

基于 K-means 聚类的可见光通信室内定位系统的研究

汤晓峰^{1,2} 杨国伟¹ 樊冰¹ 吴立群² 毕美华¹ 黄兆标¹

(1. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要 本文设计并搭建了一种定位精度高、系统简单的可见光通信室内定位系统. 在发射端使用频分多址技术编码光标标识码, 以发光二极管灯具为信号源发射定位信息. 在接收端对接收到的混合光信号进行傅里叶变换, 将基于频分多址编码的光标识码在频域上进行分离, 从而获取各个发光二极管的光标识码和光强数值. 同时, 通过多次光信号数据测量, 进行 K 均值聚类迭代选出最优解, 可以消除三边定位算法的突兀点和方程无解的问题, 以此得到高精度的定位坐标. 通过理论推导和实验测量, 本系统的定位误差为 3 ± 3 cm. 本文所提出的室内定位方案系统简单可靠、定位精度高, 使可见光通信室内定位技术进一步接近市场应用.

关键词 可见光通信; 室内定位; 频分复用; K 均值聚类; 三边定位算法

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

0 引言

随着物联网技术和智慧城市发展的需求, 低成本、高精度、智能化的室内定位系统已经成为众多高校和企业的研究热点^[1-3]. 由于房屋墙壁等对无线电信号的阻隔, 室外常用的全球定位系统(Global Positioning System, GPS) 应用在室内环境时会出现信息丢失、定位精度差等问题, 因此需要构建智能交互的室内定位系统以满足室内定位需求^[4]. 为此, 研究人员提出了无线电定位和可见光通信(Visible Light Communication, VLC) 定位两大类室内定位方案^[5,6]. 无线电定位是在室内布置 WiFi^[7]、低功耗蓝牙^[6](Bluetooth Low Energy, BLE) 等无线电信号发射端, 接收端检测信号某些特征参数的定位方案, 但是无线电信号可用频带较窄、电磁干扰大, 限制了其定位精度、稳定性以及应用场景. VLC 定位是在发光二极管(Light Emitting Diode, LED) 灯光上加载标识码(Identification, ID) 等编码信号^[9], 接收端获取光 ID 和光强信息的定位方案, 具有无需频谱许可、高速率、绿色环保、抗电磁干扰能力强等特点, 因此基于 VLC 室内定位技术已经成为高精度、高可靠室内定位的主要研究方向之一^[10-13].

虽然借助 VLC 实现室内定位方案具有架构简单、信号源分布广泛、可操作性强的优点, 但要实现高精度的定位要求, 仍需要解决光 ID 的编码^[14] 和定位算法的优化问题^[15], 以及进一步完善发射端和接收端的信号调制解调与定位实现的模块设计. 关伟鹏等^[16] 提出基于码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA) 技术的 VLC 定位方案, 利用 CDMA 调制对每个 LED 传输信号进行扩频处理, 整体方案较简单, 在提升定位精度的同时增大信道传输的数据量, 但该方案信道带宽大对发射端和接收端的时间同步要求高. Sithon 等^[17] 详细介绍了三边定位的算法和严格的推导公式, 可是没有考虑实际处理中出现定位圆不相交、方程组无解等降低算法效率的情况. 在系统发射端和接收端模块的设计方面, Yang^[18] 等提出通过单个发射机和复合多角度接收来构架 3-D 定位系统, 接收端获取光信号的角度和光强增益, 结合 3-D 定位算法来定位, 系统精度较高, 但设计过于复杂、成本较高. 所以简化 VLC 系统的复杂度, 也是推进 VLC 定位系统研究和应用的重要环节.

收稿日期: 2019-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775154); 浙江省自然科学基金(LY17F050012); 浙江省公益技术应用研究项目(2017C31067); 浙江省自然科学基金重点项目(LZ15E050004); 杭州电子科技大学研究生科研创新基金项目(ZX170603301023) 资助

通信作者: 杨国伟, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 无线光通信、多源定位、无线传感网络等, E-mail: guowei.yang@hdu.edu.cn.

针对上述问题,本文提出频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)的光 ID 编码方案^[19],同时在三边定位算法基础上加入 K 均值(K-means) 聚类的思想来提升定位精度,最后基于上述方案设计并搭建一套 VLC 的室内定位实验系统,验证方案的可行性。

1 可见光通信的室内定位系统原理分析

1.1 频分多址的 VLC 室内定位方案的原理分析

VLC 的 FDMA 方案是将 LED 光信道带宽划分为子频带分配给若干 LED 光源作为光 ID 码,在接收端对频率进行识别并提取信道中的光强信息,再结合三边定位算法输出相对 LED 定点坐标的相对位置. 各个子频带在光信道中传播,时域上相互叠加,频域上相互分离,因此在接收端使用傅里叶变换将混合光信号转化为频域图进行子频带的分离和提取. 当子载波数为 N 时,将频率波段划分为 N 等分,频段可以表示为 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$. 理论上可见光具有 405 THz 带宽,但考虑人员的余晖效应和光电传感器的采样频率,LED 光源数据带宽一般设置在 200 Hz 到 100 MHz 之间. 低于 200 Hz,LED 光源会出现明显的闪烁,影响正常的照明,而频率太高,接收端的数据采样和频率分离效果会变差. 如图 1 是本文提出的 VLC 定位系统框架图,包含光 ID 和初始光强数值的编码信号通过驱动赋值 LED 光源,LED 照明灯光建立了光载波信道. 在接收平面任何位置至少可以接收 3 个光信号,在获取混合光信号后进行傅里叶变换分离出各个光 ID 并获得其对应的光强数值,从而结合定位算法输出定位坐标。

本方案中的接收端直接探测光信号强度,获取的混合光信号转化为电信号. 在时域上是周期性的离散方波信号 $X(k)$,对 $X(k)$ 进行傅里叶变换得到频域上的函数 $x(j)$,然后对 $x(j)$ 进行频谱分析得到各个不同频段和各自的幅值,对应着各个 LED 的光 ID 和光强数值^[20]. 假设光电探测器获取的离散信号为 $X(k)$,经过傅里叶变换得到 $x(j)$,分别表示为

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)}, \quad (1)$$

$$X(j) = (1/N) \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-j(k-1)}. \quad (2)$$

混合光信号是几个固定频率方波信号在时域上叠加的结果,所以通过傅里叶变换转化为频域来分析. 事实上,方波可以由一系列正弦波组合获得,用傅里叶级数表示如

$$x(t) = \frac{4}{\pi} (\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega_0 t + \dots), \quad (3)$$

式中 $x(t)$ 是方波信号, $\sin \omega_0 t$ 是基波分量。

方波和基波的频率都是 ω_0 ,所以傅里叶变换后基波的频率与方波的频率保持一致,且方波的幅值与基波的幅值之比是 $4/\pi$. 所以在频谱中基波的频率就是方波的频率,再利用基波的幅值推算出方波的幅值,即可获取光 ID 和光强数值两种重要定位参数。

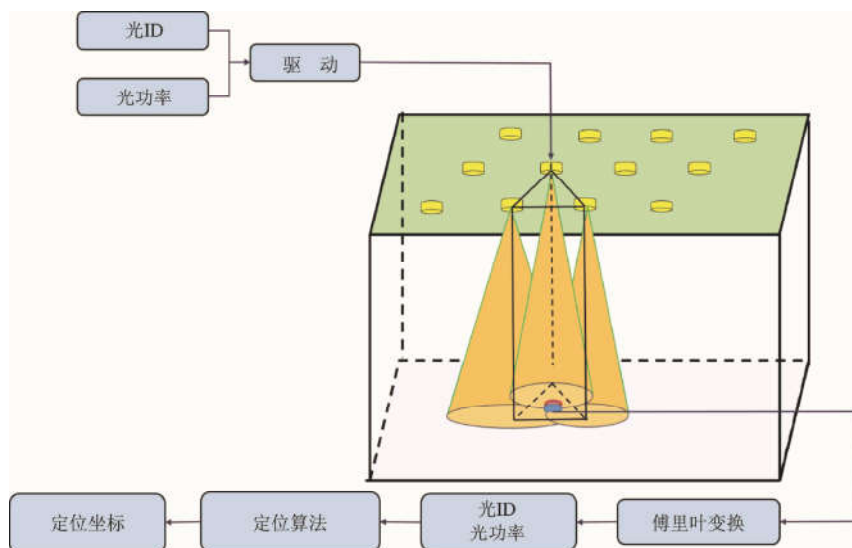


图 1 VLC 室内定位系统框架图

1.2 LED 光源的光强分布模型

LED 光源在空间上的光强分布会影响 LED 数量配置和定位圆的计算,因此本文建立 LED 光强分布模型,明确光强分布的影响参数,并通过实验数据绘制光强和距离关系图(P-L 关系曲线),进一步消除环境光影响,提高定位精度.

由于白光 LED 是非相干光源,接收平面的光强数值是每个 LED 在该点处的光强数值的线性叠加,图 2 给出了多个 LED 的光强空间分布示意图. 该点处接收到第 i 个 LED 的光强数值可以表示为

$$P_{ei} = C_{opt} / \gamma L_{ei}^2, \quad (4)$$

式(4)中 P_{ei} 是在光信号灯下待测位置点获取的 LED 灯的光强值, L_{ei} 是待测位置点到 LED 灯之间的直线距离, γ 是背景光影响因子, C_{opt} 是传感器的有效感光面积和接受角度的函数,其表达式

$$C_{opt} = R(\varphi) A_{eff}(\varphi), \quad (5)$$

式(5)中 $R(\varphi)$ 是传感器的接受角度 φ 的影响函数, $A_{eff}(\varphi)$ 是传感器的感光面积的函数. 由于本文所采用的光电探测器感光面积很小,接收角度变化对接收端截取的光强数值的影响很小,因此本文将 C_{opt} 值设为常数,方便接收端的测量,降低系统的复杂程度.

通过获取光强数值 P_{ei} 可以借助式(4)得到 LED 灯到探测器之间的直线距离 L_{ei} , 在已知垂直距离 h 的前提下,基于公式(4)计算出三边定位中的定位圆半径 d_{ei} 值

$$L_{ei} = \sqrt{C_{opt} / \gamma P_{ei}}, \quad (6)$$

$$d_{ei} = \sqrt{L_{ei}^2 - h^2}, \quad (7)$$

式中 d_{ei} 是第 i 个定位圆的半径, h 是 LED 灯到光电探测器的垂直距离.

图 3 是 LED 光源的光强空间分布模型实验图,以 LED 光源为中心在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向上分别测试的距离和光强的关系图. 测量为了消除 LED 初始光强的不同对光强和距离关系(P-L 关系曲线)的影响,对光强数值进行归一化处理. 从图 3 可见,在 LED 光源正下方光强最强,离开中心后光强呈现抛物线下降. 不同方位角的 P-L 曲线基本相同但存在一定差异,是引起最终的定位误差的原因之一. 为了消除背景光和 C_{opt} 固定数值带来的影响,本文测量了有无背景光下的 P-L 曲线,见图 4. 发现背景光会使无背景光下测得 P-L 曲线整体向上移动,分析发现光电探测器会将背景光叠加在 LED 光源的光强中,所以在公式(4)中加入背景光影响因子 γ ,其数值在附近 LED 灯光影响应设置为 1.1 到 1.2.

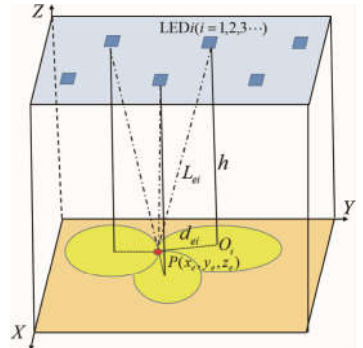


图 2 LED 光源的光强空间分布示意图

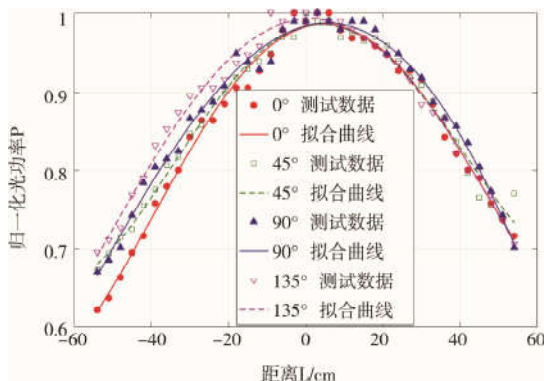


图 3 LED 光源光强分布模型

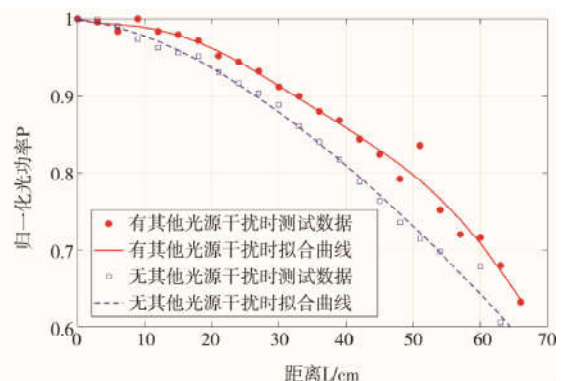


图 4 有无背景光的 P-L 关系曲线

1.3 基于 K-means 聚类的三边定位算法

本文的定位算法是通过分离出的光 ID 锁定所在局域位置,然后通过光强数值 P 找出 P-L 关系曲线对应定位圆的半径数值 L ,最后通过三边定位算法得到坐标位置 F . 但传统的三边定位算法是利用三个两两相交的定位圆计算定位坐标,会出现定位圆无法相交、方程无解和定位误差较大等问题,因此本文提出基于 K-means 聚类的三边定位算法. 通过在同一参考点检测多组数值,建立估测定位组,对组内的定位坐标进行

聚类得到质心点,然后迭代多次直至质心点不变,选出定位坐标.如图 5 所示基于 K-means 聚类的三边定位算法的示意图.

传统三边定位算法的定位方程式如(8)所示

$$\begin{cases} (x_e^k - x_1)^2 + (y_e^k - y_1)^2 + (z_e^k - z_1)^2 = (d_{e1}^1)^2, \\ (x_e^k - x_2)^2 + (y_e^k - y_2)^2 + (z_e^k - z_2)^2 = (d_{e2}^1)^2, \\ (x_e^k - x_3)^2 + (y_e^k - y_3)^2 + (z_e^k - z_3)^2 = (d_{e3}^1)^2, \end{cases} \quad (8)$$

式中 $(x_q, y_q, z_q)(q = 1, 2, 3)$ 分别是对应的 LED 灯源 O_q 在绝对坐标系下的位置坐标,并在 $z_e^k = z_1 = z_2 = z_3$ 条件下可以将公式(8)转化为矩阵

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (9)$$

式中 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{X} 向量数值分别是

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_e^k \\ y_e^k \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} ((d_{e1}^1)^2 - (d_{e2}^1)^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2)/2 \\ ((d_{e1}^1)^2 - (d_{e3}^1)^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2)/2 \end{bmatrix},$$

式(9)可以被求解为

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}, \quad (10)$$

同时,光强数值被光电探测器检测后转化为电压值,所以接收到 LED 光源的电压表示为

$$V_r = V_0 R\left(\frac{r}{h}\right) / h^2, \quad (11)$$

式中 V_r 是电压数值, V_0 是原始电压数值, $R\left(\frac{r}{h}\right)$ 是不仅与 LED 本身的发射特性有关,还与 LED 前散射板的反射特性有关,因此需要对实际的 LED 光源进行测量并选取合适的拟合函数形式 P-L 关系曲线,本实验平台中光源分布函数的拟合形式可以表示式(12)为

$$R\left(\frac{r}{h}\right) = \exp\left(c\left(\frac{r}{h}\right)^2\right), \quad (12)$$

所以,三个电压数值可以通过式(11)推导出

$$\begin{cases} V_{r1} = V_0 \exp(c(r_1^2)/h^2), \\ V_{r2} = V_0 \exp(c(r_2^2)/h^2), \\ V_{r3} = V_0 \exp(c(r_3^2)/h^2), \end{cases} \quad (13)$$

式中 r_1, r_2, r_3 分别是接收端到发射平面上的三盏 LED 灯 $Tx1, Tx2, Tx3$ 的水平距离, V_{r1}, V_{r2}, V_{r3} 分别是接收端接收到 $Tx1, Tx2, Tx3$ 的电压输出. 本文三盏 LED 灯组成的正三角形布置,建立坐标系,假设 $Tx1, Tx2, Tx3$ 的坐标分别为 $(0, 0, z_1), (L, 0, z_1)$ 和 $(\frac{1}{2}L, \frac{\sqrt{3}}{2}L, z_1)$, 则 r_1, r_2, r_3 可以表示为

$$\begin{cases} r_1^2 = x_e^2 + y_e^2, \\ r_2^2 = (x_e - L)^2 + y_e^2, \\ r_3^2 = (x_e - \frac{1}{2}L)^2 + (y_e - \frac{\sqrt{3}}{2}L)^2. \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可知, r_1, r_2, r_3 只与 x_e 和 y_e 两个变量有关. 设 $H = h^2$, 可得

$$\begin{cases} x_e^2 + y_e^2 = \frac{1}{c}(V'_{r1} + \ln H)H, \\ (x_e - L)^2 + y_e^2 = \frac{1}{c}(V'_{r2} + \ln H)H, \\ (x_e - \frac{1}{2}L)^2 + (y_e - \frac{\sqrt{3}}{2}L)^2 = \frac{1}{c}(V'_{r3} + \ln H)H, \end{cases} \quad (15)$$

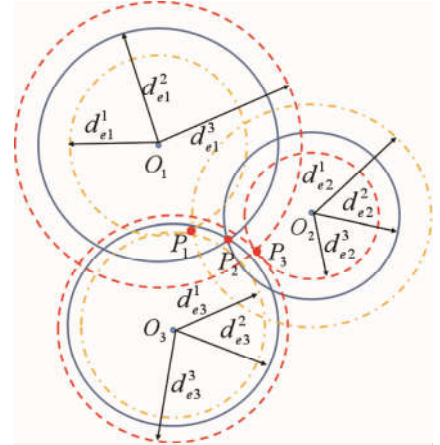


图 5 基于 K-means 聚类的三边定位算法

式中 $V'_{ri} = \ln(V_{ri}/V_0)$, ($i=1,2,3$). 通过求解方程(15), 即可获得定位三维坐标

$$\begin{cases} x_e = \frac{1}{2} \left(\frac{V'_{r1} - V'_{r2}}{cL} H + L \right), \\ y_e = \frac{\sqrt{3}}{6} \left(\frac{V'_{r1} + V'_{r2} - 2V'_{r3}}{cL} H + L \right), \\ z_e = z_1 - \sqrt{H}. \end{cases} \quad (16)$$

根据式(16) 就可以计算单次三边定位后所得到的定位坐标, 本文将通过在同一个待测定位点 P 进行 m 次光信号数值测量, 计算定位方程组(14) 获取 m 个定位坐标, 得到估测定位组 $F = \{P_1 P_2 P_3 \cdots P_m\}$. 由于本文仅考虑二维平面的定位, $P_j = [x_j y_j]^T$ ($j=1,2,3, \dots, m$) 是二维特征向量, 代表每个定位点输出的二维定位坐标. 然后将 F 划分成 k 个不相交的簇 $\{C_l | l=1,2,3, \dots, k\}$, 选取欧式距离作为距离判断准则, 计算各个簇的点到质心点的误差平方和 J , 如公式(17) 所示

$$J = \sum_l^k \sum_{P_j \in C_l} \tau_k \| P_k - \mu_k \|^2, \quad (17)$$

式中 k 表示不相交的簇个数, $\| P_k - \mu_k \|^2$ 表示估测定位组内各个估测点到簇内质心的欧氏距离, τ_k 是评估各个簇重要性的权重系数. 每个簇通过公式(15) 计算一个质心点 $\mu_l = \frac{1}{|C_l|} \sum_{P_j \in C_l} P_j$, 最后对每个质心点取平均值为最后的定位坐标计算欧氏距离最小的点为质心点, 迭代多次直至质心点不再发生变化, 从而输出质心点为最终的定位坐标. 通过增加估测点数目, 分类到不同的簇里, 进行欧氏距离的测量, 去除距离较远的点, 加权密集性较好的簇, 并通过迭代的方法获取最优的定位坐标, 提高了定位的稳定性和准确性. 尽管 K-means 算法使得定位复杂度有所提高, 采用典型性能计算单元所带来的计算时间消耗是非常有限的.

2 实验过程和结果分析

2.1 搭建实验平台和实验步骤

为了测试 LED 灯的光强分布模型(P-L 关系曲线), 验证光 ID 编码方案的可行性和 K-means 聚类算法的定位精度, 搭建了整个 VLC 室内定位实验系统, 对整个方案进行评测.

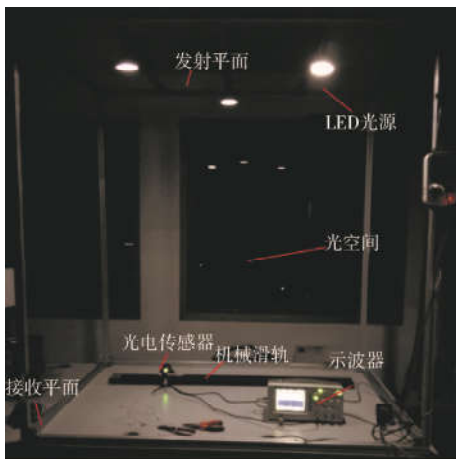


图6 VLC 室内定位实验系统

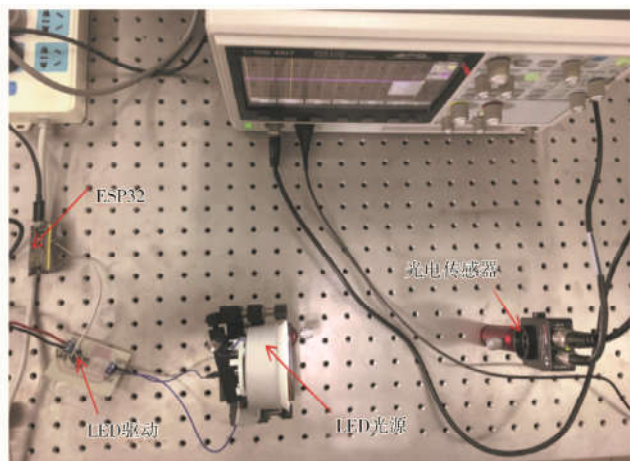


图7 LED 的光 ID 发射与接收系统

图6 展示了 VLC 室内定位实验平台, 其尺寸 $100 \text{ cm} \times 180 \text{ cm} \times 240 \text{ cm}$, 分为发射平面、光空间和接收平面三个部分. 发射平面是信号发射端, 通过光 ID 编码模块对每盏 LED 光源进行信号编码, 并计算 LED 的数量和相对位置寻找合理 LED 光源布置. 光空间是 LED 灯光覆盖的空间, 在光空间内 LED 光源符合光强分布模型. 接收平面与光电探测器感光面在同一高度, 并对接收到的信号进行信号处理和算法分析, 表1 列出了 VLC 定位实验设备的型号和参数.

根据文献[21] 分析, 发射平面 LED 的布置成正三角形可以保证下方任意位置至少接收到三个光源信

息. 所以本文使用 3 个 LED 灯, 并设置成边长为 60 cm 的等边三角形分布. 在接收平面内需要测量平面内各个测试点接收到的光强数值, 所以使用机械导轨进行定量移动, 用示波器查看图像和数值, 并输出到算法分析模块进行坐标的计算.

图 7 是 LED 光 ID 编码模块, 利用芯片 ESP32 编码方波信号的频率和占空比分别设置光 ID 和灯光亮度, 通过大功率驱动模块控制 LED 光源闪烁频率广播光信号.

表 1 VLC 室内定位实验设备的型号和参数

型号	参数
欧普筒灯 LED MTD07003A12/14	额定电压:220 V, 额定电流:0.055 A
光电探测器硅基 PIN PDA36A-EC	350 nm 到 1100 nm 的光波
WiFi 和蓝牙双核开发板 ESP-MROOM-32	电压:5 V, 时钟频率:80 MHz 到 240 MHz
实验系统支撑架	100 cm × 180 cm × 240 cm 铝材框架

图 8 是实验实施步骤流程图, ESP32 编码三个方波频率 1000、2000、4000 Hz 代表三个 LED 光源的光 ID 信号, 广播至光空间中, 然后光电探测器在参考测试点处获取混合光信号. 对混合光信号进行采样后, 传至 PC 机进行傅里叶变换还原出三个光 ID 和对应光强数值, 最后进行 K-means 聚类的三边定位算法计算定位坐标. 混合光信号时域和频谱图如图 9 所示, 从频谱图中得到 1000、2000、4000 Hz 三个峰值频率和与之对应的方波幅值即光强数值为 78、112、62 mV. 再根据 P-L 关系曲线, 得到三个定位圆, 分别是 58、9、62 cm, 输入三边定位算法中得到相对 LED 的位置坐标.

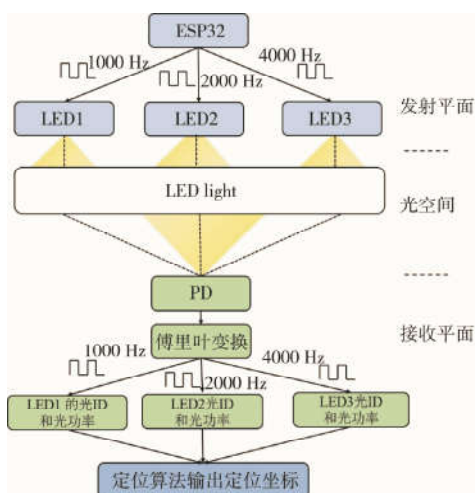


图 8 实验步骤流程图

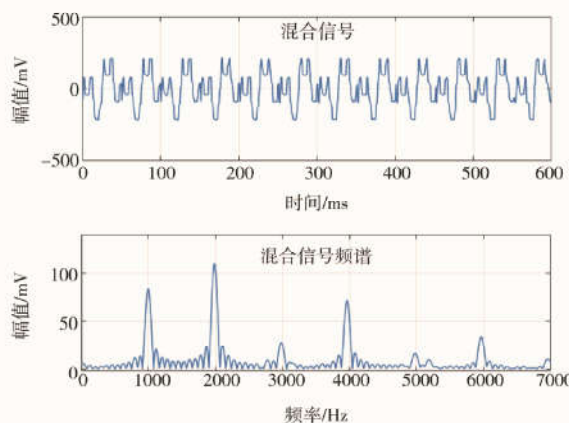


图 9 混合光信号和频谱图

2.2 实验结果分析

本文在接收平面以其中一个 LED 灯的正下方的点为原点, 建立笛卡尔坐标系, 并布置分布均匀、坐标已知的参考测试点. 在各个参考测试点放置光电探测器检测光信号, 记录定位算法的输出坐标, 最后计算输出定位坐标和参考测试点坐标的欧式距离作为定位精度的评价指标. 在 VLC 室内定位实验平台上实施本文提出的基于 K-means 聚类可见光通信定位方案, 获得了实际测试点坐标与参考测试点坐标的对比, 如图 10 所示. 可见, 在光空间对应的正三角形区域内, 可以实现良好的定位, 充分显示了本系统的可行性和稳定性. 根据测试结果, 图 11 中给出了传统三边定位和基于 K-means 方法的定位误差, 两者的定位精度分别是 $8\text{ cm} \pm 6\text{ cm}$ 和 $3\text{ cm} \pm 3\text{ cm}$. 经过实验测试和数据分析可知, 传统三边定位算法会由于环境光的干扰、LED 光信号的不稳定以及 LED 光照分布模型的不一致性等原因, 会出现无解的情况, 大大降低了算法的稳定性, 而加入 K-means 算法通过多次采样获取最优坐标点的方式在解决异常解问题的同时提升输出定位的精度和稳定性, 仍然存在较小误差大部分来源于 LED 光照分布模型的不一致性. 此外, 当环境光特别是太阳光较强时, 还需要采用蓝色滤光片和高通硬件滤波来抑制环境光的影响.

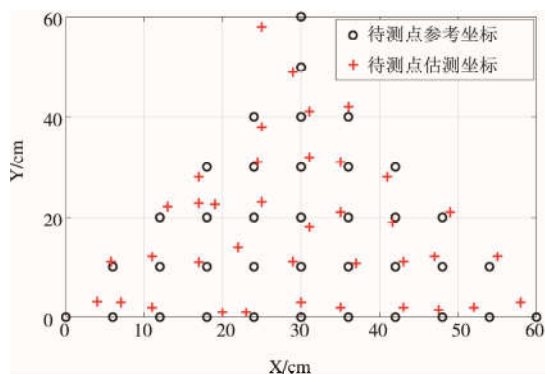


图 10 估测定位坐标的分布图

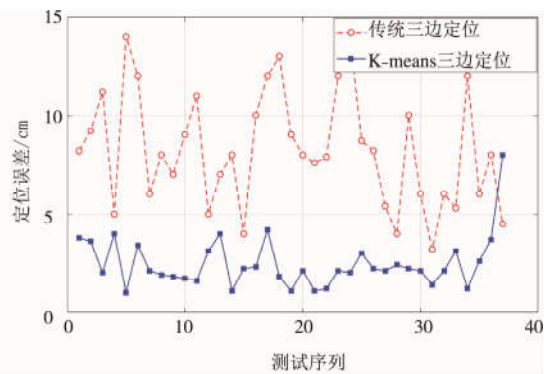


图 11 K-means 算法和一般三边定位算法精度对比

3 总结

本文详细介绍了利用 FDMA 技术的 VLC 室内定位系统方案,并提出了 K-means 聚类对三边定位算法进行优化.通过搭建实验平台,验证系统方案的可行性和定位算法的精度.从实验结果显示,基于 FDMA 的光 ID 编码方案可以有效简化系统,解决混合光信号的分离和提取问题,而使用 K-means 聚类的三边定位算法定位精度可以达到 3 ± 3 cm,可满足一般商业应用的要求.

参 考 文 献

- [1] Xia F, Yang L T, Wang L, et al. Internet of things[J]. International Journal of Communication Systems, 2012, 25(9): 1101-1102.
- [2] 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.
- [3] Do T H, Yoo M. An in-depth survey of visible light communication based positioning systems[J]. Sensors, 2016, 16(5): 678.
- [4] He Z, Petovello M, Pei L, et al. Evaluation of GPS/BDS indoor positioning performance and enhancement[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(3): 870-876.
- [5] Xiao J, Zhou Z, Yi Y, et al. A survey on wireless indoor localization from the device perspective[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2016, 49(2): 25-31.
- [6] Van M T, Tuan N V, Tran T S, et al. Weighted k-nearest neighbor model for indoor VLC positioning[J]. IET Communications, 2017, 11(6): 864-871.
- [7] Yang C, Shao H R. WiFi-based indoor positioning[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 150-157.
- [8] Powar J, Gao C, Harle R. Assessing the impact of multi-channel BLE beacons on fingerprint-based positioning[C]. // International Conference on Indoor Positioning & Indoor Navigation, 2017.
- [9] 洪阳, 陈健, 王子雄. 基于 BD 预编码的多用户 MIMO 室内可见光通信系统[J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1277-1282.
- [10] Zhang W, Kavehrad M. Comparison of VLC-based indoor positioning techniques[C]. // Proceedings of SPIE, 2013.
- [11] 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.
- [12] 刘源, 杨小平. 物联网教学案例设计 - 一种快速定位系统的设计[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2013, 26(2): 107-110.
- [13] Wang C, Wang L, Chi X. Location-adaptive transmission for indoor visible light communication[J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(1): 69-73.
- [14] Wang X, Yang H, Song J. A VLC-based robust ID broadcasting indoor location system for mobile devices[C]. // IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems & Broadcasting, 2016.
- [15] Wu D, Feng L, Yang A. VLC indoor positioning system based on iterative algorithm[C]. // Proceedings of SPIE, 2015.
- [16] 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(11): 66-74.
- [17] Manolakis D E. Efficient solution and performance analysis of 3-D position estimation by trilateration[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1996, 32(4): 1239-1248.
- [18] Yang S H, Kim H S, Son Y H, et al. Three-dimensional visible light indoor localization using AOA and RSS with multiple optical receivers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(14): 2480-2485.

- [19] Prince G B, Little T D C. Two-phase framework for indoor positioning systems using visible light[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1917-1928.
- [20] 吴兴邦, 文尚胜, 华璐. 基于蚁群算法的室内可见光高精度三维定位系统[J]. *光子学报*, 2017, 46(12): 181-194.
- [21] 徐明. 基于可见光通信的多维定位系统设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2017.

Indoor Positioning System of Visible Light Communication Based on K-means Clustering Algorithm

TANG Xiao-feng^{1,2} YANG Guo-wei¹ FAN Bing¹ WU Li-qun²

BI Mei-hua¹ HUANG Zhao-biao¹

(1. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract In this paper, we design and establish an indoor positioning system based on visible light communication (VLC) with high positioning accuracy and simple system configurations. At the transmitter, the optical identification code (ID) is coded using the frequency division multiple access (FDMA) technique, and the location information is broadcasted by the LED light source. The receiver performs Fourier transform on the received mixed optical signals to separate the FDMA-based optical IDs in the frequency domain and then to obtain the optical IDs of the involved LED sources and the corresponding optical power values. Meanwhile, we carry out multiple measurements of optical signal, and perform optimal K-means clustering to select the optimal positioning point, which can eliminate the problem of the triangulation algorithm and the equation without solution in order to obtain high precise positioning coordinates. Through theoretical derivation and experimental measurement, the positioning error of the system is $3 \pm 3\text{cm}$. The indoor positioning system proposed in this paper keeps the simple configuration and high positioning accuracy, which makes the VLC indoor positioning technology is closer to the market application.

Key words visible light communication; indoor positioning; frequency division multiple access; K-means clustering; triangulation positioning algorithm