

LED 布局优化方案

瞿树鹏, 刘战胜*

(江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 针对室内可见光通信(VLC)发光二极管(LED)布局不能同时保证照明和通信质量的问题, 提出了一种 LED 布局优化方案。首先, 介绍了不同室内 VLC 系统模型; 然后, 基于 VLC 信道模型, 确定了信干噪比覆盖率(SINRC)作为优化目标, 它被定义为大于阈值的信噪比(SINR)的比率, 在保证室内照明质量的情况下最大化 SINRC; 最后, 采用差分进化算法(DEA)确定 LED 在不同环境下的最佳部署数量和位置。此外, 还考虑了用户的随机旋转, 并通过仿真研究了其对室内 SINRC 的影响。仿真结果表明, 基于 DEA 的 LED 布局优化方案具有良好的性能。

关键词: 可见光通信; 发光二极管; 差分进化算法; 信干噪比; 随机旋转

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)02-0045-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



LED layout optimization scheme

QU Shupeng, LIU Zhansheng*

(School of Computer Science and Communication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the indoor visible light communication (VLC) light-emitting diode (LED) layout cannot guarantee the quality of lighting and communication at the same time, an optimization scheme of LED layout is proposed. First, different indoor VLC system models are introduced. Then, based on the VLC channel model, the signal to interference to noise ratio coverage (SINRC) is determined as the optimization target, which is defined as the ratio of signal to interference plus noise ratio (SINR) greater than the threshold in the case of ensuring indoor lighting quality. Finally, a differential evolution algorithm (DEA) is used to determine the optimal deployment quantity and position of LED in different environments. In addition, the random rotation of the user is considered and its effect on indoor SINRC is investigated by simulation. The simulation results show that the LED layout optimization scheme based on DEA has good performance.

Key words: visible light communication, light-emitting diode, differential evolutionary algorithm, signal to interference to noise ratio, random rotation

0 引言

可见光通信(VLC)是近十年来迅速发展的一种新型无线通信方式^[1], 被认为是在室内环境提供高速数据传输的一种候选方案^[2-3], 可以有效地分担现有无线通信网络中的数据流量。与射频技术相比, VLC 具有安装成本低、功耗低、安全性高和无需许可带宽等

优点^[4-5]。

VLC 系统中, 发光二极管(LED)的布局直接影响 VLC 的性能。理想的 LED 布局至少需要满足 2 个要求: 房间内的照明质量和接收平面上的有效通信质量。其中, LED 的位置和数量是影响接收面通信质量的 2 个关键因素^[6]。KOMINE T^[7]提出了一种单 LED 的室内 VLC 系统模型, 系统中的 LED 通常位于天花板的中心, 这不仅会导致房间内不同位置的接收功率出现差异化问题, 而且在接收平面上会出现较多的盲区。因此, 目前用于室内 VLC 布局的方案都偏向于采用多 LED 系统模型。NGUYEN H Q 等人^[8]将中心 LED 更改为阵列部署, 使得阵列与房间每个角落的墙壁存在偏移量, 以实现室内无盲区覆盖, 但是并没有研究室内系统的通信性能和合适的 LED 数量。CHEN C 和

收稿日期: 2021-12-08。

基金项目: 江苏大学高级人才科研启动基金(16JDG023)资助。

作者简介: 瞿树鹏(1995—), 男, 硕士研究生, 中国通信学会会员, 现就读于江苏大学计算机科学与通信工程学院电子与通信工程专业, 研究方向为光无线通信, 主要从事室内可见光通信信道和室内 LED 布局相关的研究与仿真实证工作。

* 通信作者: 刘战胜(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为光通信、光载无线传输技术。



$$n'_u = R_\alpha R_\beta R_\gamma \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma \sin\alpha \sin\beta + \cos\alpha \sin\gamma \\ \sin\alpha \sin\gamma - \cos\alpha \cos\gamma \sin\beta \\ \cos\beta \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

在球坐标系中, 旋转后的法向量可以使用方位角 ω 和极角 θ 表示, 即 $n'_u = [\sin\theta \cos\omega, \sin\theta \sin\omega, \cos\theta]^T$ 。

当用户设备旋转时, 下行链路传输的几何模型如图 2 所示。在这种情况下, $\cos\psi$ 表示为

$$\cos\psi = -d \cdot n'_u / D \quad (7)$$

其中, d 是从接入点到用户设备的距离矢量, “ $\cdot$ ” 是内积运算符。SINR 可表示为

$$SINR_{ij} = \frac{(rP_r^i)^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^{N_i} (rP_{int}^k)^2 + N_0 W} \quad (8)$$

其中, P_r^i 表示从相关接入点接收的功率, $P_r^i = P_t^i h_{ij}$; P_t^i 表示 LED 的发射功率; P_{int}^k 表示从其它干扰接入点接收的功率, $P_{int}^k = P_t^k h_{kj}$; r 表示光电探测器的响应率; W 表示噪声带宽; N_0 表示散粒噪声的噪声功率谱密度。

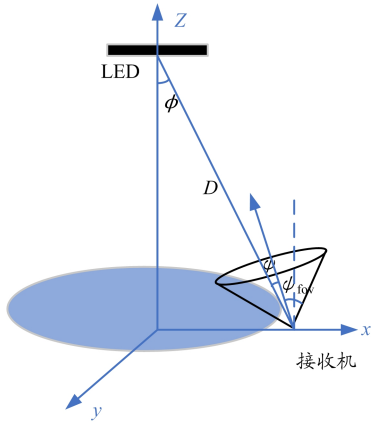


图 2 具有空间旋转的室内 VLC 系统模型

2 LED 布局优化方案

本文首先根据提出的优化目标制定了要优化的约束公式, 然后引入了优化算法, 把优化算法的过程与优化目标结合起来进行 LED 的优化布局。

2.1 优化目标

SINRC 定义为 SINR 大于或等于阈值 $SINR_{th}$ 的接收机的数目比, 并表示为 C_{SINR} 。在 VLC 中, SINRC 随 LED 的分布而变化, 为了实现最佳 LED 配置, SINRC 应尽可能大, 以使系统具有更好的通信性能。 C_{SINR} 可以表示为

$$C_{SINR} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} F[SINR_{ij}(x_i, y_i, x_j, y_j) - SINR_{th}]}{N_u} \quad (9)$$

其中, F 为比例因子。此外, 满足室内照明是 VLC 的前提。因此, 照度应符合照明标准。平均照度 $\overline{E_{hor}}$ 可以表示为

$$\overline{E_{hor}} = \frac{1}{N_u} \left[\frac{I_0 \cos^m(\varphi_{ij}) \cos(\psi_{ij})}{D_{ij}^2} \right] \quad (10)$$

为了便于描述, 假设向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_{N_i})$, $y = (y_1, y_2, \dots, y_{N_i})$ 。 (x, y) 表示 N_i 个分布的 LED 的位置向量。从数学上讲, LED 部署问题可以表示为

$$(x_i^*, y_i^*) = \arg \max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{N_i} F[SINR_{ij}(x_i, y_i, x_j, y_j) - SINR_{th}]}{N_u} \right\} \quad (11)$$

s.t. $\overline{E_{hor}} \geq E_{th}$

其中, $SINR_{ij}(x_i, y_i, x_j, y_j)$ 是第 j 个用户和 i 个 LED 之间的 SINR; $F(k) = \begin{cases} 1, k \geq 0 \\ 0, k < 0 \end{cases}$, 用来表示用户的 SINR 是否大于阈值; x_i 和 y_i 分别表示 LED 的水平和垂直坐标。

2.2 优化算法

为了获得最佳的 SINRC, 本文使用差分进化算法 (DEA) 对 LED 进行优化。

MAYER D G 和 CASTILLO O 等人分别在文献[18]和文献[19]中阐述了 DEA。由于 DEA 已在约束优化计算、神经网络优化和滤波器设计等方面得到了广泛应用, 且具有鲁棒性好、搜索能力强和收敛速度快等优点, 因此本文将 LED 布局优化问题转化为约束优化计算的问题, 故采用 DEA 进行优化。

在 DEA 中, 一个基因代表 LED 的一对水平和垂直坐标, 一个个体由多个 LED 坐标组成。可行的个体代表待解决问题的候选解决方案。这是一个二维优化问题, 其中 N_i 个分布的 LED 的 x, y 坐标形成个体的位置向量, 群体中的个体数量为 J 。为了便于描述, 第 $j(j=1, 2, \dots, J)$ 个个体的位置向量可以表示为

$$X_j(t) = [x_{j,1}(t), \dots, x_{j,N_i}(t), y_{j,1}(t), \dots, y_{j,N_i}(t)]^T \quad (12)$$

为了获得在整个搜索空间中尽可能均匀分布的初始总体, 需要根据其取值范围以随机方式为每个个体的每个维度生成初始种群。本文设计在运行一定的最大迭代次数 $iter_{max}$ 之后算法终止。此外, 如果最佳适应度值 I_{best} 在迭代过程中保持不变, 则认为找到了最优解, 算法终止。在每一代中, DEA 对种群中的每一个体

通过变异、交叉和选择 3 种进化算子得到相应的子个体, 然后通过一对一的选择让好的个体进入下一代种群。该算法的步骤如下:

①变异算子是 3 种进化算子中最重要的一种。对于当前个体向量 $\mathbf{X}_i$, 变异算子首先从双亲中随机选择 3 个不同的个体向量 $\mathbf{X}_{i1}$ 、 $\mathbf{X}_{i2}$ 、 $\mathbf{X}_{i3}$; 然后, 对 $\mathbf{X}_{i2}$ 和 $\mathbf{X}_{i3}$ 进行差分运算, 得到差分向量; 最后, 用比例因子 F 对差分向量进行缩放, 并与基向量 $\mathbf{X}_{i1}$ 进行求和运算, 得到一个新向量, 称为变异个体向量 $\mathbf{V}_i$ 。具体公式如下:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{X}_{i1} + F \times (\mathbf{X}_{i2} - \mathbf{X}_{i3}) \quad (13)$$

②交叉算子由交叉概率 CR 执行。首先, 交叉算子随机生成维度标识 d_{rand} , 保证最终生成的测试个体至少有一个维度来自变异个体, 避免与当前个体相同, 从而保证种群多样性; 然后, 对于当前个体的每个维度生成 0~1 之间的随机实数, 如果随机实数小于 CR , 则测试个体的维度来自变异个体; 否则, 测试个体维度来自当前个体。具体公式如下:

$$U_{i,d} = \begin{cases} V_{i,d}, & \text{rand}(0,1) < CR \text{ or } d = d_{\text{rand}} \\ X_{i,d}, & \text{rand}(0,1) \geq CR \text{ or } d \neq d_{\text{rand}} \end{cases} \quad (14)$$

③在 DEA 中, 选择算子具有引导种群进化的能力, 这主要通过适应度值评估来实现。对于每个当前个体向量 $\mathbf{X}_{i,t}$, 通过先前的变异和交叉操作获得相应的测试个体向量 $\mathbf{U}_i$ 。然后, 选择算子使用一对一选择来比较 $\mathbf{X}_{i,t}$ 和 $\mathbf{U}_i$, 并选择具有更好适应度值的一个作为下一代种群的个体。具体方程式如下:

$$\mathbf{X}_{i,t+1} = \begin{cases} \mathbf{U}_i, & \text{if } f(\mathbf{U}_i) \geq f(\mathbf{X}_{i,t}) \\ \mathbf{X}_{i,t}, & \text{if } f(\mathbf{U}_i) < f(\mathbf{X}_{i,t}) \end{cases} \quad (15)$$

3 性能评估

本文实验模拟环境是一个 5 m×5 m×3 m 的房间。LED 灯泡以不同的方式安装在天花板上, 光电探测器放置在距地面 0.8 m 的高度处接收 VLC 信号, 仿真中只考虑了定向视距信号。为了验证所提算法的优越性, 本文将 DEA 与 WOA 进行对比。另外, 在用户分布均匀的情况下, 研究了用户设备的随机旋转对 SINRC 的影响。仿真中, VLC 系统使用的参数如表 1 所示。室内用户服从均匀分布和高斯分布的情况, 如图 3 所示。

在用户服从均匀分布的情况下, 采用 DEA 和 WOA 优化获得的 SINRC 与室内 LED 数量之间的关系如图 4 所示。为了反映优化过程的完整性, LED 数量从 1 开始记录。当 LED 数量大于 3 时, 室内平均照度大于阈值, SINRC 随着 LED 数量的增加先增大后减

表 1 系统参数

系统参数	符号	值
房间长度/m	L_{room}	5
房间宽度/m	W_{room}	5
房间高度/m	h	3
接收端高度/m	c_h	0.8
LED 的发射功率/W	P_t	20
光电探测器的响应率/(A/W ⁻¹)	r	0.53
接收机的物理面积/cm ²	A	1
光滤波器的增益	T_s	1
透镜折射率	n	1.5
噪声带宽/MHz	W	20
噪声功率谱密度/(W/Hz ⁻¹)	N_0	1e ⁻¹⁹
接收机视场角/(°)	ψ_{fov}	60

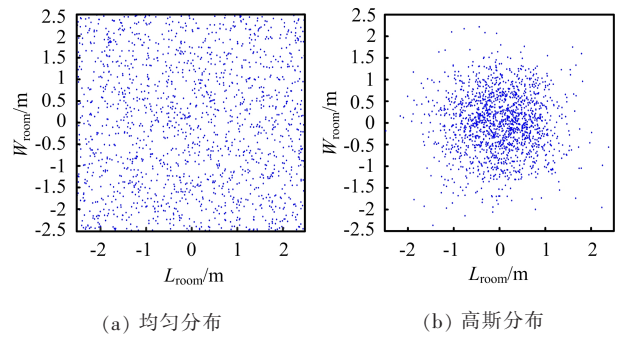


图 3 室内用户的 2 种分布状态

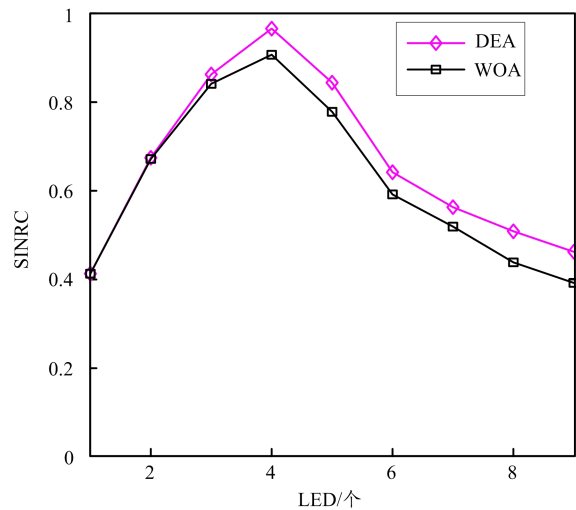


图 4 在均匀分布下, 分别通过 DEA 和 WOA 优化室内 LED 数量和 SINRC 之间的关系

小; 当 LED 数量小于 3 时, 2 种算法的优化结果基本相同; 当 LED 数量大于 2 时, DEA 的优化结果都优于 WOA。

当 LED 数量为 4 且用户服从均匀分布时, SINRC 与 2 种算法优化的最大迭代次数之间的关系如图 5 所示。可以看出, 随着迭代次数的增加, 2 种算法的 SINRC 变化平缓且收敛。为了获得更好的 SINRC 而牺牲收敛速度是不可避免的。

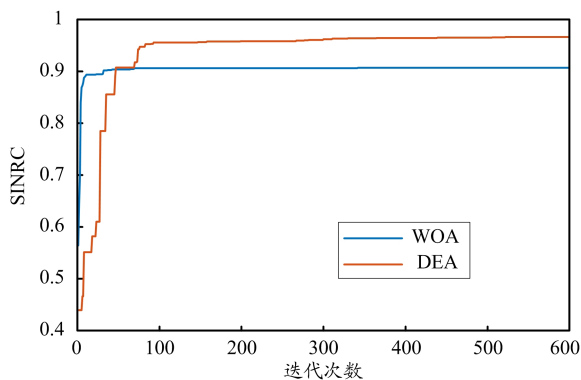
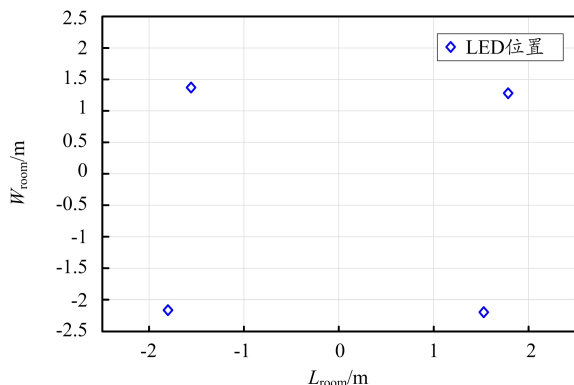


图 5 均匀分布下 DEA 和 WOA 优化 SINRC 与最大迭代次数的关系

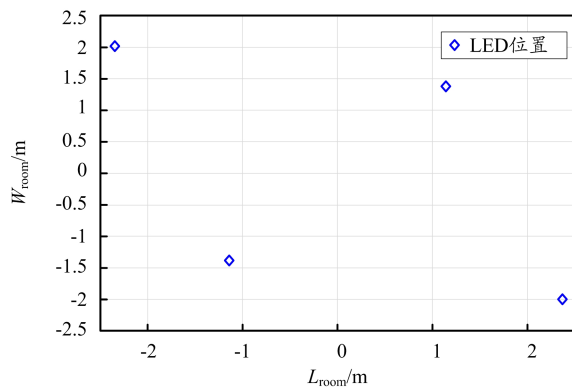
在用户服从均匀分布且 LED 数量为 4 时, 通过 2 种算法实现的优化布局结果如图 6 所示。如果 LED 按照传统的长方形布局, LED 和 LED 之间的干扰部分会比较大, 且离得越近干扰越严重。因此, 为了减轻这种干扰, 优化后的布局势必会向两边偏移。

当用户服从高斯分布时, SINRC 与 2 种算法优化的 LED 数量之间的关系如图 7 所示, 当 LED 的数量达到 3 时, 室内 SINRC 达到最大值。由于此时室内平均照度小于阈值, 所以室内最小 LED 数量应为 4。随着 LED 数量的不断增加, 室内 SINRC 显著降低。该图仍然显示 DEA 的优化结果优于 WOA。

在用户分布均匀的情况下, 当 LED 数量为 1~4、



(a) WOA



(b) DEA

图 6 在均匀分布下, 分别通过 DEA 和 WOA 优化的室内 LED 位置

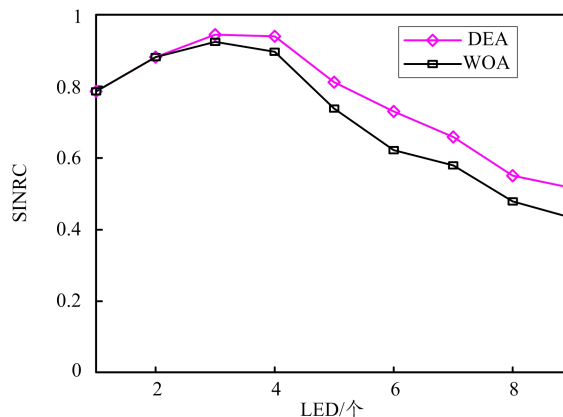


图 7 在高斯分布下, 分别通过 DEA 和 WOA 优化室内 LED 数量和 SINRC 之间的关系

4~9 时, 随机旋转角在 5° ~ 50° 之间时对室内 SINRC 的影响分别如图 8 和图 9 所示。图 8 中, 当 LED 数量小于 5 且随机旋转角度在 0° ~ 25° 之间时, 室内 SINRC 与无旋转的 SINRC 之间没有差异; 当随机旋转角度大于 25° 时, 室内 SINRC 开始明显下降, 且下降幅度随随机

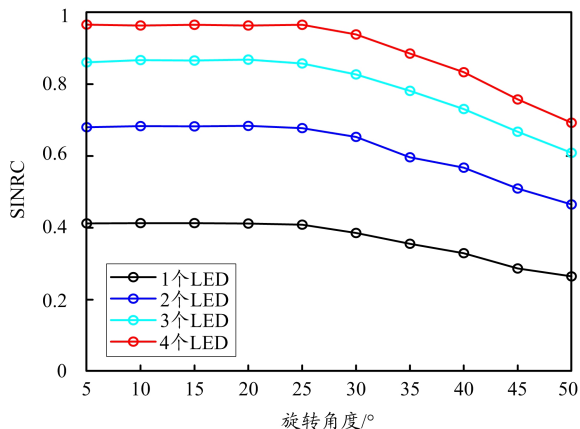


图 8 当 LED 数量为 1~4 时, 50° 内的随机旋转角度对 SINRC 的影响

瞿树鹏, 刘战胜: LED 布局优化方案

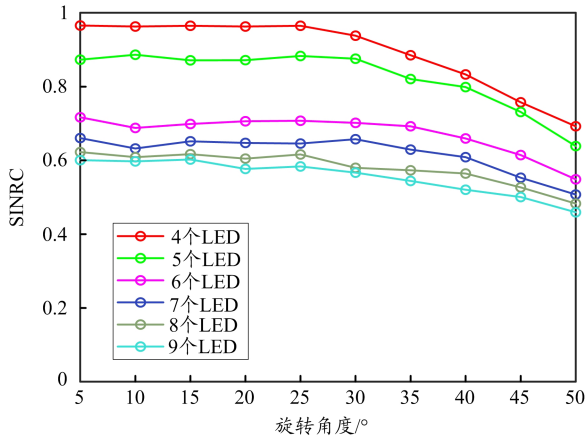


图9 当LED数量为4~9时,
50°内的随机旋转角度对SINRC的影响

旋转角度的增大而增大。这是因为当室内的LED数量超过一定数量时,可以确保室内用户处于信号覆盖范围内,但也会导致一些用户受到其它LED的信号干扰。一定的随机旋转会减弱甚至消除干扰区域内用户的干扰,从而提高通信质量。同样地,图9中,当随机旋转角度增大到一定程度时,室内SINRC开始显著减小,且减小幅度也随着随机旋转角度的增大而增大。

4 结束语

LED布局优化是VLC系统中最重要的问题之一。本文分析了VLC系统的SINRC,在保证室内照明和通信性能的情况下,提出了一种基于最大化室内SINRC的LED布局方案,确定了特定场景中LED的最佳数量,并在用户服从均匀分布和高斯分布时获得了让人满意的效果;此外,还研究了在用户服从均匀分布的场景中,用户的随机旋转对室内SINRC的影响。仿真结果表明,基于DEA的LED布局方案优于WOA方案。因此,所提出的优化方案将是VLC系统中LED部署的一个可行的候选方案。

参考文献:

- [1] AL-FUQAHA A, GUIZANA M, MOHAMMADI M, et al. Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications [J]. IEEE Commun. Surveys Tuts. 4th Quart., 2015, 17(4): 2347–2376.
- [2] KARUNATILAKA D, ZAFAR F, KALAVALLY V, et al. LED based indoor visible light communications: state of the art[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(3): 1649–1678.
- [3] HAAS H, YIN L, WANG Y, et al. What is lifi [J]. Journal of lightwave technology, 2016, 34(6): 1533–1544.
- [4] ALMADANI Y, PLETS D, BASTIAENS S, et al. Visible light communications for industrial applications—challenges and potentials[J]. Electronics, 2020, 9(12): 2157–2169.

- [5] AYYASH M, ELGALA H, KHREISHAH A, et al. Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(2): 64–71.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] NGUYEN H Q, CHOI J H, KANG M, et al. A MATLAB-based simulation program for indoor visible light communication system[C]//7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2010), July 21–23, 2010, Newcastle, United Kingdom. Newcastle: IEEE, 2010: 537–541.
- [9] CHEN C, ZHONG W D, WU D. On the coverage of multiple-input multiple-output visible light communications [Invited][J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(9): D31–D41.
- [10] GARG P, GUPTA A. Comparative analysis of hexagonal VLC nodes deployment schemes[C]//4th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPC), September 21–23, 2017, Solan, India. Solan: IEEE, 2017: 368–372.
- [11] DING J, HUANG Z, JI Y. Evolutionary algorithm based power coverage optimization for visible light communications[J]. IEEE communications letters, 2012, 16(4): 439–441.
- [12] GUAN R, WANG J Y, WEN Y P, et al. PSO-based LED deployment optimization for visible light communications[C]//2013 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, October 24–26, 2013, Hangzhou, China. IEEE, 2013: 1–6.
- [13] KUMAWAT I R, NANDA S J, MADDILA R K. Positioning LED panel for uniform illuminance in indoor VLC system using whale optimization[M]//Singapore: Optical and Wireless Technologies, 2018.
- [14] GANZELMEIER H. European standard EN 13790-the basis for sprayer inspections in europe[J]. SPISE Braunschweig Germany, 2004, 397: 24–42.
- [15] ANOUS N, ABDALLAH M, UYSAL M, et al. Performance evaluation of LOS and NLOS vertical inhomogeneous links in underwater visible light communications[J]. IEEE Access, 2018(6): 22408–22420.
- [16] SOLTANI M D, PURWITA A A, TAVAKKOLNIA I, et al. Impact of device orientation on error performance of LiFi systems [J]. IEEE Access, 2019(7): 41690–41701.
- [17] SOLTANI M D, PURWITA A A, ZENG Z, et al. Modeling the random orientation of mobile devices: measurement, analysis and LiFi use case[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 67(3): 2157–2172.
- [18] MAYER D G, KINGHORN B P, ARCHER A A. Differential evolution an easy and efficient evolutionary algorithm for model optimisation [J]. Agricultural Systems, 2005, 83(3): 315–328.
- [19] OCHOA P, CASTILLO O, SORIA J. Differential evolution algorithm using a dynamic crossover parameter with fuzzy logic applied for the CEC 2015 benchmark functions [C]//Springer. Proceedings of North American Fuzzy Information Processing Society Annual Conference. Cham: Springer, 2018: 580–591.