

# 多LED照明节点的室内可见光定位方法研究

党宇超,曹阳\*,彭晓峰,陈果

(重庆理工大学 电气与电子工程学院,重庆 400054)

**摘要:**针对室内复杂环境和室内照明节点拓扑结构对可见光定位精度的影响,基于近似完美三角点测试(APIT)算法设计了一种多LED照明节点的可见光室内定位方法。该方法利用信号传输时间作为节点间距大小的判断凭证,结合APIT定位算法,实现室内可见光定位。仿真结果表明:该定位方法的定位误差在0.24 m左右浮动,在保证定位精度的基础上,精简了定位设备成本,并提升了定位算法的计算效率,使得定位系统在实际场景中的应用更具稳定性与适用性。

**关键词:**可见光定位;多LED照明节点;信号传输时间;近似完美三角点测试定位算法

**中图分类号:**TN914 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)02-0001-05

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.02.001

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Research on indoor visible light localization method for multi-LED lighting nodes

DANG Yuchao, CAO Yang\*, PENG Xiaofeng, CHEN Guo

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** Aiming at the influence of indoor complex environment and indoor lighting node topology on visible light positioning accuracy, a visible light indoor positioning method for multi-LED lighting nodes is designed based on the approximate perfect triangle point test (APIT) algorithm. The method uses the signal transmission time as the judgment voucher of the node spacing size, and combines the APIT positioning algorithm to realize indoor visible light localization. The simulation results show that the positioning error of the positioning method fluctuates around 0.24 m. On the basis of ensuring the positioning accuracy, the layout cost of the positioning device is simplified and the computational efficiency of the positioning algorithm is improved at the same time. The above aspects of improvement make the application of the system more stable and applicable in practical scenarios.

**Key words:** visible light location; multi-LED lighting node; signal transmission time; approximate perfect triangle point test positioning algorithm

### 0 引言

由于室内环境的复杂性,常用于室外实时定位的GPS技术在室内无法正常定位,室内定位技术的出现

收稿日期:2019-07-01。

**基金项目:**重庆市教委基金(KJ120827)资助;重庆市教委科学技术项目(KJ1500934)资助;重庆市教委科学技术研究项目(KJ1709205)资助;重庆市研究生科研创新项目(CYS18311)资助;重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA40051)资助。

**作者简介:**党宇超(1996-),男,重庆人,硕士生,现就读于重庆理工大学电气与电子工程学院通信与信息专业,主要从事可见光通信及定位算法方面的研究。曾获重庆理工大学“2017年电气与电子工程学院科技创新人才”,2017年全国大学生电子设计竞赛重庆市一等奖,2019年全国研究生电子设计竞赛全国三等奖。



\*通信作者:曹阳(E-mail: caoyang@cqut.edu.cn)。

正好弥补了GPS等技术的不足,室内定位在医院、停车场和商场等大型室内场所中有良好的适用性。然而,传统室内定位技术例如无线网络、无线射频识别、红外、蓝牙信标和超宽带无线载波等技术存在成本过高、定位精度不足和易受干扰等缺点<sup>[1]</sup>。可见光通信作为无线通信的新兴技术,其不受电磁辐射干扰、频带资源丰富、传输速率高和保密性良好等特点对传统室内定位技术所使用的电磁波无线通信技术做到了极大的补充<sup>[2]</sup>。

对于室内可见光定位技术,其关键在于定位算法的选用,常见的室内可见光定位算法主要有基于到达时间差(TDOA)、接收信号强度(RSS)和飞行时间测距(TOF)的三边定位算法,以及室内指纹数据集分析算法、压缩感知算法<sup>[3]</sup>和以图像传感器作为定位设备的

党宇超,曹阳,彭晓峰,等:多LED照明节点的室内可见光定位方法研究

图像感知算法<sup>[4]</sup>。但当下大部分可见光定位系统的定位精度都因为定位设备的成本控制而受到了局限。为解决此问题,本文提出一种基于近似完美三角点测试(APIT)的多LED照明节点室内可见光定位方法。

## 1 系统模型

### 1.1 可见光传输系统模型

假设室内定位场所为5 m×5 m×3 m的立体空间,如图1所示。本文提出的定位算法参考了无线传感器网络(WSN)中的传感器节点定位算法APIT算法,并根据可见光室内通信的信号传输时间对算法作了改进来实现被定位点在室内的定位。在定位过程中,用于定位的多个锚节点和邻居节点会进行信息广播,为保证广播信息间不产生相互影响,可采用时分复用(TDM)和频分复用(FDM)等技术。在定位过程中,被定位节点必须同时接收多个来自于节点的信息,即需要多个节点对定位进行辅助。针对该特性,尝试使用室内LED照明节点布局,如图2所示,在图1的天花板正方形边界上,LED照明节点之间等间距分布,间距为1.25 m。在内部均匀放置的5个LED照明节点的坐标依次为(1.25,1.25)、(3.75,1.25)、(3.75,3.75)、(1.25,3.75)和(2.5,2.5)。在该种LED布局方式下,在室内区域的任意位置均能接收到来自多个节点的光照辐射。

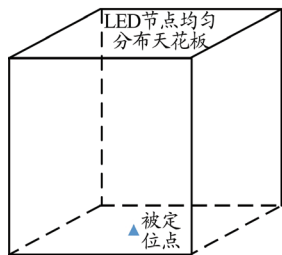


图1 可见光定位系统空间模型

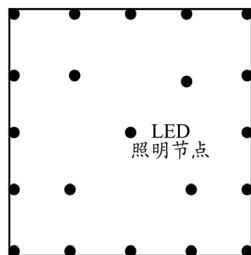


图2 天花板LED照明节点分布二维图形

### 1.2 可见光信道模型

室内无线光传输系统主要根据发射机和接收机的指向性来判别其两者之间是否存在视距路径的关系,在本系统中,可见光信道传输模型为视距传输(LOS)模型<sup>[5]</sup>。对于一个无线光通信系统,在发射和接收两端位置固定的情况下,是可以对其信道特性进行估计和建模的,考虑到人体在室内的移动速度相对于光速可以忽略不计,因此将可见光信道视为一种准静态的信道。其等效的基带传输模型为:

$$y(t) = R \cdot x(t) \otimes h(t) + n(t) \quad (1)$$

其中, $\otimes$ 符号为卷积运算, $R$ 是光检测器的响应度, $x(t)$ 是被传输信号的光功率, $h(t)$ 是信道的脉冲响应, $n(t)$ 表示信道中的主要噪声来源,一般为加性高斯白噪声和散弹噪声。在可见光通信中,因为用于通信的LED光源也是室内的照明来源,则需要对发射光功率 $x(t)$ 采取一定的限制,使其低于会对人眼造成伤害的功率范围,如式(2)所示, $x(t)$ 的平均值不能超过设定的最大功率 $P_{\max}$ ,其中 $T$ 表示信号存在时间。

$$P_{\max} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad (2)$$

在本定位系统中,所使用的辐射模型满足朗伯辐射模型,光信号从发射机到接收机产生的直流增益为:

$$H_{\text{los}}(0) = \begin{cases} \frac{(m_1+1)}{2\pi d} \cos^{(m_1)}(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq FOV \\ 0, & \psi > FOV \end{cases} \quad (3)$$

其中, $m_1$ 是辐射瓣的模式数, $\varphi$ 是发射角, $\psi$ 是接收角, $T_s(\psi)$ 为接收机的带通光滤波器的透射率, $g(\psi)$ 是非成像聚光器的增益, $d$ 是发射机和接收机的间距, $FOV$ 是接收视场角。综上所述,可得出接收光功率为:

$$P_{\text{rlos}} = H_{\text{los}}(0) \times P_t \quad (4)$$

其中, $P_t$ 为发射机的发射功率。

对于室内可见光传输信道,其等效的基带传输模型明显是满足加性高斯白噪声的加性高斯白噪声(AWGN)线性信道,因此仿真使用加性高斯白噪声作为室内可见光通信的主要噪声来源。

## 2 基于室内可见光信号传输时间的改进式APIT定位算法

### 2.1 基于信号传输时间的改进式APIT测试

APIT算法的关键环节是最佳三角内点测试法(PIT)<sup>[6]</sup>,即假设存在一个方向,沿着这个方向未知节点M会同时远离或接近三角形的3个端点,则位置节点位于三角形外,否则未知节点在三角形内。但是该方法是静态测试方法,在WSN中有一种动态的方法,并不需要未知节点M的自身进行位移,而是选择合适的邻居节点,假设未知节点M的邻居节点没有同时接近或远离三角区域的3个顶点,那么M位于三角区域的内侧。

在可见光通信中,信息是以光脉冲的形式从发射端经空气传输到接收端,即传播速率可近似为光速。因此,发射端和接收端之间的间距与信号传输时间是一个正比关系。在APIT的三角内外测试中,测试的基础定理是:如果被测点不存在同时远离或接近于三角

形3个节点的邻居节点,则被测点位于三角形的内部,否则,判定被测点在三角形的外部。在此定理中,对于距离的判定可使用信号传输时间作为代替,即可得出以下改进后的测试定理:如果被测点不存在信号传输时间同时大于或小于它的邻居节点(此处的信号传输是指三角测试中对3个顶点锚节点的广播信息做接收的传输时间),则判定被测点在三角形内部。

在最初的WSN中,被测节点对三角区域做APIT测试之后,继而使用重叠区域网格扫描法Grid Scan算法<sup>[7]</sup>,该方法是将定位区域使用分割线网格化,将通过APIT测试的三角区域重叠过一次的方格区域在该区域上的数值加一,继而通过数值叠加得出重叠最多次数的方格区域,然后计算该区域的质心,即可得出未知节点的估算位置。上述方法对于可见光室内定位LED照明节点的拓扑结构提出了需求,对此,本文提出一种无需网格区域划分的三角区域重叠方法。三角区域在通过APIT三角测试后,记录三边的直线方程;在得出通过APIT测试的全部三角区域后,计算记录过的所有三边直线方程的交点;得出的交点中,选取能围成最小多边形的点,得出的重叠区域的重心即为被定位节点的估计坐标位置。

## 2.2 基于合法区域和合法节点筛选的改进式APIT算法

本文还对APIT整体算法进行改进,在定位过程中,PIT是得出合法三角区域的基础环节,在PIT测试前添加两类筛选,分别是筛选出合法面积与合法边长的三角区域和合法的邻居节点。对三角区域筛选的主要目的是为了筛掉面积过大的三角区域以提升定位的速率,保证定位过程的时效性,根据信号传输时间来进行判定,如果三角区域的顶点锚节点发出的广播信息在接收端的接收时间大于既定的时间阈值,就将该三角区域筛除掉。对邻居节点的筛选,是设定一个信号传输时间阈值,将超过阈值的邻居节点进行筛除,从而有效避免了传统的APIT测试中出现的In-to-Out和Out-to-In误差。在进行APIT测试前需要进行两轮三角区域筛选,筛选出最终的合法三角区域数据集合。第一轮筛选是对三角区域的面积进行合法筛选,对于APIT定位来说,一个面积合适的三角区域对定位效果能有更显著的提高,此处设定一个合法三角区域的面积阈值,该数值的大小根据室内定位空间的总体二维面积的大小来确定,室内二维面积越大,该三角区域数值越大。进行了第一轮的合法面积筛选之后,形成了面积合法三角区域数据集合,再对该集合

做第二轮筛选,筛选出三角区域三边长合法的三角区域数据集合,该轮筛选的目的是为了进一步优化第一轮筛选,使用于定位的三角区域更多的为锐角三角形,而并非钝角三角形,并且,合理地控制三角区域三边长,在定位时更能为节点广播通信做一定的保障。该轮筛选的阈值确定是根据信号传输时间来确定的。

## 2.3 传输时间测定的可行性分析

综上所述,改进后的定位方法的关键点在于信号传输时间的测量。基于信号传输的距离和时间的基础关系,在实际应用中要具体实现该定位方法,需要考察以下方面:光波传输的速率与发射机和接收机处理相对速率。由于三角测试区域的3个三角顶点锚节点是同步广播自身位置信息和节点ID,即在接收广播信息的一端会存在接收信号发生冲突的情况,并且,由于光波在空气中传输速率的超高速特性,其时间间隔必定是极小的一个数值,这对于微控制单元(MCU)检测传输时间的分辨率也提出了一定的要求。针对第一个在接收广播信息会发生信号接收冲突的问题,可以设置一个安全广播时间阈值,如图3所示,将发送广播信息的锚节点进行合理的发送时间安排,即可避免在接收端产生的信号接收冲突的问题。对于如何确定检测传输时间的分辨率,首先应该明确在室内定位空间范围内,传输时间的大概数值范围。本定位系统使用的553空间模型的最大传输距离约为7.7m(即空间对角线长度)。我们将光波传输速度定为光速 $3 \times 10^8$  m/s,可得出传输时间约为25.7 ns,则测量时间的分辨率定为纳秒级别。

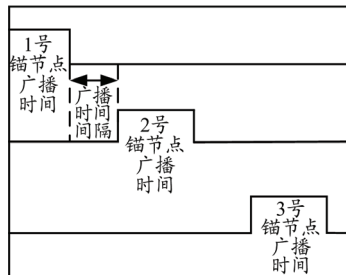


图3 广播信息时钟图

信号传输时间的定义为:从发射机开始广播信息,接收端同步开启定时器进行计时,直到接收端接收到包含信息的光脉冲,并解析出其来源的ID之后,即可关闭定时器完成传输时间的计时。因此,传输时间的前半段为光脉冲在空气中传播的时间段,后半段为接收机接收并解析光脉冲的时间段。由于后半段对于所有广播信息的检测是一样的,那么对传输时间的检测结果还是取决于对前半段的检测。这需要定时器有纳秒级别的时间检测分辨率,进而推出其定时器的时钟源大概为1 MHz的水准。市面上大部分微处理器均可达到这一标准,本定位方法的实施设备也具有可实现的条件。

### 3 仿真与性能分析

#### 3.1 系统通信能力仿真

本文在 Matlab 中使用所描述的可见光传输信道模型,依照表 1 中可见光通信的仿真参数,并引入方差为 5 的加性高斯白噪声,通过仿真得出室内任意点的信噪比(SNR)分布,如图 4 所示。在 LOS 信道下,SNR 平均值为 12.91 dB。上述室内环境及可见光传输的参数满足室内可见光通信的可靠传输要求,系统的通信能力可达到室内定位区域的全范围覆盖。

表 1 仿真参数

| 参数名       | 数值     | 参数名         | 数值          |
|-----------|--------|-------------|-------------|
| 半功率点半角    | 50°    | 接收视场角       | 70°         |
| 朗伯发射级数    | 1.5684 | 集光器增益       | 2.5481      |
| LED 总发射功率 | 0.72 W | 房屋尺寸(长×宽×高) | 5 m×5 m×3 m |
| 光滤波器增益    | 1      | 光源与接收平面的距离  | 2.15 m      |
| 透镜折射率     | 1.5    | —           | —           |

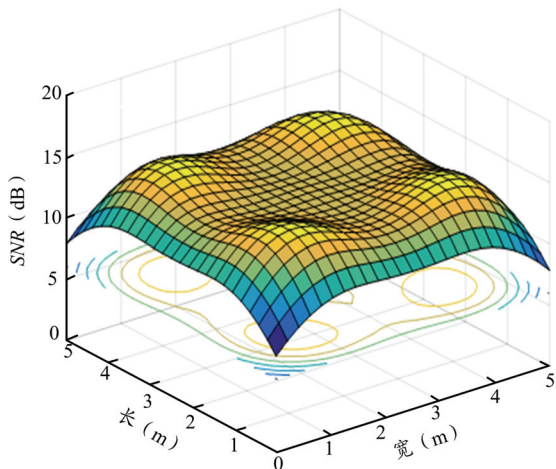


图 4 室内可见光通信 SNR 分布

#### 3.2 Matlab 定位仿真方案及仿真结果

在系统通信能力达标的条件下,本文提出如下仿真测试方案:在当前三角区域中,3 个顶点锚节点同时向周围发出自身位置信息及 ID 号,此时除三角区域的顶点锚节点以外,其余锚节点均被认作被定位点的邻居节点,依次对邻居节点做合法邻居节点筛选,筛选完成之后再做传输时间判别,如果在该次三角区域测试的邻居节点集合中,不存在同时大于或小于被测点传输时间的节点,则判断被测点在三角区域内,否则,判断该点在区域外。

在完成 APIT 三角测试之后,如果被定位点位于

三角区域内,则该三角区域保留,最后得出通过测试的三角区域集合后,计算三角区域集合内所有三角的交点,得出其所能围成的最小多边形,计算该多边形的重心坐标,即可完成对被定位节点的坐标估计。

在 Matlab 中使用改进后的 APIT 定位算法,某一次定位过程中经过改进算法的两类筛选和 PIT,对得到的三角区域的个数做统计。最初形成的三角区域个数为 3120 个,经过第一类的合法邻居节点的筛选,三角区域的数量减少到了 626 个;然后,对以上 626 个三角区域做第二类的筛选,得出合法面积和合法三边长的三角区域,此时三角区域减少到了 312 个;且三角区域均满足 APIT 测试的要求;经过完整三角区域筛选后,三角区域个数从 312 个锐减到 33 个。在该次定位中,三角区域的减少表明对邻居节点和三角区域的合法筛选是有效的。为确保在本次定位中三角区域成功被筛选出来,又进行了 10 次定位过程三角区域数量的统计,结果如图 5 所示。从图 5 中折线图走势均可看出,每一次定位都完成了对三角区域的成功筛选。

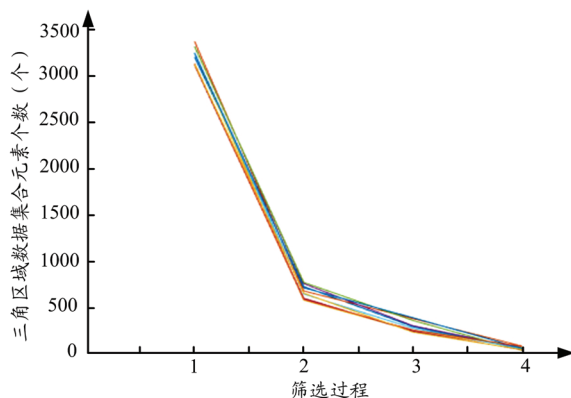


图 5 10 次定位的三角区域数量变化折线图

任意选取 10 次定位中的一次,将筛选出来的三角区域绘制成图,结果如图 6 所示。室内长×宽为 5 m×5 m,白色圆形点为 LED 照明节点,黑色×型点为被定位节点,被定位节点被筛选出来的三角区域包围在其中。对三角区域进行三边直线方程交点位置计算后,形成定位最小多边形区域,如图 7 所示。被定位点相较于多边形区域只有一小段距离的偏离。这表明三角区域在筛选和测试后,所形成的定位最小多边形区域对被定节点的估计是有效的。

本文引入可见光通信室内模型,随机生成了 30 个被定位节点的坐标,使用该定位算法对被定位节点做坐标估计,结果如图 8 所示。被定位节点的实际坐

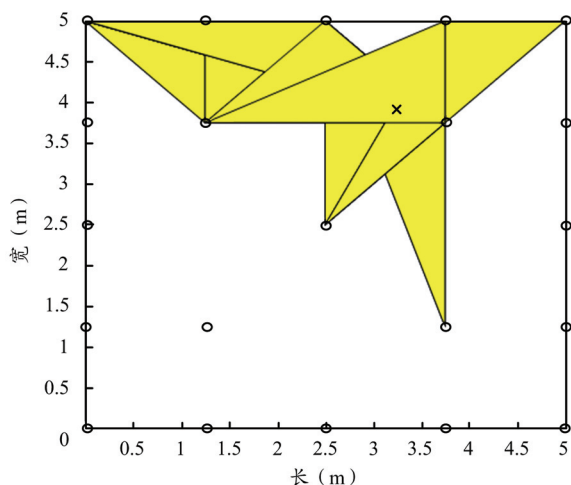


图6 最终定位三角区域结果图示

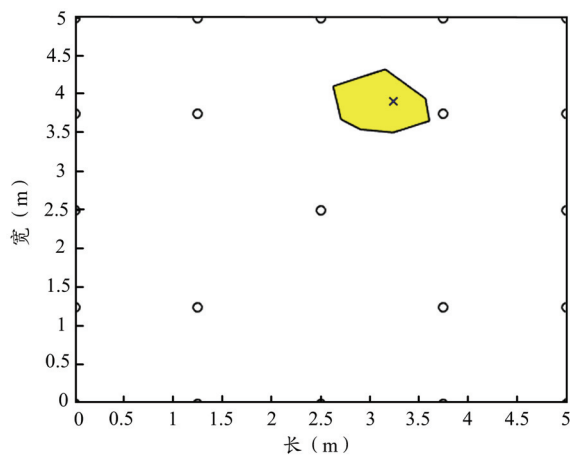


图7 定位最小多边形图示

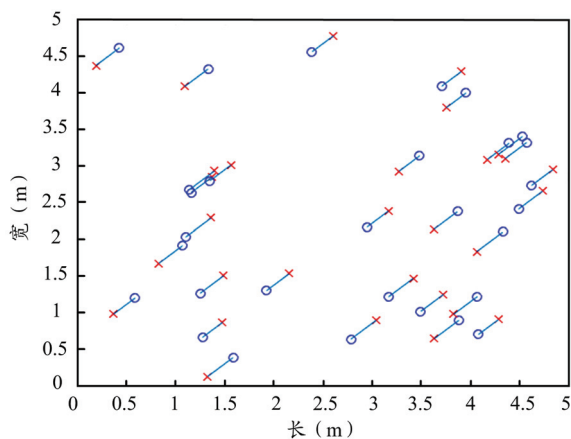


图8 30次定位的估计坐标和实际坐标

标是蓝色圆圈标记,估计坐标是红色叉型标记,每个被定位节点的估计坐标和实际坐标均使用横线连接,对30次定位的误差进行了折线图绘制,结果如图9所示。可以看出,定位误差在0.24 m上下波动,表明该算法对被定位节点的坐标估计是有效的。

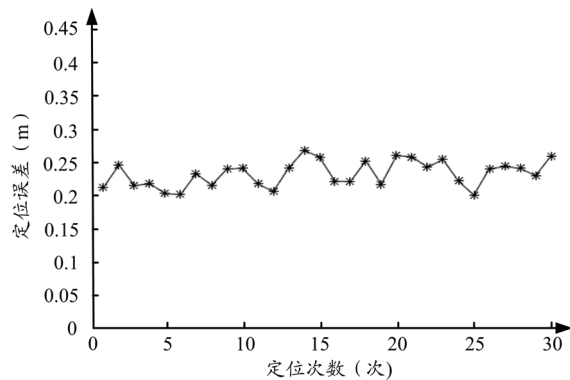


图9 30次定位的误差

## 4 结束语

以室内可见光通信为基础,参考WSN中的APIT传感器节点定位,本文提出了基于室内可见光通信的定位方法。本方法利用测定信号传输时间并做对比,完成APIT测试与测试前、后的合法筛选,得出了定位最小多边形区域,最终得出被定位节点的估计坐标。仿真实验结果表明:本方法有效减少了APIT定位算法本身的In-to-Out和Out-to-In误差,相较于WSN中APIT算法的定位精度有较大的提升。本方法对室内通信覆盖的要求为基本满足即可,更具有适用性和普遍性。在5 m×5 m×3 m的立体空间环境中,室内SNR分布均值为12 dB左右的情况下,定位误差保持在0.24 m左右。

## 参考文献:

- [1] RAHMAN M S, HAQUE M M, KIM K D. High precision indoor positioning using lighting LED and image sensor[C]//International Conference on Computer & Information Technology, Dec. 22–24, 2011, Dhaka, Bangladesh. Dhaka: IEEE, 2012.
- [2] ZHUAN Yuan, HUA Luchi, QI Longning, et al. A Survey of Positioning Systems Using Visible LED Lights[J]. in IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 1963–1988.
- [3] 聂帅,邵建华,柯炜,等. 遮挡情况下基于压缩感知的可见光室内定位[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2018, 41(2): 47–53.
- [4] HOU Y, XIAO S, BI M, et al. Single LED Beacon-Based 3-D Indoor Positioning Using Off-the-Shelf Devices[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(6): 1–11.
- [5] 卢洪斌,梁祚铨. 可见光室内定位系统的信道模型及其仿真分析[J]. 光学仪器, 2017, 39(2): 64–69.
- [6] 赵军,裴庆祺,徐展琦. 无线传感器网络近似三角形内点测试定位算法[J]. 计算机工程, 2007(5): 109–111.
- [7] 周勇,夏士雄,丁世飞,等. 基于三角形重心扫描的改进APIT无线传感器网络自定位算法[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(4): 566–574.