

基于深度学习的室内可见光通信光源配置策略

黄名川, 王旭东*, 吴楠

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为了在不同的室内环境下寻求最优的光源优化方案, 提出了一种基于深度学习的室内可见光通信光源配置策略。分别引入室内障碍物、自然光和人员移动干扰, 以室内信噪比均匀度为目标函数, 使用花授粉算法 (FPA) 对不同的房间状态下的光源功率和半功率角进行优化; 将得到的房间状态和光源配置作为训练集, 使用卷积神经网络 (CNN) 进行训练, 得到的计算模型可以在不同房间状态下对最优光源设置进行预测, 实现光源配置的动态调整。仿真结果表明: 该策略的光源参数合格率达 88%, 且预测结果在房间信号功率和光照强度上均满足要求。

关键词: 可见光通信; 光源布局策略; 花授粉算法; 卷积神经网络; 信噪比均匀度

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)02-0018-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.02.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Light source configuration strategy for indoor visible light communication based on deep learning

HUANG Mingchuan, WANG Xudong*, WU Nan

(Information Science Technology College, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: In order to seek the optimal light source optimization scheme in different indoor environments, a deep learning based indoor visible light communication light source configuration strategy is proposed. Introducing indoor obstacles, natural light, and human movement interference separately, with indoor signal-to-noise ratio uniformity as the objective function, using the flower pollination algorithm (FPA) to optimize the light source power and half power angle under different room conditions. Using the obtained room state and light source configuration as the training set, a convolutional neural network (CNN) is used for training. The resulting computational model can predict the optimal light source settings in different room states, achieving dynamic adjustment of light source configuration. The simulation results show that the qualification rate of the light source parameters of this strategy reaches 88%, and the predicted results meet the requirements in terms of room signal power and lighting intensity.

Key words: visible light communication, light source layout scheme, flower pollination algorithm, convolutional neural network, signal noise ratio uniformity

0 引言

随着时代的发展, 人们逐渐追求高速率、低时延、

收稿日期: 2023-12-13。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61371091, 61801074)资助。

作者简介: 黄名川(1999—), 男, 硕士研究生, 现就读于大连海事大学信息科学技术学院信息与通信工程专业, 主要从事可见光通信、优化算法等方面的研究工作。曾连续两年获得大连海事大学研究生学业一等奖学金, 曾获大连海事大学优秀研究生、大连海事大学数学建模比赛二等奖等奖项。

* 通信作者: 王旭东(1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光无线通信调制技术、可见光无线通信及定位技术、基于人工智能的无线通信物理层设计。



低成本的通信方式, 可见光通信(VLC)由此走入了研究人员的视野。室内 VLC 是一种利用发光二极管(LED)作为发射机, 将空气作为传输媒介, 以光电检测器(PD)为接收机的通信技术, 在可见光频段进行通信数据传输; 该技术具有绿色可持续、传输保密性能好、频谱资源充沛等优势, 逐渐发展为传统无线通信的重要补充替代技术, 具有广阔的发展前景^[1-3]。

白灯 LED 作为光通信系统的发射端, 除提供室内照明外, 还能通过高频闪烁发出光通信信号。合适的光源设置不仅能提高室内通信性能, 增强信号传输的可靠性和稳定性, 还能使室内的照明更均匀, 提供更

好的照明性能。文献[4]对室内光源矩形布局和圆形布局进行了研究,并分析了房间大小、最佳光源位置和照度均方差的关系,得到了最优的室内 LED 布局。文献[5]提出了一种用于优化光源布局的基于基因密度分段交叉和基因突变的策略,获得了更为均匀的接收功率。文献[6]以小发射角 LED 作为光源,以最优光照均匀度为目标对光源位置进行优化,提高了系统性能。文献[7]采用了改进蝙蝠算法对规则及非规则 LED 布局进行了优化,降低了接收平面上的光照度和光功率波动。文献[8]对传统遗传算法进行改进,对光源的坐标、灯珠数量和半功率角进行同步优化,提高了室内光功率均匀度。文献[9]采用了一种基于融合改进策略的快速鲸鱼优化算法,较好地解决了室内 VLC 系统中光功率分布不均匀的问题。但上述文献常使用固定的室内场景,没有考虑当室内状态变化时对通信性能造成的影响;同时,机器学习中的传统优化算法存在因迭代次数过多而导致优化时间长、易陷入局部最优和种群多样性差等问题。文献[10]采用深度学习算法对光源坐标进行优化,虽然比机器学习更加快速灵活,但仅针对光源坐标进行优化,且没有考虑到房间流动性干扰。

针对以上问题,本文提出了一种基于深度学习的室内 VLC 光源配置策略。

1 房间状态模型构建

在所提出的基于深度学习的室内 VLC 光源配置策略中,本文模拟实际应用场景,构建更加准确的房间状态数据集。首先,分别引入障碍物分布、自然光干扰和人员移动干扰,并采用花授粉算法(FPA)对随机产生的房间状态进行每个光源的功率和半功率角优化;然后,以房间状态数据和对应的光源参数数据为训练集,使用卷积神经网络(CNN)进行训练^[11],得到的计算模型可以在输入房间状态数据时,对光源的功率和半功率角进行预测,给出能使房间通信性能达到最优的光源配置和动态光源配置效果。

1.1 房间障碍物分布

在传统研究中,常默认室内场景为空旷区域,忽略了室内障碍物布局对系统通信性能的影响。由于室内存在障碍物的区域会对光信号造成遮挡,使其无法正常工作,从而产生通信盲区。本文通过调节光源的功率和半功率角,使资源尽可能分配到有通信需求的区域中,提高资源利用效率和信号分布均匀性。为了将现实的房间状态转变为便于理解和训练的数学模

型,房间状态可用“0、1”矩阵表示。“1”表示房间中无障碍物分布的区域,即需要通信的区域;“0”表示房间中存在障碍物区域,即通信盲区。矩阵越密集,对房间的状态描述越精确,但同时也会出现运算速度降低的问题。因此,本文选取 10×10 的矩阵,即一个 0/1 单元可表示 0.5 m×0.5 m 的区域。当一个小区内障碍物的占地面积超过 50%时,便可认为这个小区域为通信盲区。房间障碍物分布及对应的数据模型如图 1 所示。

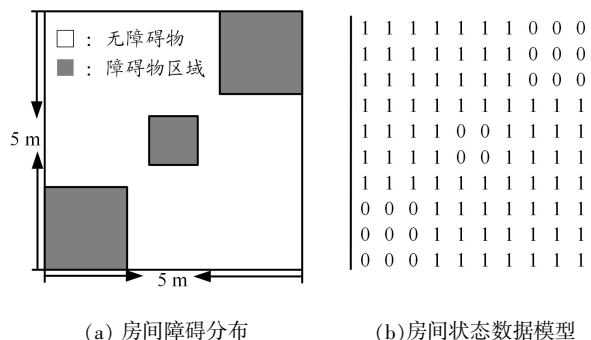


图 1 房间障碍分布及对应的数据模型

由于房间障碍物形状的不规则性,且一般障碍物高度和表面积较小,导致光反射功率较低。因此,为方便计算,本文对障碍物所在区域按通信盲区处理,忽略其带来的光反射效应。

1.2 自然光噪声干扰

考虑到自然光是由窗户引入室内的,所以房间窗户可以被视为一组只发射散粒噪声功率不产生信号功率的 LED 光源,且噪声的大小与窗户间的间距成反比,可表示为

$$P_w = \frac{\sigma_{sh}^2}{d^2} \quad (1)$$

其中, d 为发射端到接收端的距离, P_w 为自然光噪声功率, σ_{sh} 为散粒噪声方差。模拟窗户的 LED 坐标取窗户的中心位置坐标,高度为房间高度的一半,散粒噪声大小可以根据实际天气状况调节。

窗户高度统一为 1.5 m。为方便表示窗户位置,本文将图 1 中的 10×10 矩阵延伸为 12×12 矩阵,新延展的行列即矩阵第一行和第十二行,第一列和第十二列表示是否有窗,0 表示无窗区域,2 表示有窗区域。引入自然光噪声的房间状态分布及对应的数据模型如图 2 所示。

1.3 人员移动干扰

由于人员在室内移动出现的阴影会对信道增益和均方根时延产生一定的影响^[12],从而引起信道的时

黄名川,王旭东,吴楠:基于深度学习的室内可见光通信光源配置策略

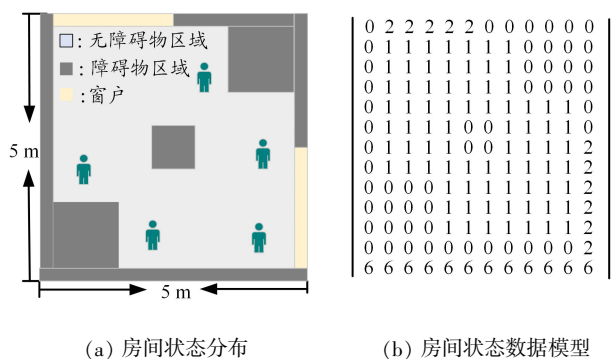


图2 引入自然光的房间状态分布及对应的数据模型

变效应。因此,将 VLC 信道建立为衰落信道,并通过实验获得表征信道衰落特性的人员流动性参数。研究表明,在具有人员流动的室内空间中,VLC 链路的接收信号包络起伏,信道衰落特性可用瑞利分布表示。基于人员流动参数对房间人员流动进行建模,归一化接收功率 x 服从瑞利分布,接收功率分布 $P(x)$ 可表示为

$$P(x) = \frac{x}{\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (2)$$

其中,比例参数 σ_i 与室内人流密度有关。

图2中,房间状态矩阵中第13行表示人流密度情况,用一行相同整数5~8分别表示空旷、适中、略挤、拥挤的4种状态,图中人流密集情况为适中(用6表示)。不同人流密度对应的比例参数如表1所示。针对人员移动造成的干扰,可将 VLC 信道建模为上述不同衰落状态的瑞利信道。

人流密度(人/m ²)	比例参数 σ_i
0	0.98
0.37	1.33
0.74	1.57
1.11	1.77

1.4 基于 FPA 的光源优化

本文采用 FPA 对不同房间状态的每个光源功率和半功率角进行优化,构建神经网络训练数据集,选取信噪比分布均匀度 Q 为目标函数。对于光源坐标,本文选取传统的四灯模型,在房间理想无障碍物状态下使用 FPA 优化所得,分别为 LED₁(1.36 m, 1.42 m, H)、LED₂(3.72 m, 1.42 m, H)、LED₃(1.36 m, 3.72 m, H)、LED₄(3.72 m, 3.72 m, H), H 为房间高度。每个 LED 使用 32×32 的光珠阵列。考虑到 LED 需要兼顾房间照明需求,为使调节后的功率和半功率角满足国家标准要求和用户感官舒适度,本文对每个种群个体分别计算其光照强度和照明均匀度(UIR)值,淘汰不满足要求的个体,按照初始条件重新生成新的个体。

FPA 模拟了自然界花授粉的2种机制,从数学特征上描述可简化为:自花授粉通过近距离扰动实现局部搜索,异花授粉通过远距离 Levy 飞行实现全局搜索,异花授粉^[15-16]的表达式为

$$X_i^{t+1} = X_i^t + L(X_i^t - g_b^t) \quad (3)$$

其中, X_i^t 表示第 t 代第 i 个解, g_b^t 为第 t 代最优解, L 为步长,步长的概率分布服从莱维分布。同时, FPA 以一定概率自花授粉,其表达式为

$$Y_i^{t+1} = X_i^t + \varepsilon(X_j^t - X_k^t) \quad (4)$$

其中, ε 表示 $[0, 1]$ 之间的随机数, X_j^t 、 X_k^t 表示第 t 代种群中第 j 和第 k 个解。

1.5 基于 CNN 的光源优化

虽然使用传统的机器学习算法能得到较好的优化结果,但需要的迭代次数较多、种群规模较大,当房间状态变化时需重新优化,时间较长,且传统优化算法易陷入局部最优,不能很好地达到灵活光源配置效果。而深度学习算法具有高效准确的分析学习能力,当完成模型的训练后,输入房间状态数据便可直接预测出每个 LED 适配的功率和半功率角,因此本文选取深度学习算法优化 VLC 动态光源配置。

文献[10]通过使用神经网络训练光源坐标取得了较好的效果,本文在此基础上更改了优化目标并增加了房间人员流动干扰,同时优化了障碍物和自然光干扰模型,神经网络选取 CNN,网络结构在文献[10]的基础上增添了一个卷积层,进一步进行特征提取网络结构如图3所示。该结构将房间状态数据模型作为 CNN 的输入,经过2个二维卷积层进行特征提取后,接入1个二维平均池化层,然后对卷积层输出进行下采样和特征聚合,之后再接入1个二维卷积层进一步提取特征,最后接入1个全连接层,输出对应房间状态的光源配置。

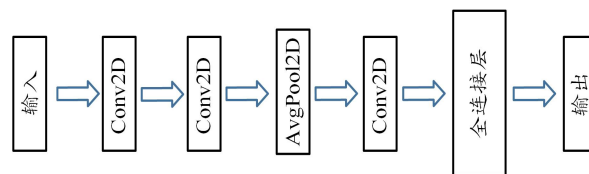


图3 神经网络结构图

训练阶段随机生成200种不同的房间障碍物分布、窗户位置和人流密度组合,采用 FPA 进行优化得到每种房间状态下的最优功率和半功率角设置,分别作为神经网络的输入和输出进行训练。训练完成后,随机生成50种房间状态作为模型的输入,利用得到

的计算模型预测相应的功率和半功率角, 并将所得结果代入房间模型中进行仿真和性能验证。

2 模拟仿真

本文对所提出光源配置策略进行模拟仿真, 验证其性能。

2.1 FPA 性能验证

模拟仿真场所设置为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的室内空间, 仿真软件使用 Matlab2019b, 信道仿真参数如表 2 所示。不同 LED 对应的参数如表 3 所示。以图 2 的房间状态为例, 使用 FPA 进行优化, 迭代次数为 200 次, 花朵种群为 50 个, 使用传统遗传算法(GA)和 FPA 优化的目标函数迭代结果如图 4 所示。可以看出, 与 GA 相比, FPA 的目标函数最优值提升了 10.27%, 具有较好的优化效果。

表 2 信道仿真参数

参数	取值	参数	取值
光学滤波器增益	1	暗电流 $I_{\text{d}}/\mu\text{A}$	5 100
单位面积		开路电压	10
固定电容 $\eta/(\text{pF}/\text{cm}^2)$	112	增益 G	
反射系数 ρ	0.8	绝对温度 T_{K}/K	298
接收视角 $\theta/(\circ)$	60	跨导系数 g_{m}/ms	30
折射指数 n	1.5	噪声系数 Γ	1.5
检测器表面积/ cm^2	1	噪声带宽 I_{f}	1.5
滤波器带宽 B/MHz	100	噪声带宽 I_{b}	0.0868

表 3 不同 LED 对应的参数

LED 序号	坐标 (长/m, 宽/m, 高/m)	单珠功率/mW	半功率角 $\phi_{1/2}/(\circ)$
LED ₁	(1.29, 1.67, 3)	43.6	61.23
LED ₂	(3.55, 1.67, 3)	38.2	66.55
LED ₃	(1.29, 3.72, 3)	45.7	59.14
LED ₄	(3.55, 3.72, 3)	49.1	63.62

2.2 CNN 性能验证

本文使用 Python3.7 对采用 FPA 优化后的数据集进行训练, 对 50 个测试集得到的光源配置进行仿真, 结果如图 5 所示。

图 5(a)中, 未优化实验组采用单珠功率为 40 mW、

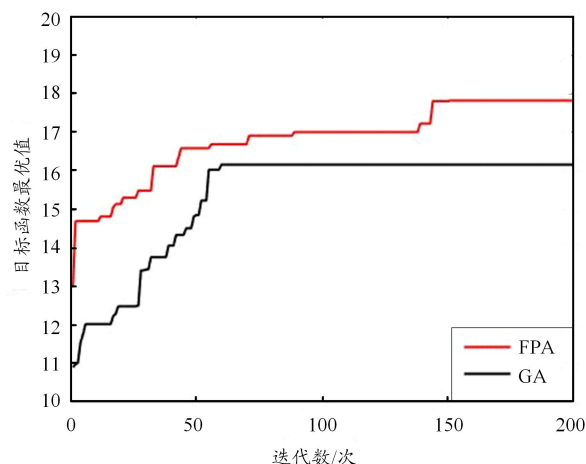
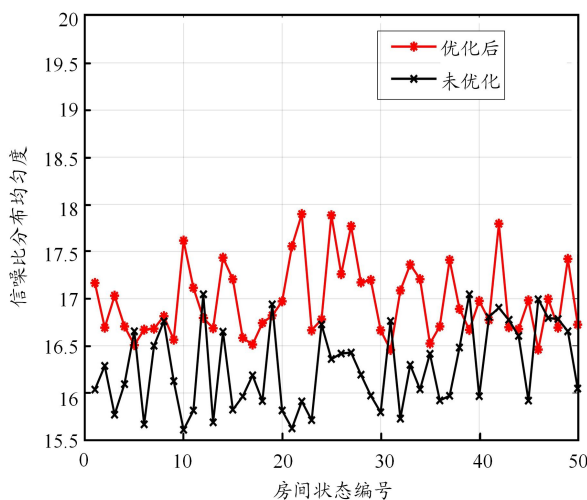
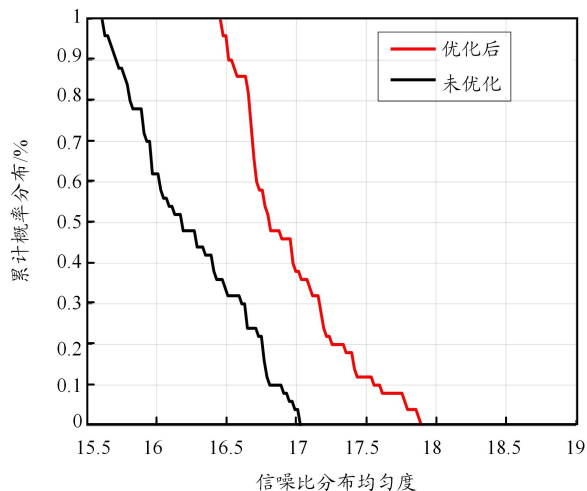


图 4 2 种算法优化迭代结果



(a) 测试房间目标函数值



(b) 测试房间目标函数分布

图 5 测试房间目标函数验证

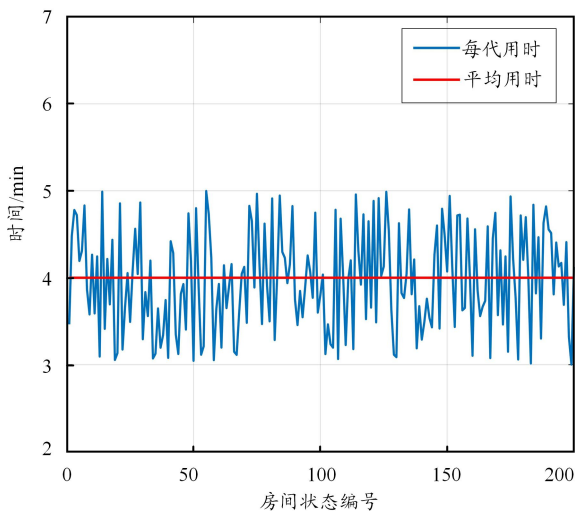
黄名川,王旭东,吴楠: 基于深度学习的室内可见光通信光源配置策略

半功率角为 60° 的常用仿真参数。在 50 组测试房间状态中,由 CNN 预测优化后得到的光源配置仿真结果有 44 组,优于常用参数(未优化)仿真结果,光源参数合格率达 88%,平均 Q 值提高了 6.5%。图 5(b)中,相比于未优化的结果,优化后的目标函数整体分布于较高信噪比分布均匀度处。

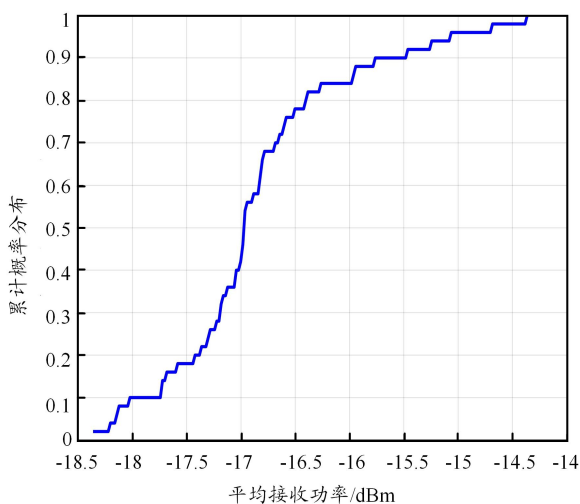
FPA 与 CNN 优化用时对比情况如图 6 所示。FPA 迭代次数设置为 200 次,种群数量为 50 个。可以看出,不同状态用时差异性主要是由房间障碍分布差异和因约束条件重新生成个体造成的。另外,FPA 优化每种房间状态平均用时为 4 min,这是因为 FPA 因加入房间光照强度和 UIR 这 2 个约束函数,需额外计算约

束函数值,且迭代次数较多,所以用时较长。而使用 CNN 优化时,当计算模型训练完成后,在预测阶段,由于模型参数已经固定,不再需要进行反向传播和参数更新,因此预测过程通常是非常快速的,几乎不消耗额外的时间,因此,CNN 在用时方面具有明显优势。

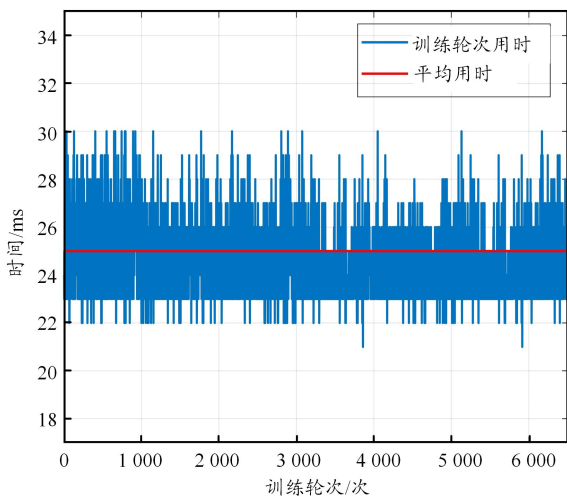
利用所得 LED 参数分别对测试集中的 50 组测试房间状态下房间平均接收功率和房间平均光照强度仿真,所得结果如图 7 所示。可以看出,平均接收功率主要分布在 $-17.5 \sim -16$ dBm,平均光照强度主要分布在 $400 \sim 430$ lx,均符合室内功率和光照强度的要求。CNN 训练和测试集的损失函数曲线如图 8 所示。可以看出,CNN 具有较好的准确率和收敛性。



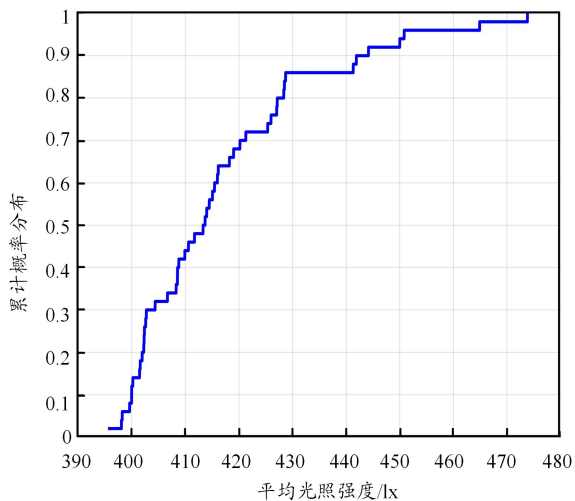
(a) FPA 优化单个房间状态用时



(a) 平均接收功率累计概率分布



(b) CNN 优化训练用时



(b) 平均光照强度累计概率分布

图 6 优化用时对比

图 7 平均接收功率和平均光照强度仿真

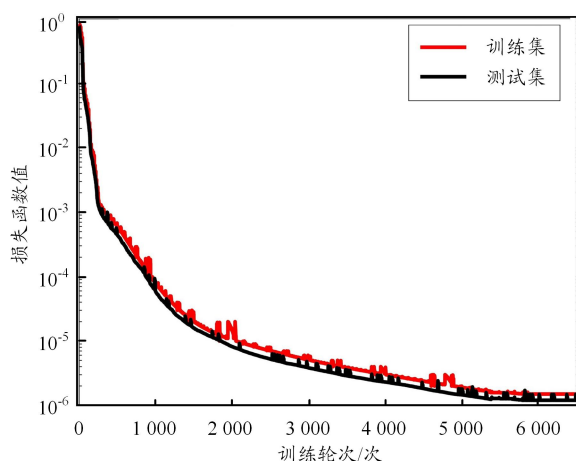


图8 CNN训练和测试集的损失函数曲线

3 结束语

本文提出了一种基于深度学习的室内 VLC 光源配置策略,该策略能在室内状态变化时,对光源设置进行预测。仿真结果表明:相比 GA, FPA 的性能提高了 10.27%,使用 FPA 优化的结果构建训练集,可达到更好的预测效果。此外,利用 CNN 预测得到光源参数合格率达 88%,相比于未优化的光源,其平均 Q 值提高了 6.5%,且在用时方面, CNN 比 FPA 有几个数量级间的优势。本文所提方案从优化目标、约束条件和优化方法等方面都充分考虑了实际应用性,具有较强的实用价值。

参考文献:

- [1] MADIHA A, HASSAAN K Q, SYED A H, et al. Optimization of MAC frame slots and power in hybrid VLC/RF networks [J]. IEEE Access, 2020, 8: 21653–21664.
- [2] NDJONGUE A R, NGATCHED T M N, DOBRE O A, et al. VLC-based networking: feasibility and challenges[J]. IEEE Networking, 2020, 34 (4): 158–165.
- [3] ZHANG T, ZHOU J, ZHANG Z, et al. Dimming control systems based on low-PAPR SCFDM for visible light communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 1–11.
- [4] 王加安, 车英, 郭林炆, 等. 室内可见光通信系统光源 LED 布局优化与性能分析[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 172–183.
- [5] 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: 76–81.
- [6] 赵太飞, 马壮, 李星善. 基于小发散角 LED 的光源优化布局[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 134–144.
- [7] HUANG L, WANG P, WANG J, et al. Optimized design of the light source for an indoor visible light communication system based on an improved bat algorithm[J]. Applied Optics, 2020, 59(34): 10638–10644.
- [8] 贺锋涛, 余婕, 张建磊, 等. 采用改进遗传算法的可见光通信光源布局优化[J]. 中国激光, 2023, 50(13): 150–158.
- [9] 陈勇, 胡陈毅, 刘焕淋, 等. 基于可见光通信的 LED 布局与功率分配的同步优化[J]. 光学学报, 2023, 43(14): 65–75.
- [10] 谭梦源. 基于深度学习算法的室内可见光通信系统光源布局的动态优化[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [11] DU X X, ZHANG Y Y, YE Z W, et al. LED lighting area recognition for visible light positioning based on convolutional neural network in the industrial internet of things[J]. Optics express, 2023, 31(8): 12778–12788.
- [12] 曲佳, 王旭东, 吴楠, 等. 基于随机森林算法的室内可见光指纹定位方法[J]. 光通信技术, 2023, 47(1): 1–7.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑照明设计标准: GB 50034-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [14] CHVOJKA P, ZVANOVEC S, HAIGH P A, et al. Channel characteristics of visible light communications within dynamic indoor environment[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(9): 1719–1725.
- [15] 李克文, 梁永琪, 李绍辉. 基于混合策略改进的花朵授粉算法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(2): 361–366.
- [16] YANG X, SHEN Y. An improved flower pollination algorithm with three strategies and its applications [J]. Neural Processing Letters, 2020, 51 (1): 675–695.