

基于最小三角形算法的室内可见光三维定位方法

方智敬, 陈媛*, 王俊杰, 林星辰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为进一步提高室内可见光三维定位的精度, 提出了一种基于最小三角形算法的室内可见光三维定位方法。该方法采用视距链路模型, 由定位终端接收携带发光二极管位置信息的光强信号, 利用最小三角形算法和接收信号强度指示方法来计算接收机在室内的三维位置信息, 再引入加权质心算法降低光路受遮挡所造成的影响。仿真结果表明: 在室内 5 m×5 m×3 m 的定位区域内, 提出的定位方法平均定位误差约为 4.35 cm, 平均高度误差约为 1.65 cm, 定位精度优于传统的室内可见光三维定位方法。

关键词: 可见光; 室内三维定位; 最小三角形算法; 质心加权算法

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2023)01-0068-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Indoor visible light three-dimensional positioning method based on minimum triangle algorithm

FANG Zhijing, CHEN Yuan*, WANG Junjie, LIN Xingchen

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to further improve the accuracy of indoor visible light three-dimensional positioning, an indoor visible light three-dimensional positioning method based on minimum triangle algorithm is proposed. In this method, the line-of-sight link model is adopted, and the positioning terminal receives the light intensity signal carrying the light-emitting diode position information. The minimum triangle algorithm and the received signal strength indication method are used to calculate the three-dimensional position information of the receiver in the room, and then the weighted centroid algorithm is introduced to reduce the impact of optical path occlusion. The simulation results show that the average positioning error of the proposed positioning method is about 4.35 cm and the average height error is about 1.65 cm in the indoor positioning area of 5 m×5 m×3 m. The positioning accuracy is better than that of the traditional indoor visible light three-dimensional positioning method.

Key words: visible light, indoor three-dimensional positioning, minimum triangle algorithm, weighted centroid algorithm

0 引言

基于位置的服务作为智能且上下文感知的物联网系统关键项目之一, 正越来越引起人们的重视。特别是在室内, 由于射频信号很容易受到阻碍, 使得全

收稿日期: 2022-12-07。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(批准号: 62205336)资助。

作者简介: 方智敬(1994—), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 2021年获得北京邮电大学光学工程专业硕士学位, 同年进入中国科学院长春光学精密机械与物理研究所工作, 目前主要研究方向为室内可见光通信均衡技术、光源布局、定位技术、调制技术等。

*通信作者: 陈媛(1981—), 女, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为室内可见光定位技术、软件测试技术。



球定位系统(GPS)定位精度在室内的偏差较大^[1-2]。为提供增强的室内位置服务, 目前已经有多种基于不同无线信道的定位技术, 如无线局域网(WLAN)^[3]、射频识别(RFID)^[4]、蓝牙^[5]、超宽频(UWB)^[6]和可见光^[7-9]。基于WLAN、RFID和蓝牙的定位系统精度较低, 必须经常创建和维护射频地图^[10]; 基于UWB的定位系统虽然定位精度较高, 但成本高昂^[6]。

与上述定位技术相比, 可见光定位技术具有成本低廉、防电磁干扰、频谱无约束和稳定性高等优势^[11-12]。但是, 目前的室内可见光三维定位系统的定位精度较低。文献[13]提出了一种接收信号强度(RSS)的室内可见光三维定位算法, 采用了3个发光二极管(LED)发送器和4个光电二极管(PD)接收器, 定位误差为6 cm

左右。文献[14]提出了一种采用 RSS 技术的热成像室内定位模式, 在信号端通过 XC7A35TCPG236 现场可编程门阵列(FPGA)和 STM32F405RGT7 单片机对位置信息进行解调和处理, 最大位置偏差约为 15 cm, 平均位置偏差约为 5.8 cm。文献[15]提出了一种双 PD 的高精度室内可见光定位方案, 利用 3 个能发送不同频率信息的 LED 和 1 个双 PD 接收器, 实现了定位精度为 11 cm 左右的三维定位。为了进一步提高室内可见光系统定位精度, 本文提出基于最小三角形算法的室内可见光三维定位方法。

1 定位模型

室内可见光定位模型如图 1 所示。本文建立了尺寸为 5 m×5 m×3 m 的室内可见光通信(VLC)系统模型。4 个 LED 阵列均匀分布在天花板上, 起到发射器和定位参考节点的作用。由于非视距链路的衰减远大于视距链路, 因此本文只考虑视距链路。

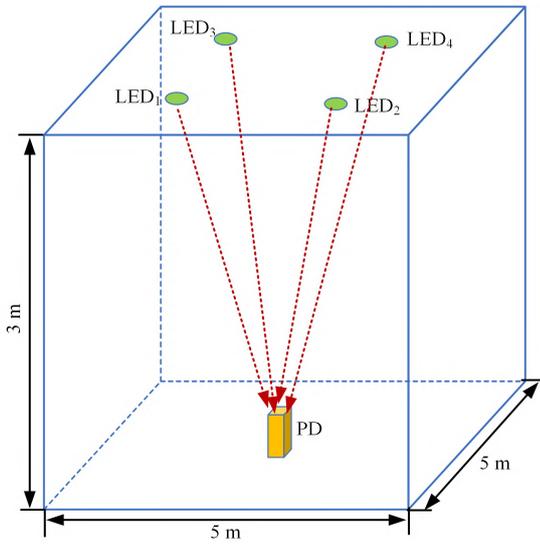


图 1 室内可见光定位模型

在视距链路情况下, PD 和 LED 之间的信道增益 H_{TR} 可以表示为

$$H_{TR} = \begin{cases} \frac{(m_s+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m \varphi \times \\ \cos \Psi_c T_s(\psi) g(\psi), 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (1)$$

其中, A 是 PD 的面积, D_d 是发送端到接收端的距离, φ 是发散角, Ψ_c 是 PD 的最大视场角, ψ 是吸收角, $T_s(\psi)$ 是光滤波器增益, $g(\psi)$ 是聚光器增益。

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

其中, $\varphi_{1/2}$ 为 LED 的发射半功率角。

接收器的功率 P_r 可以表示为

$$P_r = H_{TR} \cdot P_t \quad (3)$$

其中, P_t 是发射器的功率。

在 VLC 系统中, 噪声是不可避免的, 也是产生定位误差的原因之一。噪声一般由散粒噪声、热噪声和符号间干扰(ISI)组成。然而, ISI 可以通过调制消除。因此, 本文仅考虑散粒噪声和热噪声。

2 定位方法实现

为了进一步提高定位精度, 本文提出利用最小三角形算法和加权质心算法来实现室内可见光三维定位。最小三角算法根据 3 个信标节点的接收信号的强度指示(RSSI)信息, 采用三边测量法获得未知节点的位置, 因此可用来计算目标高度 h 。其次, 在采用 RSSI 信息求解坐标 x 和坐标 y 时, 引入加权质心算法, 用信标节点对未知节点不同的 RSSI 值来确定加权因子, 从而减少光路受遮挡所造成的影响。

2.1 最小三角形算法

式(1)中, D_d 可以表示为

$$D_d = \sqrt{\frac{(m+1)A \cos^m \varphi \cos \psi T_s(\psi) g(\psi) P_t}{2\pi P_r}} \quad (4)$$

由于 LED 平面和 PD 平面是平行的, 因此式(4)可以表示为

$$D_d = \sqrt{\frac{(m+1)AT_s(\psi)g(\psi)P_t h^{m+1}}{2\pi P_r}} \quad (5)$$

其对应的接收水平距离 d_{xy} 可估计为

$$d_{xy} = \sqrt{\frac{m+3}{2} \sqrt{\frac{(m+1)AT_s(\psi)g(\psi)P_t h^{m+1}}{2\pi P_r}} - h^2} \quad (6)$$

然而, 在室内三维定位系统中, 为了求解 h , 本文根据定位模型中 3 个相关的 LED, 采用最小三角形算法来确定某一个点的 h 值。LED 和 PD 分区俯视图如图 2 所示, PD 平面被分成 4 个对称区域, 其中, 蓝色区域中的点与 LED₁、LED₂ 和 LED₃ (这 3 个 LED 组合记作 LED_{1,2,3}) 相关; 类似地, 粉红色、黄色和绿色区域中的点分别与 LED_{1,2,4}、LED_{1,3,4} 和 LED_{2,3,4} 相关。

以蓝色区域为例, 最小三角形算法流程如下:

① 计算 $h=0$ 时 LED_{1,2,3} 的 d_{xy} 值, 并分别记录为 d_{xy1} 、 d_{xy2} 、 d_{xy3} ;

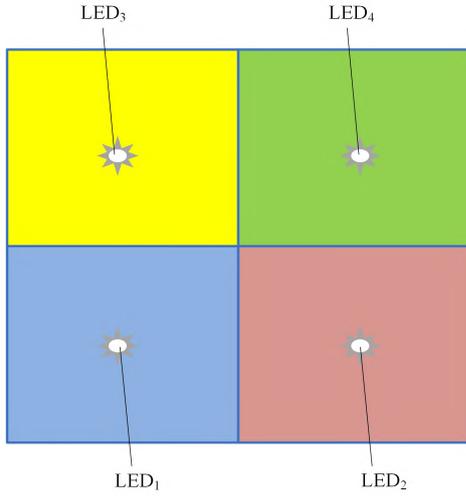


图2 LED和PD分区俯视图

②绘制以每个LED的位置为中心的圆;

③如果圆相交, 找到这6个交点;

④每2个圆选择1个交点, 可以从6个交点组合出8个($C_2^1 C_2^1 C_2^1 = 8$)三角形, 计算它们的面积并得到最小值;

⑤将最小值及其对应的高度 h 插入数组, 并将接收器的高度 h 增加 1 cm;

⑥重复步骤②~步骤⑤, 直到 $h=1.5$ m(该值可调);

⑦比较数组中蓝色区域的值, 找出与最小值相对应的高度值 h 。

根据式(6)可知, 在获得 h 值后, 可以通过使用三边测量法求出PD与3个LED之间的距离来预估目标位置坐标, 方程式可表示为

$$\begin{cases} (x_{R1} - x_1)^2 + (y_{R1} - y_1)^2 = d_{xy1}^2 \\ (x_{R1} - x_2)^2 + (y_{R1} - y_2)^2 = d_{xy2}^2 \\ (x_{R1} - x_3)^2 + (y_{R1} - y_3)^2 = d_{xy3}^2 \end{cases} \quad (7)$$

其中, (x_i, y_i) 是第 i 个LED的坐标, (x_{R1}, y_{R1}) 是LED_{1,2,3} 预估的接收器坐标。

2.2 加权质心算法

首先, 通过使用最小二乘估计法对LED组合(LED_{1,2,3}、LED_{1,2,4}、LED_{1,3,4}、LED_{2,3,4}) 预估的PD坐标进行求解。然后, 采用加权质心算法^[6]对获得的4个PD预估坐标 (x_{R1}, y_{R1}) 、 (x_{R2}, y_{R2}) 、 (x_{R3}, y_{R3}) 、 (x_{R4}, y_{R4}) 进行处理, 得到其对应的预测坐标为

$$\begin{cases} x_R = w_1 x_{R1} + w_2 x_{R2} + w_3 x_{R3} + w_4 x_{R4} \\ y_R = w_1 y_{R1} + w_2 y_{R2} + w_3 y_{R3} + w_4 y_{R4} \end{cases} \quad (8)$$

其中, w_i 表示加权值, 其表达式为

$$\begin{cases} w_1 = \frac{d_1^k + d_2^k + d_3^k}{3(d_1^k + d_2^k + d_3^k + d_4^k)} \\ w_2 = \frac{d_1^k + d_2^k + d_4^k}{3(d_1^k + d_2^k + d_3^k + d_4^k)} \\ w_3 = \frac{d_1^k + d_3^k + d_4^k}{3(d_1^k + d_2^k + d_3^k + d_4^k)} \\ w_4 = \frac{d_2^k + d_3^k + d_4^k}{3(d_1^k + d_2^k + d_3^k + d_4^k)} \end{cases} \quad (9)$$

其中, k 是衰减常数, d_i 是第 i 个LED和PD之间的距离。为了测量三维定位性能, 定位误差 P_{error} 可以定义为

$$P_{error} = \sqrt{(x_R - x_{real})^2 + (y_R - y_{real})^2 + (h - z_{real})^2} \quad (10)$$

其中, $(x_{real}, y_{real}, z_{real})$ 是接收器的实际坐标。

3 仿真结果及分析

LED和测试点的分布如图3所示, 在二维平面中, 红色星号表示LED, 绿色圆点表示测试点。为了验证算法的通用性, 本文在每个不同高度的水平面上取676个测试点。仿真具体参数如表1所示。

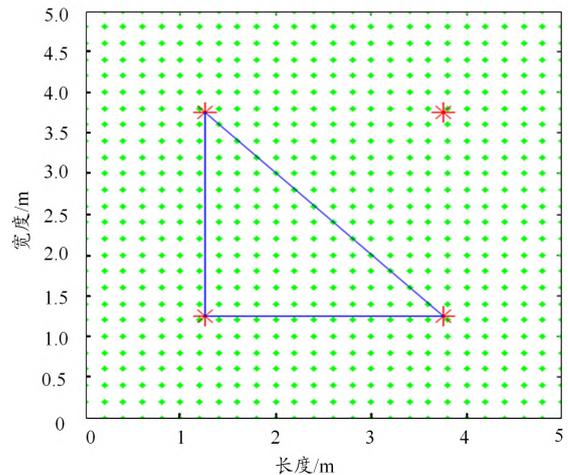


图3 LED和测试点的分布

不同高度值 h 下的定位误差分布如图4所示。可以看出, 最大误差总是存在于房间的拐角处, 这是由最小三角形算法的边缘效应导致的。根据仿真结果, 可以得到平均定位误差约为 4.35 cm, 最大定位误差约为 15.35 cm, 最小误差为 1.00 cm。

在所有高度平面上, 本文共选取测试集中的 3380

表 1 定位系统仿真参数

参数	数值
LED 空间坐标/m	LED ₁ (1.25, 1.25, 3)
	LED ₂ (1.25, 3.75, 3)
	LED ₃ (3.75, 1.25, 3)
	LED ₄ (3.75, 3.75, 3)
LED 的半功率角/(°)	60
每个 LED 的发射功率/W	15
高度范围/m	0~1.5
聚光器增益	1
滤波器增益	1
接收器的视场角/(°)	90
接收器的有效接收面积/cm ²	1

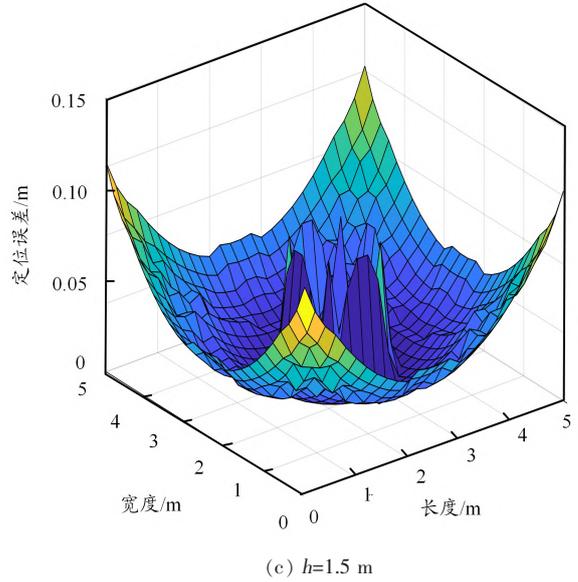
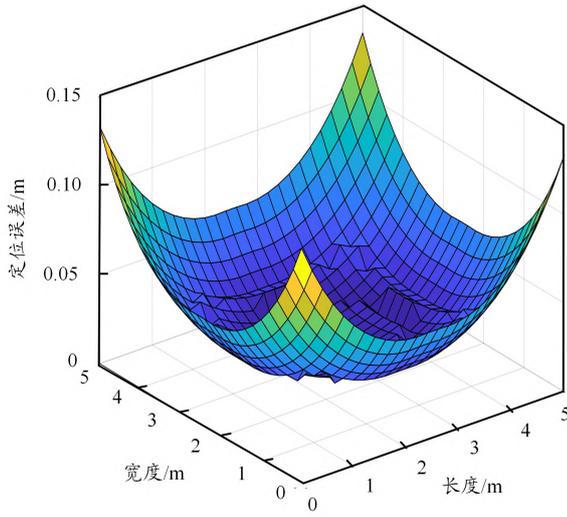
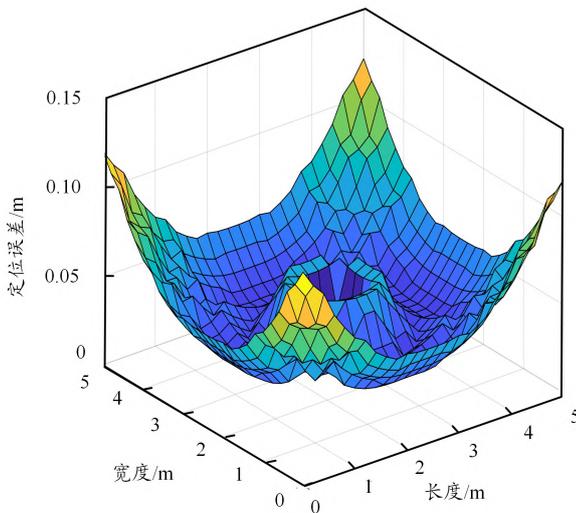


图 4 三维定位误差的分布图



(a) $h=0.5$ m



(b) $h=1.0$ m

个点进行误差统计, 绘制定位误差累计分布函数 (CDF) 值图如图 5 所示。可以看出, 90% 的测试点的定位误差小于 7.52 cm。本文随机选取了 15 个测试点, 得到测试点实际位置和预估位置分布如图 6 所示。可以看出, 测试点的预估位置坐标和实际位置坐标间的偏差很小。

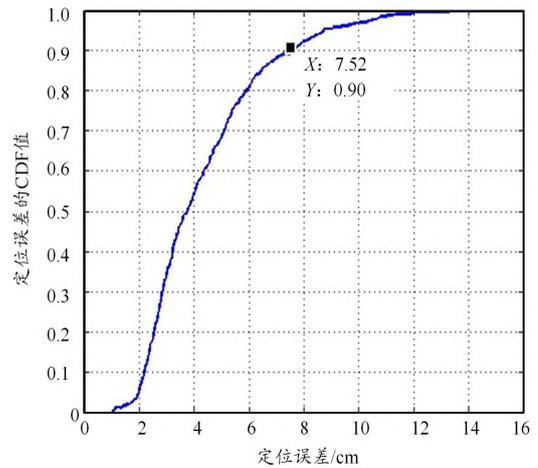


图 5 定位误差累计分布

本文对所有测试点的定位高度误差进行统计, 其高度误差统计直方图、误差累积分布情况分别如图 7、图 8 所示。根据图 7 可以计算出所有测试点的平均定位高度误差为 1.65 cm, 最大定位高度误差为 10 cm, 最小定位高度误差为 0 cm。从图 8 可以看出, 90% 的测试点定位高度误差小于 4 cm, 其中, 75% 测试点的定位高度误差为 0~2 cm。

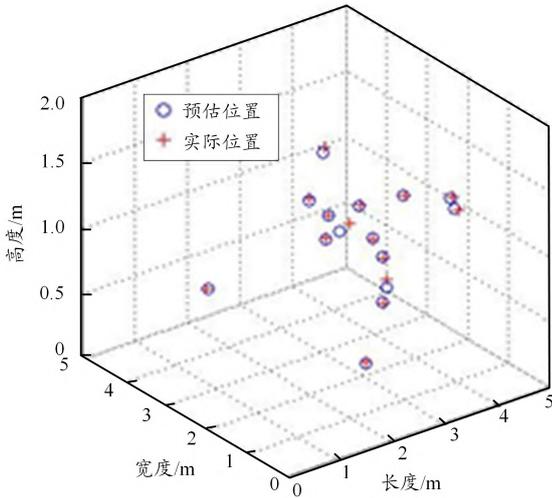


图6 测试点真实位置和预估位置分布

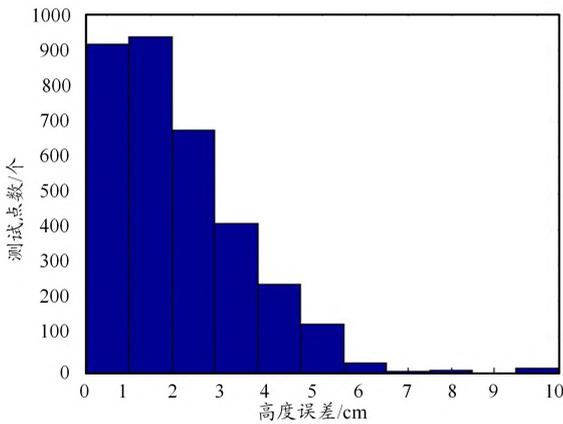


图7 高度误差统计直方图

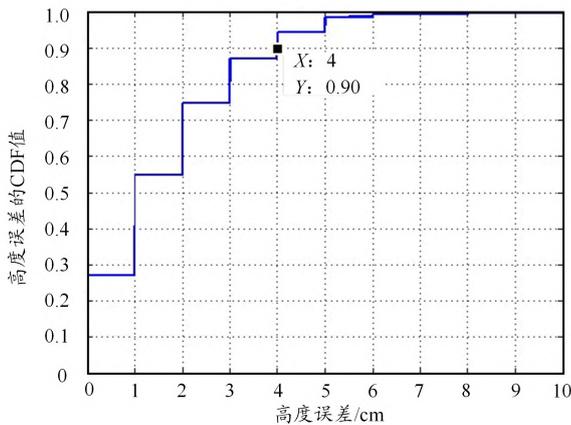


图8 高度误差累积分布

4 结束语

本文采用最小三角形算法和加权质心算法计算接收机在房间内的三维定位信号位置,在 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的室内定位模型中,本文所提方法的平均定位误差为 4.35 cm ,90%的测试点的定位误差均小于 7.52 cm ;

平均定位高度误差约为 1.65 cm (最大定位高度误差为 10 cm ,最小定位高度误差为 0 cm),90%的测试点定位高度误差小于 4 cm ,实现了厘米级的定位精度。因此,本文提出的基于最小三角形算法的室内可见光三维定位方法具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] SADOWSKI S, SPACHOS P, PLATANIOTIS K N S. Memoryless techniques and wireless technologies for indoor localization with the internet of things[J]. IEEE Internet Things, 2020, 7(11): 10996–11005.
- [2] 秦岭,刘哲,王凤英,等. 基于双BP神经网络的室内可见光定位算法[J]. 光通信技术,2021,45(2):1–5.
- [3] SHAO W, LUO H, ZHAO F, et al. Accurate indoor positioning using temporal-spatial constraints based on wi-fi fine time measurements [J]. IEEE Internet Things 2020, 7(11):11006–11019.
- [4] SHIREHJINI A A N, SHIRMOHAMMADI S. Improving accuracy and robustness in hf-rfid-based indoor positioning with kalman filtering and tukey smoothing [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2020, 69(11): 9190–9202.
- [5] DINH T M T, DUING N S, SANDRASEGARAN K. Smartphone-based indoor positioning using bleibeacon and reliable lightweight fingerprint map[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(17): 10283–10294.
- [6] ZHU X, YI J, CHENG J, et al. Adapted error map based mobile robot uwb indoor positioning [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2020, 69(9): 6336–6350.
- [7] MAHEEPALA M, KOUZANI A Z, JOORDENS M A. Light-based indoor positioning systems: a review [J]. IEEE Sens, 2020, 20 (8): 3971–3995.
- [8] CHEN P, PANG M, CHE D, et al. A survey on visible light positioning from software algorithms to hardware [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2021,17(3): 973–985.
- [9] YANG Z, WANG Z, ZHAN J, et al. Polarization-based visible light positioning [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(3): 715–727.
- [10] ZHENG Z, LIU L, HU W. Accuracy of ranging based on DMT visible light communication for indoor positioning[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(8): 679–682.
- [11] 吕慧超,黄河清,陈工,等. 基于手机环境光传感器的室内可见光定位方法[J]. 光通信技术,2022,46(4):89–93.
- [12] 赵黎,刘海涛,陈俊波. 基于采用天牛须搜索算法优化神经网络的可见光室内定位方法[J]. 光通信技术,2022,46(2):1–7.
- [13] YASIR M, HO S W, VELLAMBI B N. Indoor position tracking using multiple optical receivers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1166–1176.
- [14] 孙豫斌,黄臻,高瑞祥,等. 基于RSS的可见光室内定位系统[J]. 仪表技术与传感器,2018(11):80–84.
- [15] 王群,马玲芳. 基于双PD接收机的高精度室内可见光定位算法[J]. 光通信技术,2021,45(12):29–33.
- [16] HU Q Q, WANG X D, WU N. An indoor visible light positioning algorithm based on distance weighted adjustment[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(5): 82–87.