

引用本文:刘威,陈青辉,文鸿,等. 基于RSS算法的CDMA调制解调可见光定位系统[J]. 光通信技术,2023,47(4):42-47.

基于RSS算法的CDMA调制解调可见光定位系统

刘威¹,陈青辉^{1*},文鸿¹,邓锐²,马杰³,陈明⁴,刘克雄¹,罗坤平¹

(1.湖南工业大学 计算机学院,湖南 株洲 412007;2.深圳华创芯光科技有限公司,广东 深圳 518118;

3. 河北工业大学 电子信息学院,天津 050019;4. 湖南师范大学 物电院,长沙 410081)

摘要:针对室内可见光定位(VLP)实际应用的大面积面板灯排列场景中存在的定位精确度低、信号干扰严重等问题,提出了一种基于接收信号强度(RSS)算法的码分多址(CDMA)调制解调VLP系统,介绍了RSS算法和CDMA调制解调VLP系统原理,通过实验验证了系统定位精度。实验结果表明:在未考虑实时移动和延迟刷新等因素的情况下,固定点位的定位最大误差为0.3 m,算法解决了传统定位算法中边缘角落区域定位精度低的问题,提高了VLP系统的鲁棒性。

关键词:可见光定位;码分多址;接收信号强度;光定位算法;鲁棒性

中图分类号:TN929.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)04-0042-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.04.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Visible light positioning system with CDMA modulation and demodulation based on RSS algorithm

LIU Wei¹, CHEN Qinghui^{1*}, WEN Hong¹, DENG Rui², MA Jie³, CHEN Ming⁴, LIU Kexiong¹, LUO Kunping¹

(1. College of Computer Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Shenzhen Huachuangxin Optical Technology Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518118, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 050019, China;

4. School of Physics and Electronics, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: Aiming at the problems such as low positioning accuracy and serious signal interference in the large-area panel light arrangement scene of indoor visible light positioning(VLP), a code division multiple access(CDMA) modulation and demodulation VLP system based on received signal strength(RSS) algorithm is proposed. The principles of the RSS algorithm and CDMA modulation and demodulation VLP system are introduced, and the positioning accuracy of the system is verified by experiments. The experimental results show that the maximum error of the positioning of the fixed point is 0.3 m without considering the factors such as real-time movement and delay refresh. The algorithm solves the problem of low positioning accuracy of the edge corner region in the traditional positioning algorithm and improves the robustness of the VLP system.

Key words: visible light positioning, code division multiple access, received signal strength, optical positioning algorithm, robustness

0 引言

随着移动通信的发展,基于定位技术的应用和服

收稿日期:2023-01-30。

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1801503)资助;湖南省自然科学基金项目(2020JJ6087、2022JJ5006、2023JJ50197)资助;湖南省教育厅科学研究项目(22A0063、22A0418)资助。

作者简介:刘威(1996—),男,安徽马鞍山人,2019年获得淮南师范学院电子工程学院工学学位,现为湖南工业大学硕士研究生,在校期间连续多年获得校级奖学金,主要研究方向为可见光通信技术。

***通信作者:**陈青辉(1978—),女,博士,高级工程师,主要研究方向为光纤通信技术、可见光通信技术和数字信号处理。



务相关需求急剧增加,推动了新型室内定位系统(IPS)的持续发展和应用。与此同时,随着高效绿色节能的发光二极管(LED)技术的广泛普及,LED在室内可见光通信(VLC)和可见光定位(VLP)方面的应用受到了越来越多的关注^[1-3]。文献[4-5]采用贝叶斯预测法和到达时间差法实现了室内可见光的二维定位,由于此定位无法预测接收机的高度,因此不能满足三维定位的需求。文献[6-7]提出了使用多个LED和图像传感器的可见光三维定位系统,能够快速确定LED在图像上的位置,从而大幅度提升了VLP的时间性能。但是,使用多个LED实现定位时会产生信号干扰,影响定位精

度。文献[8-9]提出了一种基于单个 LED 的室内定位系统,避免了利用多个 LED 定位时的信号干扰问题,且能够实现准确定位。但是,上述研究均针对的是单个及多个 LED 的定位,而在实际的照明场景中,部分采用的是大面积 LED 照明面板一维排列(如走廊、机房场景),会带来更多的干扰和定位精度低的问题。当 LED 面板灯呈一维排布,且面积较大时,定位精度一般很难控制在 0.5 m 以内。另外,在该类场景中,当人位于最邻近、次邻近、第三邻近 LED 的正常光照照射范围内时,第四、第五邻近的 LED 发出的光与其所漫反射产生的光介入至接收端则将成为干扰信号。现有的文献鲜有针对该类真实场景的 VLP 方法进行研究。因此,本文基于以上研究现状,提出一种基于接收信号强度(RSS)算法的码分多址(CDMA)调制解调 VLP 系统,在存在多灯间干扰情况下通过实验验证所提系统的定位精度性能和鲁棒性。

1 基于 RSS 算法的 CDMA 调制解调 VLP 系统

1.1 RSS 算法

RSS 算法是基于距离的一种定位算法,通过对距离精度的估计来反映 VLP 系统定位性能。设想某房间的同一直角平面内存在 3 个 LED,坐标分别为: $A(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(x_2, y_2, z_2)$ 、 $C(x_3, y_3, z_3)$,对应接收器光电二极管(PD)的位置坐标是 $O(x, y, z)$,设 PD 点到 3 个 LED 的距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ,则

$$\begin{cases} (x_1-x)^2 + (y_1-y)^2 + (z_1-z)^2 = d_1^2 \\ (x_2-x)^2 + (y_2-y)^2 + (z_2-z)^2 = d_2^2 \\ (x_3-x)^2 + (y_3-y)^2 + (z_3-z)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

由于发射端的 3 个 LED 共面,而且是针对二维平面内的物体进行定位的,即 $z_1=z_2=z_3=H$ (H 为房间的室内高度)。当 PD 位于地面时,对应的高度为 0,即 $z=0$,所以 PD 的坐标为 (x, y) 。将式(1)化简,如式(2)所示。

$$VX=Q \quad (2)$$

$$\text{其中, } V = \begin{bmatrix} x_2-x_1 & y_2-y_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 \\ x_3-x_2 & y_3-y_2 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} \frac{(d_1^2-d_2^2+x_2^2+y_2^2-x_1^2-y_1^2)}{2} \\ \frac{(d_1^2-d_3^2+x_3^2+y_3^2-x_1^2-y_1^2)}{2} \\ \frac{(d_2^2-d_3^2+x_3^2+y_3^2-x_2^2-y_2^2)}{2} \end{bmatrix}$$

V 和 Q 是通过 LED 的位置坐标确定的,为已知向量;

而 X 为需要求解的未知向量, $X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$, 可以通过最小二乘法来计算。根据式(2)定义残差值 r 为

$$r = Q - VX \quad (3)$$

根据最小二乘法的计算原理,可定义残差的平方表达式为

$$f(X) = r^T r = (Q - VX)^T (Q - VX) \quad (4)$$

因此,VLP 问题即为求解 $f(X)$ 的最小值。对 $f(X)$ 求导,设其值为零,如式(5)所示。

$$\frac{df(X)}{dX} = 2V^T VX - 2VQ = 0 \quad (5)$$

得出解为

$$X = (V^T V)^{-1} V^T Q \quad (6)$$

式(1)~式(6)是对最小二乘法求解,也被称作 RSS 三角定位迭代算法(本文简称 RSS 算法)。当 3 个 LED 不在同一条线上时,式(1)才能得出唯一解。

1.2 CDMA 调制解调 VLP 系统原理

图 1 是 CDMA 调制解调 VLP 系统的基本原理流程图。在发射端, ID 位置信息通过开关键控(OOK)和 CDMA 调制后,经 LED 驱动电路放大,并调制到 LED 上发送出去。在接收端, PD 接收 ID 位置信息后,经过信号解调处理,一方面获取 ID 位置信息从而获得定位位置区域;另一方面,通过光强衰减因子结合 RSS 算法计算出与参考点之间的距离,实现 VLP 系统的精确定位。

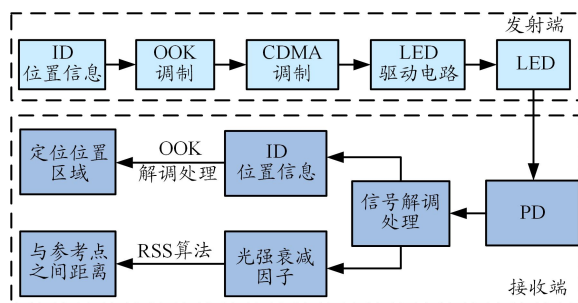


图 1 CDMA 调制解调 VLP 系统原理流程图

CDMA 调制解调 VLP 系统的核心在于接收端可解出收发信号的相关性峰值 R 。假设接收到的信号为 $s(x)$, 发送端的信号为 $t(x)$, 则 R 可表示为

$$R = s(x) \otimes t(x) \quad (7)$$

无论何种灯光传输模型,接收器和 LED 之间的距离 d 与 R 存在一定反比关系,即

$$R \propto \frac{1}{d} \quad (8)$$

由式(8)可知,不同距离 (d_1, d_2, d_3) 可由接收端对

刘威,陈青辉,文鸿,等. 基于RSS算法的CDMA调制解调可见光定位系统

应的相关性峰值(R_1, R_2, R_3)之间的映射关系得到。

VLP接收器接收到单个LED发射的光功率可表示为

$$P = \begin{cases} \frac{p_L(m+1)SG_L(\varphi)G(\varphi)(H)^{m+1}}{2\pi[d^2]^{(m+3/2)}}, & \varphi < \varphi_{FOV} \\ 0, & \varphi \geq \varphi_{FOV} \end{cases} \quad (9)$$

其中, p_L 为发射光功率, S 为接收器的横截面积, $G(\varphi)$ 为接收光学滤波器的增益, φ_{FOV} 为接收器视场角, m 为朗博模型的模式数, $G_L(\varphi)$ 为发送光滤波器的增益。

在保证接收器垂直向上的情况下, p_L 、 S 、 $G(\varphi)$ 、 φ 基本确定且 m 为 1, 令 $K=p_L(2)SG_L(\varphi)G(\varphi)(H)^2/2\pi$, 则 $P=K/d^4$, 可以推导出接收到的光功率与距离 d 成反比关系, 因此结合式(8)可得到 $R \propto P$ 。

综上所述, CDMA 解调后得到的相关性峰值 R 正比于 PD 接收到的功率, 由此结合 RSS 算法可得

$$Q = \begin{cases} (K_1^{1/2}/R_1^{1/2} - K_2^{1/2}/R_2^{1/2} + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2)/2 \\ (K_1^{1/2}/R_1^{1/2} - K_3^{1/2}/R_3^{1/2} + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2)/2 \\ (K_2^{1/2}/R_2^{1/2} - K_3^{1/2}/R_3^{1/2} + x_3^2 + y_3^2 - x_2^2 - y_2^2)/2 \end{cases} \quad (10)$$

将 Q 代入式(6), 可求得接收端 PD 的位置。

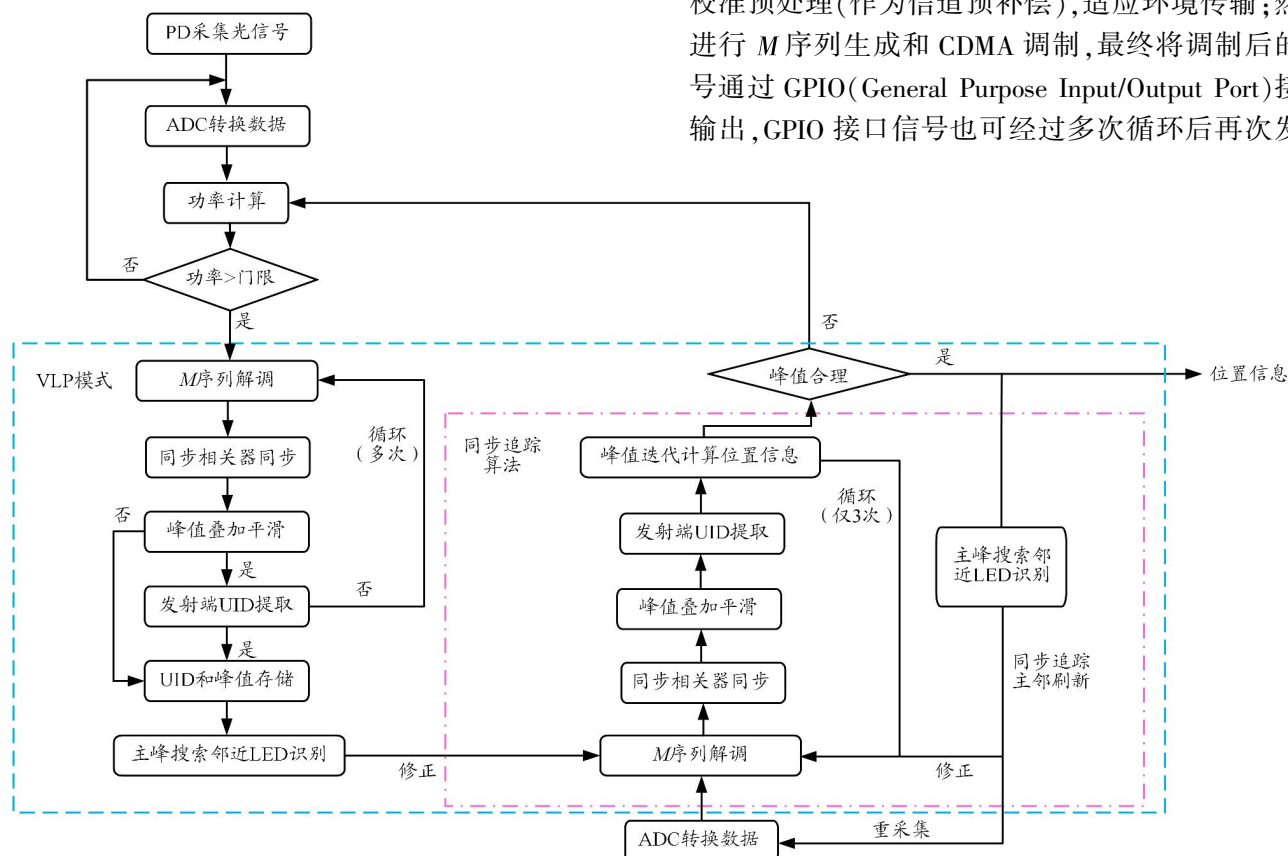


图3 接收端定位算法原理图

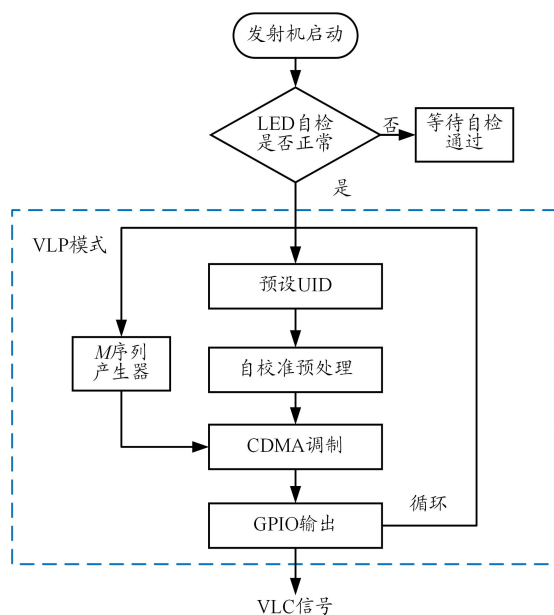


图2 发射端定位算法流程图

1.3 收发端同步追踪算法原理

发射端定位算法流程如图2所示。发射机自启动后, 通过检测电路中的阈值电压、LED 电流等操作, 判断电路是否正常工作, 若正常, 则选择进入 VLP 模式。VLP 的基本原理是根据预设个人信息(UID)先进行自校准预处理(作为信道预补偿), 适应环境传输; 然后进行 M 序列生成和 CDMA 调制, 最终将调制后的信号通过 GPIO(General Purpose Input/Output Port)接口输出, GPIO 接口信号也可经过多次循环后再次发送

出去。

接收端定位算法流程图如图 3 所示。当接收端 PD 采集到光信号,且经模/数转换器(ADC)转换后进行内部功率统计,若单位时间内统计量大于预设门限,则进入 VLP 模式。VLP 模式下,接收端通过 M 序列解调、同步相关器同步、峰值叠加平滑、发送端 UID 提取、UID 和峰值存储等一系列操作,以特定场景下 LED 个数为循环次数(如 30 个 LED,则循环 30 次),通过 CDMA 相关峰值检测,可初步判断出最邻近 LED 的 UID。在一维排列场景中,可提前预存所有 LED 的 UID 及其前后最相近 2 个 LED 的 UID,后续经过类似操作(M 序列解调、峰值叠加平滑、发送端 UID 提取、UID 和峰值存储),只需循环 3 次,检测最邻近 LED、次邻近 LED 及第三邻近 LED 的 UID,并实现跟踪,逐次刷新最邻近的 LED 的 UID,则可准确地防止跳变与定位抖动。另一方面,检测出最邻近、次邻近、第三邻近 LED 的 UID 相关峰值后,通过式(6)则可计算出位置信息。图中的同步追踪算法用于追踪相邻 LED 灯信号的相关处理,减少非临近 LED 信号相关处理。当判断相关性峰值异常时,则重新进行功率统计门限判断。该算法可以大幅减少码分复用迭代判断的循环次数,减少功耗,同时降低时延,提高定位刷新率;其次,可更好地适应一维排列定位场景,减少定位错误抖动,提高系统的鲁棒性。

2 实验分析

2.1 实验参数

本文实验使用的 LED 面板灯为正方形结构,面板尺寸为 $60\text{ cm}\times 60\text{ cm}$,面板灯功率为 60 W ,呈多排排列,排与排之间间隔 1.8 m ,每一排灯布局规整,且均离地 1.5 m ,放置于狭长走廊场景下,走廊宽 1 m ;可穿戴的 VLP 接收器被绑定于玩具小车上,接收器探测面正朝向上,分别固定于区域(区域划分如图 4 所示)不同点位进行 VLP 实验。

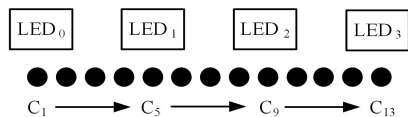


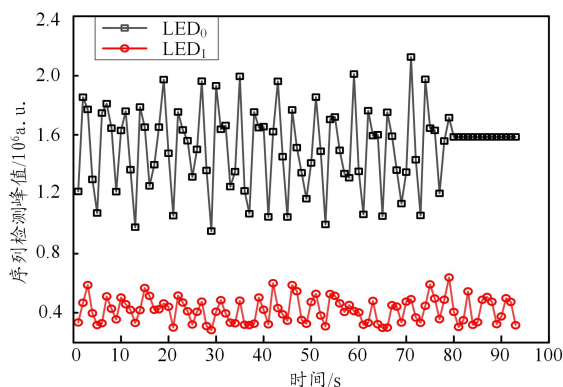
图 4 实验区域划分示意

2.2 实验结果与分析

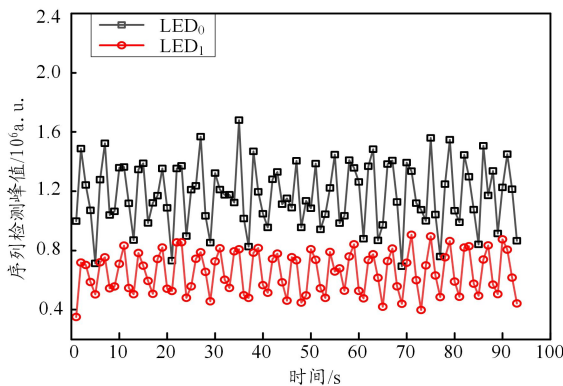
以图 4 中 $\text{LED}_0\sim\text{LED}_1$ 的区域为例,本文选取了 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 这 5 个固定位置(每个点位相距 0.45 m)分别进行定位。在 5 个固定点位,根据接收端算法连续

提取的检测峰值,包括 LED_0 、 LED_1 序列检测峰值,得到不同位置的序列检测峰值图如图 5 所示。可以看出,在不同位置提取的 LED_0 、 LED_1 序列检测峰值均变化明显,呈现规律性波动,近似正弦波动。由此证明:1)该 VLP 系统中 LED 发射与 PD 接收比较稳定;2)接收器上的 VLP 算法能够实现一定精度的定位。

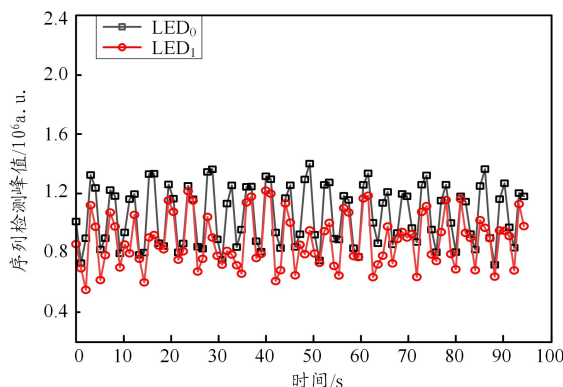
对图 5 进行 2 s 采样平滑处理后,得到如图 6 所示 VLP 算法输出结果。可以看出, $C_1\sim C_5$ 这 5 个点清晰,表明算法定位精度在 0.45 m 以内。



(a) C_1 点

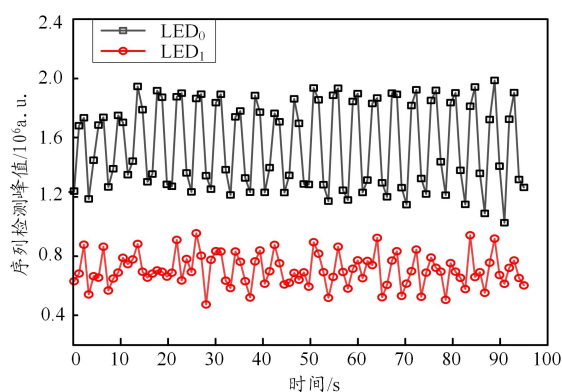


(b) C_2 点

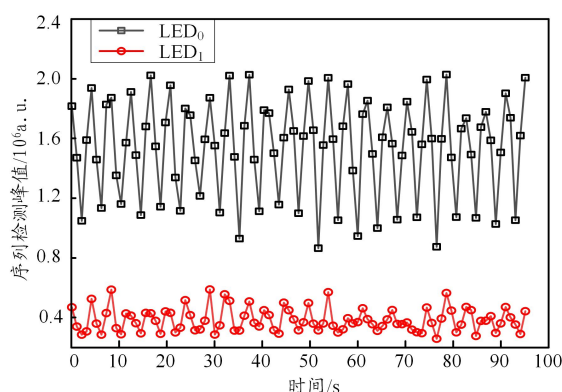


(c) C_3 点

刘威,陈青辉,文鸿,等. 基于RSS算法的CDMA调制解调可见光定位系统



(d) C_4 点



(e) C_5 点

图5 VLP定位过程中 $C_1 \sim C_5$ 点位的序列检测峰值图

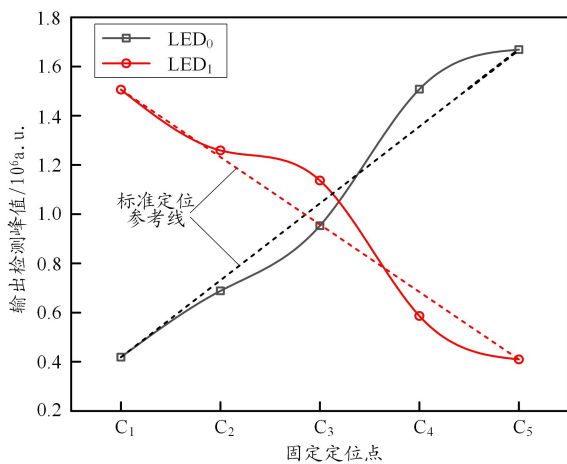
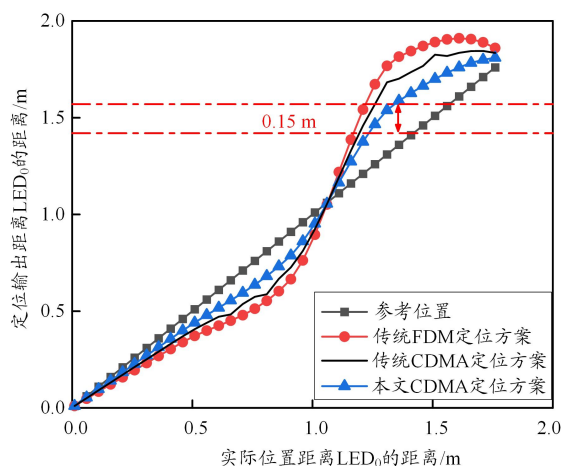
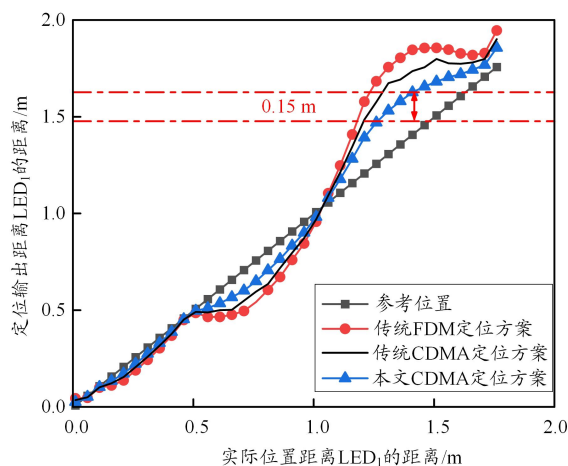


图6 $C_1 \sim C_5$ 点位VLP算法输出结果

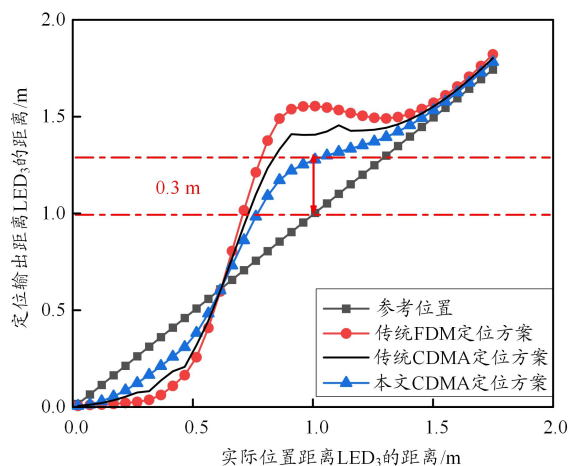
本文在 $LED_0 \sim LED_1$ 、 $LED_1 \sim LED_2$ 、 $LED_2 \sim LED_3$ 不同区域下连续改变点位,而VLP接收器保持原来形态进行探测定位,得到定位统计结果如图7所示。实验结果表明:在未考虑实时移动和延迟刷新等因素的情况下,固定点的定位误差大部分在0.15 m以内,小部分为0.3 m;与传统频分复用(FDM)、传统CDMA定位方



(a) $LED_0 \sim LED_1$ 间定位



(b) $LED_1 \sim LED_2$ 间定位



(c) $LED_2 \sim LED_3$ 间定位

图7 几种定位方案输出结果

案相比,可明显看出本文提出的方案定位精度最高,也没有突起的尖点(信号干扰)。

3 结束语

本文提出了一种基于 RSS 算法的 CDMA 调制解调 VLP 系统,并进行了固定点位定位实验,对系统中的算法进行了测试和分析。实验结果表明:在 LED 面板灯离地高度为 1.5 m 的条件下,该系统在固定点位的总体定位误差低于 0.3 m,且保证了在边缘区域的定位性能,弥补了传统定位方案的不足,证明了所提 CDMA 调制解调 VLP 系统具有较强的鲁棒性和使用价值。

参考文献:

- [1] SHAABAN K, SHAMIM M H M, ABDURROUF K. Visible light communication for intelligent transportation systems: a review of the latest technologies [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 8 (4): 483–492.
- [2] 刘翔宇,刘保睿,宋嵩,等. 成像型可见光定位系统优化研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(12): 4246–4255.
- [3] MAHMOUD A A, AHMAD Z U, HAAS O C L, et al. Precision indoor three-dimensional visible light positioning using receiver diversity and multi-layer perceptron neural network [J]. IET Optoelectronics, 2020, 14(6):

刘威,陈青辉,文鸿,等. 基于 RSS 算法的 CDMA 调制解调可见光定位系统

440–446.

- [4] GUAN W, CHEN X, HUANG M, et al. High-speed robust dynamic positioning and tracking method based on visual visible light communication using optical flow detection and bayesian forecast[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 7904722-1–7904722-22.
- [5] NAZ A, HASSAN N U, PASHA M A, et al. Single LED ceiling lamp based indoor positioning system[C]//2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), February 5–8, 2018, Singapore. New York: IEEE, 2018: 682–687.
- [6] LI Q L, WANG J Y, HUANG T, et al. Three-dimensional indoor visible light positioning system with a single transmitter and a single tilted receiver [J]. Optical Engineering, 2016, 55(10): 106103-1–106103-7.
- [7] 许永泽, 陈哲. 基于 LED 与图像传感器的可见光三维定位系统[J/OL]. 激光与光电子学进展: 1–20[2023–01–29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220617.1833.005.html>.
- [8] CHENG H, XIAO C, JI Y, et al. A single LED visible light positioning system based on geometric features and CMOS camera [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(17): 1097–1100.
- [9] LI H, HUANG H, XU Y, et al. A fast and high-accuracy real-time visible light positioning system based on single LED lamp with a beacon[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(6): 09233945-1–09233945-12.