

基于接收信号强度检测的高精度可见光定位方法

叶子蔚, 叶会英, 聂翔宇, 习小玉

郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 以高精度为研究目标,使用适用范围广、系统相对简单易搭建、可移植性好的接收信号强度检测法(RSSI),对可见光通信定位方法进行研究。由于易受到背景光源的干扰,RSSI定位方法的测量误差很难控制在厘米以下。利用小波分析大幅降低接收信号中的噪声,采用相关检测法提取噪声中的源信号,使用最小二乘法估算位置坐标。通过在不同信噪比条件下的仿真对比,验证了方法的可靠性,发现RSSI可见光定位的误差范围稳定在1cm以内且随噪声增长率较小,比误差分析计算出的未经处理的理论精度提高了数十倍,明显提高了定位精度。

关键词 光通信; 可见光通信; 室内定位; 接收信号强度检测; 信号处理; 高精度定位

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0306002

High-Accuracy Visible Light Positioning Method Based on Received Signal Strength Indicator

Ye Ziwei, Ye Huiying, Nie Xiangyu, Xi Xiaoyu

School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract Based on received signal strength indicator (RSSI), which has wide serviceability, simple and easy-to-construct structure, and good portability, we study a visible light communication positioning method with high accuracy. Due to the interference from background resources, the measurement error of RSSI-based positioning method is difficult to control below centimeters. We use wavelet analysis to significantly reduce the noise mixed with received signal, use the correlation test method to extract the source signal in noise, and use the least square method to estimate location coordinate. We verify the reliability of the method by the simulations under different signal-to-noise ratios (SNRs). It is found that the error of the RSSI-based visible light positioning is less than 1 cm and is insensitive with noise, which is dozens of times better than the theoretical accuracy without processing based on error analysis.

Key words optical communications; visible light communication; indoor positioning; received signal strength indicator; signal processing; high accuracy positioning

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 120.3940; 200.4560

1 引言

得益于可见光通信(VLC)技术的迅速发展,可见光定位(VLP)作为一项新兴定位技术,以其精度高、成本低、可移植性好、系统易于搭建等优势,逐渐跻身于现阶段主流的定位系统行列,成为相关行业的热点^[1-3]。

可见光通信技术,是以发光二极管(LED)为信号光源,可见光波为通信载波,自由空间为传输信道的通信技术,具有传输速率高、保密性强、抗电磁干扰性强等特点^[4-7]。可见光定位技术建立于可见光通信的基础之上,目前主要用于室内环境的定位技术。室内定位技术主要应用于机场、大型商场、地下停车场等环境中,在功能上可以同基

收稿日期: 2017-07-05; 收到修改稿日期: 2017-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(61705198)

作者简介: 叶子蔚(1990—),男,硕士,主要从事可见光通信方面的研究。E-mail: yzwleaf@126.com

导师简介: 叶会英(1966—),女,博士,硕士生导师,主要从事光电测量、可见光通信方面的研究。

E-mail: iehyye@zzu.edu.cn(通信联系人)

0306002-1

于全球卫星定位系统(GPS)的室外定位技术互补。室内可见光定位技术通过建立室内光源网络,将室内环境信息加载到光信号上,由 LED 信号源发射,经室内空间被待检测设备的传感器接收,再分析计算得出待检测设备在室内的位置^[3-8]。相比于红外、超声定位,可见光定位不需要高昂的建设成本,还可同时兼顾照明和通信;对比射频(RF)定位技术,可见光定位不受频谱许可的限制,并具有更好的抗干扰性和数据保密性,因此在室内定位中具有更广泛的应用前景^[9-10]。室内可见光定位方法主要有成像型与非成像型^[10-11]。成像型定位是依靠图像传感器以及图像处理技术来实现;非成像型则是利用光电探测器(PD)和数字信号处理技术实现。接收信号强度检测法(RSSI)是一种非成像型的定位方法,在非成像定位法中有着较高的定位精度、较好的实时性和可移植性;相比成像型定位法还有着成本低、数据传输速度高的优势,并具有较多样的调制模式。由于对系统复杂度要求很低,RSSI 定位具有极广的应用范围,它可以搭载至个人计算机、手机、智能机器人,甚至电子表等简单设备上。

目前的可见光 RSSI 定位方法的定位精度已达到 3 cm^[11-12],但由于易受到自然光源或其他人工光源的干扰,该方法的定位精度很难突破厘米级限制。本文通过信号处理与算法优化等措施有效降低强噪声干扰从而提高定位精度,并对定位系统做误差分析和仿真模拟,验证其可靠性。

2 可见光通信与 RSSI 定位算法

2.1 LED 与信道模型

可见光通信的信号光源一般采用白光 LED,其发光强度分布通常服从近朗伯光源模型^[13]:

$$I_{\theta} = I_0 \cos^m \theta, \quad (1)$$

式中, I_{θ} 是指在发射角 θ 方向的发光强度; I_0 是垂直于发光面(发射角为 0)的发光强度; m 为辐射模数(即 order),代表 LED 光源的聚光度,可表示为^[11]

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})}, \quad (2)$$

其中 $\theta_{1/2}$ 为 LED 发光强度的半功率角或半光强角,通常将 $2\theta_{1/2}$ 称为光源器件的光束角,即最大有效发光角。LED 光源发光与 PD 接收过程如图 1 所示, L 为光电探测器(接收机)与信号光源之间的水平距离。

在室内可见光通信信道模型中,根据近朗伯光

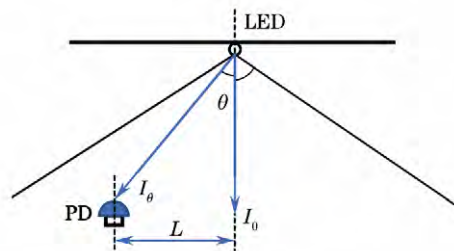


图 1 LED 光源发光与 PD 接收示意图

Fig. 1 LED radiation and PD reception sketch

源的辐射特性,在直射链路(LOS)中,接收器所接收到的光功率 P_r 同发射端发射功率 P_t 间存在如下关系^[14]:

$$P_r = P_t \cdot \frac{(m+1)}{2\pi} \cos^m \theta \cos \varphi T_s g \frac{A_r}{d^2}, \quad (3)$$

式中, θ 和 φ 分别为光源的发射角和接收器的接收角,若接收端与发射端水平放置,则有 $\varphi = \theta$; T_s 和 g 分别表示接收端的光滤波器增益和光聚能增益; A_r 接收器件有效接收面积; d 为接收器同发射器的直线距离。

2.2 RSSI 定位过程

基于 RSSI 的室内可见光定位法,是根据检测到的光信号强度获取接收机的室内相对位置的定位方法。该方法通常采用强度调制与直接检测的方法,通过发射端加载不同频率的载波信号来加以区分,同时减小了小区间内信号的相互干扰^[15-16]。

根据 LED 的光强分布特性,可以得出图 2 所示接收机的接收信号强度随接收机与信号光源之间水平距离 L 的一一对应关系。RSSI 方法的定位过程如图 3 所示,设备接收端根据检测到的来自多个光源发射信号的强度得出到各光源 T_n 的水平距离,同时接收各光源的位置信息,通过相应的定位算法,如三边定位法、最小二乘法等,计算出接收端的位置坐标。

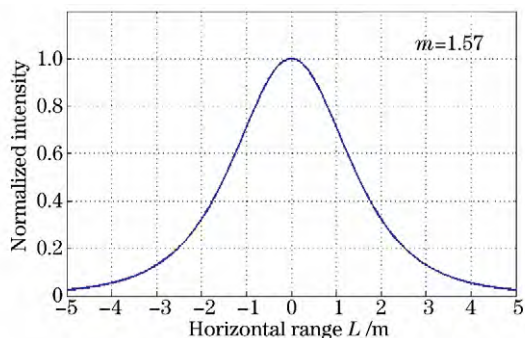


图 2 归一化的接收光强度在水平方向的分布

Fig. 2 Normalized received light intensity distribution on horizontal range

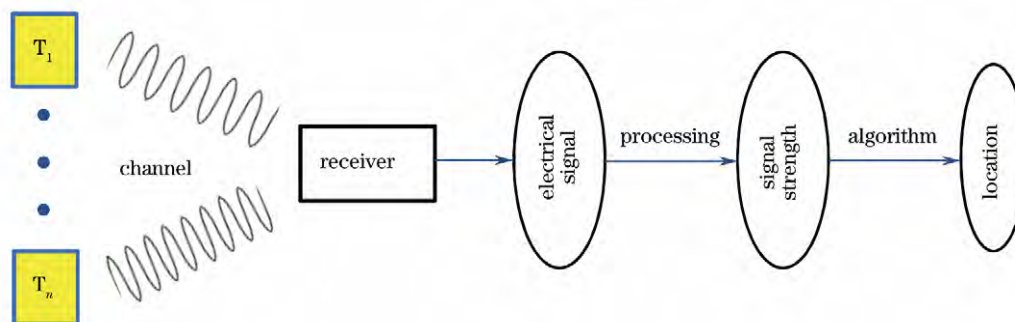


图3 RSSI方法的定位过程

Fig. 3 Positioning procedure of RSSI

3 信号处理及定位算法

3.1 相关函数检测

相关函数检测法^[17]是信号处理中常用的处理方法,常用于信噪比较低的弱正弦信号检测,包括自相关法和互相关法。自相关法是将接收到的含噪声信号作自相关运算,互相关法则需要在接收端生成与待检测信号同周期的正弦信号,并将接收信号与正弦信号作互相关运算,因正弦信号与高斯噪声互为统计独立,且具有各态历经性,据此可提取出信号成分。在定位系统中,自相关法需要足够的采样时间使含噪项衰减,而互相关法具有更好的实时性,且RSSI定位系统中每个信号光源的发射频率都是人为设定的(已知的),便于接收机区分不同的信号源,故互相关法更加适用于本文的定位系统。

设含噪声的周期信号为 $x(t) = s(t) + n(t)$, 其中 $s(t) = A \cos(2\pi ft + \phi)$ 为被检测正弦信号, A 为幅值, f 为频率, ϕ 为初始相位, $n(t)$ 为高斯噪声。接收机内产生信号 $g(t) = B \cos(2\pi ft)$, $g(t)$ 是人为设定的,其幅值 B 、频率 f 均已知。互相关函数可表示为 $R_{xg} = R_{sg} + R_{ng}$, 其中 R_{ng} 理论上为0,故

$$R_{xg}(n\tau) = R_{sg}(n\tau) = \frac{1}{N} \sum s(k\tau)g(k\tau - n\tau), \quad k, n \in \mathbf{Z}, \quad (4)$$

式中, τ 为采样间隔,代入 s, g 可得

$$R_{xg}(n\tau) = \frac{AB}{2} \cos(2\pi fn\tau + \delta), \quad (5)$$

即

$$R_{xg}(t) = \frac{AB}{2} \cos(2\pi ft + \delta), \quad (6)$$

式中 δ 为相位偏差。通过分析相关函数 R_{xg} 的波形,便可得到源信号 $s(t)$ 的强度。

3.2 小波降噪

考虑到强光干扰的随机性,在进行相关函数运算之前有必要对信号进行一定的预处理。本文采用小波分析来降低噪声干扰,使信号更为规整,便于之后的处理。小波分析是一种多分辨率的时频分析方法^[18-19],具有分辨率可调的时频窗口,比传统降噪法更利于本文的后续工作。信号 $x(t)$ 的小波变换可表示为

$$w(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{\mathbf{R}} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (7)$$

式中, \mathbf{R} 为实数域, ψ 为母小波, a, b 分别为伸缩因子与平移因子。通过小波变换,将信号 $x(t)$ 投影到各小波基进行分解,然后对各小波系数进行处理,再逆变换重构信号,以达到降噪的目的。

图4为上述处理方法的仿真测试结果。图4(a)~(c)分别为采样信号、经过小波降噪的信号和互相关检测提取出的信号波形,图4(d)~(f)为与之对应的频谱。源信号为4 kHz的正弦信号,采样频率为0.2 MHz;测试中的信噪比为6 dB,属于强噪声环境;选用的小波函数为Daubechies 3小波,降噪方法为软阈值降噪。从图4中可见,尽管处于6 dB的信噪比环境,经过以上方法还原出的信号除初相位的变化外已接近标准的正弦波,并具有较好的频谱特性,可见源信号的还原效果很好。之后利用接收机检测到的光源强度同接收机与光源间水平距离的一一对应关系,即可得出接收机到各光源的水平距离。

3.3 最小二乘法估算位置坐标

RSSI定位方法的最后一步是由接收机到各光源的水平距离计算出接收机的位置坐标,常用的算法有三边定位、双曲线定位等算法,本文选用了更为有效的最小二乘法来估测位置坐标。

最小二乘法的原则是使拟合数据与实测数据之间误差的平方和最小^[3-4]。设接收机接收到的信号源数量为 M , L_i 为到第 i 个信号源 (x_i, y_i) 的测量

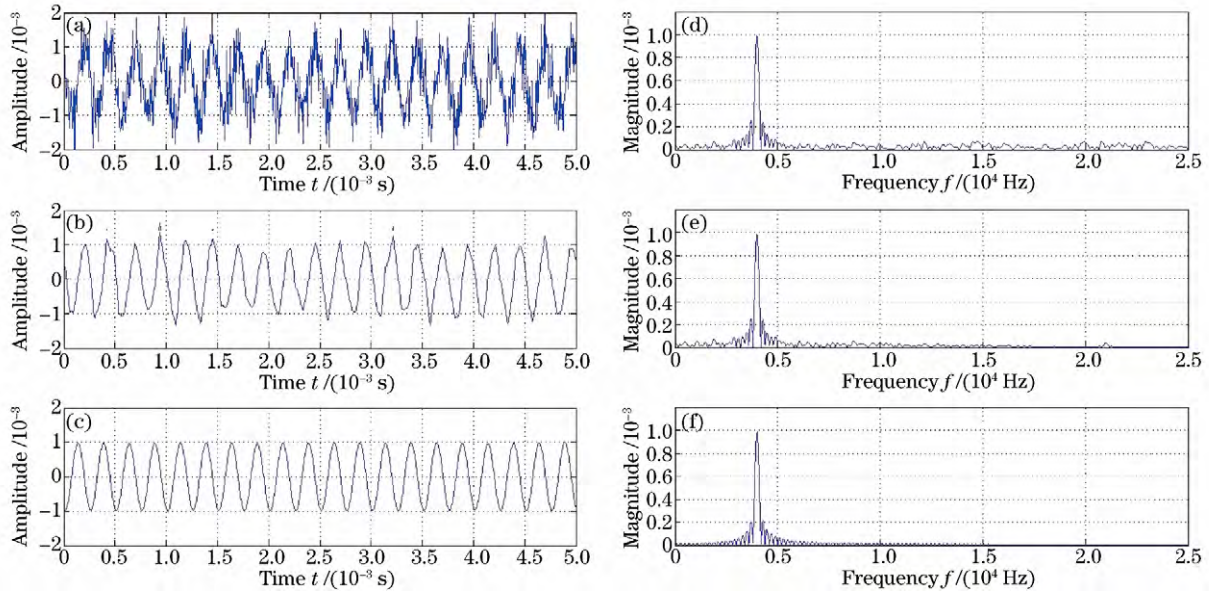


图 4 小波降噪与互相关检测测试图。(a)、(b)、(c)分别为采样信号、经过小波降噪的信号和互相关检测提取出的信号波形；
(d)、(e)、(f)分别为采样信号、经过小波降噪的信号和互相关检测提取出的信号波形对应的频谱
Fig. 4 Wavelet denoise and cross-correlation detection test results. Waveforms of (a) sampled signal, (b) wavelet denoised signal, and (c) restored signal extracted by correlation method, respectively; frequency spectra of (d) sampled signal, (e) wavelet denoised signal, and (f) restored signal extracted by correlation method, respectively

距离,接收机的待测坐标为 (x, y) ,则有

$$\begin{cases} L_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ L_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\ \vdots \\ L_M^2 = (x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 \end{cases}, \quad (8)$$

误差函数可表示为

$$f_e = (\mathbf{H}\mathbf{X} - \mathbf{Y})^T (\mathbf{H}\mathbf{X} - \mathbf{Y}), \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 2(x_M - x_1) & 2(y_M - y_1) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_M - x_{M-1}) & 2(y_M - y_{M-1}) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} L_1^2 - L_M^2 - (x_1^2 + y_1^2) + (x_M^2 + y_M^2) \\ \vdots \\ L_{M-1}^2 - L_M^2 - (x_{M-1}^2 + y_{M-1}^2) + (x_M^2 + y_M^2) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

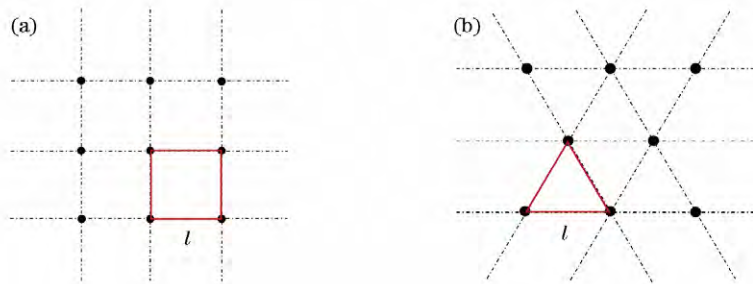


图 5 可见光室内定位系统两种光源分布方式。(a)矩形排布方式;(b)三角排布方式

Fig. 5 Two luminaire distribution modes in visible light positioning system. (a) Rectangular distribution mode; (b) triangular distribution mode

$$\mathbf{X} = [x, y]^T. \quad (12)$$

对误差函数求导,令其等于 0 得

$$2\mathbf{H}^T\mathbf{H}\mathbf{X} - 2\mathbf{H}^T\mathbf{Y} = 0, \quad (13)$$

若 $\mathbf{H}^T\mathbf{H}$ 是非奇异的,可得出接收机坐标:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{Y}. \quad (14)$$

4 仿真及结果

4.1 仿真参数设置

仿真的目的是测试定位方法的定位精度,为此设置多个检测点来评估各个位置的测量误差。

在室内可见光定位系统中,光源分布方式主要有两种^[20-22]:矩形排布方式和三角形(或菱形)排布方式,如图 5 所示,其中 l 为相邻光源间距离。根据光照分布的对称性,仅需测试图中红色框内的一小部分即可,如图 6 中的蓝色阴影部分^[23-24]。

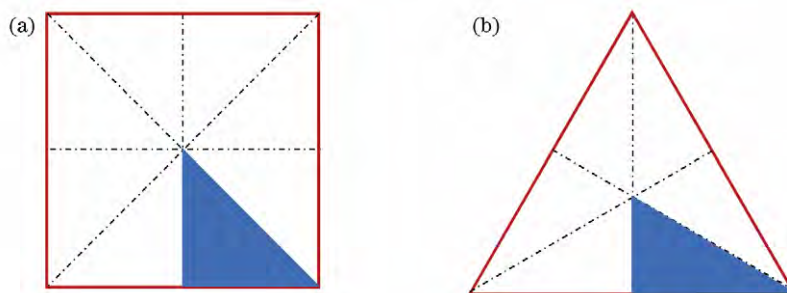


图 6 需要测试的区域

Fig. 6 District to be measured

系统中的噪声 σ 包含散粒噪声 σ_{shot} 与热噪声 σ_{ther} ^[25], 均可作为高斯噪声处理:

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{ther}}^2, \quad (15)$$

其中:

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2qRP_r + 2qI_{\text{bg}}I_2B, \quad (16)$$

$$\sigma_{\text{ther}}^2 = \frac{8\pi k T_K}{G_0} \eta A_r I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_K \Gamma}{g_m} \eta^2 A_r^2 I_3 B^2, \quad (17)$$

式中, q 为元电荷量, R 为 PD 的接收响应, B 为等效噪声带宽, k 为 Boltzmann 常数, T_K 是热力学温度, G_0 为开环电压增益, η 为 PD 单位面积的固定电容, g_m 为跨导, Γ 为信道噪声因数, I_{bg} 为背景电流, I_2 、 I_3 为噪声带宽因子。经计算, 仿真中的信噪比可低至 10 dB。

仿真过程中, 认为接收端透镜有足够的视角。其他仿真参数如表 1 中所示。

4.2 理论误差

在参数估计中, 任何针对某个参数 k 的无偏估计量 \hat{k} , 其有效性由方差 $D(\hat{k})$ 衡量, 并满足

$$D(\hat{k}) \geq \frac{1}{E\left[\sum \frac{\partial}{\partial k} \ln f(X, k)\right]^2}. \quad (18)$$

式(18)称为Cramer-Rao不等式^[26], 该式表明任何

表 1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameter

Parameter	Value
Signal sampling frequency f_s /MHz	0.2
Carrier frequency /kHz	4~5
LED emission power P_t /W	25
Order of LEDs m	3
Room height h /m	2.5
Distance between adjacent resources l /m	3.0
Effective received area of PD A_r /cm ²	0.2
Receiving response of PD R /(A·W ⁻¹)	0.4
Gain of optical filter T_s	1
Concentrator gain g	1
Channel noise factor Γ	1.5

无偏估计量不可能绝对有效, 即方差存在下限, 这个下限称为 Cramer-Rao 边界 (CRB), 其分母部分为 Fisher 信息量, 记作

$$I(k) = E\left[\sum \frac{\partial}{\partial k} \ln f(X, k)\right]^2, \quad (19)$$

其定义为 k 的对数似然函数一阶导数的二阶距, 其中 $f(X, k)$ 为变量 X 在 k 下的分布函数, $E(\cdot)$ 为对话框内随机变量求期望。在待仿真的定位系统中, 任意一条传输链路中水平距离参数的 CRB 表示为^[20-21]

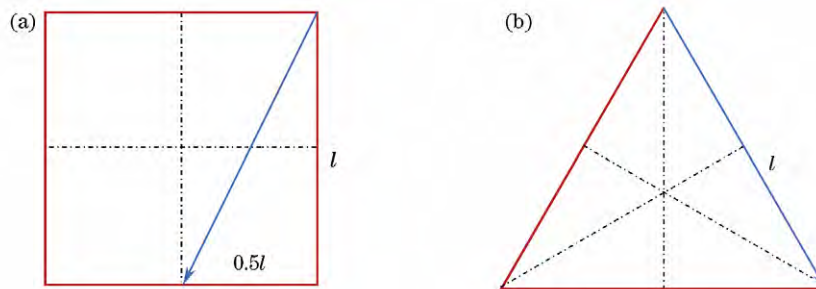


图 7 两种分布方式的最大水平测量距离。(a)矩形分布方式;(b)三角分布方式

Fig. 7 Largest horizontal measuring distance of two distribution modes. (a) Rectangular distribution mode; (b) triangular distribution mode

$$\sqrt{D(\hat{L}_i)} \geq \frac{2\pi(L_i^2 + h^2)^{\frac{m+5}{2}} \sigma}{(m+1)(m+3)A_r R a h^{m+1} L_i}, \quad (20)$$

式中 α 为 LED 发射功率的峰-峰值。

若选取距离最近的三个信号源的接收强度来计算,如图 7 所示,两种分布方式的测量范围分别为 $(0 \sim \sqrt{5}/2)l$ 和 $0 \sim l$,根据上述 CRB,代入仿真参数计算得出在 $L_i = 0.945$ m 处存在最小误差值。若信噪比为 10 dB,经计算,未经处理的数据误差可达到 13 cm。

4.3 误差仿真结果

在仿真中,每一个检测信号经过小波降噪、信号提取并采用最小二乘法估算位置,得出的矩形与三角形光源分布方式的仿真结果分别如图 8 和图 9 所示,图中蓝色小方框表示检测点,红色乘号表示定位结果,相邻检测点间隔 10 cm。整体上看,仿真得到的位置信息同检测点的位置基本吻合,只有少数定位点能够从图中看出明显误差。

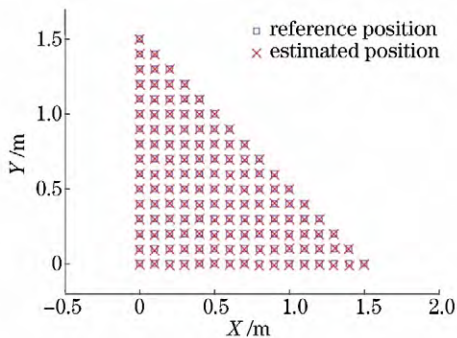


图 8 矩形分布方式仿真结果

Fig. 8 Simulation result of rectangular distribution mode

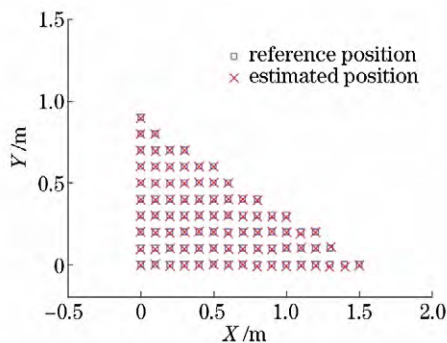


图 9 三角分布方式仿真结果

Fig. 9 Simulation result of triangular distribution mode

对两种排列方式分别做 12 组类似的仿真测试,并统计每一个位置的定位误差,得到矩形排列方式的均方误差为 0.478 cm,三角排列方式的为 0.425 cm。在 2000 余个位置数据中,90% 以上的测

量误差在 1 cm 以下。

4.4 噪声强度影响

虽然当信噪比(SNR)为 10 dB 时仿真结果较好,但还不足以说明该设计能够很好地降低噪声干扰,为此需要测试不同噪声环境下定位误差的变化。保持上述的处理算法和各仿真参数不变,分别在信噪比为 20 dB,10 dB,6 dB,3 dB,0 dB 条件下进行上述定位精度仿真,并分别采样多组均方误差作对比。图 10、图 11 分别为信噪比为 20 dB 和 0 dB 的仿真结果图(以矩形分布为例),图 12、图 13 分别为两种分布方式定位误差随信噪比的变化趋势图。经过多组仿真,三角分布方式在对应信噪比条件下的平均误差分别为 0.342,0.425,0.535,0.660,0.989 cm,矩形分布方式分别为 0.346,0.511,0.670,0.855,1.082 cm。

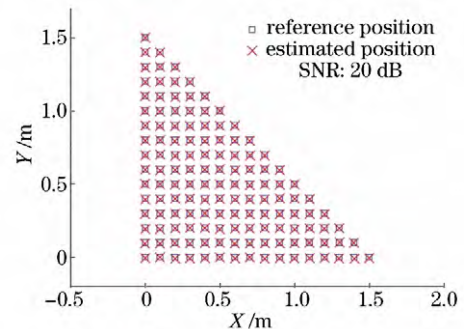


图 10 矩形定位 20 dB 信噪比仿真结果

Fig. 10 Simulation result of rectangular array positioning with SNR of 20 dB

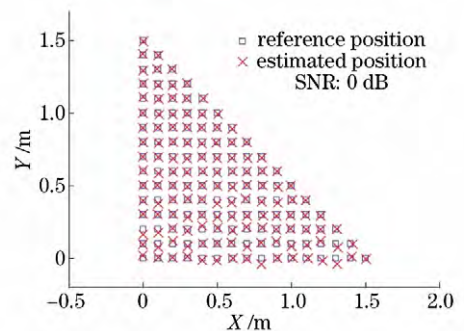


图 11 矩形定位 0 dB 信噪比仿真结果

Fig. 11 Simulation result of rectangular array positioning with SNR of 0 dB

由图 12 和 13 可知,当噪声强度增大时,测量误差确实会随之增大,但其随噪声的增大趋势并不十分显著。即使在噪声功率增大至与信号功率相等(0 dB)的情况下,测量误差值也仅在 1 cm 左右;0 dB 的噪声功率比 20 dB 的增大了 100 倍,而测量误差增大不足 3 倍。

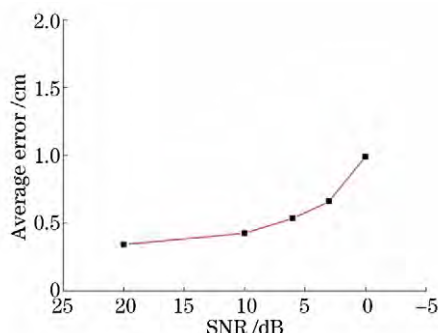


图 12 三角分布的定位误差随信噪比变化

Fig. 12 Positioning error tendency varied with SNR in triangular distribution

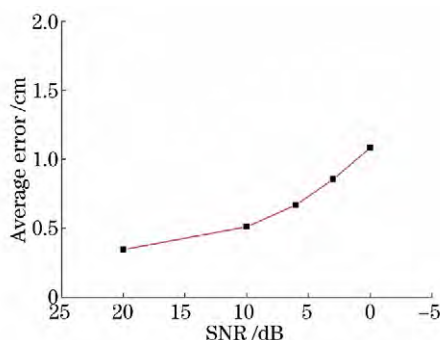


图 13 矩形分布的定位误差随信噪比变化

Fig. 13 Positioning error tendency varied with SNR in rectangular distribution

5 结 论

通过分析可见光发射和接收通信链路,采用接收信号强度检测方法,对室内定位方法进行研究,设计了利用小波分析法大幅降噪、互相关检测提取源信号、最小二乘法估算位置坐标的定位方法,利用该方法实现了二维平面定位的仿真,达到了较理想的精度。

由 24 组位置数据的统计结果可得,本文设计的定位方法在 10 dB 的信噪比条件下,均方误差基本稳定在 0.4~0.5 cm 之间;通过 CRB 进行的误差分析表明,相同参数的系统不经处理直接计算得出的位置坐标理论误差大于 13 cm,可见处理方法是有效的;在等光源间距的条件下,三角分布方式相比于矩形分布具有更高的稳定性;随着噪声强度的增大,定位误差的增大趋势并不十分明显,说明该方法对于强噪声有更好的抑制效果。

由于具有系统简洁、可移植性强、适用范围广的特点,基于 RSSI 的可见光定位技术在设备小型化、便携化的科技发展趋势下有很好的应用前景;随着人工智能设备的普及,各相关行业对机器设备的精

细操作提出越来越高的要求,高精度的定位方法将为此打下很好的基础。此外,该定位方法对强噪声的抑制作用,使得可见光定位即使在日光通透的室内场所也能够得到有效的应用,甚至有望将其应用领域扩展至公园、广场等户外场所。

参 考 文 献

- [1] Zhao J Q, Chi N. Comparative research on several key indoor positioning technologies based on LED visible light communication [J]. Light & Lighting, 2015, 39(1): 34-41.
赵嘉琦, 迟楠. 室内 LED 可见光定位若干关键技术的比较研究 [J]. 灯与照明, 2015, 39(1): 34-41.
- [2] Do T H, Yoo M. An in-depth survey of visible light communication based positioning systems [J]. Sensors, 2016, 16(5): 678.
- [3] Jiang Y L. Research on indoor visible light positioning system based on RSSI and image sensor [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014.
江运力. 基于 RSSI 及图像传感器室内可见光定位系统研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.
- [4] He S Y. Research on key technologies of indoor visible light communication system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
何胜阳. 室内可见光通信系统关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [5] Wang L. Visible light communication source layout and modulation techniques [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
王莉. 可见光通信中光源布局与调制技术研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [6] Ding J P. Visible light communications indoor channel modeling & performance optimization [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
丁举鹏. 可见光通信室内信道建模及性能优化 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [7] Bai B, Tian H, Li X B. Wireless positioning algorithm based on light emitting diode lights and camera calibration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0205003.
白勃, 田骅, 李晓波. 基于发光二极管光源的相机定标无线定位算法 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0205003.
- [8] Wang C. Toward indoor visible light communication: the research and implementation of positioning scheme based on mobile phone [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.
王聪. 基于 Andorid 平台下的可见光通信室内定位

- 技术研究与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [9] Song X Q, Zhao Z X, Chen K W, *et al.* Visible light communication: potential applications and challenges [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52 (8): 30-38.
宋小庆, 赵梓旭, 陈克伟, 等. 可见光通信应用前景与发展挑战[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52 (8): 30-38.
- [10] Xu Y F, Huang X X, Li R L, *et al.* Research on indoor positioning algorithm based on LED visible light communication [J]. *China Light & Lighting*, 2014(4): 11-15.
许银帆, 黄星星, 李荣玲, 等. 基于LED可见光通信的室内定位技术研究[J]. *中国照明电器*, 2014(4): 11-15.
- [11] Niu Y F, Sun D D. Indoor positioning application of visible light communication in intelligent lighting[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2016, 27 (6): 104-107.
牛衍方, 孙德栋. 可见光通信在智能照明中的室内定位应用[J]. *照明工程学报*, 2016, 27(6): 104-107.
- [12] Zheng H, Xu Z, Yu C, *et al.* A 3-D high accuracy positioning system based on visible light communication with novel positioning algorithm[J]. *Optics Communications*, 2017, 396: 160-168.
- [13] Xia X L, Yu B H, Mai Z Q. Design on approximate Lambertian LED opto lens configuration[J], *Electro-optic Technology Application*, 2010, 25(1): 22-25.
夏勋力, 余彬海, 麦镇强. 近朗伯光型LED透镜的光学设计[J]. *光电技术应用*, 2010, 25(1): 22-25.
- [14] Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communication[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(2): 265-298.
- [15] Han Y. Design and implementation of wireless location & velocimetry system based on ZigBee[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
韩莹. 基于ZigBee技术的无线定位及测速系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [16] Guan W P, Wu Y X, Wen S S, *et al.* Indoor positioning technology of visible light communication based on CDMA modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106006.
关伟鹏, 吴玉香, 文尚胜, 等. 基于CDMA调制的可见光通信室内定位技术的研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106006.
- [17] Lu D J, Zhang H. Randomized procedure and its applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
陆大金, 张颢. 随机过程及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [18] Li X. Research on measurement signal processing technology based on wavelet analyse [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
李翔. 基于小波分析的测量信号处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [19] Liu Y D, Ouyang A G, Ying Y B. Application of wavelet analysis in signal process using Matlab[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19 (3): 821-823.
刘燕德, 欧阳爱国, 应义斌. 小波分析用于光谱信号处理及其在Matlab中的实现[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(3): 821-823.
- [20] Zhang X, Duan J, Fu Y, *et al.* Theoretical accuracy analysis of indoor visible light communication positioning system based on received signal strength indicator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(21): 4180-4186.
- [21] Amini C, Taherpour A, Khattab T, *et al.* Theoretical accuracy analysis of indoor visible light communication positioning system based on time-of-arrival[C]// *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2016: 1-5.
- [22] Zhao L, Peng K. Optimization of light source layout in indoor visible light communication based on white light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (7): 0706001.
赵黎, 彭恺. 基于白光发光二极管的室内可见光通信光源布局优化[J]. *光学学报*, 2017, 37 (7): 0706001.
- [23] Luo P, Ghassemlooy Z, Minh H L, *et al.* Experimental demonstration of an indoor visible light communication positioning system using dual-tone multi-frequency technique [C]// *IEEE International Conference on Optical Wireless Communications*, 2016: 55-59.
- [24] Marshoud H, Muhaidat S, Sofotasios P C, *et al.* Optical non-orthogonal multiple access for visible light communication [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017(4): 1-5.
- [25] Lee I E, Sim M L, Kung F W L. Performance enhancement of outdoor visible-light communication system using selective combining receiver [J]. *IET Optoelectronics*, 2009, 3(1): 30-39.
- [26] Deleuze A L, Martret C L, Ciblat P, *et al.* Cramer-Rao bound for channel parameters in ultra-wide band based system[C]// *IEEE Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 2004: 140-144.