumination range /lx
Method before optimization	-3.18	-0.78	-1.68	3.02	374-862
GA	-2.17	-0.59	-1.40	2.04	455-917
AGA	-2.02	-0.66	-1.15	1.87	424-791
IGA	-1.52	-0.66	-1.02	1.16	417-765

2) 算法的收敛仿真与分析

同时对 3 种算法的收敛特性进行研究,如图 12 所示,IGA 比 GA 和 AGA 的收敛速度更快,且 IGA 最终收敛的解也要优于其他两种算法。从图中可以观察到,GA 和 AGA 的收敛曲线均呈现出波动状态,这是因为每次迭代后最优个体可能遭受破坏,而 IGA 由于采用了精英保留策略,将每一代最优个体保留下来,使收敛曲线呈现单调递减状态,算法收敛速度也大大加快。其中 GA 迭代次数为 92 代,AGA 为 81 代,IGA 为 51 代。

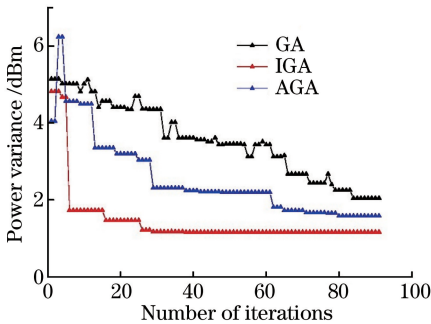


图 12 3 种算法的收敛曲线

Fig. 12 Convergence curves of three algorithms

3) 光功率波动的仿真与分析

目前主要使用两种方法降低接收平面上接收光

功率的波动性,一种是文献[6]提出的运用改进的 GA(GDGA)优化 LED 阵列布局,另一种是文献[19]提出的采用蚁群算法(ACO)优化功率因子调节发射光功率。将文献[6]、文献[19]的优化结果与使用所提算法得到的优化结果进行对比,如表 4 所示,结果显示所提算法的接收平面功率方差最小,优化效果最优。

表 4 3 种方法的参数

Table 4 Parameters of the three methods

Algorithm	Maximum receiving power /dBm	Minimum receiving power /dBm	Received power variance /dBm
ACO	-7.40	-9.98	19.27
GDGA	-3.25	0.54	1.32
IGA	-0.66	-1.52	1.16

5 结 论

针对接收平面接收功率值波动大的问题,在 LED 阵列独立均匀分布的基础上采用 GA 优化 LED 阵列间距离和 LED 半功率角,并对 GA 中的选择操作、交叉操作和变异操作进行改进。仿真结果表明:所提算法不易陷入局部最优,收敛速度快,收敛性能更佳。所提算法与优化 LED 布局和发射光功率的方

法相比,优化效果更加明显。算法优化接收光功率后能够显著增强室内 VLC 系统性能,并且能够增加通信质量和通信公平性。此外,算法具有良好的可移植性,针对不同场景,可以进行动态的调整。

参 考 文 献

- [1] Chen Y, Yin H, Liu H L. Adaptive channel estimation for MIMO-OFDM visible light communication system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0906003.
陈勇, 尹辉, 刘焕淋. MIMO-OFDM 可见光通信系统的自适应信道估计[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0906003.
- [2] Chi N, Hass H, Kavehrad M, *et al.* Visible light communication: demand factors, benefits and opportunities [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 5-7.
- [3] Son I K, Mao S. A survey of free space optical networks [J]. Digital Communications and Networks, 2016, 3(2): 67-77.
- [4] Chi N, Lu X Y, Wang C, *et al.* High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [5] Zhang J, Wang H. An improved SNR uniformity optimization scheme for visible optical communication systems [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 27(1): 78-82.
张健, 王辉. 一种改进的可见光通信系统 SNR 均匀性优化方法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(1): 78-82.
- [6] Liu H, 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(9): 76-81.
- [7] Wang Y, Lan T, Wang H T, *et al.* A new design of light source arrangements for indoor visible light communication [C] // IEEE International Conference on Systems and Informatics, 2017: 705-709.
- [8] You C X, Zhang S, Zhang R, *et al.* Light source altitude optimization in coalface visible light communication based on the fireworks algorithm [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(5): 1174-1180.
游春霞, 张申, 张然, 等. 基于烟花算法的煤矿工作面 VLC 光源高度优化 [J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 1174-1180.
- [9] Rajagopal S, Roberts R D, Lim S K. IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 72-82.
- [10] Zeng L, O'Brien D C, Minh H L, *et al.* High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white led lighting [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1654-1662.
- [11] Chen Y, Li Y C, Liu H L. Moving target positioning method based on visible light communication in time division multiplexing network [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1006003.
陈勇, 李逸超, 刘焕淋. 基于可见光通信的时分复用组网下移动目标定位方法 [J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1006003.
- [12] Karunatilaka D, Zafar F, Kalavally V, *et al.* LED based indoor visible light communications: state of the art [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 17(3): 1649-1678.
- [13] Gao S. Performance study for indoor visible light communication systems [D]. Ottawa: University of Ottawa, 2013.
- [14] Shen Z M. Study on the channel model and optical receiving end of LED-based indoor visible light communication [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
沈振民. 基于 LED 的室内可见光通信信道建模及光学接收端研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [15] Rajashree M, Kedar N D, Kusum D. Design of chemo-GA for engineering design optimization problem [C] // IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation, 2016: 141-145.
- [16] Goldberg D E, Holland J H. Genetic algorithms and machine learning [J]. Machine Learning, 1988, 3(2/3): 98-99.
- [17] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 2002, 24(4): 656-667.
- [18] Ding J P, Huang Z T, Ji Y F. Evolutionary algorithm based power coverage optimization for visible light communications [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(4): 439-441.
- [19] 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.
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.