

改进遗传模拟退火算法优化室内 VLC 覆盖均匀性

刘焕淋^{1*}, 朱平鑫¹, 陈勇², 林振宇¹

¹重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;

²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

摘要 基于 LED 的室内可见光通信(VLC)能够实现照明和高速率的数据传输,但 LED 朗伯辐射模式和光线多径效应等使 VLC 系统下行链路在同一接收水平面的光功率和照明强度分布不均匀,难以保证通信服务的公平性。提出了一种改进的遗传模拟退火算法(IGSAA)搜索最优的功率调节因子并调节 LED 阵列的发射功率。IGSAA 基于不同接收点的接收功率差异的适应度函数,采用双点交叉操作方式并根据种群最优个体信息和进化代数设计自适应变异概率以增强算法的搜索能力,采用基于子群划分的概率交叉和变异方法以增加种群多样性。仿真结果表明,IGSAA 能在有限进化代数内有效地提高室内 VLC 系统的覆盖均匀性。

关键词 光通信; 均匀覆盖; 遗传模拟退火算法; 功率调节因子; 接收光功率

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0106001

Optimization of Indoor VLC Coverage Uniformity by Improved Genetic Simulated Annealing Algorithm

Liu Huanlin^{1*}, Zhu Pingxin¹, Chen Yong², Lin Zhenyu¹

¹*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

²*Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*

Abstract Indoor visible light communication (VLC) based on light-emitting diodes (LED) can meet the needs of illuminance and high-rate data communications. However, the optical power and illuminance intensity distributions for the downlink of a VLC system on the same receiving plane are nonuniform owing to the LED Lambertian radiation pattern, the inherent ray multipath effect, and so on. Thus, it is difficult to ensure the fairness of communication services. An improved genetic simulated annealing algorithm (IGSAA) is proposed to search a set of optimal power regulating factors and adjust the transmitting power of LED arrays. In the IGSAA, the adaptive function is designed in the view of the received power differences among different positions on the receiving plane. A two-point crossover operation mode is used and a adaptive mutation probability is designed based on the optimal chromosome information of the population and the evolutionary generation to enhance the search ability of the algorithm. Besides, to maintain the diversity of population, the probability crossover and mutation methods based on subgroup division are used to increase the population diversity. The numerical results show that the proposed IGSAA can effectively improve the coverage uniformity of an indoor VLC system within limited evolutionary generations.

Key words optical communications; uniform coverage; genetic simulated annealing algorithm; power regulating factor; received optical power

OCIS codes 060.2605; 060.4080; 300.6280

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-08-23; 录用日期: 2018-09-05

基金项目: 国家电网公司科技项目(52010118000Q)

* E-mail: liuhl2@sina.com

1 引 言

相比于传统射频通信,基于 LED 的室内可见光通信(VLC)具有功耗低、安全性高、无电磁干扰、可用带宽大且无需频谱认证等优点^[1-2],有着广阔的应用前景^[3]。在实际应用场景中,VLC 系统通常需要布置多个 LED 阵列以实现照明和高密度、高速率的数据传输。但是,LED 朗伯辐射模型及信道的多径效应等容易造成接收平面的接收光功率和照明强度分布不均匀,使位于同一接收平面不同位置的用户难以享受到同等的服务质量^[4-5]。

目前,关于优化室内 VLC 系统覆盖性能的研究主要包括优化 LED 阵列布局^[6]和优化固定布局 LED 阵列的功率调节因子。文献[7]设计了反向 LED 布局,能够同时满足照明和均匀的信噪比(SNR)要求。文献[8]提出了混合角落照明布局(HCLL)、混合边缘照明布局(HELL)和混合墙照明布局(HWLL),使得接收平面上的 SNR 分布更均匀,但其方案优化效果有限。相比而言,采用智能优化算法优化 LED 阵列布局或发射功率时优化效果更明显。文献[9]在特定 LED 间隔和数目下,提出进化算法以确定最优 LED 阵列。文献[10]提出基于基因密度的遗传算法(GA)优化 LED 阵列坐标,利用 LED 阵列坐标构建染色体,采用改进的遗传操作达到优化接收平面光功率分布均匀性的目的,但是 GA 算法易陷入局部最优,通常需要设置很大的迭代次数。虽然 LED 阵列布局能够在一定程度上优化系统的覆盖均匀性,但是其优化结果可能使布局杂乱无章,不适用于 LED 布局确定的应用场景。因此,不改变 LED 布局和坐标的参数优化也引起人们的重视。Ding 等^[11]提出基于进化算法的接收机光功率因子调节优化方法,使接收平面的接收功率更加均匀,该方案能够将接收光功率的波动范围降低 26.5%。文献[12]将接收机的折光指数作为遗传算法的基因,使接收端光功率更加均匀,但该算法的寻优速度缓慢和覆盖性能不佳。而模拟退火算法(SAA)具有较强的局部搜索能力,但寻优效率差^[13],有研究者将 GA 和 SAA 结合产生了各领域问题求解的 GSAA(Genetic Simulated Annealing Algorithm)来提升算法的搜索能力^[14],但是 GSAA 算法的随机搜索寻优能力和收敛速度依赖于算法的退火策略、适应度函数设计和对劣质个体的接纳策略。

针对 GSAA 的问题,本文提出一种改进的遗传模拟退火算法,该算法可为 LED 阵列搜索 VLC 系

统最优功率调节因子。考虑到接收端接收光功率的差异性,设计适应度函数作为算法筛选个体的依据;采用基于子群划分的双点交叉和自适应的变异操作改进劣质个体接纳策略,充分保持种群的多样性。

2 室内 VLC 信道模型

图 1 所示为室内 VLC 系统模型示意图,发射端和接收端分别由安装在天花板上的 LED 和位于接收点的用户设备组成。接收点位于距离地面高度为 h 的平面上,接收机为单个光电检测器(PD)。

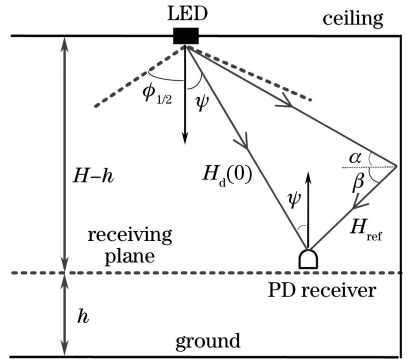


图 1 室内 VLC 系统下行链路示意图

Fig. 1 Schematic of downlink of indoor VLC system

2.1 接收光功率

接收光功率 $P_r(R_j)$ 由直射链路功率和反射链路功率组成,可表示为

$$P_r(R_j) = \sum_{i=1}^{N_{LED}} \left\{ P_t H_d(0; S_i, R_j) + \int_{A_{sur}} P_t H_{ref}(0; S_i, R_j) \right\}, \quad (1)$$

式中: S_i 表示第 i 个 LED; R_j 表示第 j 个 PD; N_{LED} 表示 LED 总数目; P_t 表示 LED 发射功率; $H_{ref}(0)$ 为一阶反射链路的信道增益; $H_d(0)$ 为直射链路信道增益,可以表示为

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

式中: m 表示朗伯指数, $m = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2})$, $\phi_{1/2}$ 为 LED 的半功率角; A 为 PD 接收机的有效检测面积; ψ_c 为 PD 的半视场角(FOV); D_d 为 LED 与 PD 间的直线距离; ψ 为 PD 的入射角; ϕ 为 LED 的发射角,在视距链路中, $\psi = \phi$; $T_s(\psi)$ 为光滤波器增益; $g(\psi)$ 为光集中器增益, $g(\psi)$ 可定义为

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n_{\text{lens}}^2}{\sin^2 \psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c, \\ 0, & \psi > \psi_c. \end{cases} \quad (3)$$

式中 n_{lens} 为 PD 透镜的折光系数, $H_{\text{ref}}(0)$ 为一阶反射链路的信道增益^[6]。

2.2 问题描述

针对固定 LED 阵列布局的覆盖均匀性, 可以优化调节 LED 阵列的功率因子, 则(1)式可改写为

$$P_r(R_j) = \sum_{l=0}^{N_{\text{LED}}} \left\{ k_l P_l H(0; S_i, R_j) + \int_{A_{\text{sur}}} k_l P_l H_{\text{ref}}(0; S_i, R_j) \right\}, \quad (4)$$

式中 k_l 为 LED 阵列的优化功率调节因子, $k_l \in [0, 1]$; $k_l P_l$ 为优化后 LED 阵列的辐射光功率。

本文目标是寻找一组最优功率调节因子, 使接收平面上接收点的接收光功率差异最小, 即目标函数为

$$\begin{aligned} \min & |P_r(R_{j_1}) - P_r(R_{j_2})| \\ \text{s.t.} & j_1, j_2 \in \{1, 2, \dots, N_{\text{rec}}\}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 j_1 和 j_2 为接收平面上的两个不同接收点, N_{rec} 为接收平面上的总接收点数。由于 VLC 系统中有多个源 LED, 且需要验证尽量多个接收点, 使建模优化效果更精确, 这都增加了(5)式的求解难度。针对此问题, 提出一种改进的遗传模拟退火算法(IGSAA), 以优化室内 VLC 系统下行链路覆盖的均匀性。

3 IGSAA

IGSAA 以模拟退火算法为框架, 引入遗传算法优胜劣汰的寻优机制, 通过设计有效的适应度函数, 在遗传操作中基于种群最优个体信息和进化代数设计自适应的变异概率公式, 保证 IGSAA 全局搜索能力和进化能力, 模拟退火算法具有较强的局部搜索能力, 使 IGSAA 不容易陷入局部最优。此外, IGSAA 采用划分子种群的方式增加对种群操作的多样性, 并结合 Metropolis 接受准则获得最优的一组 LED 功率调节因子。

3.1 基于光功率差异性信息的适应度函数

适应度函数作为 IGSAA 选择个体的依据, 其设计至关重要。现有 VLC 优化的适应度函数设计通常基于接收平面的接收光功率最大值或最小值^[10-11], 或基于所有接收点的接收光功率方差^[9], 未充分利用各个接收点之间接收光功率差异性信息。因此, 基于

Raj Jain 等式设计个体的适应度函数 $f(c)$:

$$f(c) = \frac{\left[\sum_{j=1}^{N_{\text{rec}}} P_r(R_j) \right]^2}{N_{\text{rec}} \sum_{j=1}^{N_{\text{rec}}} P_r^2(R_j)}, \quad (6)$$

式中 $P_r(R_j)$ 为接收点 j 接收的光功率, c 为染色体(个体), $f(c) \in [0, 1]$ 。当各个接收点的接收光功率值越接近时, $f(c)$ 越接近 1, 当且仅当所有接收点光功率都相等时, $f(c) = 1$ 。

3.2 染色体编码和遗传操作

IGSAA 的染色体采用十进制编码方式, 染色体的基因代表 LED 的功率调节因子, 一组功率调节因子构成一条染色体 $c = (k_1, k_2, \dots, k_{N_{\text{LED}}})$ 。IGSAA 的遗传操作包括选择操作、交叉操作和变异操作。选择操作采用轮盘赌选择(RWS)。RWS 根据个体适应度函数值选择个体, 使适应度函数值高的个体被选中而生存下来的概率更大, 在选择操作中, 个体被选中的概率为

$$P_{\text{sel}}(c) = \frac{f(c)}{\sum_{m=1}^{N_{\text{popu}}} f(m)}, \quad (7)$$

式中 N_{popu} 为一个种群中的个体数目, $\sum_{m=1}^{N_{\text{popu}}} f(m)$ 为种群中所有个体的适应度函数值之和。

IGSAA 的交叉操作采用双点交叉方式, 即在两个父代个体中随机设定两个交叉点, 如图 2 所示, 然后将交叉点之间的等位基因进行互换以生成两个新的个体, 交叉概率为 P_{cro} 。

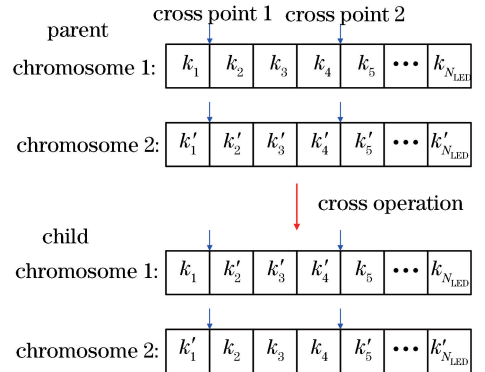


图 2 染色体交叉操作示意图

Fig. 2 Schematic of cross operation of chromosomes

IGSAA 采用动态变异操作方式, 根据种群中最优个体信息和进化代数自适应地调整变异概率, 增强算法的局部搜索能力, 动态变异概率计算公式为

$$P_{\text{mut}} = P_{\text{init}} + \lambda_{\text{inc}} \times N_{\text{inc}} \quad (8)$$

式中 P_{init} 为初始变异概率, λ_{inc} 为变异步长, N_{inc} 为从变异概率没有变化周期内种群中最优个体未变化的进化代数。当最优个体未变化的进化代数增加时, (8) 式中变异概率 P_{mut} 增加, 从而避免算法陷入局部最优。

$$p = \begin{cases} 1, & \Delta E > 0 \\ \exp(-\Delta E/T_k), & \Delta E < 0 \text{ and } \exp(-\Delta E/T_k) \geq N_{rand}, \\ 0, & \Delta E < 0 \text{ and } \exp(-\Delta E/T_k) < N_{rand} \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_k 为第 k 代的温度; $\Delta E = f(c') - f(c)$, 表示新个体与旧个体的适应度函数值之差; N_{rand} 为 $[0, 1)$ 随机数。由 (9) 式可知, 当新个体适应度函数值大于旧个体时, 接受新个体; 否则, 以一定概率接受新个体, 这样可以避免 IGSA 陷入局部最优。IGSA 采用的降温策略为^[15]

$$T_k = \lambda \cdot T_{k-1}, \quad (10)$$

式中 λ 为降温系数, $\lambda \in [0.5, 0.99]$ 。

3.4 IGSA 算法步骤

- 1) 初始化初始温度 T_0 , $T_k = T_0$, $k = 1$, 生成规模为 N_{popu} 的初始种群;
- 2) 计算种群中个体的适应度函数值 $f(c)$;
- 3) 判断 k 是否达到设定的最大进化代数或者种群中最优适应度函数值连续 15 代不变或者温度降为 0, 若是, 转至步骤 8); 否则, 转至步骤 4);
- 4) 执行选择操作, 按 $P_{sel}(c)$ 选择个体, 将得到的种群随机划分为规模相当的子种群 1 和子种群 2;
- 5) 对子种群 1 和子种群 2 分别按交叉概率 P_{cro} 和 (8) 式的变异概率 P_{mut} 执行交叉和变异操作;
- 6) 按 Metropolis 接受准则接受步骤 5) 中得到

3.3 Metropolis 接受个体准则

Metropolis 接受准则由 Metropolis 等于 1953 年提出, 其思想为以一定概率接受新产生的个体, 从而增加种群多样性^[15], IGSA 设计接纳新个体的概率为

的新个体并替换相应父代个体, 得到新种群;

7) 执行降温操作, 按 (10) 式更新 T_k , $k = k + 1$, 转至步骤 2);

8) 输出种群中满足照明强度要求且适应度函数值最大的最优个体信息。

4 算法仿真结果分析

为了验证本文所提算法的有效性和普适性, 分别在图 3 所示的矩形布局和圆形-矩形混合布局下仿真分析接收平面接收光功率和种群最优个体的适应度函数值, 并满足室内光照明强度范围 (300 ~ 1500 lx) 需求^[16]。对比方案为 SAA^[13] 和 GSAA^[14], GSAA 的交叉概率 $P_{cro} = 0.30$, 变异概率 $P_{mut} = 0.005$; IGSA 的交叉概率 $P_{cro} = 0.30$, 初始变异概率 $P_{init} = 0.003$, 变异步长 $\lambda_{inc} = 0.001$, 初始温度 $T_0 = 1000$ °C, 降温系数 $\lambda = 0.95$ ^[15]。各算法种群规模 $N_{popu} = 100$ 。最大进化代数为 300, 接收平面接收点均匀分布且总数 $N_{rec} = 2500$ 。为了避免结果的偶然性, 各算法分别运行 10 次, 并取结果的平均值。LED 发射机、PD 参数^[6] 和其他系统参数^[11] 如表 1 所示。

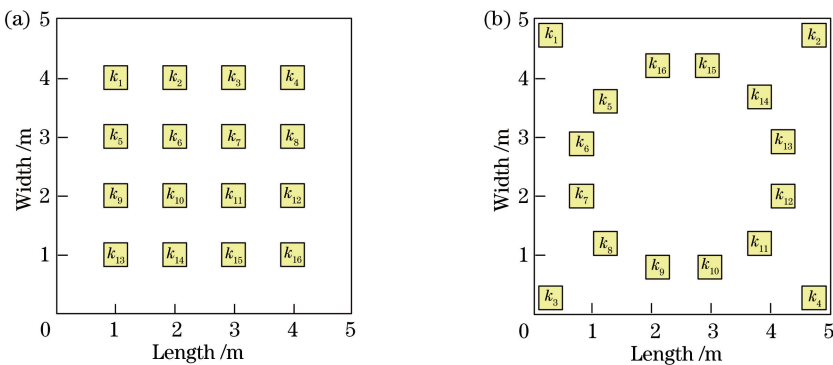


图 3 LED 阵列布局。(a) 矩形; (b) 混合形

Fig. 3 LED array layout. (a) Rectangular layout; (b) mixed layout

表 1 默认的仿真参数

Table 1 Default parameters for simulation

Symbol	Meaning	Value	Symbol	Meaning	Value
$L \times W \times H$	Room size / (m × m × m)	5 × 5 × 3	T_{s0}	Gain of optical filter	1
FOV	Transmitter field angle / (°)	45	g_0	Gain of optical concentrator	1
H_f	Receiving plane height / m	0.85	ϕ_c	FOV of the PD / (°)	55
P_t	Single LED transmit power / mW	452	P_{sens}	Sensitivity of PD receiver / (A · W ⁻¹)	0.52
$\phi_{1/2}$	Half power angle / (°)	80	n_{lens}	Reflective index of a lens	1.5
—	LEDs in each lamp	7 × 7	—	Interval between LEDs / m	0.01

4.1 矩形布局下的仿真结果分析

在矩形布局下,原始接收平面的接收光功率和照明强度分别如图 4(a)所示,接收光功率范围为 -3.74 dBm~2.04 dBm,功率方差为 7.92 dBm。由图 4(a)可知,房间中心和边缘区域的接收信号强度差别较大,分布极不均匀。图 4(b)~(d)为采用不同算法优化矩形 LED 布局后的接收光功率分布,其中图 4(b)为采用 SAA 优化后的接收光功率分布,其范围为 -7.73 dBm~ -1.98 dBm,功率方差为

5.74 dBm。图 4(c)为采用 GSAA 优化后的接收光功率分布,其范围为 -7.24 dBm~ -2.68 dBm,功率方差为 4.33 dBm。相比于传统 SAA 算法,结合 GA 和 SAA 优点的 GSAA 算法覆盖更均匀。图 4(d)为采用 IGSA 优化后的接收光功率分布,其范围为 -7.98 dBm~ -3.76 dBm,功率方差为 3.22 dBm。详细数据列于表 2 中,相比于其他 2 种优化算法,本文所提 IGSA 优化后的功率方差最小,即均匀性最好。

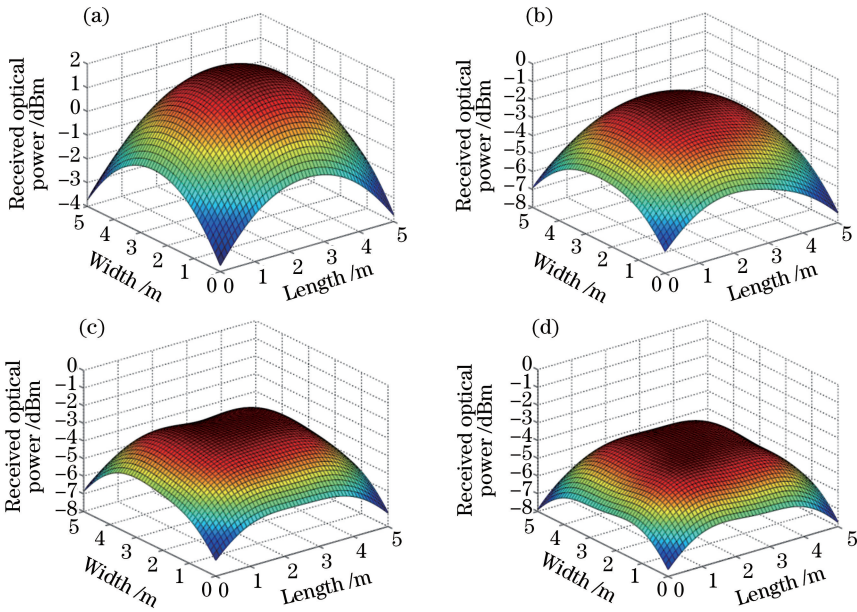


图 4 矩形布局下优化前、后的接收光功率分布; (a)未采用优化算法; (b) SAA; (c) GSAA; (d) IGSA

Fig. 4 Received optical power distributions before and after optimization under rectangular layout.

(a) Without optimization algorithm; (b) SAA (c) GSAA; (d) IGSA

表 2 矩形布局下的光功率

Table 2 Optical power under rectangular layout dBm

Condition	Minimum power	Maximum power	Power variance
Original	-3.74	2.04	7.92
SAA	-7.73	-1.98	5.74
GSAA	-7.24	-2.68	4.33
IGSA	-7.98	-3.76	3.22

表 3 混合布局下的光功率

Table 3 Optical power under mixed layout dBm

Condition	Minimum power	Maximum power	Power variance
Original	-2.46	-1.38	2.78
SAA	-6.94	-3.65	1.75
GSAA	-4.90	-3.21	1.31
IGSA	-4.57	-3.71	0.99

4.2 混合布局下的仿真结果分析

在混合布局下,原始接收平面的接收光功率如图 5(a)所示,接收光功率范围为 $-2.46\text{ dBm} \sim -1.38\text{ dBm}$,功率方差为 2.78 dBm 。图 5(b)~(d)为采用不同算法优化混合 LED 布局后的接收光功率分布,其中图 5(b)为采用 SAA 优化后的接收光功率分布,其范围为 $-6.94\text{ dBm} \sim -3.65\text{ dBm}$,功率方

差为 1.75 。图 5(c)为采用 GSAA 优化后的接收光功率分布,其范围为 $-4.90\text{ dBm} \sim -3.21\text{ dBm}$,功率方差为 1.31 dBm 。图 5(d)为采用 IGSA 优化后的接收光功率分布,其范围为 $-4.57\text{ dBm} \sim -3.71\text{ dBm}$,功率方差为 0.99 dBm 。详细数值列于表 3 中,相比于其他 2 种优化算法,本文所提 IGSA 优化后的功率方差最小,即均匀性最好。

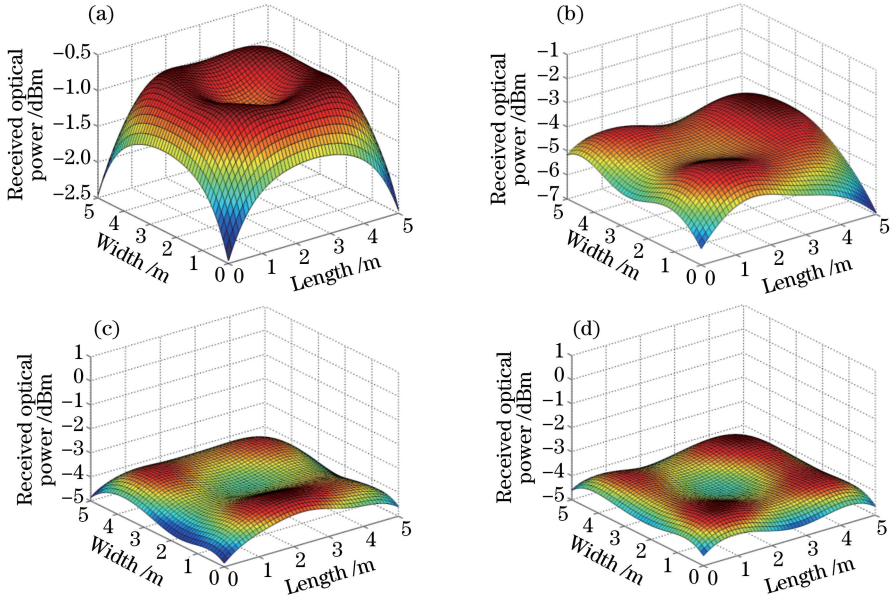


图 5 混合布局下优化前、后的接收光功率分布。(a)未采用优化算法;(b) SAA;(c) GSAA;(d) IGSA

Fig. 5 Received optical power distributions before and after optimization under mixed layout.

(a) Without optimization algorithm; (b) SAA; (c) GSAA; (d) IGSA

5 结 论

针对 VLC 通信在同一接收水平面的光功率和照明强度分布不均匀使用户接收的光信号功率波动较大的问题,研究了一种在保证照明需求前提下的改进的 IGSA,以优化室内 VLC 系统各 LED 功率调节因子,提高 VLC 覆盖均匀性。通过设计 IGSA 的适应度函数、改进种群交叉方式和采用自适应变异概率,使算法在有限进化代数内求得更优的功率调节因子。室内 VLC 是短距离无线通信有效方式之一,改进 VLC 通信系统性能和覆盖特性有利于在节能 LED 照明同时提高通信接入的服务质量和带宽。

参 考 文 献

[1] Obeed M, Salhab A M, Zummo S A, *et al.* Joint optimization of power allocation and load balancing for hybrid VLC/RF networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(5): 553-562.

[2] Yin H H, Dong Y Q, Zou Q, *et al.* Design and implementation of a visible light communication system based on the mobile scenario[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 29(4): 487-493.
尹浩浩,董雨晴,邹倩,等.移动场景下一种可见光通信系统的设计与实现[J].*重庆邮电大学学报*, 2017, 29(4): 487-493.

[3] Liu H, Xia P, Chen Y, *et al.* Interference graph-based dynamic frequency reuse in optical attocell networks[J]. *Optics Communications*, 2017, 402(3): 527-534.

[4] Zhang J, Wang H. An improved SNR uniformity optimization scheme for VLC system[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2015(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(1): 78-82.

[5] 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.
- 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.
- [6] Wang J A, Che Y, Lü C, *et al.* LED Layout for Indoor Visible Light Communication Based on Energy Optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0806003.
- 王加安, 车英, 吕超, 等. 基于能量最优的室内可见光通信 LED 布局 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0806003.
- [7] Zheng H H, Yu C Y, Chen J, *et al.* LED arrangement optimization for visible light communication systems [C]. Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), 2015: 1-3.
- [8] Azizan L A, Ab-Rahman M S, Hassan M R, *et al.* Optimization of signal-to-noise ratio for wireless light-emitting diode communication in modern lighting layouts [J]. Optical Engineering, 2014, 53(4): 045103.
- [9] Liu H L, Wang X, Chen Y, *et al.* Optimization lighting layout based on gene density improved genetic algorithm for indoor visible light communications[J]. Optics Communications, 2017, 390: 76-81.
- [10] Pal S. Optimization of LED array for uniform illumination over a target plane by evolutionary programming[J]. Applied Optics, 2015, 54(27): 8221-8227.
- [11] 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.
- [12] Liu Y H, Peng Y F, Liu Y M, *et al.* Optimization of receiving power distribution using genetic algorithm for visible light communication [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9679: 96790I.
- [13] Cerdón O, Moya F, Zarco C. A new evolutionary algorithm combining simulated annealing and genetic programming for relevance feedback in fuzzy information retrieval systems[J]. Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2002, 6(5): 308-319.
- [14] Lin W F, Chow C W, Yeh C H. Using specific and adaptive arrangement of grid-type pilot in channel estimation for white-light LED-based OFDM visible light communication system [J]. Optics Communications, 2015, 338: 7-10.
- [15] Zhao X C. Simulated annealing algorithm with adaptive neighborhood[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2): 1827-1836.
- [16] Lee K, Park H, Barry J R. Indoor channel characteristics for visible light communications [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(2): 217-219.