

室内可见光通信系统光源优化设计

翟长鑫^{1,2}, 郑茹^{1,2}, 刘畅^{1,2}, 吕江泊^{1,2}, 陈佳奇^{1,2}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022; 2. 长春理工大学 光电工程国家级实验教学示范中心, 长春 130022)

摘要: 针对可见光通信系统接收光功率分布不均匀的问题, 提出基于人工鱼群算法的发光二极管(LED)光源布局优化模型。围绕矩形和椭圆形 2 种光源布局方式, 以 16 个 LED 布局为例, 以接收平面功率方差最小化为目标函数, 对 LED 的位置和半功率角值进行优化, 并在此基础上, 对 LED 功率因子进一步优化。仿真结果表明: 在照度范围和功率均匀性方面, 矩形布局要优于椭圆形布局, 经优化后得到的矩形布局接收平面功率方差为 2.1027 dBm, 经调节功率因子后方差达到 1.8759 dBm, 功率分布均匀性得到明显改善。

关键词: 光通信; 可见光通信; 人工鱼群算法; 矩形布局; 椭圆形布局; 功率分布均匀性

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)08-0011-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimum design of light source for indoor visible communication system

ZHAI Changxin^{1,2}, ZHENG Ru^{1,2}, LIU Chang^{1,2}, LYV Jiangbo^{1,2}, CHEN Jiaqi^{1,2}

(1. School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Opto-Electronic Engineering Education,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: To solve the problem of the uneven distribution of received optical power in visible light communication system, an optimization model of light source layout for light emitting diode (LED) based on artificial fish swarm algorithm is proposed. Taking the rectangular and elliptical layouts with 16 LEDs in each layout respectively as examples, the algorithm is introduced to optimize the position and semi-angles of LEDs on the principle of the smallest variance of the distribution of received optical power. Based on this, the power factor is furtherly optimized. The simulation results show the rectangular layout is better than the elliptical layout in terms of the range of illumination and the evenness of received optical power. Especially, the rectangular layout stands out with the variance of 2.1027 dBm. And its variance can reach 1.8759 dBm after optimizing power factors. Finally, the evenness of power distribution is evidently improved.

Key words: optical communication; visible light communication; artificial fish swarm algorithm; rectangular layout; elliptical layout; power distribution evenness

0 引言

21 世纪, 可见光通信(VLC)技术以其绿色性和安

收稿日期: 2019-03-04。

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(JJKH20181133 KJ)资助。

作者简介: 翟长鑫(1997-), 男, 山东聊城人, 本科, 现就读于吉林省长春理工大学光电工程学院光电信息科学与工程(工学)专业, 在校期间主要从事光通信和光电检测方面的研究, 参加了“全国大学生数学竞赛”、“全国大学生英语竞赛”, 均获得省级以上荣誉。



全性的特点逐步取代传统无线通信。VLC 以白光激光二极管(LED)作为发射光源, 经加载的高频信号调制后可同时实现照明和通信的双重功能, 为未来 5G 通信的大面积覆盖提供可能。为实现室内光功率的均匀性覆盖, 提高通信质量和用户接收功率的公平性, 需要对光源的布局进行优化。在数理统计上, 方差越小, 则表征均匀性越好。然而, 目前研究大多采用的是底面为正方形的立体空间系统模型, 对于常见的底面为长方形(如会议室、公共大厅等)的立体空间模型的研究却很少。王丽等人^[1]曾针对长方形底面的立体空间

提出椭圆形 LED 布局模型,但仅针对椭圆长短半轴用特定的离散数值进行仿真优化,后续研究则亟待加强。本文针对该问题,采用人工鱼群算法(AFSA)^[2]进行优化矩形和椭圆形光源布局,得到了接收功率均匀性大大提高的布局方案。

1 VLC 系统模型

一个 5 m×4 m×3 m 的长方体房间模型如图 1 所示。以地面中心为坐标原点,并分别以地面宽度与长度的中点与坐标原点的连线为 x 轴和 y 轴在系统内建立直角坐标系。阵列光源置于天花板上,接收终端置于距地面 0.85 m 即

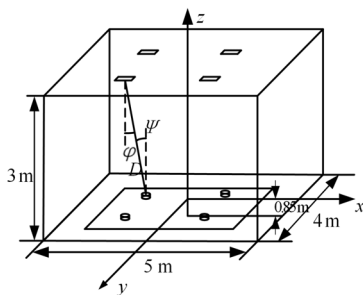


图 1 VLC 系统模型

$z=0.85$ m 的平面内。光源发射的信号通过 2 种方式到达接收平面——视距链路 (LOS) 和非视距链路 (NLOS)。由文献[3]的分析可知,由光源经 LOS 投射到接收平面的功率占总接收功率的 95.16%,故本文只考虑接收功率的主要来源——LOS 的情况。同时,采用正交频分多路复用技术(OFDM)调制方法^[4]以减小码间干扰的噪声影响。

假设单个 LED 辐射符合朗伯辐射照度模型^[5],则 LED 发光强度可表示为:

$$I(\varphi) = \frac{m+1}{2\pi} P_s \cos^m \varphi, \varphi \in [-\pi/2, \pi/2] \quad (1)$$

其中, φ 为 LED 的发射角; P_s 为 LED 辐射功率; m 为朗伯辐射模式数,是与光源辐射半功率角 $\varphi_{1/2}$ 有关的参量,其表达式为:

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \varphi_{1/2})} \quad (2)$$

单个 LED 的发光强度可表示为:

$$I(\varphi) = I(0) \cos^m \varphi \quad (3)$$

接收平面上任意点 (x, y) 处的接收照度为:

$$E_{\text{tot}} = I(0) \cos^m \varphi \cos \psi / D^2 \quad (4)$$

其中, $I(0)$ 为单个 LED 的中心发光强度, ψ 为接收端的入射角, D 为相应 LED 与接收平面接收点的欧氏距离,接收点处总接收照度即为各 LED 在该点处辐射照度的总和。根据国际标准化组织(ISO)关于室内灯光标准的相关规定,办公室的照度应在 300~1500 lx 范围内^[6]。

与 LED 光源特性相关的另一重要参数为辐射功率。为了计算接收平面的功率分布,引入直流增益 $H(0)$ 。在单个光链路中,直流增益^[7]可表示为:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D^2} \cos^m \varphi T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

其中, A 为接收终端的接收面积, $T_s(\psi)$ 为光学滤波器的增益, $g(\psi)$ 为光学集中器的增益, ψ_c 为接收终端的视角, $g(\psi)$ 与 ψ_c 之间的关系可表示为:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

其中, n 为折射率。接收功率 P_r 可表示为:

$$P_r = H(0) P_t \quad (7)$$

其中, P_t 为单个 LED 的发射功率。接收平面上的功率分布即为各 LED 在该平面上辐射光功率的总和。

2 光源布局及优化

2.1 光源布局及待优化变量和函数

在光源布局方面,针对接收平面为矩形的问题,本文提出 2 种布局方式——矩形布局和椭圆形布局,并以 16 个 LED 为例进行优化后比较 2 种布局方式接收平面功率分布均匀性的差异。由于系统模型和光源布局的对称性,对称位置的 LED 可看作一类优化目标,同一类优化目标的优化参量一致。

LED 布局如图 2 所示,当 LED 为矩形布局时,主要通过优化阵列间距离 x_1, x_2 和 y_1, y_2 及 4 类优化目标的半功率角 $\varphi_{1/2}^{(1)}, \varphi_{1/2}^{(2)}, \varphi_{1/2}^{(3)}$ 和 $\varphi_{1/2}^{(4)}$ 来达到接收平面功率分布最均匀;当为椭圆形布局方式时,引入椭圆函数的参数方程:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (8)$$

$$\begin{cases} x = a \cdot \cos(\theta) \\ y = b \cdot \sin(\theta) \end{cases} \quad (9)$$

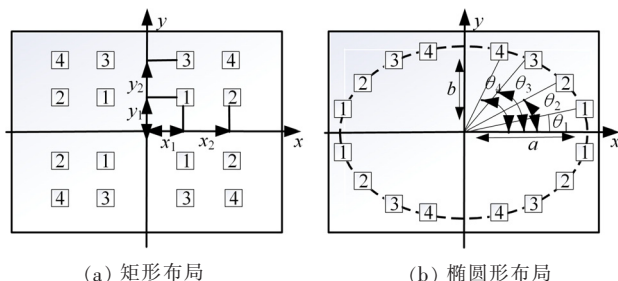


图 2 LED 布局(矩形与椭圆内 1~4 表示半功率角的上标值)

其中, a 为椭圆的长半轴长度, b 为短半轴长度, θ 为坐标原点和椭圆内某一点的连线方向与 x 轴正方向的夹角。待优化变量为 a 、 b ,4类优化目标的参变量为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 和 θ_4 及其半功率角 $\varphi_{1/2}^{(1)}$ 、 $\varphi_{1/2}^{(2)}$ 、 $\varphi_{1/2}^{(3)}$ 和 $\varphi_{1/2}^{(4)}$ 。然而,引入算法能够得到趋向于函数最值的一组解,却不能保证寻得的最优解为函数对应于最值的一组解。本文进行后续优化,引入LED的功率因子参量,在得到初始优化布局后,对该布局的4类优化目标的功率因子 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 进行优化,即通过初始参数寻优得到的一组解作为后续优化的参数对初始参数进行寻优,可弥补算法本身的不足。将待优化函数取为接收平面功率分布方差如式(10)所示:

$$F=[D(P_r)]_{\min} \quad (10)$$

根据概率论和数理统计知识可知,方差越小,则功率分布均匀性越好。

2.2 优化AFSA

AFSA是李晓磊、邵之江等人于2002年提出的一类基于动物行为的群体智能优化算法。该算法根据一片水域中人工鱼数目最多的地方营养物质最丰富的特点,模仿自然界鱼群的觅食、聚群和追尾行为,通过鱼群中各个体的局部寻优使得全局最优值在群体中凸显出来。

本文定义人工鱼个体的初始位置向量 $X_i=(x_1, x_2, \dots, x_i)$ 为待优化的变量,包括LED的位置参数和半功率角值及后续优化的功率因子。共构造了100条人工鱼个体,故 i 的取值范围是 $[1, 100]$ 。接收功率方差 $Y=F(X)$ (下标相同的 X 和 Y 代表同一个人工鱼个体的相同参量)作为相应的食物浓度(目标函数)。

2.2.1 觅食行为

人工鱼由当前位置 X_i 随机性地选择视野内的下一个目标 X_j , $visual$ 为视野范围, $step$ 为步长, $rand()$ 为随机函数。当目标点食物浓度 $Y_j < Y_i$ 时,人工鱼则从当前位置移动到目标点,反之不移动。

$$X_j = X_i + visual \times rand() \quad (11)$$

当选择次数达到最大试探次数仍不发生移动时,则按式(11)随机移动一次。

2.2.2 聚群行为

当前执行操作的人工鱼 X_i 在其视野范围内查找其它人工鱼数目 n_i ,并计算视野范围内 n_i 条人工鱼的中心位置 X_c ,其食物浓度为 Y_c 。定义拥挤度因子 $\delta \in (0, 1)$ 。当 $Y_c/n_i > \delta Y_i$ 且 $Y_i < Y_c$ 时,说明中心位置处有较多食物且不太拥挤,人工鱼向中心位置 X_c 移动一步到

X_j ;否则执行觅食行为。当 $n_i=0$ 时,执行觅食行为。计算过程如式(12)、式(13)所示。

$$X_c = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{X_i}{n_i} \quad (12)$$

$$X_j = X_i + \frac{X_c - X_i}{\|X_c - X_i\|} \cdot step \cdot rand() \quad (13)$$

2.2.3 追尾行为

当前执行操作的人工鱼 X_i 搜索其视野范围内最优人工鱼 X_b ,当 $Y_b/n_b > \delta Y_i$ 且 $Y_i < Y_b$ 时,向最优人工鱼方向移动一步到 X_j ;否则执行觅食行为。当 $n_i=0$ 时,执行觅食行为。计算过程如式(14)所示。

$$X_j = X_i + \frac{X_b - X_i}{\|X_b - X_i\|} \cdot step \cdot rand() \quad (14)$$

每次更新后的位置记录在公告板上,整个算法的流程图如图3所示。

3 仿真与分析

VLC系统的接收功率分布仿真环境为Matlab R2016a。仿真系统为:5 m×4 m×3 m的房间,LED阵列光源置于天花板,接收平面位于距地面0.85 m处。接收平面上共均匀分布有51×41个接收机。详细仿真参数如表1所示。经仿真后得到的矩形和椭圆形布局的布局图和参数分布图如图4~图6所示。

经Matlab系统人工鱼群算法仿真实验后确定

的矩形光源布局参数分别为 $x_1=0.69$, $x_2=2.47$, $y_1=0.9$, $y_2=2$, $\varphi_{1/2}^{(1)}=77^\circ$, $\varphi_{1/2}^{(2)}=50^\circ$, $\varphi_{1/2}^{(3)}=57^\circ$, $\varphi_{1/2}^{(4)}=42^\circ$,仿真实验确定的椭圆布局参数分别为 $a=2.5$, $b=2$, $\theta_1=26^\circ$, $\theta_2=40^\circ$, $\theta_3=44^\circ$, $\theta_4=75^\circ$, $\varphi_{1/2}^{(1)}=49^\circ$, $\varphi_{1/2}^{(2)}=53^\circ$, $\varphi_{1/2}^{(3)}=54^\circ$, $\varphi_{1/2}^{(4)}=40^\circ$ 。

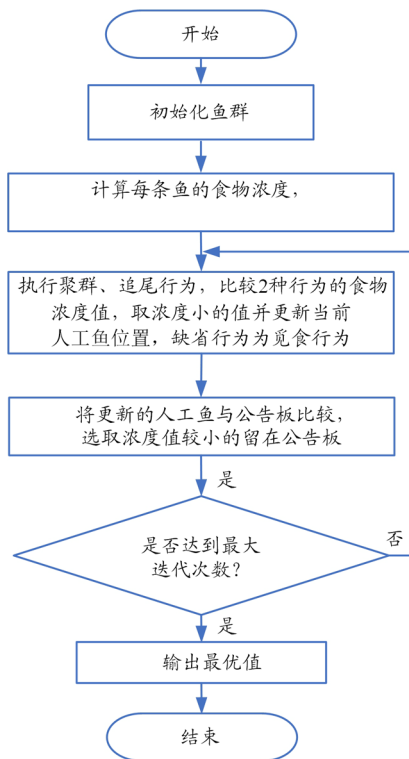


图3 人工鱼群算法流程图

表 1 系统模型参数表

参数	值
房间尺寸	5 m×4 m×3 m
接收平面高度 h	0.85 m
灯的数量	16 个
LED 中心发光强度 $I(0)$	23.81 cd
LED 功率 P_i	452 mW
半解功率 $\varphi_{1/2}$	$20^{\circ}\sim 80^{\circ}$
每盏灯内 LED 数量	7×7
LED 间隔	0.01 m
接收机物理面积 A	1 cm ²
接收机视野角 Ψ_r	60°
光学滤波器增益 $T_s(\psi)$	1
集中器反射系数	1.5
光电响应度	0.54

表 2 各种布局的参数

布局	最小接收功率 (dBm)	最大接收功率 (dBm)	接收功率均值 (dBm)	接收功率方差 (dBm)	照度范围 (lx)
矩形	-1.20	-0.57	-0.75	2.1027	706~1092
椭圆形	-1.82	0.19	-0.32	14.1583	708~1137

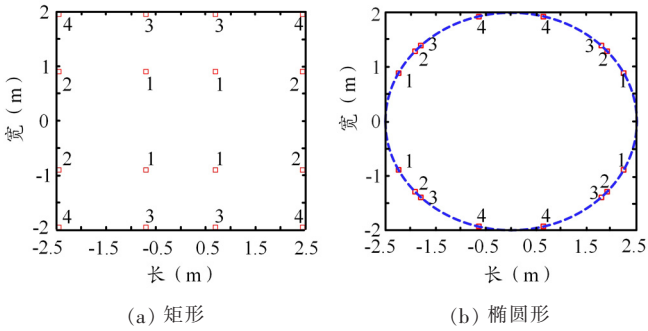


图 4 LED 布局图

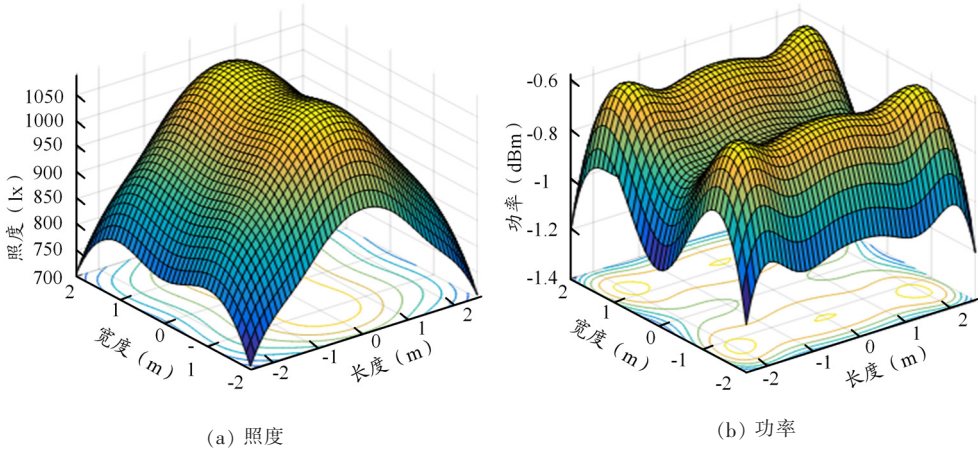


图 5 矩形布局参数分布图

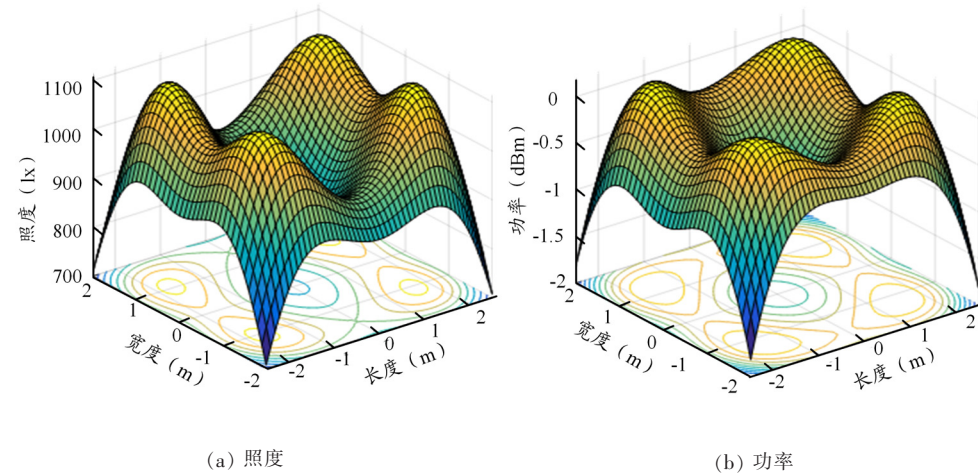


图 6 椭圆形布局参数分布图

68°。从图 5、图 6 可看出,矩形布局功率分布错落有致,较均匀;而椭圆形布局功率分布角落处与中心相比偏差较大。具体量化数值如表 2 所示。

从表 2 可以看出,经优化后 2 种布局下的接收光照度都满足 ISO 的规定范围(300~1500 lx),矩形布局的接收功率方差和照度范围都小于椭圆形布局,即光源矩形布局均匀性要优于椭圆形布局。本文选取矩形布局对 LED 继续进行优化功率因子处理。4 类不同优化目标的功率因子的变化范围为 $K_i \in (0.2,1), i \in [1,4]$,对应 LED 发射功率则为 $K_i \times P_i$,经优化后的接收功率分布如图 7 所示。

由图 7 可知,经优化后的功率分布功率降低,与未优化前相比,分布图波峰的中间位置比两侧边缘位置落差更显著,且更平坦,即数据更趋向集中化。当经优化后

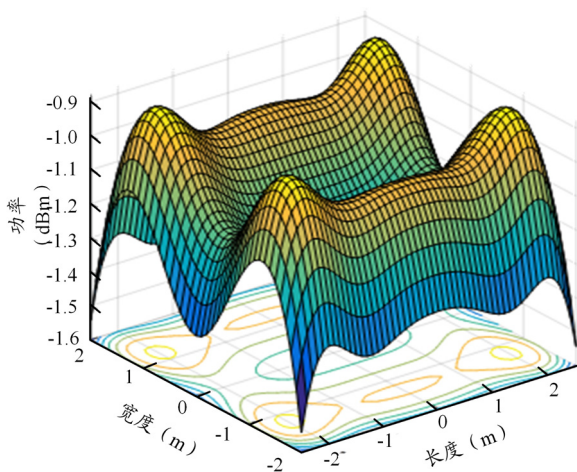


图7 矩形布局优化功率因子后功率分布图

表3 经优化功率因子后的矩形布局参数

最小 接收功率 (dBm)	最大 接收功率 (dBm)	接收 功率均值 (dBm)	接收 功率方差 (dBm)
-1.54	-0.88	-1.10	1.8759

的参数为 $K_1=0.80, K_2=1, K_3=1, K_4=0.89$ 时,量化数值如表3所示,功率均值虽下降,但方差由 2.1027 降为 1.8759,功率分布更均匀。为使系统达到可调功率的需求,通常调节 LED 驱动电路的交流信号,使 LED 光功率随着交流信号变化而变化^[8]。

4 结束语

本文针对 VLC 系统中接收平面光功率分配不均匀的问题,提出一种基于 ASFA 的优化模型。对于会议室、公共大厅等底面为长方形的环境,提出 16 LEDs 矩形和椭圆形 2 种光源布局方案。设定目标函数为求取接收功率方差最小值,优化目标为 LED 的阵列间距

和半功率角的一系列连续值,采用 ASFA 构造人工鱼个体,经觅食、聚群和追尾等行为求取最佳食物浓度下的最优解。为弥补算法本身的不足,采用二次优化,对 LED 功率因子进行寻优,进一步提高接收功率的均匀性,以使用户能得到公平分配的通信信号强度。仿真结果表明:矩形阵列的功率均匀性要优于椭圆形阵列,方差达到 2.1027 dBm,继续对该布局的功率因子进行调节,功率方差降为 1.8759 dBm,均匀性改善,从而验证了该方法在系统底面为长方形时提高系统均匀性的有效性,为 VLC 系统优化 LED 布局以使用户获得更好的通信体验提供了借鉴方案。

参考文献:

- [1] 王丽,郭茂田,田辉.一种可见光通信光源布局模型及性能分析[J].激光杂志,2016,37(3):92-94.
- [2] 李晓磊.一种新型的智能优化方法-人工鱼群算法[D].杭州:浙江大学,2003.
- [3] DING D, KE X, XU L. An optimal lights layout scheme for visible-light communication system[C]//2017 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI2007), August 16-18, 2007, Xi'an, China. Piscataway: IEEE, 2007: 189-194.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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,2002,13(4): 55-60.
- [7] RAJAGOPAL S, ROBERTS R D, LIM S K. IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support [J]. IEEE Communications Magazines, 2012, 50(3): 72-82.
- [8] 薛晓满.白光 LED 室内可见光通信系统研究[D].成都:电子科技大学,2014.

OSID 内容制作手册

凡经本刊审稿录用后即将发表的论文都将添加 OSID 开放科学(资源服务)标识码。作者需要录制 1 段或几段语音介绍(每段语音不超过 10 分钟)上传到 OSID 码中。具体操作如下:

1、注册 OSID 作者助手。作者收到“OSID” <says_support@vip.163.com>发来的那封邮件后,用手机扫描邮件中的二维码,注册“OSID 作者助手”工具账号(也可以通过电脑注册账号 <https://author.says.ren/A10000088871/register>)。

2、录制并上传语音。获得【OSID 作者助手】工具账号后,请先准备好要录制上传的语音内容,然后登录【OSID 作者助手】工具账号,这时窗口会自动弹出系统为您的文章生成的独一无二的 OSID 码;接下来您只需按提示操作录音、提交。录好第 1 段语音后请提交(右侧那个“提交”);然后录第 2 段、提交(右侧那个“提交”)……最多可录 5 段,录完最后一段语音后,先点右侧那个“提交”,再点正下方的那个“提交”。

3、添加开放科学数据与内容(可选项)。

4、学术圈动态(可选项)。

《光通信技术》编辑部