

DOI:10.16136/j.joel.2020.06.0453

基于朗伯模型参数估计的 VLC 室内定位优化算法

黄兆标¹, 杨国伟^{1*}, 樊冰¹, 周雪芳¹, 毕美华¹, 王天枢²

(1. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要:为实现高精度室内定位,本文设计了一种可见光通信(VLC)室内定位系统,并通过结合优化的朗伯模型、码分多址技术(CDMA)、三边定位算法而有效提升了定位精度和系统扩展性。首先,每个发光二极管(LED)的ID信息经过直接序列调制后加载到LED驱动电路上,LED发出带有自身ID信息的灯光信号。在接收端通过光电探测器(PD)接收灯光信号,并根据扩频码的正交性恢复出ID信息及接收信号强度(RSS),以此提高信道容量并增强系统抗干扰能力。然后,根据朗伯光源模型,由三边定位算法得出待定位点的定位估计坐标。为进一步提高精度,引入 k 最近邻(KNN)思想,采集适当的指纹点并由指纹点信息对每盏灯在定位估计坐标处的朗伯光源模型参数进行估计,由优化后的朗伯模型计算出精度更高的定位坐标。在 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.35\text{ m}$ 的空间区域中,进行本VLC室内定位系统的实验测试。结果表明,提出的高精度VLC室内定位系统的平均定位误差降低至 2 cm 左右,其定位精度相比于传统三边定位算法提升了 30% 。此外,该系统方案所采用基于指纹点信息优化朗伯模型参数的方法具备良好的实用扩展性,可实现广阔的应用场景。

关键词:可见光通信;室内定位;码分多址;接收信号强度;三边定位算法

中图分类号:TN929.1 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2020)06-0641-07

VLC indoor positioning optimization algorithm based on the parameters estimation of lambertian model

HUANG Zhao-biao¹, YANG Guo-wei^{1*}, FAN Bing¹, ZHOU Xue-fang¹, BI Mei-hua¹,
WANG Tian-shu²

(1. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to achieve high accurate indoor positioning, this paper designs a visible light communication (VLC) based indoor positioning system. By combining the optimized Lambertian model, code division multiple access (CDMA) technology and trilateral positioning algorithm, the positioning accuracy and system scalability are effectively improved. To begin with, the ID information of each light emitting diode (LED) with the direct spread spectrum modulation is loaded to the LED driver, and the ID bearing LED light signal is launched. At the receiver, the optical signal is detected by the photodetector (PD) and the ID information with the corresponding received signal strength (RSS) are recovered based on the orthogonality of the spread spectrum code that increases the channel capacity and enhances the anti-interference ability of the system. Then, using the Lambertian model, the location estimation coordinates of the point to be located are calculated by the traditional trilateral positioning algorithm. To further im-

* E-mail: guowei.yang@hdu.edu.cn.

收稿日期: 2019-11-05 修订日期: 2020-06-07

基金项目: 浙江省公益技术应用研究计划(2017C31067)、浙江省自然科学基金(LY17F050012)和国家自然科学基金(61405051、61501157、11574068)资助项目

prove the positioning accuracy, an optimal approach based on the k -nearest neighbor (KNN) is introduced. The RSS fingerprints of some appropriate points are collected and the Lambertian model parameters of each LED are renewed by these fingerprints. Thus, the optimized Lambertian model can be applied to obtain the higher accurate positioning coordinates. The experimental investigation of the designed VLC indoor positioning system was carried out in a space region of $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.35\text{ m}$. The results show that the average positioning error of the proposed high accurate VLC indoor positioning system is reduced to around 2 cm, and the positioning accuracy is improved by 30% as compared to the traditional trilateral positioning algorithm. The proposed scheme based the Lambertian model optimization using RSS fingerprints has excellent scalability and can be applied in broad applications.

Key words: visible light communication; indoor positioning; code division multiple access; received signal strength; trilateral positioning algorithm

1 引 言

近年来,室内位置服务倍受关注,在安防管理、机器人定位、仓库产品追踪等方面逐渐爆发出快速增长的需求。虽然全球定位系统(GPS)在室外定位的应用上已十分成熟,但由于多径衰落、电磁屏蔽、以及障碍物阻隔等因素的影响,其在室内定位应用上受到严重制约。因此,WiFi、蓝牙、射频识别(RFID)、ZigBee、超宽带(UWB)等技术相继应用于室内定位方案,但这些无线定位方案在定位精度、搭建成本、系统稳定性上无法兼顾,各自都存在一定的局限性^[1~4]。近年来,可见光通信(VLC)室内定位方案受到了广泛的关注。相比于以上无线定位方案,VLC室内定位方案主要有以下几个优点^[5]:1)不受电磁干扰,定位结果相对稳定,定位精度高;2)兼顾照明,能源利用率高;3)结合照明灯具一同部署,设备与运维成本较低;4)可采用几何测距,无需创建和更新指纹库。

VLC室内定位系统采用发光二极管(LED)阵列作为定位参考点,将每盏灯的ID信息调制到LED的光信号上^[6]。接收端采用光电探测器(PD)检测光信号并通过相应的定位算法来完成定位。在多信号源的可见光通信系统中,各个灯信号所传输的信息在时域上往往是重叠的。因此,实现VLC室内定位首先要解决的是多信源之间的符号间干扰问题。为了确保LED灯信号之间不会引起互扰并能分离这些信号,可选用的典型方案有时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)等技术^[7,8]。考虑到实际大型室内场景中LED信号源数量众多,TDMA与FDMA信道数量有限而不能广泛适用,因此本系统将采用码分多址(CDMA)技术。

目前,VLC室内定位系统常用的定位算法可以分为指纹匹配法和几何测距法。在指纹匹配法

的定位系统中,系统的定位精度依赖于采集点密度。若要实现较高的定位精度,需要建立较为完备的指纹库信息^[9~11]。指纹匹配法需要大量的人力采集信息,且设备移植性较差,在实际应用中维护成本较高。在基于几何测量的定位方法上,一般采用接收信号强度(RSS)、到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)、到达角度(AOA)等信息来对距离进行测量。其中,TOA、TDOA要求设备具有严格的同步时钟周期^[12],AOA易受信号范围限制,而RSS简单易搭建,已有诸多研究案例^[13~15]。

现有的基于VLC的室内定位系统研究多采用TDMA与FDMA技术,且在提升定位精度上缺少改进算法。因此,本文提出采用CDMA技术来搭建基于RSS三边定位技术的高精度室内定位系统。相比于传统的VLC定位系统,本系统搭建的平台无需对频谱和时隙进行分配,具有良好的扩展性,并通过对光源辐射模型参数的优化而有效提升了系统定位精度。

2 基于RSS的VLC定位技术

2.1 光信道模型

VLC定位系统采用坐标已知的LED灯阵列作为定位参考信号发射源,如图1所示。每个LED灯的光信号都携带经过CDMA调制的对应自身位置的ID信息,光电探测器通过解析接收到的混合光信号来获得每盏灯的位置和RSS值。

由于反射信号强度远小于直射信号强度,因此本文仅考虑直射信号强度,即直射链路(LOS)传输环境。LED灯的辐射模式符合朗伯(Lambertian)辐射模型^[16,17],LOS信道的增益可以表示为:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{m+1}{2\pi d^2} A \cdot \cos^m(\phi) \cdot \cos(\Psi), & 0 \leq \Psi \leq \Psi_c \\ 0, & \Psi > \Psi_c \end{cases} \quad (1)$$

式中 A 为光电探测器的有效面积; d 为发射端与接收端的直线距离; ϕ 和 Ψ 分别为相对垂直轴的辐射

角和接收角; Ψ_c 为光接收机视角 (FOV); m 为朗伯光源阶数, 表示为^[18]

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

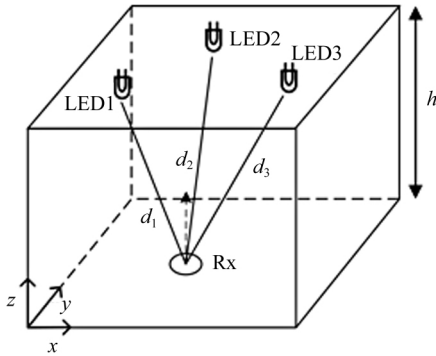


图1 3LED灯 VLC 定位系统模型

Fig. 1 3-LEDs VLC positioning system model

其中, $\varphi_{1/2}$ 为发射机半功率角。 m 与光源发光指向性有关, m 越大, 光源具有更强的指向性。当 $m=1$ 时, 可以认为 LED 灯为理想的朗伯漫射光源。若发射端初始信号强度为 P_0 , 信道噪声为 N_0 , 经过信道传输后, PD 接收到的信号强度可表示为:

$$P_r = \kappa \Lambda A P_0 \frac{(m+1) \cos^m(\phi) \cos(\Psi)}{2\pi d^2} + N_0 \quad (3)$$

式中 κ 为 PD 的光电转化率, Λ 为 PD 的内阻。当接收端和发射端都处于水平时 (即 $\cos(\Psi) = \cos(\phi)$), 并设定 LED 阵列与接收端的垂直距离 h , 则每个 LED 灯与接收端之间的距离可以表示为:

$$d_i = \left[\frac{(m+1)Gh^{m+1}}{P_{ri}} \right]^{\frac{1}{m+3}} \quad (4)$$

$$G = \frac{\kappa \Lambda A P_i}{2\pi} \quad (5)$$

式(4)即为本文所用的 LOS 环境下朗伯光源强度与距离关系模型。式中 P_{ri} 为 LED 灯在接收端处的信号强度, G 为该关系模型的初始参数, 其值与发射端初始信号强度、PD 属性相关。若采用相同的 PD, 且硬件运行稳定的情况下, 可将 G 理解为常数。在 m 和 h 已知的条件下, 通过测量一个已知点的强度即可计算 G 的数值。接收端与各个 LED 灯在接收平面上的投影距离可以表示为:

$$r_i = \sqrt{d_i^2 - h^2} \quad (6)$$

再通过三边定位算法即可求得定位点在接收平面上的坐标。

2.2 CDMA 原理

CDMA 是在扩频通信技术基础上发展而来的通

信技术, 它利用扩频码的正交性将在时域和频域重叠的混合信号分离开来实现码分多址通信。然而由于不同类型的扩频码的自相关和互相关性有所不同, 且在同样长度下的码序列数也有差异, 因此扩频码的选择显得异常重要。本文采用的是绝对正交的 Walsh 码及直接序列调制方式来实现码分多址^[15]。

利用哈达玛矩阵可生成一组 Walsh 码序列, $W_i = \{w_{i,1}, w_{i,2}, \dots, w_{i,M}\}$, $i=1, 2, \dots, M$ 为码长。由正交性可得, 该序列满足条件^[19]

$$\theta_i(\tau) = \sum_{j=1}^M w_{i,j} \cdot w_{i+\tau,j} = \begin{cases} M, \tau = 0 \\ 0, \tau \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

假设现有三个 LED 灯, 其发出的第 N 位 ID 信息分别为 $x_{1,n}, x_{2,n}, x_{3,n}$, 到达接收端的信号强度分别为 P_{r1}, P_{r2}, P_{r3} , 并采用三个互不相同的 Walsh 码序列进行扩频, 则该位信息在经过发射端调制、自由空间传播后, 到达接收端的信号表示为:

$$S_n = \begin{bmatrix} x_{1,n} P_{r1} W_a \\ x_{2,n} P_{r2} W_h \\ x_{3,n} P_{r3} W_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,n} P_{r1} W_{a,1} & \dots & x_{1,n} P_{r1} W_{a,M} \\ x_{2,n} P_{r2} W_{h,1} & \dots & x_{2,n} P_{r2} W_{h,M} \\ x_{3,n} P_{r3} W_{c,1} & \dots & x_{3,n} P_{r3} W_{c,M} \end{bmatrix} \quad (8)$$

S_n 每一行的每一位表示对应 LED 灯在接收端处的信号。在发射端同步的情况下, S_n 每一列的向量之和为接收端接收到的混合信号的幅值。接收到的混合信号再通过解扩步骤, 即

$$Y = S_n \cdot W_i^T = \begin{bmatrix} x_{1,n} P_{r1} W_a \\ x_{2,n} P_{r2} W_h \\ x_{3,n} P_{r3} W_c \end{bmatrix} \cdot W_i^T \quad (9)$$

结合(7)式和(9)式可知, 当 W_i 与其中一盏 LED 灯所用扩频码序列相同时, 所得 Y 的非零行即为该灯解扩后信息, 在理想情况下其值为 $x_{1,n} P_{ri} M$ 。解扩后信息通过抽样判决, 即可得到每路光信号对应的信号强度 P_{ri} 和 ID 信息, 再通过三边定位算法即可求得定位点坐标。

2.3 三边定位算法

接收端利用 CDMA 技术和朗伯光源模型, 分离光信号并计算出定位点与各 LED 灯之间距离。将 LED 灯所处位置投影到接收端平面 (x_i, y_i) , 则可通过三边定位算法确定接收端位置 (x, y) 。通过求解

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (10)$$

即可得到接收端坐标 (x, y) 。然而实际系统测试中这三个距离圆并不会交于一点, 而是相交于一块重叠区域, 只存在近似解。在这种情况下, 可以采用最

大似然估计法、最小二乘法进行估计。本文采用的是三角形质心法^[20],即通过求解三个圆相互重叠的区域的三角形各顶点的坐标,并取其质心作为接收端坐标。

3 基于朗伯模型参数估计的优化算法

LED 朗伯光源模型中主要参数为朗伯光源阶数 m 和初始参数 G 。其中, m 与朗伯光源发光指向性有关,查询所使用的 LED 灯的产品手册可获知其值。然而,在实际定位过程中可发现光源的发光指向性与产品手册数值有差异。首先由于 LED 设备内部每个 LED 灯珠的出厂差异,光源的发光指向性在不同方向上并不相同。其次,无法保证 LED 灯的朝向在布局过程中保持绝对水平。因而,为了提高定位精度,可以对 LED 灯在不同区域的朗伯光源阶数进行估计^[17],但 LED 灯在每一个方向上的朗伯阶数并不相同, m 的估计过于繁琐,不适用于大型场景,因此考虑对初始参数进行分析。

由于仅考虑了 LOS 环境,LED 灯并不严格满足朗伯模型和朗伯光源阶数各方向不一致等因素的影响,实际中不同参考点得出的初始参数 G 有所不同,而 G 的数值将直接影响三边定位的精度^[21]。为了有效、简便地提高三边定位精度,本文提出一种基于朗伯模型参数估计的方法来优化定位结果。下面结合图 2 来阐述本文提出的优化算法。

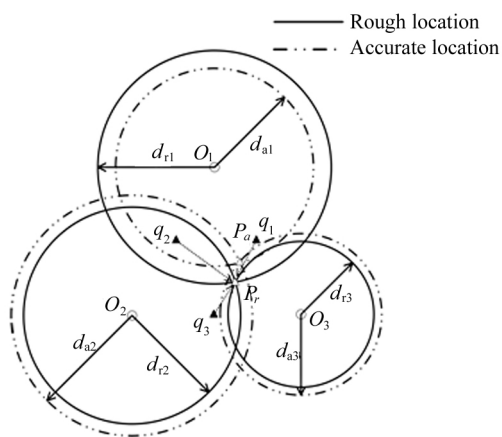


图 2 基于模型参数估计的优化算法示意图
Fig. 2 Schematic diagram of trilateral positioning algorithm based on model optimization

首先,建立每盏 LED 灯的朗伯光源模型,记为初始朗伯模型。然后在 LED 灯覆盖的区域中选取 n 个指纹点 $q_i = (x_i, y_i)$ 。再根据 CDMA 技术,在每个指纹点的 RSS 信息中分离出所有 LED 灯的 RSS

值,并由此得到该指纹点处所有 LED 灯的朗伯模型初始参数的集合 G ,记为 $(G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{ik})$, k 为 LED 灯的总数。

然后对待定位点,先利用初始朗伯模型,通过三边定位方法得出位置作为粗定位坐标 $P_r = (x_j, y_j)$ 。由于不同参考点得出的初始参数 G 有所不同,初始模型所采用的 G 并不能十分精确地描述出 P_r 附近处 LED 灯光强度与距离的关系,因此引入 K 最近邻 (KNN) 思想,选取粗定位坐标 P_r 附近 K 个指纹点 q_i ,将这 K 个指纹点的 G 的加权均值结果作为待测点的精确 G ,加权算式为

$$\begin{cases} d_i = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \\ w_i = \frac{1}{d_i} \\ G_j = \sum_{i=1}^K w_i G_i \end{cases} \quad (11)$$

将精确 G 代入对应的 LED 灯模型中,则有相应 LED 灯在该点附近区域的精确朗伯模型。利用精确朗伯模型,再经过三边定位算法即可得出定位点精确坐标。计算过程中朗伯光源模型采用的朗伯阶数与 LED 产品参数保持一致。

即先通过初始模型来获取待定位点的粗坐标 P_r ,再由指纹点估算出 P_r 处的精确 G 并得出精确朗伯模型,再由精确朗伯模型计算出精确坐标 P_a 。该算法不依赖于朗伯光源阶数 m 的准确性,采取少量的指纹点即可有效提升定位精度。

4 实验设计及结果分析

4.1 实验设计

本文设计的 VLC 室内定位系统功能框架如图 3 所示。首先在发射端,每盏 LED 灯 ID 信息会通过对应的 Walsh 码序列进行扩频处理,然后将扩频后的信息烧录到乐鑫 ESP32 中。ESP32 具有足够高的晶振,能保证多个输出信号的同步性和稳定性,以此避免信号不同步和时隙不稳定对 CDMA 解调造成干扰。在接收端,光信号经过传输衰减后,通过 PD 将光信号转化为电信号。再通过采样、解扩和抽样判决步骤,恢复出 ID 信息并得到对应的 RSS 值。再由本文提出的定位算法得出定位点坐标。

根据图 3 设计,本文搭建了如图 4 所示的 VLC 室内定位系统,以对整个定位系统方案进行评估。三盏 LED 灯固定在高度为 1.35 m 的铝架上,其坐

标分别为 $(0,0)$ 、 $(72\text{ cm},0)$ 、 $(36\text{ cm},56\text{ cm})$,并在 ESP32 的驱动下周期性发射带有完整 ID 信息的光信号。利用示波器采集和保存 PD 信号,信号处理步骤在 MATLAB 中完成。图 5 展示了示波器采集的

部分信号波形,分析接收波形可知噪声大约为 20 mV ,每盏灯的最大值约为 160 mV 。表 1 为所搭建实验系统的关键参数。实验采用的 LED 灯光束角为 100° ,计算可得光源朗伯阶数 m 为 1.5。

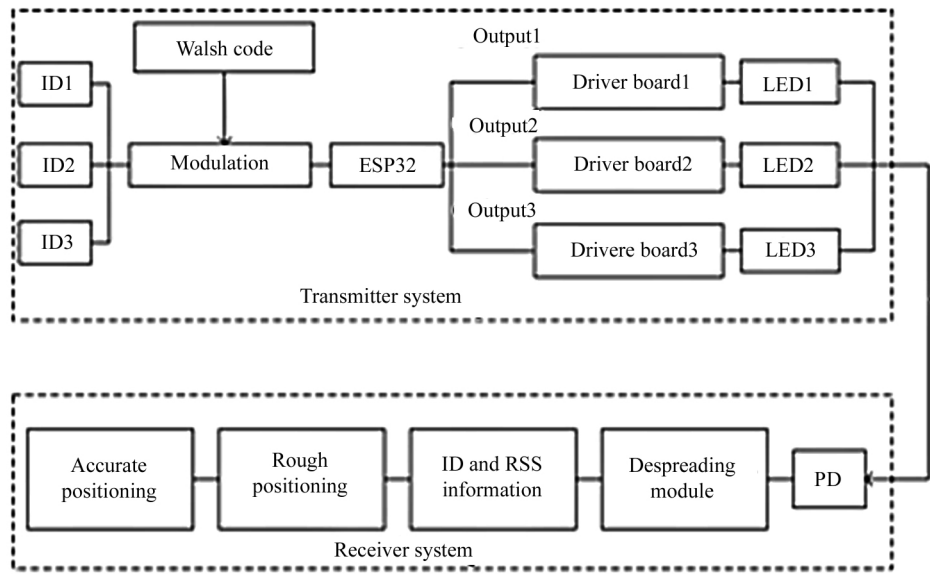


图 3 VLC 定位系统功能框架图
Fig. 3 Structure diagram of VLC positioning system

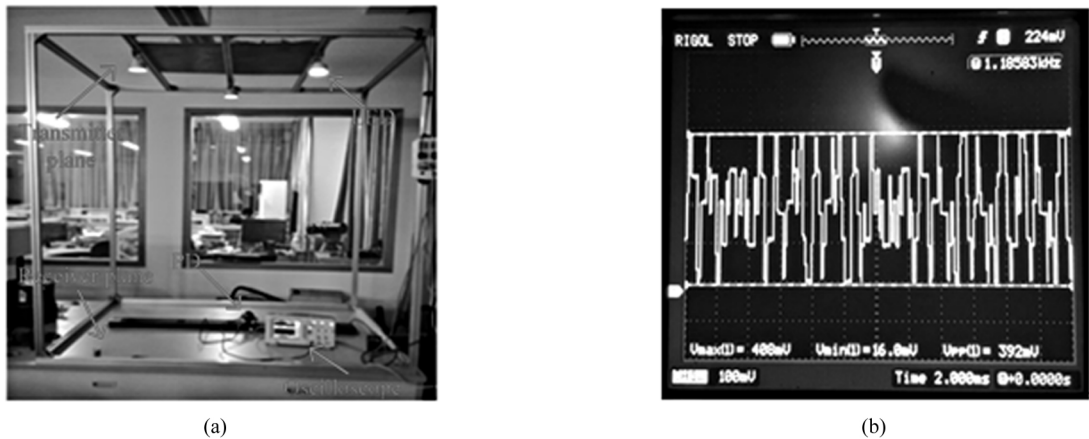


图 4 VLC 实验系统测试平台:(a) VLC 实验系统测试平台;(b) 示波器采样混合信号波形
Fig. 4 Test Platform for VLC Experimental System:(a) Actual system composition;(b) Mixed signal waveform in Oscilloscope

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters	
Parameters	Value
Indoor space unit size $(L \times W \times H)/\text{m}$	$1 \times 1 \times 1.35$
Power of each LED bulb/ w	5.5
LED $(0,0,0)$ LED $2(0,72,0)$ LED $3(36,5,0)$	
Height of the receiver h/m	1.35
Oscilloscope sampling frequency/ kHz	50
LED frequency/ kHz	5
LED beam angle/ $^\circ$	100
Gain of photodetector/ dB	60
Noise of Receiving Waveform/ mV	20

4.2 实验结果及分析

为了证明本文提出的优化算法不依赖朗伯阶数准确性并能有效提高定位精度,实验对比了不同朗伯阶数下传统三边定位算法和优化算法的定位结果。在进行实验时,保持环境处于弱光状态并保持 LED 灯的水平。首先在定位测试区域设置 33 个点作为参考点,同时采集 8 个指纹点用于优化算法。当 $m=1$ (即认为 LED 灯为一阶朗伯光源)时,传统三边定位算法和本文提出的高精度算法的定位结果分

布如图 5 所示。此时,传统三边定位算法得到的定位坐标与参考点坐标存在较大的偏离,其平均定位误差为 4.82 cm。而本文优化算法的定位位置与参考点较为接近,平均定位误差为 1.90 cm。在朗伯阶数 $m=1.5$ 时进行定位,传统算法的定位误差为 2.65 cm,经优化后平均定位误差减小至 1.80 cm,结果如图 6 所示。图 7 展示了图 5 和图 6 中各个测试点的误差。

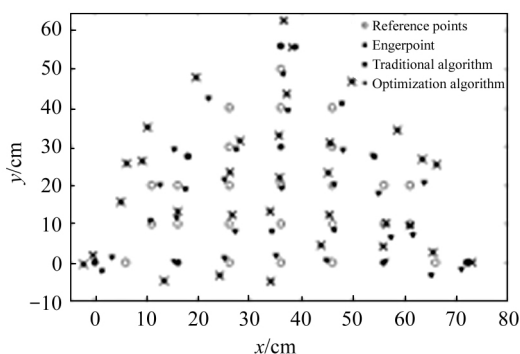


图 5 $m=1$,定位分布图

Fig. 5 $m=1$, Location map

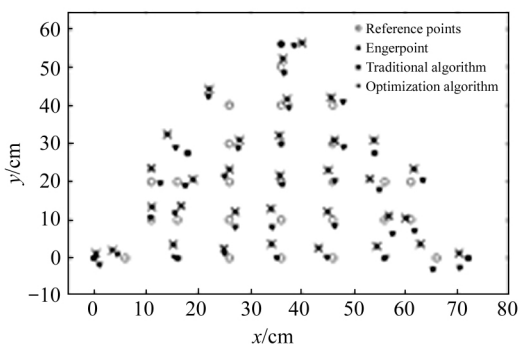


图 6 $m=1.5$,定位分布图

Fig. 6 $m=1.5$, Location map

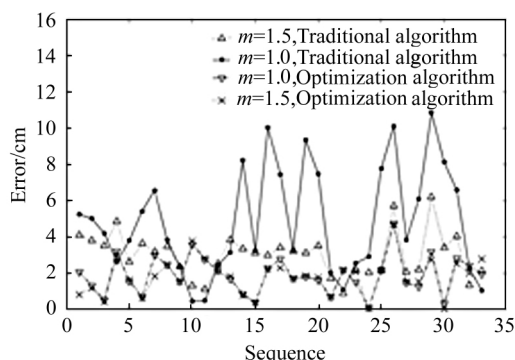


图 7 定位结果误差图

Fig. 7 Error map of location result

根据实际测试,本实验所采用的 LED 灯的朗伯阶数更加接近 $m=1.5$ 。结合图 5 和图 6 可知,朗伯

光源阶数 m 越准确,传统三边定位算法的结果更加精确,但本文优化算法结果并未显著变化。事实上,由于实际应用中 LED 灯在不同方向上的朗伯光源阶数并不一致,若要对进行优化调整而提高精度,则需要对每盏灯各个方向进行测量,从而导致系统建设与维护十分麻烦。而本文提出的优化算法并不依赖于 m 的准确度,测量少量指纹点后即可有效提高定位系统性能,实用性较强。

5 结 论

本文所搭建的 VLC 室内定位系统采用 CDMA 技术,解决了多盏 LED 灯码间干扰问题,提高了系统的抗噪声能力,并提出一种基于朗伯模型参数估计的定位优化算法。通过三边定位算法得出待定位点的定位估计坐标,并采集适当的指纹点,由指纹点信息对定位估计坐标处的光源辐射模型的参数进行估计,再由所估计的辐射模型计算出精确坐标。本文提出的优化定位算法能有效地提升系统定位精度,使得在大型室内空间中部署 LED 阵列来实现 VLC 高精度定位系统有更好的可实施性和可行性。通过大量实验测试,本文所实现的优化系统能够将平均定位误差降低至 2 cm 左右。相比于传统 VLC 三边定位系统本系统定位精度提升了 30%,达到较高的 VLC 定位精度,具备良好的实际应用价值。

参考文献:

- [1] YANG Jin-sheng, LIU Bin. WLAN fingerprint positioning database construction algorithm based on improved dBN [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2018, 29(9): 996-1002.
- [2] 杨晋生,刘斌. 基于改进的 DBN 的 WLAN 指纹定位数据库构建算法[J]. 光电子·激光, 2018, 29(9): 996-1002.
- [3] WU Xu-dong, SHEN Rou-fei, FU Luo-yi, et al. iBILL: Using iBeacon and inertial sensors for accurate indoor localization in large open areas[J]. IEEE Access, 2017, 5: 14589-14599.
- [4] Abdulrahman A, Abdulmalik A S, Mansour A, et al. Ultra wideband indoor positioning technologies: analysis and recent advances[J]. Sensors, 2016, 16(5): 707-1-36.
- [5] LIU H, Darabi H, Banerjee P, et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C (Applications and Reviews), 2007, 37(6): 1067-1080.
- [6] Keskin M F, Sezer A D, Gezici S. Localization via visible light systems[J]. Proc. of the IEEE, 2018, 106(6): 1063-

- 1088.
- [6] Trong-Hop D, Myungsik Y. An in-depth survey of visible light communication based positioning systems[J]. Sensors, 2016, **16**(5): 678-1-40.
- [7] ZHAO Chu-han, ZHANG Hong-ming, SONG Jian. Fingerprint-based indoor visible light localization method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, **45**(8): 202-208.
赵楚韩, 张洪明, 宋健. 基于指纹的室内可见光定位方法[J]. 中国激光, 2018, **45**(8): 202-208.
- [8] Elkarim M A, Mohammed N A, Aly M H. Exploring the performance of indoor localization systems based on VLC-RSSI, including the effect of NLOS components using two light-emitting diode lighting systems[J]. Optical Engineering, 2015, **54**(10): 105110-1-9.
- [9] Van M T, Tuan N V, Son T T, et al. Weighted k-nearest neighbour model for indoor VLC positioning[J]. IET Communications, 2017, **11**(6): 864-871.
- [10] JIANG Jia-jia, GUAN Wei-peng, CHEN Zhou-nan, et al. Indoor high-precision three-dimensional positioning algorithm based on visible light communication and fingerprinting using K-means and random forest[J]. Optical Engineering, 2019, **58**(1): 016102-1-16.
- [11] Irshad M, LIU Wen-yuan, WANG Lin, et al. Cogent machine learning algorithm for indoor and underwater localization using visible light spectrum[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 1-6.
- [12] Jung S Y, Hann S, Park C S. TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps[J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, **57**(4): 1592-1597.
- [13] LIN Bang-jiang, TANG Xuan, Ghassemloooy Z, et al. Experimental demonstration of an indoor VLC positioning system based on OFDMA[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, **9**(2): 1-9.
- [14] TANG Xiao-feng, YANG Guo-wei, FAN Bing, et al. Indoor positioning system of visible light communication based on K-means clustering algorithm[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2019, **32**(5): 24-31.
汤晓峰, 杨国伟, 樊冰, 等. 基于 K-means 聚类的可见光通信室内定位系统的研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2019, **32**(5): 24-31.
- [15] GUAN Wei-peng, WU Yu-xiang, WEN Shang-sheng, et al. Research on indoor positioning technology of visible light communication based on CDMA modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, **36**(11): 73-81.
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): 73-81.
- [16] Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communications[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, **85**(2): 265-298.
- [17] CHENG Shun-li, YAN Kun, LI Zhuo, et al. Lambertian model parameter optimization of visible light indoor positioning technology[J]. Study on Optical Communications, 2018, **209**(5): 73-77.
成顺利, 闫坤, 李卓, 等. 朗伯模型参数优化的可见光室内定位技术[J]. 光通信研究, 2018, **209**(5): 73-77.
- [18] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. IEEE transactions on Consumer Electronics, 2004, **50**(1): 100-107.
- [19] QIAN Hua, DAI Sheng-chen, ZHAO Shuang, et al. A robust CDMA VLC system against front-end nonlinearity[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, **7**(5): 1-9.
- [20] WANG Xu-dong, HU Qing-qing, WU Nan. High accuracy indoor visible light positioning algorithm[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, **26**(5): 862-868.
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): 862-868.
- [21] CHEN Shao-qin, YANG Guo-wei, LI Zhi-peng. Phase compensation for crosstalk distribution distortion of multiple vortex beams[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2019, **32**(2): 64-68.
陈少钦, 杨国伟, 李志鹏. 多束涡旋光波串扰分布失真的相位补偿研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2019, **32**(2): 64-68.

作者简介:

杨国伟 (1984—), 博士, 副教授, 主要研究方向为自由空间光通信、室内定位。