

基于 RSS/AOA 混合的室内可见光定位算法

董文杰, 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 针对室内可见光定位精度不高的问题, 提出了一种基于接收信号强度与到达角度(RSS/AOA)信息混合的室内三维空间定位算法。该算法同时考虑距离信息和角度信息, 利用最小二乘准则(LS), 建立混合定位优化目标函数, 导出定位节点位置信息的最小二乘估计量。对于目标函数为非凸情况, 将目标函数转换成广义信赖域子问题(GTRS)的形式进行求解, 可以获得全局最优解。数值仿真结果显示, 在室内 5 m×5 m×3 m 的二维定位场景下, 选取 20×20 个测试点, 平均定位误差为 8.7 cm。此外, 针对三维定位场景, 对动态目标进行定位和追踪, 结果表明该算法在水平方向和垂直方向均能获得较高的定位精度。

关键词 光通信; 室内定位; 接收信号强度; 到达角度; 广义信赖域子问题

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.050603

A Hybrid RSS/AOA Algorithm for Indoor Visible Light Positioning

Dong Wenjie, Wang Xudong, Wu Nan

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

Abstract Aiming at the problem of low indoor visible light positioning accuracy, a positioning algorithm based on the received signal strength and arrival angle (RSS/AOA) information in indoor three-dimensional space is proposed. Based on the least squares (LS) criterion, the distance and angle are considered at the same time, a novel hybrid objective function is constructed, and then the least square estimator of location information is derived. For the non-convex objective function, the objective function is transformed into generalized trust region sub-problem (GTRS) to solve the global optimal solution. The simulation results show that in the 5 m×5 m×3 m two-dimensional positioning space, 20×20 test points are selected, for which the average positioning error is 8.7 cm. In addition, it can realize dynamic positioning and tracking in the three-dimensional space. The results show that the algorithm can obtain high accuracy in horizontal and vertical directions.

Key words optical communications; indoor positioning; received signal strength; angle of arrival; generalized trust region sub-problem

OCIS codes 060.4510; 230.3670; 230.5160

1 引言

可见光通信(VLC)作为一种新兴技术,能够在提供照明的同时实现高速率的数据传输,因此可应用于室内可见光定位^[1-4]。和其他室内定位技术相比,可见光室内定位具有以下特有的优点。1)利用室内空间现有的照明基础设施 LED 作为发射端,成

本较小;2)可见光的波长较小,与光电检测器(PD)检测波长的大小相比可以忽略,受多径衰落的影响不大,比射频信号的定位精度高;3)LED 提供较窄的波束,使接收端获取的到达角度(AOA)信息更精确;4)可见光不受电磁干扰的影响,可用于射频信号受限的场景,例如医院和飞机等场所。

基于上述优点,可见光室内定位技术得到了较

收稿日期: 2017-10-19; 收到修改稿日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61371091)

作者简介: 董文杰(1993—),女,硕士研究生,主要从事可见光通信及可见光定位方面的研究。

E-mail: dwenjie@dmlu.edu.cn

导师简介: 王旭东(1967—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事 MIMO 无线通信、空间调制、可见光通信与定位等方面的研究。E-mail: wxd@dmlu.edu.cn

为广泛的研究^[5-7]。基于 VLC 的常用定位方法主要有:接收信号强度(RSS)、到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)以及 AOA 等^[8-9]。其中基于 RSS 三边测量法的简单应用较多,但该算法受定位环境影响较大,定位精度不高。文献[10]针对室内实际照明情况,提出了一种利用多个 LED 发射端实现定位的方法,有效地解决了室内遮挡问题。文献[11]将 RSS 算法与最大似然估计量结合,改善了 RSS 算法的定位精度。文献[12]提出了一种改进的 TDOA,并结合质心加权的混合定位方法,进一步提高了室内可见光定位技术的精度以及算法的稳健性。文献[13]针对二维室内定位场景,提出了一种 AOA 定位算法,实现了对移动目标定位和跟踪。文献[14]提出了一种基于 RSS/AOA 混合的定位算法,该算法首先通过求解 AOA 获得节点的位置信息,然后将其作为初始点对 RSS 算法进行求解,得到最终位置信息。该算法基于 AOA 定位,会产生误差累积,但由于没有联合考虑 RSS 和 AOA 测量信息,其定位精度不高,仿真结果表明该算法的定位误差小于 1 m。

本文针对文献[14]定位精度不高的问题,同时考虑距离信息和角度信息,提出了一种基于 RSS/AOA 混合的定位算法。该算法根据最小二乘准则(LS),结合距离和角度测量构建了一个混合目标函数。针对目标函数非凸的情况,将其转换成广义信赖域子问题(GTRS)^[15-16],通过二分法求解出定位目标的位置信息。该方法具有全局收敛的优点。仿真结果表明:由于联合考虑距离信息和角度信息,该算法在 5 m×5 m×3 m 的定位空间中可以获得平均定位误差为 8.7 cm 的定位性能,有效地提高了室内定位精度。

2 VLC 定位原理

2.1 定位模型

考虑室内定位场所为 5 m×5 m×3 m 的区域,如图 1 所示,其三维空间模型如图 2 所示。室内照明用的 LED 作为发射端固定在房间天花板上,假设发射端 LED 编号为 T_i ($T_i \in \mathbf{R}^q$, $q = 3$, $i = 1, \dots, N$),其中 $T_i = (x_i, y_i, z_i)$, q 为空间维数, N 为 LED 的个数,各 LED 坐标为 $T_1 = (1.25 \text{ m}, 1.25 \text{ m}, 3 \text{ m})$, $T_2 = (1.25 \text{ m}, 3.75 \text{ m}, 3 \text{ m})$, $T_3 = (3.75 \text{ m}, 1.25 \text{ m}, 3 \text{ m})$, $T_4 = (3.75 \text{ m}, 3.75 \text{ m}, 3 \text{ m})$;接收装置可位于房间内的任意位置,坐标为 x_i ($x_i \in \mathbf{R}^3$)。定位时,发射端采用基于白光 LED 的 VLC 传输定

位信息,接收端通过光电转换以及强度检测技术获取参考信息,利用定位算法实现位置估计。

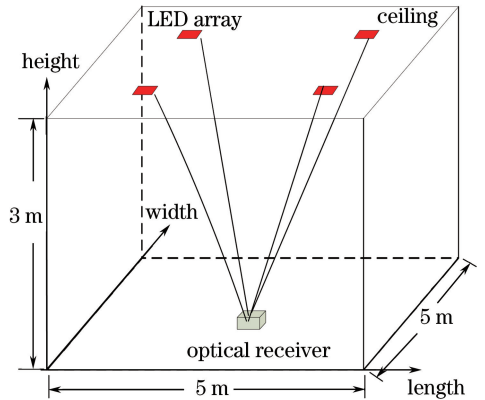


图 1 可见光定位系统模型

Fig. 1 System model of visible light positioning

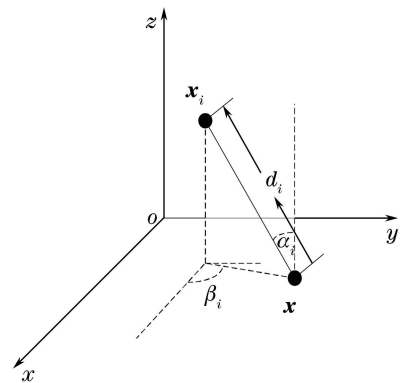


图 2 三维定位空间模型

Fig. 2 Positioning system in three-dimensional space

2.2 信道模型

可见光定位系统采用 LED 作为信号发射端,引入 Lambertian 辐射模型,直射链路(LOS)中接收光功率 P_{LOS} 与发射光功率 P_t 间的关系为

$$P_{\text{LOS}} = P_t \times H(0), \quad (1)$$

式中: $H(0)$ 为信道的直流增益,可表示为

$$H(0) = \frac{A(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m \varphi T_s(\theta) g(\theta) \cos \theta, \quad (2)$$

$$0 \leq \theta \leq \theta_{\text{FOV}},$$

式中: m 为 LED 辐射瓣的模式数; A 为 PD 接收面积; $T_s(\theta)$ 为接收端光滤波器增益; $g(\theta)$ 为聚光器增益; φ 为发送端的辐射角; θ 为接收端入射角; d 为收发两端的欧式距离; θ_{FOV} 为接收视场角。显然,接收光功率 P_{LOS} 与发射端的辐射模式、接收角度、传输距离以及光电检测器有关。

接收端 PD 输出的电功率为

$$P_{\text{ele}} = (RP_{\text{LOS}})^2. \quad (3)$$

根据(1)~(3)式,可以得到收发两端的距离估计为

$$\hat{d}_0 = \left[\frac{RP_i(m+1)Ah^{m+1}T_s(\theta)g(\theta)}{4\pi^2 P_{ele}} \right]^{-1/(2m+6)}, \quad (4)$$

式中: R 为PD的响应灵敏度; h 为收发两端间的垂直距离。

2.3 角度测量

采用RSS定位算法时,需要对收发两端的距离进行估计。在考虑噪声的情况下,距离估计可由(4)式得出。为了实现室内三维空间高精度定位,引入角度信息估计量。根据图2三维定位空间模型推导出接收端仰角和方位角的表达式为

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{z_i - z}{\|\mathbf{x} - \mathbf{T}_i\|}\right) + n_{Ei}, \quad (5)$$

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{y_i - y}{x_i - x}\right) + n_{Ai}, \quad (6)$$

式中: n_{Ei} 和 n_{Ai} 分别为仰角和方位角的测量误差,二者均服从零均值高斯分布,即 $n_{Ei} \sim N(0, \sigma_{n_{Ei}}^2)$, $n_{Ai} \sim N(0, \sigma_{n_{Ai}}^2)$ 。

假设定位环境中噪声足够小时,距离、仰角和方位角的关系可表示为

$$\begin{cases} \|\mathbf{x} - \mathbf{T}_i\| \approx \hat{d}_i \\ \mathbf{c}_i^T(\mathbf{x} - \mathbf{T}_i) \approx 0 \\ \mathbf{k}_i^T(\mathbf{x} - \mathbf{T}_i) = \|\mathbf{x} - \mathbf{T}_i\| \cos \alpha_i \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $\mathbf{c}_i = [-\sin \beta_i, \cos \beta_i, 0]$, $\mathbf{k}_i = [0, 0, -1]$ 。

3 RSS/AOA混合定位法

针对RSS算法定位精度不高的问题,引入AOA实现混合定位。首先,根据RSS测量模型和定位空间几何关系,得出距离和角度信息。然后,根据最小二乘准则,建立混合定位目标函数。通常情况该函数为非凸的,因此再将该函数转化成广义信赖域子问题(GTRS),采用二分法求解,获得全局最优解。

3.1 二维定位

在进行二维平面定位时只考虑距离和方位角估计,根据最小二乘法,建立混合目标函数,导出最小二乘估计量为

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \sum_{i=1}^N (\|\mathbf{x} - \mathbf{T}_i\|^2 - \hat{d}_i^2)^2 + \sum_{i=1}^N [\mathbf{c}_i^T(\mathbf{x} - \mathbf{T}_i)]^2, \quad (8)$$

式(8)为非凸函数,不能保证全局收敛。为了解决该

问题,可以将(8)式转化成广义信赖域子问题(GTRS)进行求解,具有全局最优解。假设 $\mathbf{y} = [\mathbf{x}^T \|\mathbf{x}\|^2]^T$, 可将(8)式写成

$$\min_{\mathbf{y}} \|\mathbf{A}\mathbf{y} - \mathbf{B}\|^2, \text{ subject to } \mathbf{y}^T \mathbf{D}\mathbf{y} + 2\mathbf{f}^T \mathbf{y} = 0, \quad (9)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2\mathbf{T}_1^T & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -2\mathbf{T}_N^T & 1 \\ \mathbf{c}_N^T & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{c}_N^T & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \hat{d}_1^2 - \|\mathbf{T}_1\|^2 \\ \vdots \\ \hat{d}_N^2 - \|\mathbf{T}_N\|^2 \\ \mathbf{c}_1^T \mathbf{T}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{c}_N^T \mathbf{T}_N \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_q & \mathbf{0}_{q \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times q} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{q \times 1} \\ -1/2 \end{bmatrix},$$

(9)式中目标函数与约束都为二次的,这种问题归属为GTRS,可采用二分法求解。

根据文献[16]定理3.2可知,当 $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^{q+1}$ 为(9)式的最优解时,当且仅当存在一个 $\lambda \in \mathbf{R}$ 满足:

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{D})\mathbf{y} = \mathbf{A}^T \mathbf{B} - \lambda \mathbf{f}, \quad (10)$$

$$\mathbf{y}^T \mathbf{D}\mathbf{y} + 2\mathbf{f}^T \mathbf{y} = 0, \quad (11)$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{D} \geq \mathbf{0}, \quad (12)$$

式中: $\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{D} \geq \mathbf{0}$ 表示 $\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{D}$ 为半正定的。为了求解 \mathbf{y} ,首先要求解

$$\varphi(\lambda) = \hat{\mathbf{y}}(\lambda)^T \mathbf{D} \hat{\mathbf{y}}(\lambda) + 2\mathbf{f}^T \mathbf{y}(\lambda), \quad (13)$$

得出拉格朗日算子 λ 的值,其中 $\hat{\mathbf{y}}$ 为 \mathbf{y} 的全局最优解。根据(12)式获取所有满足 $\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{D}$ 半正定的 λ 区间 I :

$$I = (-1/\lambda_1, \infty), \quad (14)$$

式中: λ_1 为矩阵 $[\mathbf{D} \ \mathbf{A}^T \mathbf{A}]$ 的最大广义特征值。 $\varphi(\lambda)$ 在区间 I 上严格递减,意味着(13)式的解是唯一的,因此可以采用二分法求解 λ 的值;(10)式表明全局最优解 $\hat{\mathbf{y}}$ 必须满足:

$$\hat{\mathbf{y}}(\lambda) = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{D})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{B} - \lambda \mathbf{f}), \quad (15)$$

最后将求解的 λ 代入到(15)式中,即可求出全局最优解 $\hat{\mathbf{y}}$ 。

3.2 三维定位

在现实生活使用手机进行定位时,由于使用人群不同,接收端的高度不同。为了使定位更具有普遍性,考虑三维定位场景。构建目标函数时,同时考虑距离、方位角及仰角估计,根据最小二乘准则,目标函数构建如下:

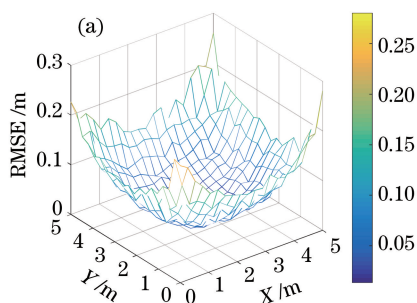
$$\hat{\mathbf{x}} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^N (\|\mathbf{x} - \mathbf{T}_i\|^2 - \hat{d}_i^2)^2 + \sum_{i=1}^N [\mathbf{c}_i^T (\mathbf{x} - \mathbf{T}_i)]^2 + \sum_{i=1}^N [\mathbf{k}_i^T (\mathbf{x} - \mathbf{T}_i) - \hat{d}_i \cos \alpha_i]^2. \quad (16)$$

(16)式同样为非凸函数,将其转换成广义信赖域子问题(GTRS)形式,采用二分法进行求解。

4 定位仿真结果

4.1 二维场景

根据前面介绍的仿真模型,在 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 室内场景的地面上,通过网格划分选取 20×20 个测试点,并对每个点进行循环 100 次定位估计。为了



$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + (z - \hat{z})^2]}, \quad (17)$$

式中: $E[\cdot]$ 为统计平均算符; (x, y, z) 为定位节点的真实坐标; $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 为定位节点的估计坐标。

假设方位角和仰角测量标准差为 $\sigma = 3^\circ$, 噪声带宽为 1 MHz, 在二维平面对混合算法定位误差进行分析,如图 3 所示。图 3(a)为定位误差空间分布图,其定位平均 R_{MSE} 为 8.7 cm, 最大 R_{MSE} 为 28.1 cm; 图 3(b)为误差分布直方图,可以看出大部分定位误差分布在 20 cm 内,说明该算法是可行的。

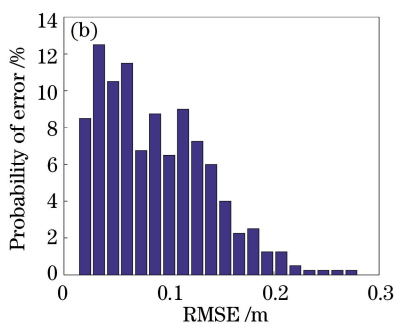


图 3 (a)定位误差空间分布图;(b)定位误差分布直方图

Fig. 3 (a) Space distribution of positioning error; (b) histogram of positioning error probability

在噪声带宽及角度标准差一定的条件下,对单一算法和混合算法的定位误差累计概率分布函数(CDF)进行了比较,如图 4 所示。可以看出,混合算法的 CDF 曲线向左偏移,说明定位性能要优于单一算法;3 种算法在 95% 置信区间下的 R_{MSE} 分别为 17.4, 28.2, 41.4 cm。

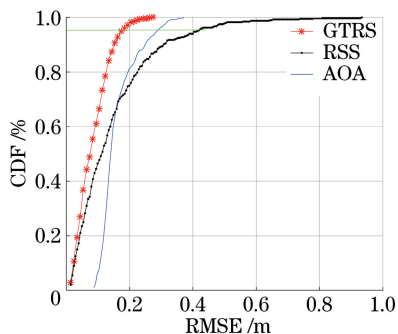


图 4 定位误差累计概率分布

Fig. 4 CDF of the positioning error

在噪声带宽一定的条件下,比较了角度测量标准差与 R_{MSE} 误差的关系,如图 5 所示。可以看出, AOA 算法随着角度标准差的增加,误差呈线性增

大;RSS 算法与角度无关,误差不变;而混合算法随着角度标准差的增加而变化缓慢且定位精度一直优于 RSS 算法;并且,在 $\sigma = 1.62^\circ$ 之后,算法的性能明显优于单一 AOA 算法。

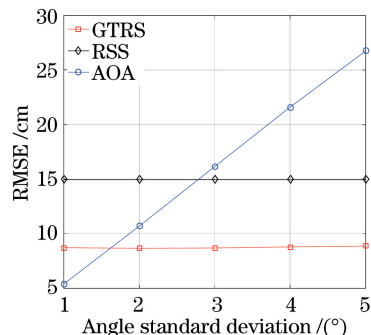


图 5 定位误差与角度测量关系

Fig. 5 Positioning error versus angle standard deviation

4.2 三维场景

考虑现实生活中使用手机进行定位的实际情况,针对定位场景中移动目标进行动态定位跟踪。在定位空间内收集 150 个样本生成行走路径,三维定位结果如图 6 所示。蓝色曲线为真实路径,红色

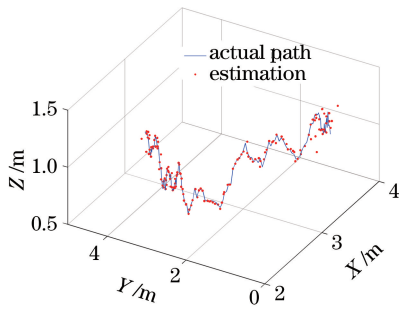


图6 三维定位结果

Fig. 6 Three-dimensional positioning results

曲线为提出算法的估计路径,定位 R_{MSE} 为 3.4 cm。为了更清楚地说明定位结果,图7给出水平方向和

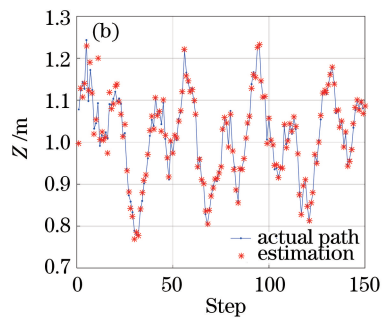
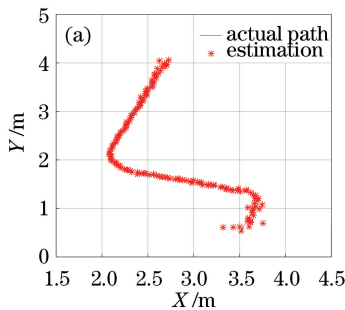


图7 (a)水平方向误差;(b)垂直方向误差

Fig. 7 (a) Horizontal positioning error; (b) vertical positioning error

5 结 论

随着技术的发展,人们对室内定位的需求越来越多,如何实现高精度的定位是室内定位技术需要解决的问题。基于最小二乘算法,结合距离信息和角度信息,提出了一种基于 RSS/AOA 混合的定位算法。仿真结果表明:在 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的二维定位空间中,角度标准差为 $\sigma = 3^\circ$ 的条件下,采用 GTRS 方法获得了 8.7 cm 的定位误差。此外,针对定位高度不同,提出了三维定位算法。仿真结果表明:对于任意行走路径,水平方向和垂直方向都实现了高精度定位及跟踪,验证了该算法的可行性和有效性。

参 考 文 献

- [1] Chi N, Lu X Y, Wang C, *et al.* High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [2] Wang J A, Che Y, Lü Chao, *et al.* LED layout for indoor visible light communication based on energy

垂直方向的定位结果,其中水平方向的 R_{MSE} 为 3.2 cm,垂直方向的 R_{MSE} 为 1.0 cm,都比较接近真实路径。表1总结了定位结果,可以看出,三维定位误差的 95%置信区间的误差为 8.9 cm。

表1 算法三维定位误差

Table 1 Three-dimensional positioning errors of the algorithm

Positioning error	Horizontal / cm	Vertical / cm	Total / cm
RMSE /cm	3.2	1.0	3.3
95% confidential interval	7.9	3.6	8.9

optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0806003.

王加安, 车英, 吕超, 等. 基于能量最优的室内可见光通信 LED 布局[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0806003.

- [3] Panta K, Armstrong J. Indoor localisation using white LEDs[J]. Electronics Letters, 2012, 48(4): 228-230.
- [4] Armstrong J, Sekercioglu Y A, Neild A. Visible light positioning: a roadmap for international standardization [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12): 68-73.
- [5] Yang S H, Jung E M, Han S K. Indoor location estimation based on LED visible light communication using multiple optical receivers [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9): 1834-1837.
- [6] Zhang W, Chowdhury M I S, Kavehrad M. Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications [J]. Optical Engineering, 2014, 53(4): 045105.
- [7] Yang S H, Kim D R, Kim H, *et al.* Visible light based high accuracy indoor localization using the extinction ratio distributions of light signals [J].

- Microwave and Optical Technology Letters, 2013, 55 (6): 1385-1389.
- [8] Zhang X F, Wang M, Wang J. Research status and development of indoor positioning based on visible light communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100001.
张晓锋, 王敏, 王瑾. 基于可见光通信室内定位的研究现状与发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54 (10): 100001.
- [9] Do T H, Yoo M. An in-depth survey of visible light communication based positioning systems [J]. Sensors, 2016, 16(5): 678.
- [10] Wu N, Wang X D, Hu Q Q, *et al.* Multiple LED based high accuracy indoor visible light positioning scheme [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(3): 727-732.
吴楠, 王旭东, 胡晴晴, 等. 基于多LED的高精度室内可见光定位方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37 (3): 727-732.
- [11] Lim J. Ubiquitous 3D positioning systems by led-based visible light communications [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 80-85.
- [12] Wang X D, Hu Q Q, Wu N. High accuracy indoor visible light positioning algorithm [J]. Journal of optoelectronics • Laser, 2015, 26(5): 862-867.
王旭东, 胡晴晴, 吴楠. 高精度室内可见光定位算法[J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(5): 862-867.
- [13] Eroglu Y S, Guvenc I, Palay N, *et al.* AOA-based localization and tracking in multi-element VLC systems[C]. 2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Cocoa Beach, FL, USA, 2015: 15201591.
- [14] Sahin A, Eroglu Y S, Guvenc I, *et al.* Hybrid 3-D localization for visible light communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33 (22): 4589-4599.
- [15] Beck A, Stoica P, Li J. Exact and approximate solutions of source localization problems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56 (5): 1770-1778.
- [16] More J J. Generalizations of the trust region problem [J]. Optimization Methods & Software, 1993, 2 (3): 189-209.