

# 蚁群算法优化室内可见光通信功率均匀性的研究

杨智群<sup>1</sup>, 梁继然<sup>1\*</sup>, 毛陆虹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>天津大学微电子学院, 天津, 300072;

<sup>2</sup>天津大学自动化学院, 天津, 300072

**摘要** 在室内可见光通信系统中, 为保证处于室内不同方位的多个用户均能够获得良好的通信质量, 即改善接收平面接收光功率分布均匀性, 提出一种基于改进蚁群算法的功率优化方法, 将一维路径优化问题转化为三维, 提高了运算效率; 把接收平面最大功率与最小功率之差作为待优化的目标函数, 并添加约束条件, 避免了优化后平均光功率过低以及人工筛选带来的不确定性。仿真结果表明, 该方法进一步降低了光功率的偏移量, 并保证了通信环境的稳定性。

**关键词** 光通信; 可见光通信; 蚁群算法; 功率优化

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.220601

## Power Uniformity Optimization in Indoor Visible Light Communication Based on Ant Colony Algorithm

Yang Zhiqun<sup>1</sup>, Liang Jiran<sup>1\*</sup>, Mao Luhong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin, 300072, China;

<sup>2</sup>School of Automation, Tianjin University, Tianjin, 300072, China

**Abstract** To ensure good communication quality of several users from different orientations within a room in indoor visible light communication systems, this study proposes a power optimization method based on the improved ant colony algorithm, which converts the one-dimensional path optimization problem into three dimensions and improves the operational efficiency, thereby improving the uniformity of the received optical power distribution of the receiving plane. Further, the difference between the maximum and minimum powers of the receiving plane is considered to be the optimization target. The addition of constraints avoids the occurrence of low average optical power after optimization as well as the uncertainty attributed to manual screening. Finally, the simulation results demonstrate that the proposed method reduces the optical power offset and ensures the stability of the communication environment.

**Key words** optical communications; visible light communications; ant colony algorithm; power optimization

**OCIS codes** 060.4510; 150.1135; 200.3050

## 1 引言

室内可见光通信(VLC)是一种基于白光发光二极管(LED)的安全高速无线通信技术,具有绿色环保、应用领域多样以及通信容量大等优点<sup>[1-3]</sup>,得到了广泛关注。

传统室内可见光通信系统中,由于用户与LED发射机的相对位置不同,通信质量也有较大的不

同<sup>[4]</sup>。如何保证同一接收平面上得到相同的通信质量,一直是可见光通信领域的研究热点<sup>[5]</sup>。近年来,国内外的相关学者就这一问题从不同方向提出了一些解决方案。文献[1]提出了一种LED阵列独立均匀分布的布局,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。文献[2]通过引入遗传算法对每个LED进行功率优化分配。文献[6]基于烟花算法调整LED的高度,优化接收功

收稿日期: 2019-04-25; 修回日期: 2019-05-16; 录用日期: 2019-05-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403603)、国家自然科学基金(61601309)、深圳市科技计划项目(JCYJ20160422093217170)

\* E-mail: 13212015921@163.com

率。综上所述,人工智能算法在可靠性与经济性方面可以得到保证,因此寻找一种最佳算法是对可见光系统进行功率优化的关键。

文献[7]利用蚁群算法生成一组功率调节因子,并通过反复试验的方式找到当前室内通信环境的最佳因子。但该方法采用方差作为待优化的目标函数,在降低了接收光功率偏移量的同时,也降低了平均光功率,从而造成了通信环境的劣化,并且人工筛选功率调节因子的方式造成了可靠性的降低以及人力与时间上的大量耗费。针对以上问题,本文提出了一种改进型的蚁群算法,在重新构建蚂蚁寻优模型的基础上,以接收平面最大最小功率差作为目标函数,并引入约束条件,减小了算法的复杂程度与人力资源的耗费,解决了由该目标函数造成的偏移量过大的问题。

## 2 可见光通信系统模型

### 2.1 信道模型

在室内无线光通信信道模型中,LED为发射机,光电探测器件为接收机。为了计算其直流增益以及信号功率,需要指定发射器和接收器的相对位置<sup>[8]</sup>。这种相对定位如图1所示,其中,接收器和发射器之间的距离是 $D$ , $\phi$ 为光源发出的光线照到某一接收器时这条光线相对于光源轴的夹角, $\psi$ 为接收机的入射角<sup>[9]</sup>。

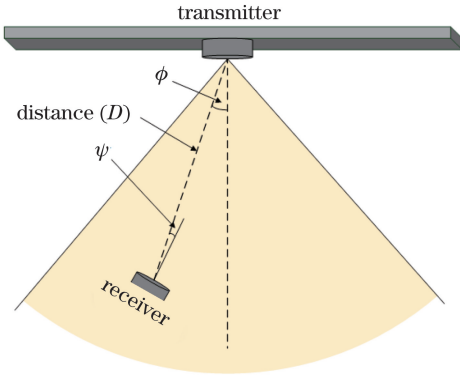


图1 可见光信道模型

Fig. 1 Visible channel model

任意接收器 $R_n$ 接收到发射机 $T_m$ 发送的信号功率 $P_0$ 为

$$P_0(R_n) = P_1 H(0; T_m, R_n), \quad (1)$$

$$H(0; T_m, R_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(0; T_m, R_n) dt, \quad (2)$$

$$h(0; T_m, R_n) =$$

$$\frac{A(l_b + 1)}{2\pi} \cos^{l_b}(\phi) \cos(\psi) \text{rect}\left(\frac{\psi}{F_{OV}}\right) \varepsilon\left(t - \frac{R}{c_0}\right), \quad (3)$$

$$l_b = -\ln 2 / \ln[\cos(\phi_{1/2})], \quad (4)$$

式中, $P_1$ 为发射机的发射功率, $T_m$ 为第 $m$ 个发射机, $R_n$ 为第 $n$ 个接收机, $t$ 为信号传输时间, $F_{OV}$ 为接收机的视场角, $H(0; T_m, R_n)$ 为总信道中发射机与接收机之间的频率响应的直流增益, $h(0; T_m, R_n)$ 为发射机与接收机之间的频率响应, $A$ 为接收机接收面积, $l_b$ 为发射机的朗伯指数, $\phi_{1/2}$ 为发射机半功率角, $\varepsilon(\cdot)$ 为阶跃函数, $R$ 为发射机与接收机之间的距离, $c_0$ 为光速, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数。 $\text{rect}(\cdot)$ 可表示为

$$\text{rect}\left(\frac{\psi}{F_{OV}}\right) = \begin{cases} 1, & \left| \frac{\psi}{F_{OV}} \right| \leq 1 \\ 0, & \left| \frac{\psi}{F_{OV}} \right| > 1 \end{cases}. \quad (5)$$

$\varepsilon(\cdot)$ 可表示为

$$\varepsilon\left(t - \frac{R}{c_0}\right) = \begin{cases} 1, & t - \frac{R}{c_0} > 0 \\ 0, & t - \frac{R}{c_0} \leq 0 \end{cases}. \quad (6)$$

文献[10]表明,在可见光通信环境中,多次反射造成的直流增益衰减十分严重,对接收机接收到的光功率分布影响相对较小,且在实际应用中,通常情况下非视距链路无法用于有效信息的传送<sup>[11]</sup>,因此在本系统中仅考虑视距链路在光功率分布中的影响。单个接收机所接收到的总功率 $P_{\text{total}}$ 可以表示为

$$P_{\text{total}}(R_n) = \sum_{m=1}^M P_1 H_0(0; T_m, R_n), \quad (7)$$

$$H_0(0; T_m, R_n) = \frac{(l_b + 1)}{2\pi D_{mn}^2} \cos^{l_b} \alpha \times \cos \beta \times \varepsilon(\pi/2 - \psi), \quad (8)$$

式中, $M$ 为发射机总数, $D_{mn}$ 为发射机 $T_m$ 与接收机 $R_n$ 之间的距离, $\alpha$ 为发射机与其法向量的夹角, $\beta$ 为接收机与其法向量的夹角, $H_0(0; T_m, R_n)$ 为视距链路中第 $m$ 个发射机与第 $n$ 个接收机之间频率响应的直流增益。

可见光系统中,任意一个接收机所对应的水平照度为所有发射机对其作用产生的照度之和<sup>[9]</sup>,即

$$E_{\text{total}}(R_n) = \sum_{m=1}^M E_{mn}, \quad (9)$$

式中, $E_{mn}$ 为单个LED灯对该接收机的水平照度,表达式为

$$E_{mn}(R_n) = \frac{I(0)}{D_{mn}^2} \cos^{l_b} \phi \cos \psi, \quad (10)$$

式中, $I(0)$ 为LED最大发光强度。

## 2.2 可见光 MIMO 通信系统

如图 2 所示,室内可见光 MIMO 通信系统可以分为室内环境、发射机阵列、接收机阵列三部分。本系统中,依据经典室内可见光系统模型,将室内环境设置为 5 m×5 m×3 m 的空的矩形房间<sup>[12]</sup>。发射机为 16 组均匀分布于房间天花板上的 LED 阵列。接收机平面距地面 1 m,接收平面上共有 25×25=625 个接收机且均匀分布。每个接收机可以分别接收来自 16 个发射机的通信信息,故可据此计算出每一个接收机的接收功率和水平照度。

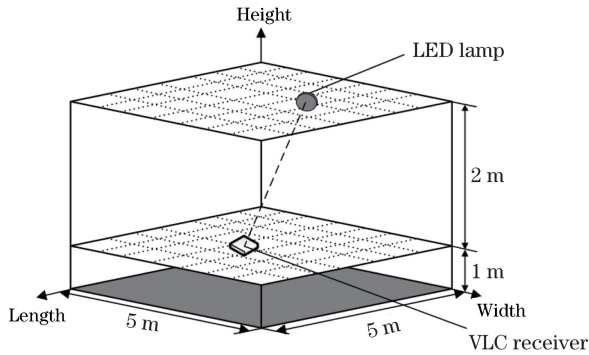


图 2 室内 MIMO 通信系统模型

Fig. 2 Model of indoor MIMO communication system

在可见光 MIMO 通信系统中,如(5)式所示,接收机阵列中任意接收机接收到的光功率均为所有发射机对其产生的光功率之和。故可通过矩阵阵列形式  $\mathbf{P}_{\text{distribution}}$  表达整体接收机阵列接收到的光功率情况,即

$$\mathbf{P}_{\text{distribution}} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{i1} & \cdots & P_{ij} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中,  $P_{ij}$  为第  $i$  行第  $j$  列接收机接收到的光功率。整体光照强度的分布情况也可通过矩阵  $\mathbf{E}_{\text{distribution}}$  表示,即

$$\mathbf{E}_{\text{distribution}} = \begin{bmatrix} E_{11} & \cdots & E_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ E_{i1} & \cdots & E_{ij} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中,  $E_{ij}$  为第  $i$  行第  $j$  列接收机接收到的光照强度。

## 3 可见光接收功率调节存在的问题

由(7)式和(10)式可以看出,在室内可见光系统中,任意一个接收机可接收来自不同位置所有发射机的光,而由于接收机的位置不同,接收机与发射机的距离  $D$  也有较大区别。处于中心处的接收机接收功率较高,而边缘处的接收机接收功率则远低于中央区域。基于以上问题,可采用添加功率调节因

子  $A_m$  的方式<sup>[11]</sup>,对处于不同位置的发射机发射功率  $P_1$  进行调节,此时,单一接收机接收到的光功率以及平均光照度可表示为

$$P_{\text{total}}(R_n) = \sum_{m=1}^M A_m P_1 H_0(0; T_m, R_n), \quad (13)$$

$$E_{\text{total}}(R_n) = \sum_{m=1}^M A_m E_{m_n}. \quad (14)$$

因此,发射机经过功率调整后,接收平面上的  $n$  个接收机能够接收到趋于一致的光功率,表达式为

$$P_r(R_1) \approx P_r(R_2) \approx P_r(R_3) \approx \cdots \approx P_r(R_n), \quad (15)$$

式中,  $P_r(R_n)$  为发射机经过功率调整后,第  $n$  个接收机接收到的总光功率。

## 4 可见光接收功率调节策略设计

### 4.1 LED 布局优化

文献[7]采用传统 LED 布局方案,即将 LED 以矩形阵列形式在天花板上进行均匀排布,如图 3 所示。将 LED 发射功率设置为 0.452 W,相邻 LED 间距 1 m,由此可得接收端接收功率分布,如图 4 所示,此种排布方式在各 LED 功率相同的情况下,接收光功率的波动范围为 213.321~639.353  $\mu\text{W}$ ,波动幅度为 426.032  $\mu\text{W}$ 。

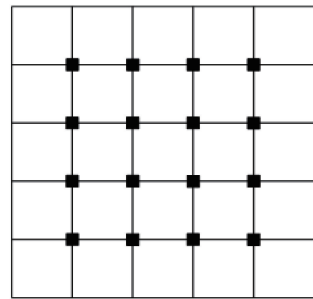


图 3 传统 LED 布局

Fig. 3 Layout of traditional LED

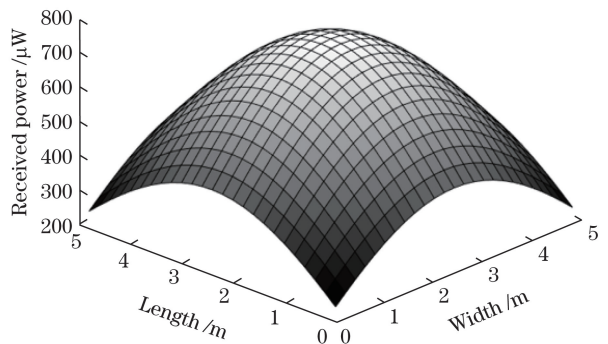


图 4 传统布局下的功率分布

Fig. 4 Power distribution with traditional layout

如(5)式和(7)式所示,接收光功率与入射角的

余弦成正比,在传统 LED 布局方案下,由于 LED 阵列在天花板上呈均匀排布,对多数发射机而言,边缘部分接收机的入射角远小于中心部分接收机的入射角,故导致边缘接收光功率远低于房间中心。为了进一步改善功率分布的均匀性,提高边缘区域的接收功率,提出了一种新型布局方案,将 16 个 LED 分为 3 组,其中 8 个 LED 均匀排布于天花板距离墙壁 0.5 m 处,4 个 LED 排布于距离墙壁 1 m 处的 4 个角,4 个 LED 布置于天花板中心距离墙壁 1.5 m 的 4 个角落,如图 5 所示。通过提高边缘区域 LED 的比例,实现通过布局优化进行功率优化的目的。

通过仿真得到的接收平面光功率分布如图 6 所示,光功率分布为  $331.245 \sim 568.731 \mu\text{W}$ ,波动幅度为  $237.486 \mu\text{W}$ 。该结果表明,优化布局后接收光功率均匀性得到显著改善。

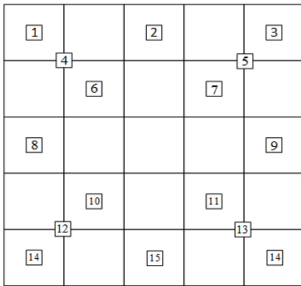


图 5 优化后室内 LED 布局

Fig. 5 Optimized indoor LED layout

### 4.2 可见光功率调节模型转化

控制参数优化是蚁群算法的重要应用之一,其本质是经过多次迭代,找到一组适用于系统的最佳参数。而本文所提出的可见光功率调节模型,也是通过对蚁群算法的改进寻找一组功率调节因子,进而实现接收机光功率平均化。

### 4.3 目标函数设计

文献[7]利用方差作为目标函数,但算法的时间

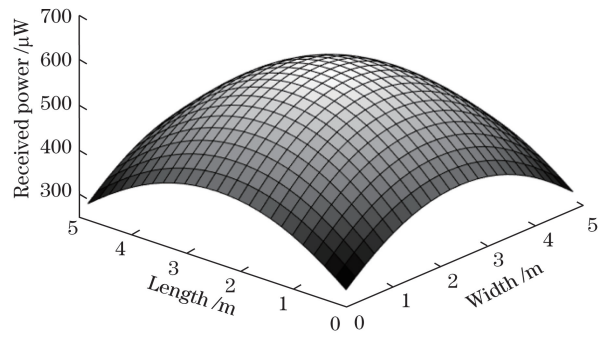


图 6 布局优化后的功率分布

Fig. 6 Power distribution after layout optimization

复杂度在增加的同时,整体光功率与光照强度下降过多。其结果也表明,优化后的平均光功率低于优化前的最低光功率,这对信号传输有不利影响。

蚁群算法在优化系统参数时,每一次迭代产生的最优参数与系统本身的性能指标相互独立,因此在本模型中,一旦生成功率调节因子,系统整体的接收机光功率便为已知。因此可以将接收机阵列整体的光功率作为优化目标,故设计目标函数如下:

$$F = \min \left\{ \left| \frac{\max P_r - \min P_r}{\max P_r} \right| \right\}, \quad (16)$$

式中,  $\max P_r$  和  $\min P_r$  为通信平面中,接收机阵列接收到的光功率的最大值与最小值。

### 4.4 节点和路径的生成

传统蚁群算法在解决参数优化问题上,通常在所有蚂蚁从同一原点出发时即进行迭代,运算效率往往较低。为解决这一问题,本研究以一个  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的长方体外表面作为蚂蚁寻优模型,将传统一维路径寻优问题转化为三维,如图 7 所示,将 16 个节点均匀分布于长方体的 4 个平面上,将蚂蚁分为 2 组,从原点出发,从 2 个方向进行路径寻优,并最终收敛至  $c$  处。初始各节点上信息量相等,

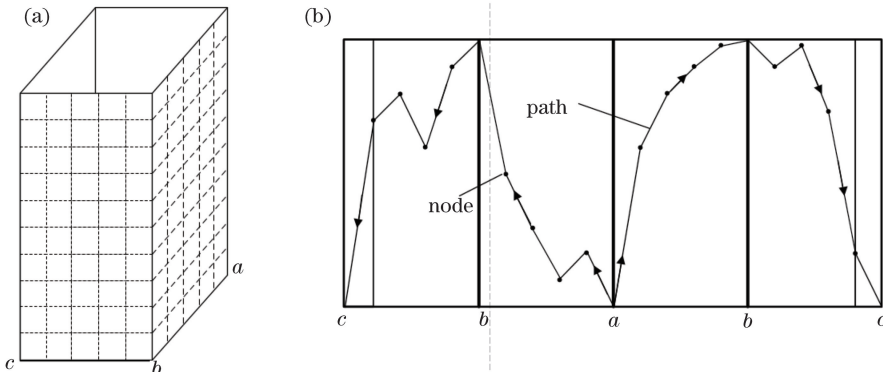


图 7 蚂蚁移动路径示意图。(a)三维移动路径图;(b)三维路径展开图

Fig. 7 Diagrams of ant moving path. (a) 3D moving path map; (b) developed map of 3D path



与节点间距离无关。因此蚂蚁同时从坐标  $a$  点出发,同时到达  $c$  处各自的终点,完成一次循环。其爬行路径可表示为

$$L_{\text{path}} = \{O, A_1, A_2, \dots, A_m, \dots, A_{16}\}, \quad (17)$$

式中,  $A_m$  表示第  $m$  个发射机所对应的功率调节因子,在该模型中映射为蚂蚁在当前路径上所选择的节点对应的  $z$  轴坐标。

#### 4.5 路径点的选择

从  $u$  节点转移到  $d$  节点的状态转移概率可以表示为

$$p_{ud}^e(s) = \frac{\tau_{ud}^h(s) \eta_{ud}^v(s)}{\sum_{e=0}^{10} \tau_{ud}^h(s) \eta_{ud}^v(s)}, \quad (18)$$

$$\eta_{ud}^v(s) = \frac{10 - |z_{ud} - z_{ud}^*|}{10}, \quad (19)$$

式中,  $s$  表示仿真周期,  $e$  为蚂蚁个数,  $h$  为信息素权重系数,  $v$  为启发函数权重系数,  $\tau_{ud}^h(s)$  为信息量,  $\eta_{ud}^v(s)$  为能见度,  $z_{ud}$  为本次循环中的节点  $z$  轴坐标,  $z_{ud}^*$  为上一次循环中得到的对应路径的  $z$  轴坐标。同时为了蚂蚁不被过多的信息素所扰乱,保证算法收敛,对信息素设计挥发过程,即

$$\tau_{ud}(s+1) = (1 - \kappa) \tau_{ud}(s) / F + h \Delta \tau_{ud}(s), \quad (20)$$

式中,  $\kappa$  为局部挥发系数,  $\tau_{ud}(s)$  为前一循环蚂蚁在当前节点的信息量,  $\tau_{ud}(s+1)$  为当前循环蚂蚁在当前节点的信息量,  $F$  为本次循环的目标函数值。  $\Delta \tau_{ud}(s)$  表示新蚂蚁两次经过同一节点的信息量差值。

#### 4.6 约束条件

传统人工智能算法在计算功率调节因子的问题上均存在收敛结果过小的问题,为解决这一问题,本研究在传统算法上添加了对优化结果的约束条件。

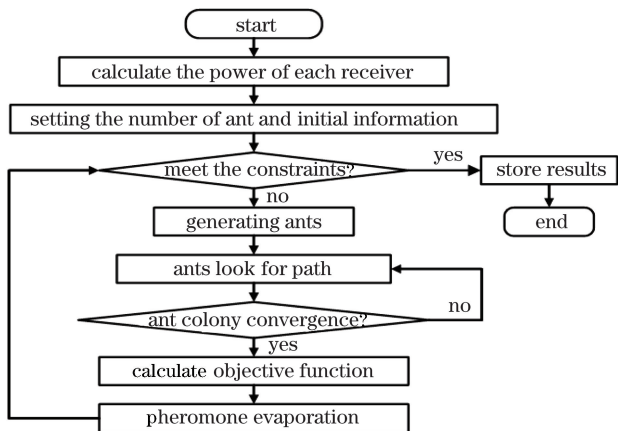


图 8 改进蚁群算法流程图

Fig. 8 Flowchart of improved ant colony algorithm

若迭代结果计算所得的平均功率低于额定功率 (RP) 或最大接收功率与最小接收功率大于预定阈值,则继续算法迭代以防止接收机的接收光功率过低。整体算法流程图如图 8 所示。

## 5 算例分析

仿真环境为模拟  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  的空的矩形房间,LED 采用改进后的布局方式。单一发射机发射功率为  $0.825 \text{ W}$ ,最大发光强度为  $35.95 \text{ cd}$ ,半功率角为  $54^\circ$ 。单一接收机表面积为  $1 \text{ cm}^2$ 。可根据 (9) 式和 (10) 式求得初始接收机的接收光功率分布,如图 4 所示,为  $225 \sim 728 \mu\text{W}$ ,接收的光照强度分布为  $667.981 \sim 1339.71 \text{ lx}$ 。二者的波动幅度分别为  $503 \mu\text{W}$  与  $1065 \text{ lx}$ 。在此模型下对传统蚁群算法进行建模,仿真结果如图 9 与图 10 所示,接收机接收光功率分布为  $100.534 \sim 181.824 \mu\text{W}$ ,接收的光照强度为  $513.421 \sim 629.583 \text{ lx}$ 。二者的波动幅度分别为  $81.29 \mu\text{W}$  与  $116.162 \text{ lx}$ 。

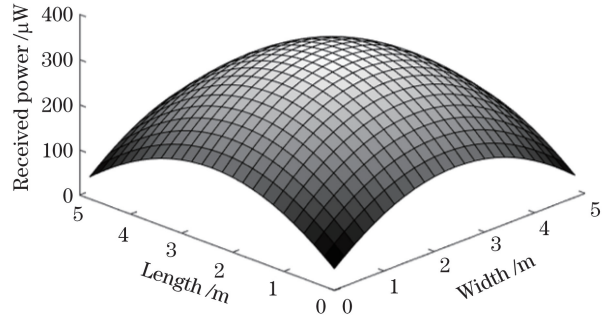


图 9 传统蚁群算法光功率分布

Fig. 9 Power distribution of traditional ant colony algorithm

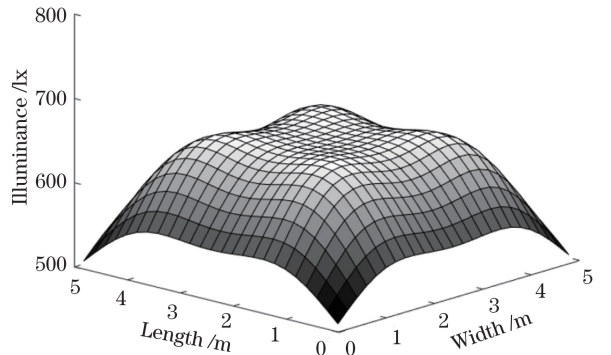


图 10 传统蚁群算法光照强度分布

Fig. 10 Light intensity distribution of traditional ant colony algorithm

现对本文所述的改进蚁群算法进行仿真分析,在迭代更新过程中,信息素的蒸发速度满足  $\epsilon_{s+1} = 0.85\epsilon_s$ ,每个蚂蚁携带的信息素为 600。最优条件为前后两代蚂蚁之间的优化结果差距  $\epsilon \leq 10^{-3}$ 。经过

蚁群算法生成功率调节因子进行功率分布优化,得到最佳功率调节因子  $A \in \{0.98, 0.99, 0.95, 0.98, 0.94, 0.99, 0.97, 0.89, 0.71, 0.65, 0.59, 0.68, 0.32, 0.21, 0.35, 0.43\}$ , 利用该组优化因子对 LED 发射功率进行调整, 仿真结果如图 11 与图 12 所示。

可知接收机接收到的光功率分布为  $405 \sim 463 \mu\text{W}$ , 接收的光照强度为  $553 \sim 598 \text{ lx}$ 。二者的波动幅度分别为  $58 \mu\text{W}$  与  $45 \text{ lx}$ , 由此可见该算法进一步优化了接收平面的光功率与光强分布。

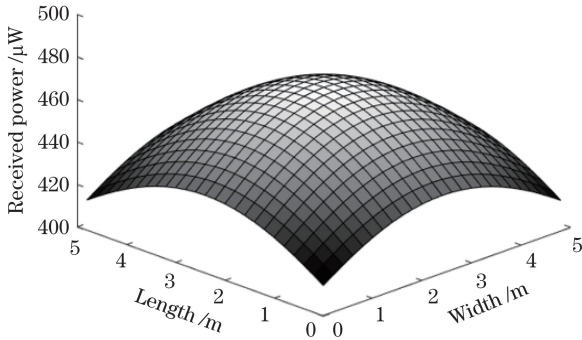


图 11 改进蚁群算法光功率分布

Fig. 11 Power distribution of optimized ant colony algorithm

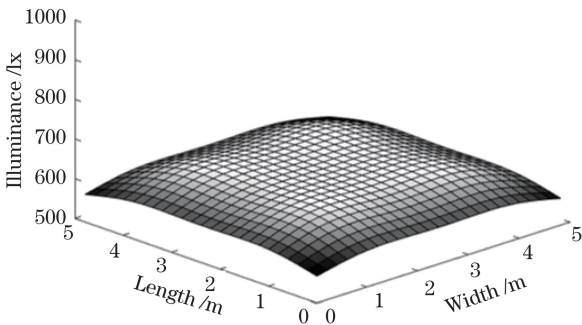


图 12 改进蚁群算法光照强度分布

Fig. 12 Light intensity distribution of optimized ant colony algorithm

最后将该改进型蚁群算法与传统蚁群算法的收敛曲线进行对比, 如图 13 所示, 可见本文提出的方法具有更优越的收敛性。

综上, 改进后的蚁群算法在降低了算法的时间复杂度的同时, 减小了优化后的功率与光照度偏移量, 并且能够减小由优化所造成的光功率损失对信号正常传输的影响。

## 6 结 论

提出了一种新型室内 LED 布局方式, 提高了接收功率的均匀性。并结合改进蚁群算法提出了一种适用于可见光通信系统的功率优化方案, 改进节点

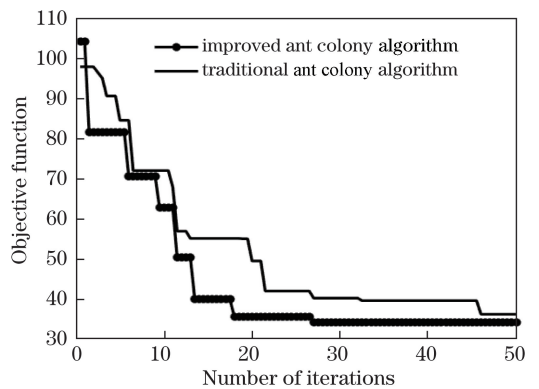


图 13 蚁群算法收敛曲线对比

Fig. 13 Convergence curve comparison of ant colony algorithm

布局方式, 提高运算效率; 将最大最小功率差作为目标函数, 缩短了功率优化问题的计算时间并降低了算法复杂度; 添加约束条件, 以及信息素蒸发算法, 减小了光功率偏移量, 避免了人工筛选造成的不稳定性。仿真结果表明, 本文提出的功率优化方法进一步减小了光功率的偏移量, 同时保证了优化后通信环境的稳定性, 具有更加优良的收敛性。

## 参 考 文 献

- [1] Song X Q, Wei Y C, Zhao Z X, *et al.* Research progress on hardware pre-equalization technology for high-speed visible light communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 080003.  
宋小庆, 魏有财, 赵梓旭, 等. 高速可见光通信硬件预均衡技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 080003.
- [2] Song X Q, Wang M Y, Xing S, *et al.* Progress of orthogonal frequency division multiplexing based on visible light communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 120008.  
宋小庆, 王慕煜, 邢松, 等. 基于可见光通信的正交频分复用技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 120008.
- [3] 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.
- [4] Huang Z T, Ji Y F. Design and demonstration of room division multiplexing-based hybrid VLC network [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(6): 060603.

- [5] Gong C, Li S B, Gao Q, *et al.* Power and rate optimization for visible light communication system with lighting constraints [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(16): 4245-4256.
- [6] You C X, Zhang S, Zhang R, *et al.* Light source altitude optimization in coalface visible light communications based on the fireworks algorithm [J]. *Journal of China University of Mining & 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.
- [7] 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.
- [8] Miramirkhani F, Uysal M. Channel modeling and characterization for visible light communications [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 7905616.
- [9] Li C P, Park K H, Alouini M S. On the use of a direct radiative transfer equation solver for path loss calculation in underwater optical wireless channels [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, 4(5): 561-564.
- [10] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100-107.
- [11] Ding J P. Visible light communications indoor channel modeling & performance optimization [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.  
丁举鹏. 可见光通信室内信道建模及性能优化 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [12] Pérez S R, Jiménez R P, Hernández F J L, *et al.* Reflection model for calculation of the impulse response on IR-wireless indoor channels using ray-tracing algorithm [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2002, 32(4): 296-300.