

反射与噪声对室内可见光定位系统 精度影响及其克拉美罗界

张秀楠,邵建华,柯 炜,袁亚男,聂 帅

(南京师范大学物理科学与技术学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 基于到达信号强度(RSS)测距的方法,可见光室内定位系统中因为墙面反射和外界噪声等存在干扰,从而产生误差.将计算机图形学中的 Phong 模型应用到可见光定位的墙面反射模型中,通过计算仿真反射和噪声信号到达接收端的强度,与发射端直射到接收端的信号强度进行对比,发现干扰信号中反射信号的强度与直射强度处于同一个数量级上,因此干扰对于可见光定位系统误差的影响不容忽视.仿真得到这些干扰对于最终定位系统造成的误差,并且与表示定位性能的克拉美罗下界进行对比,发现最大误差达到 1.82 m,平均误差为 0.12 m,干扰现象在墙角区域明显.

[关键词] 可见光,定位,反射,噪声,克拉美罗界

[中图分类号] TN929.1 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2017)03-0102-08

Errors and the Cramer-Rao Bound Caused by Reflection and Noise on Visible Light Positioning System

Zhang Xiunan, Shao Jianhua, Ke Wei, Yuan Yanan, Nie Shuai

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The visible light indoor positioning system based on received signal strength(RSS) has positioning error due to the disturbance of the wall reflection and the external noise. This system applies Phong in computer graphics to the wall reflection of visible light positioning. Comparing signal strength from LEDs directly with the reflection and noise simulation at the receiving, it is found that signal strength of the wall reflection and direct strength are in the same order of magnitude. Thus the disturbance of the wall reflection and the external noise cannot be ignored. This article compares the simulation error caused by the disturbance to the positioning system with Cramer-Rao bound which represents the lower limit of the positioning error. It is found that maximum error is 1.8 m and the average error is 0.12 m. The disturbance phenomenon is obvious in the corner of the wall.

Key words: visible light, positioning, wall reflection, external noise, cramer-rao bound

随着社会的加速发展,数据和多媒体等业务的迅速增加,人们对于室内导航与定位越来越依赖,特别是在较复杂的环境下,如在室内高保密会议和军、工、政保密工作场地,在公共区域、商业场所室内等.因此,人们探索出很多种方法,如 ZigBee 定位技术、WLAN 定位技术、红外线技术、超声波技术、蓝牙技术、超宽带定位技术、射频识别定位技术等^[1].但是上述方法都需要通过安装发送与接收设备等繁杂的工序,并且这些技术对于安装环境的要求也较为苛刻,这些因素极大地增加了定位的成本,从而限制了这些技术的推广与使用^[2].

LED 被称为第四代光源,它的发明为照明技术带来了新的革命,它集合了各种传统光源的优势,并且具有电压低、功耗低、寿命长、易于小型化等各项优点.因此基于白光 LED 的通信技术应运而生,并以其能效高、绿色环保、不受电磁干扰等优势,兼具照明与通信两种功能成为近几年来的一个研究热

收稿日期:2016-12-15.

基金项目:教育部博士点基金(2013102SBJ0265).

通讯联系人:邵建华,教授,研究方向:通信技术. E-mail:shaonianhua@njnu.edu.cn

点. 从 2000 年, 日本研究人员提出并仿真基于 LED 灯作为基站的可见光室内通信系统后, 可见光的通信迅速得到各国的关注.

基于白光 LED 的可见光室内定位技术也随之被提出. 目前已有的室内定位技术大多是在发射端通过各路 LED 灯不断发送一定的光信号, 位于室内的移动目标接收到 LED 灯发来的信号, 通过接收到的光信号来判断移动目标所在的位置. 每路 LED 灯通过发送不同频率的数据信号(FDM), 或者在不同的时间发送数据信号(TDM), 给每个 LED 灯一个自己的专用标识 ID, 来标记接收到的光信号来自哪一路^[3]. 接收端在识别信号来源的同时, 利用 TOA、TDOA、AOA、RSS 等方法进行测距. 但是大多文献没有考虑到外界干扰对距离测量的影响, 进一步对定位精度造成的影响.

在移动通讯中, 关键的一个环节就是定位服务的精度要求, 本文针对这一要求, 研究定位过程中墙面反射光及外界自然光对定位精度的影响, 对比不同定位方法中外界因素影响下的误差大小, 并与克拉美罗界进行比对.

1 可见光定位系统模型

1.1 系统模型

本文所采用的系统模型如图 1 所示^[4-5], 该模型中室内定位场所为 5 m×5 m×3 m 的空间, 4 个 LED 灯安装在天花板上, 利用 LED 灯的照明与通信双重功能, 对 LED 灯进行合理的布置, 尽可能使接收平面上所有位置都能被光照覆盖. 4 个 LED 灯光照强度完全相同, 且发射信号自带信标(ID), 使接收端(PD)能够分辨来自每个 LED 灯的信号强度.

1.2 理想信道模型及定位方法

1.2.1 信道模型

室内定位系统主要由天花板上的 LED 灯作为发射源发出带有 ID 的光信号, 光信号由接收端的 PD 接收. 图 2 给出了可见光室内定位系统的典型直射模型.

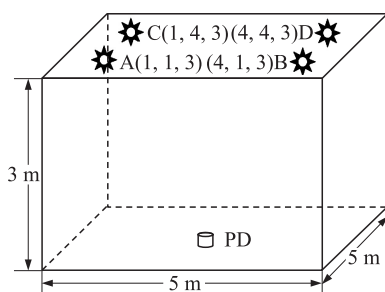


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

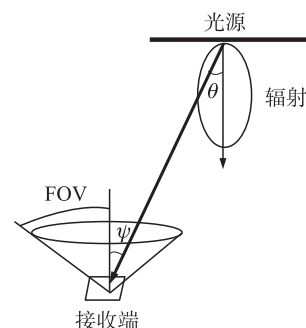


图 2 直射模型

Fig. 2 Direct model

本文中辐射模型采用最经典的朗伯辐射模型^[6-7], 其中发射端发出的光信号直接到达接收端的直射路径信道增益 H_d 可由式(1)表示.

$$H_d = \begin{cases} \frac{(n+1)A_R}{2\pi d^2} \cos^n(\theta) \cos(\psi) T_s(\psi) g(\psi), & 0 \leq \theta \leq \text{FOV}, \\ 0, & \theta \geq \text{FOV}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_R 是光检测器接收面积, θ 是辐射角, ψ 是接收角, $T_s(\psi)$ 是光滤波器增益, $g(\psi)$ 是光聚器增益, FOV 为光接收机视角(Field Of View), n 为朗伯系数, 即式(2):

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

式中, $\theta_{1/2}$ 为 LED 光源的半功率角.

直射路径中, 接收端接受强度 P_r 与发射端辐射强度 P_t 之间的关系可由式(3)表示:

$$P_r = P_t * H_d. \quad (3)$$

发送端辐射强度 P_t 为光功率, 因此上式中接收信号强度 P_r 也是光功率, 以下记作 P_{r_opt} , 在光电探测

器中首先将接收到的光功率以 γ 转换系数转变为电流^[8], 如式(4)所示:

$$i_{r_Elec} = \gamma * P_{r_Opt}, \quad (4)$$

则接收到的电功率表示为式(5):

$$P_{r_Elec} = i_{r_Elec}^2 R. \quad (5)$$

1.2.2 Phong 模型和一次反射

光信号从发射端传播到接收端途中,除了上面所述的直射情况,传播路径还包括反射部分,并且在信号传播过程中不可避免会有外界光被接收端所接收,这些都是可见光定位系统中的“噪声”. 本文中将这“噪声”简单分割为信号传播途中经过周围四面墙的反射光和外界包括自然光的一些干扰因素.

为了简化模型,本节将讨论墙面一次反射光的信道模型. 本文中的反射面模型采用光照模型中的 Phong 反射模型^[9], 这个模型不同于理想的镜面反射和漫反射模型. 完全漫反射光可以被认为光源发出的光被墙面接收,然后重新反射出来,即从一个方向射进墙面,又以各个方向均匀地向外射出,因此无论在什么位置都可以看到漫反射光. 而理想的镜面反射模型是光源发射出的光线以一个入射角射进一个光滑的平面,反射角一定是与入射角相同的,因此只有在反射方向才能看到反射光. 本文采用的 Phong 不同于上面两者,而是将完全漫反射光与镜面反射按一定的比例相结合,构成了一个与现实中的墙面反射比较为真实的模型.

图 3 给出了可见光室内定位系统的墙面一次反射模型.

如图 3 所示,光信号由光源辐射出去,墙面的反射可以看作是先把墙面作为接收端接收光信号,然后又作为发射端发射出去,因此这一反射过程可以看成把两次直射相结合. 在反射过程中,首先将墙面分割成许多的小平面,本文中称之为微元面,每个微元面的面积为 $1 \text{ dm} \times 1 \text{ dm}$. 当光信号从光源处发射出去以后,房间四周墙面的某个微元面作为接收端接收光信号,此时光照经过第一段距离的衰减后,接收信号强度为:

$$P_{\text{received}}^{(0)} = H_d * P_{\text{source}}^{(0)}, \quad (6)$$

式中, H_d 为直流信道增益, $P_{\text{source}}^{(0)}$ 是 LED 光源的强度, $P_{\text{received}}^{(0)}$ 是墙面在直射路径下的接收强度.

墙面上的微元面接收到光信号后又可以看作作为一个朗伯光源,而每个微元面的辐射强度为:

$$P_{\text{source}}^{(1)} = \rho_{\text{surface}} * P_{\text{received}}^{(0)}, \quad (7)$$

式中, ρ_{surface} 表示墙面的反射系数.

在这种模型中,入射光根据反射系数有部分被吸收,以 $\rho \cdot \alpha$ 的概率进行镜面反射,以 $\rho \cdot (1-\alpha)$ 的概率进行漫反射.

$$H_r = \frac{\rho \cdot (1-\alpha)}{\pi} \cdot \cos(\theta_2) + \frac{\rho \cdot \alpha \cdot (n+1)}{2\pi} \cdot \cos^n(\theta_2 - \psi_1). \quad (8)$$

经过墙面一次反射后接收平面上的 PD 接收到的信号强度为:

$$P_{\text{received}}^{(1)} = H_r * P_{\text{source}}^{(1)}. \quad (9)$$

1.2.3 噪声模型

本节所述噪声为接收端 PD 接收到的除去墙面反射光部分其它因素造成的干扰,主要包括热噪声和散粒噪声两个部分,具体参数如表 1 所示^[10].

热噪声的功率为:

$$\sigma_{\text{TH}}^2 = \frac{8\pi k T_e}{G} \eta A_R I_2 \beta^2 + \frac{16\pi^2 k T_e \Gamma}{g_m} \eta^2 A_R^2 I_3 \beta^3. \quad (10)$$

散粒噪声的功率为:

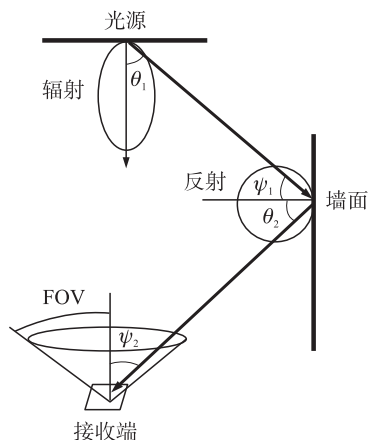


图 3 反射模型

Fig. 3 Reflection model

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2qRP_{\text{BS}}A_{\text{R}}\lambda\beta + 2qRP_{\text{B}}\beta + 2qI_{\text{DC}}\beta. \quad (11)$$

表 1 几个典型参数数值

Table 1 Several parameter values

符号	意义	数值	符号	意义	数值
q	电子电荷	$1.6 \times 10^{19} \text{ C}$	T_e	绝对温度	300 K
I_{DC}	暗电流	5 pA	A_{R}	探测器有效面积	1 dm ²
Γ	信道噪声因子	1.5	g_{m}	跨导	30 m/s
R	探测器响应度	0.53 A/W	λ	光学滤波器的带宽	400 nm
β	等效噪声带宽	400 MHz	P_{BS}	背景光谱辐照度	$5.8 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$
G	开环电压增益	10	η	光电探测器的固定电容	112 pF/cm ²
k	玻尔兹曼常数	1.38×10^{-23}			

1.3 定位方法

本节中采用定位中比较经典的三边定位法进行定位. 根据三边定位法的原理^[11-12], 给出 PD 未知位置与 4 个 LED 已知位置之间距离构成的方程组, 如式 (12) 所示.

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = d_1^2, \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 = d_2^2, \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 = d_3^2, \\ (x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2 = d_4^2, \end{cases} \quad (12)$$

式中, (x, y) 表示最终定位的 PD 的位置, (x_i, y_i) 表示第 i 个 LED 灯在天花板上的位置, d_i 表示 PD 到第 i 个 LED 之间的距离, 该距离可由上述式 (1) 中的信道增益得到.

上面所说的三边定位法是针对理想情况下准确无误地测出发送端与接收端之间距离的, 但是在现实条件下, 由于反射和噪声等不可避免的干扰存在, 测算出的收发端之间的距离往往会小于理想情况下测算出的距离, 那么利用三边定位法就无法定位到接收端的一点, 所以我们使用下列方法进行定位.

将上式 (12) 变形得到式 (13).

$$\begin{cases} (x_1-x_2)x + (y_1-y_2)y + (z_1-z_2)z = (d_{n2}^2 - d_{n1}^2 - x_2^2 + x_1^2 - y_2^2 + y_1^2 - z_2^2 + z_1^2)/2, \\ (x_1-x_3)x + (y_1-y_3)y + (z_1-z_3)z = (d_{n3}^2 - d_{n1}^2 - x_3^2 + x_1^2 - y_3^2 + y_1^2 - z_3^2 + z_1^2)/2, \\ (x_1-x_4)x + (y_1-y_4)y + (z_1-z_4)z = (d_{n4}^2 - d_{n1}^2 - x_4^2 + x_1^2 - y_4^2 + y_1^2 - z_4^2 + z_1^2)/2. \end{cases} \quad (13)$$

将上式转换为矩阵的形式进行求解, 即转换为 $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$, 则方程组的解即为 $\mathbf{X} = [x \ y \ z]^T = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$.

$$\text{在本设计中 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & z_3-z_1 \\ x_4-x_1 & y_4-y_1 & z_4-z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 3 & 3 & 0 \end{bmatrix}, \text{ 因为 } \mathbf{A} \text{ 没有逆矩阵, 则无法求解该方程组, 因此}$$

我们这边引入了广义逆这个概念. 根据最小二乘法的准则, 将目标函数定位为 $X_{\text{LS}} = \arg\min \|\mathbf{AX} - \mathbf{B}\|_2$, 解出该方程组的最小二乘解为 $\mathbf{X} = \mathbf{A}^{\dagger}\mathbf{B}$.

1.4 定位误差与克拉美罗下界的对比

克拉美罗下界 (CRB) 为任何无偏估计确定了一个下界, 也就是不可能有方差小于这个下限的无偏估计量. 本文中, 利用克拉美罗下界来表示可见光室内定位系统的性能好坏. 因此我们给出空间内各点处的克拉美罗下界, 通过推导接收平面内各点的克拉美罗下界, 可以得到在反射和噪声作为干扰条件下的定位理论最佳性能^[13-14].

由上面式 (1) 和 (3) 得到,

$$\mathbf{P}_{ni} = \frac{(n+1)A_{\text{R}}}{2\pi d_i^2} \cos^n(\theta) \cos(\psi) T_s(\psi) g(\psi) \mathbf{P}_{ti} + \mathbf{P}_{ni} = \frac{(n+1)A_{\text{R}}}{2\pi d_i^2} \left(\frac{h}{\sqrt{h^2 + d_i^2}} \right)^{n+1} T_s(\psi) g(\psi) \mathbf{P}_{ti} + \mathbf{P}_{ni} = \mathbf{G}_i(d_i) + \mathbf{P}_{ni}, \quad (14)$$

式中, $i=1, 2, 3, 4$ 表示第 i 个发射端 LED 灯的参数, 因此 $\mathbf{P}_{ni} = (P_{n1}, P_{n2}, P_{n3}, P_{n4})^T$ 表示第 i 个 LED 灯接收到的噪声功率, 而且

$$\mathbf{G}_i(d_i) \frac{(n+1)A_R}{2\pi d_i^2} \left(\frac{h}{\sqrt{h^2+d_i^2}} \right)^{n+1} T_s(\psi) g(\psi) \mathbf{P}_i = (G_1, G_2, G_3, G_4)^T, \quad (15)$$

则有

$$\frac{\partial \mathbf{G}_i(d_i)}{\partial d_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial d_1} & \frac{\partial G_1}{\partial d_2} & \frac{\partial G_1}{\partial d_3} & \frac{\partial G_1}{\partial d_4} \\ \frac{\partial G_2}{\partial d_1} & \frac{\partial G_2}{\partial d_2} & \frac{\partial G_2}{\partial d_3} & \frac{\partial G_2}{\partial d_4} \\ \frac{\partial G_3}{\partial d_1} & \frac{\partial G_3}{\partial d_2} & \frac{\partial G_3}{\partial d_3} & \frac{\partial G_3}{\partial d_4} \\ \frac{\partial G_4}{\partial d_1} & \frac{\partial G_4}{\partial d_2} & \frac{\partial G_4}{\partial d_3} & \frac{\partial G_4}{\partial d_4} \end{bmatrix} = \frac{-(n+1)(n+3)A_R T_s g h^{n+1}}{2\pi} \times \text{diag} \left[\frac{P_{i1}d_1}{(d_1^2+h^2)^{(n+5)/2}}, \frac{P_{i2}d_2}{(d_2^2+h^2)^{(n+5)/2}}, \frac{P_{i3}d_3}{(d_3^2+h^2)^{(n+5)/2}}, \frac{P_{i4}d_4}{(d_4^2+h^2)^{(n+5)/2}} \right], \quad (16)$$

且,

$$\frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial \mathbf{X}^T} = \begin{pmatrix} \frac{\partial d_1}{\partial x} & \frac{\partial d_1}{\partial y} \\ \frac{\partial d_2}{\partial x} & \frac{\partial d_2}{\partial y} \\ \frac{\partial d_3}{\partial x} & \frac{\partial d_3}{\partial y} \\ \frac{\partial d_4}{\partial x} & \frac{\partial d_4}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x-x_1}{d_1} & \frac{y-y_1}{d_1} \\ \frac{x-x_2}{d_2} & \frac{y-y_2}{d_2} \\ \frac{x-x_3}{d_3} & \frac{y-y_3}{d_3} \\ \frac{x-x_4}{d_4} & \frac{y-y_4}{d_4} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

那么,

$$\frac{\partial \mathbf{G}(d_i)}{\partial \mathbf{X}^T} = \frac{\partial \mathbf{G}(d_i)}{\partial \mathbf{d}_i} \frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial \mathbf{X}^T}. \quad (18)$$

因此克拉美罗下界的倒数可以表示为:

$$\mathbf{CRB}^{-1} = \left(\frac{\partial \mathbf{G}(d_i)}{\partial \mathbf{X}_i^T} \right)^T \mathbf{Q}^{-1} \frac{\partial \mathbf{G}(d_i)}{\partial \mathbf{X}_i^T}. \quad (19)$$

2 可见光室内定位系统的仿真与分析

2.1 定位系统的仿真

可见光室内定位系统采用 MATLAB 软件进行仿真实验. 仿真中 4 个 LED 灯的位置分别在 $A(1,1,3)$, $B(4,1,3)$, $C(1,4,3)$, $D(4,4,3)$. 利用 RSS 到达信号强度的方法进行测距, 图 4 给出了 4 个 LED 光源照明强度的分布.

2.2 反射及噪声的影响

考虑干扰中一次反射及噪声对于定位精度的影响. 为了简化模型, 本文中仅考虑四周墙面的反射, 且墙面以常用的反射系数和镜面反射指数作为仿真模型, 选取反射系数为 0.66, 以 0.66×0.4 的概率进行镜面反射, 0.66×0.6 的概率进行漫反射, 不考虑天花板和地面的反射.

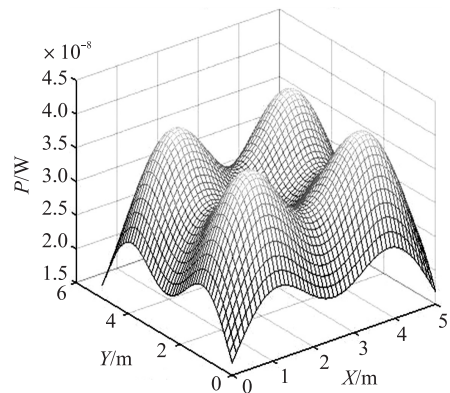


图 4 直射光在空间内的强度分布图

Fig. 4 Intensity distribution of direct light

图 5 和 6 分别给出了经过四周墙面反射后的反射光的强度分布图和空间内外界噪声的分布情况。

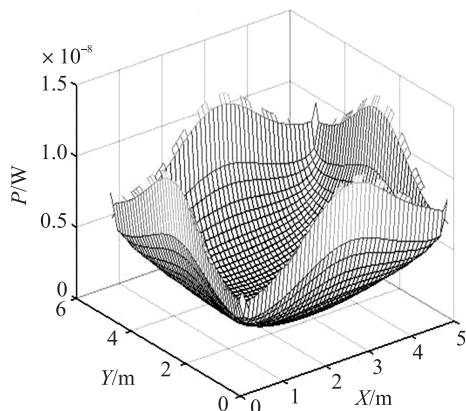


图 5 反射光在空间内的强度分布图

Fig. 5 Intensity distribution of reflected light

由图 5 和 6 可见,一次反射光和外界噪声相对于直射光的强度还是比较大的,特别是反射光的强度,因此肯定会对定位精度造成较大的影响. 下面我们对反射光及噪声对于定位误差的影响进行仿真. 本文中采用误差公式^[15](20)表达定位误差.

$$\text{error} = \sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2}, \quad (20)$$

式中, (x_m, y_m) 表示仿真中利用最小二乘法定位出的坐标.

图 7 和图 8 分别给出了仿真实间内各处由于一次反射光和噪声对定位误差造成的影响. 并且图 9 给出了把反射光和噪声作为一个干扰整体,其对于定位误差造成的影响.

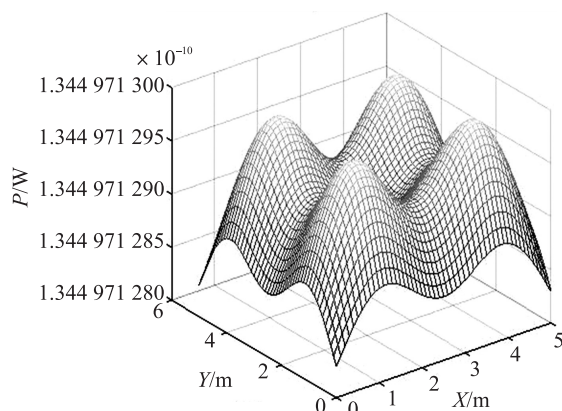


图 6 噪声在空间内的强度分布图

Fig. 6 Intensity distribution of noise

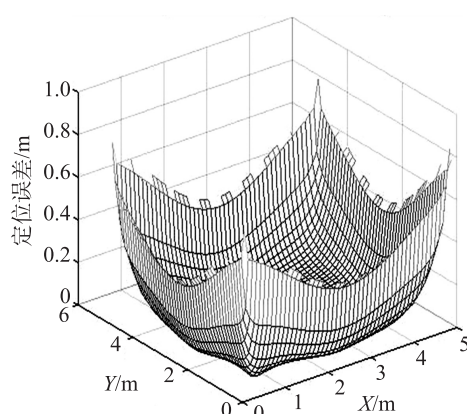


图 7 反射对定位精度的影响

Fig. 7 Positioning error caused by reflection

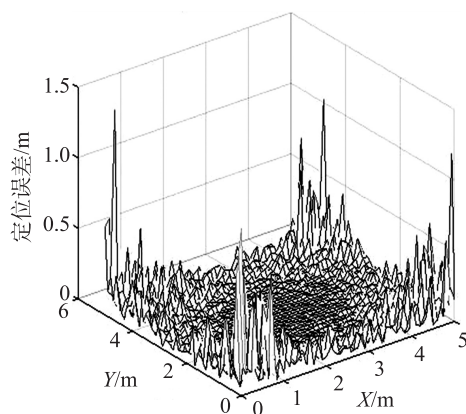


图 8 噪声对定位精度的影响

Fig. 8 Positioning error caused by noise

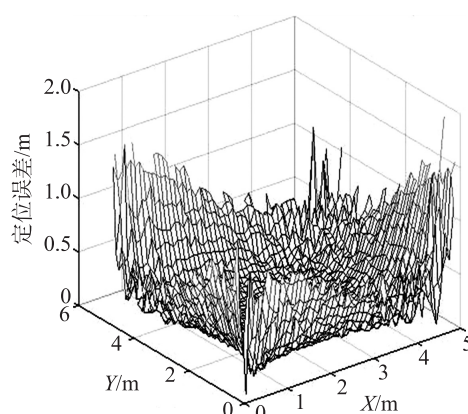


图 9 干扰整体对定位精度的影响

Fig. 9 Positioning error caused by external disturbance

2.3 克拉美罗下界及其与算法误差的对比分析

图 10 和图 11 分别给出在反射与噪声两外界干扰下的克拉美罗下界. 上面已经给出了定位性能的下界,我们将最小二乘法定位精度与这个下界进行对比. 图 12 和图 13 分别给出了反射和噪声在最小二乘法下的定位误差与反射和噪声作为观测误差下的克拉美罗下界对比图. 克拉美罗下界给出反射及噪声的平均误差为 0.015 8 m,利用最小二乘算法下的平均误差为 0.124 2 m,两者相差一个数量级,对比表明,最小二乘法运用下的定位精度相对较高.

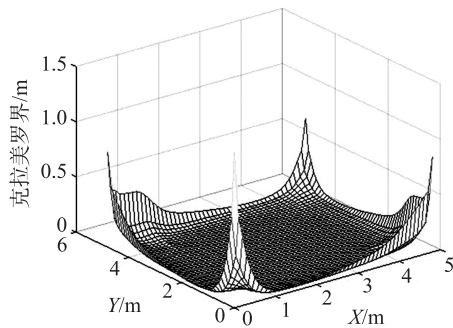


图 10 反射干扰下的克拉美罗界

Fig. 10 Cramer-Rao bound of reflection

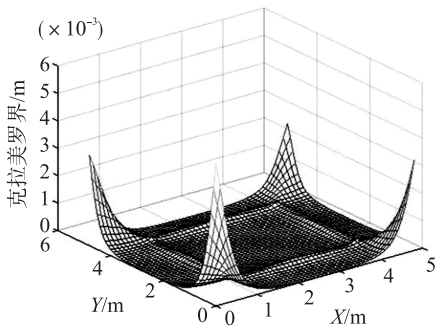


图 11 噪声干扰下的克拉美罗界

Fig. 11 Cramer-Rao bound of noise

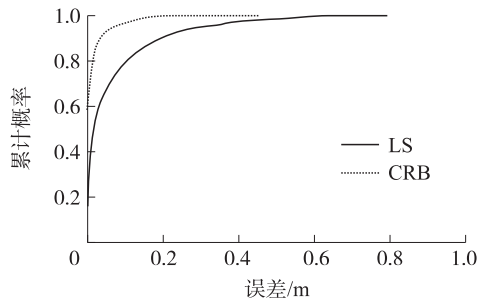


图 12 反射中定位精度与克拉美罗界对比

Fig. 12 Comparison of CRB and LS of reflection

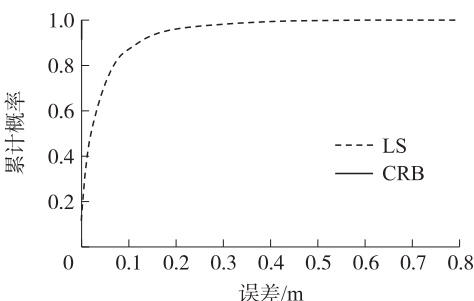


图 13 噪声中定位精度与克拉美罗界对比

Fig. 13 Comparison of CRB and LS of noise

2.4 定位误差与反射系数的关系

以上仿真是考虑了市面上较为常见的白粉墙面作为仿真对象进行一次反射,本小节中将研究墙面反射系数和光滑程度对定位误差造成的影响.图 14 给出了不同镜面反射指数(α)下,定位精度与墙面反射系数之间的关系.由图分析可得,墙面反射系数在 0.3 处,定位误差较小;定位误差会随着镜面反射指数的增加而增加,定位精度随之减小,即墙面越粗糙,在接近完全漫反射的情况下,定位误差最小,定位精度最高.

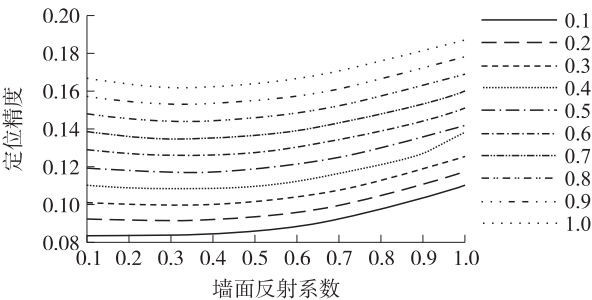


图 14 不同镜面反射指数下,定位精度与墙面反射系数之间的关系

Fig. 14 Relationship between position error and reflectance under different specular reflection coefficient

3 结论

本文对可见光室内定位系统进行了简要介绍,将在墙面上反射的复杂过程进行了简化,并采用光照模型里面比较经典的 Phong 模型进行仿真.在朗伯模型的基础上,深入讨论了含有反射光和高斯噪声等干扰的影响下接收到的信号强度.结果表明,相对于直射光的强度,墙面的反射干扰的强度还是很大并且不能忽略,因此对于干扰的研究十分必要.

文章采用接收信号强度(RSS)的方法进行测距,然后使用最小二乘法实现定位.整个系统采用使用广泛的 LED 灯进行照明,并且能实现室内定位,无需接收信号同步,因此设备简单,数据处理计算难度都不大.最后将定位精度与克拉美罗下界进行了对比,仿真结果表明精度相对较高.

然而,仿真结果可以看出最小二乘法下的定位精度与克拉美罗下界之间还是有一定的差距,定位误差的大小一直是衡量定位方法好坏的一项比较重要的标准,因此如何去减小定位误差提高定位精度的问题将成为接下来的研究重点.

[参考文献]

[1] 汪苑,林锦国.几种常用室内定位技术的探讨[J].中国仪器仪表,2011(2):54-57.

- [2] 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.
- [3] NADEEM U,HASSAN N U,PASHA M A. Indoor positioning system designs using visible LED lights:performance comparison of TDM and FDM protocols[J]. Electronics letters,2015,51(1):72-74.
- [4] 沈芮,张剑. 基于可见光通信的室内定位方法[J]. 信息工程大学学报,2014,15(1):41-45.
- [5] ZHANG W,KAVEHRAD M. A 2-D indoor localization system based on visible light LED[C]//Photonics Society Summer Topical Meeting Series,Seattle,2012:80-81.
- [6] SOO Y J,SWOOK H,CHANG S P. TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps[J]. IEEE transactions on consumer electronics,2011,57(4):1 592-1 597.
- [7] KAHN J,BARRY J. Wireless infrared communications[J]. Springer international,1994,85(2):265-298.
- [8] HYUN S K,DEOK R K,SE H Y,et al. An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique[J]. Journal of lightwave technology,2013,31(1):134-144.
- [9] 吴凤和,王金芬,尹清静,等. 基于锥角计算的 Phong 混合反射模型反射参数估算[J]. 燕山大学学报(自然科学版),2014,38(2):144-151.
- [10] ZHANG X L,DUAN J Y,FU Y G,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):4 180-4 186.
- [11] 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.
- [12] 孙佩刚,赵海,韩光洁,等. 混沌三角形定位参考点选择算法[J]. 计算机研究与发展,2007,44(12):1 987-1 995.
- [13] 沈芮,张剑,王 鼎. 基于可见光通信的室内定位算法及相应参数估计克拉美罗界[J]. 激光与光电子学进展,2014,51:1-8.
- [14] WANG T Q,SEKERCIOGLU Y A,NEILD A,et al. Position accuracy of time-of-arrival based ranging using visible light with application in indoor localization systems[J]. Journal of lightwave technology,2013,31(20):3 302-3 308.
- [15] ZHOU Z,MOHSEN K,PENG D. Indoor positioning algorithm using light-emitting diode visible light communications[J]. Optical engineering,2012,51(8):1-6.

[责任编辑:顾晓天]

(上接第 101 页)

- [27] XU M,WANG L. Time-domain reconstruction algorithms and numerical simulations for thermoacoustic tomography in various geometries[J]. IEEE Trans Biomed Eng,2003,50(9):1 086-1 099.
- [28] MORSE P,FESHBACH H. Methods of theoretical physics[M]. New York:McGraw-Hill,1953:762-814.
- [29] ARFKEN G,WEBER H. Mathematical methods for physicists[M]. San Diego:Academic Press,1995:268-356.
- [30] WANG J,ZHOU Y,SUN X,et al. Acoustic source analysis of magnetoacoustic tomography with magnetic induction for conductivity gradual-varying tissues[J]. IEEE Trans Biomed Eng,2016,63(4):758-764.
- [31] 沈宜昕,郭各朴,孙晓冬,等. 换能器指向性对磁感应磁声成像伪影的影响[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2016,16(4):1-7.
- [32] LOUPAS T,PYE S D,MCDICKENM W N. Deconvolution in medical ultrasonics:practical considerations[J]. Phys Med Biol,1989,34(11):1 691-1 700.
- [33] TAO Y,WANG M,XIA W. Semiconductor laser self-mixing micro-vibration measuring technology based on Hilbert transform[J]. Opt Comm,2016,368:12-19.

[责任编辑:顾晓天]