

# 基于 CDMA 调制的可见光通信室内定位技术的研究

关伟鹏<sup>1,2</sup> 吴玉香<sup>1</sup> 文尚胜<sup>2,3\*</sup> 陈颖聪<sup>2,3</sup> 陈昊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640

<sup>2</sup>华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640

<sup>3</sup>华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510640

**摘要** 多个参考点光源间的信号相互干扰,使得室内可见光通信定位系统的精度不高。为此提出一种基于码分多址(CDMA)调制的可见光定位算法,利用扩频码的正交性,对每个发光二极管(LED)所发出的身份识别(ID)信息进行扩频处理,在克服了码间干扰的同时,提升了信道的容量。接收端由自适应滤波器分辨出解扩后的 ID 信息以及对应的信号强度,根据 ID 信息确定定位的位置区域,根据衰减强度确定定位点与各 LED 的距离,利用接收信号强度(RSS)三角定位算法实现接收机的定位,并采用分集接收技术来提高接收增益以提升定位的精度。仿真结果表明,该定位系统最大误差为 6.18 cm,超过 88%的定位点的测量精度被控制在 5 cm 以内。该系统不仅实现了较高精度的定位,而且易于控制、稳定性好,具有广阔的应用前景。

**关键词** 光通信; 码分多址; 接收信号强度; 三角定位算法; 室内定位系统

**中图分类号** TN929.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1106006

## Indoor Positioning Technology of Visible Light Communication Based on CDMA Modulation

Guan Weipeng<sup>1,2</sup> Wu Yuxiang<sup>1</sup> Wen Shangsheng<sup>2,3</sup> Chen Yingcong<sup>2,3</sup> Chen Hao<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Luminescence Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

<sup>3</sup> School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

**Abstract** Due to the inter symbol interference between multiple reference point sources in the positioning system, the positioning accuracy of the indoor visible light communication positioning system is decreased. Therefore, a positioning algorithm of visible light communication based on code division multiple access (CDMA) modulation is proposed. The identity (ID) information of every light emitting diode (LED) source is broadcasted by using the orthogonality of the spread spectrum code. The inter symbol interference is overcome and the capacity of the channel is enhanced by using the spread spectrum. At the receiver end, ID information and the signal strength of each LED are distinguished by adaptive filters. The location area of each LED and the distance between receiver end and each LED can be determined according to the ID information and the signal attenuation intensity, respectively. The

**收稿日期:** 2016-05-23; **收到修改稿日期:** 2016-06-22

**基金项目:** 国家文化科技提升计划项目(GJWHKJTSXM20154464)、教育部国家级大学生创新创业训练计划项目(201510561003, 201610561065, 201610561068)、广东省科技计划项目(2013B090600048)、广东省应用型科技研发专项(2015B010134001)、广东省扬帆计划引进创新创业团队专项(2015YT02C093)、广州市科技计划项目(2013J4300021)、广州市产学研协同创新重大专项(201604010006)

**作者简介:** 关伟鹏(1993—),男,硕士研究生,主要从事可见光无线通信方面的研究。E-mail: gwpscut@163.com

**导师简介:** 吴玉香(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事 LED 可见光通信、智能控制以及自适应与学习控制等方面的研究。E-mail: xyuwu@scut.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: shshwen@scut.edu.cn

positioning of the receiver can be realized by using the received signal strength (RSS) triangulation positioning algorithm. Furthermore, the receiving gain is improved by means of diversity reception technique, and finally the positioning accuracy is improved. The simulation result shows that the maximum error of the proposed positioning system is 6.18 cm, and more than 88% of the positioning point can be of the positioning accuracy less than 5 cm. The system not only achieves a good positioning accuracy, but also has a good stability and is easy to control, which will have broad application prospects.

**Key words** optical communications; code division multiple access; received signal strength; triangulation positioning algorithm; indoor positioning system

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510; 220.4830

## 1 引 言

全球定位系统(GPS)是良好的户外应用导航系统,在手机地图服务、汽车导航、船舶和飞机等领域具有广泛的应用<sup>[1]</sup>,极大地激励了室内定位技术的发展。近年来,室内定位技术也受到了广泛关注,如大型仓库里的产品定位检测、大型建筑(博物馆、购物中心、停车场)内部的导航服务等。然而在建筑物内部和人口密集的城市、地下等环境中,多径衰落、电磁屏蔽效应以及其他无线设备的干扰使得GPS等传统的室外定位技术在室内的信号覆盖率较差,用于室内的定位存在较大定位误差<sup>[2]</sup>。因此,近十多年来,各科技巨头和研究机构相继提出了许多基于无线电电磁波的室内定位技术,如红外定位、无线局域网(WLAN)、射频识别(RFID)、蓝牙、紫蜂协议(ZigBee)、超宽带(UWB)和超声波定位等<sup>[3]</sup>,这些方法的定位精度达到几米到几十厘米<sup>[4]</sup>。然而,大多数基于无线通信的定位系统会受到电磁干扰的影响,在多个用户共享的情况下通信质量会下降从而直接影响定位的质量。

可见光通信技术(VLC)将人眼无法识别的高频信号加载到发光二极管(LED)灯具上进行传输,使白光LED从照明领域扩展到通信领域<sup>[5]</sup>。与上述传统室内定位技术不同,可见光室内定位技术是一种基于可见光通信技术的室内定位技术,相比于传统室内定位技术具有定位精度高、无电磁干扰、附加模块少、保密性好和兼顾通信与照明等优点,已引起国际上许多专家学者的关注<sup>[6-8]</sup>。

基于可见光通信的室内定位算法,定位的参考点为LED点光源,而定位目标为光电检测器件,定位的距离检测一般采用接收信号强度(RSS)、到达时间(TOA)或到达时间差(TDOA)等方式。其中TOA或TDOA算法要求发射端和接收端具有严格的同步时钟周期<sup>[9-10]</sup>;而RSS算法不需要TOA或TDOA算法中严格的同步要求,仅通过测量可见光信号在空间传递过程中的衰减因子即可检测定位的距离,控制简单且具有更高的定位精度<sup>[2]</sup>。一般使用的三角定位算法,通过基于强度调制和直接检测技术(IM/DD)的接收信号强度来估算定位的距离时,至少需要知道三个参考点的位置,而不同参考点信源所发出的身份识别(ID)定位信息在时域和频域上一般是重叠的,且会由于多径效应的存在而产生码间干扰,进而大大降低了定位的精度<sup>[11]</sup>。为了克服码间干扰,进一步提高定位的精度,Kim等<sup>[7]</sup>采用了载波分配技术,但由于发射端和接收端信号不随频率稳定变化,因而需要额外的补偿算法;Yang等分别采用时隙分配技术<sup>[12]</sup>和波长分配技术<sup>[13]</sup>来克服码间干扰的影响,需要发射端和接收端严格同步及光学滤波器或多个接收器分集接收。这些方法都大大增加了系统的复杂程度。

本文采用RSS三角定位算法,提出一种基于码分多址(CDMA)技术的室内可见光通信高精度定位技术。通过利用CDMA调制中扩频码的正交性,对每个LED灯具所发出的ID定位信息经特定的正交码进行直接扩频处理,接收端经自适应滤波器分辨出各LED的ID码和对应的信号强度,根据ID信息确定定位的位置区域,根据衰减的大小确定定位点的距离,再利用三角定位算法即可实现接收机的精确定位。在克服了码间干扰的同时,增加了信道的容量,且不需要对发射端发射的信息作同步发射处理,大大降低了系统控制的复杂程度,提升了定位的精度。进一步采用分集接收技术来提高系统接收信噪比(SNR)<sup>[5]</sup>,进而提升了定位精度;并使用自适应滤波器来均衡信道,抵消回波,增强谱线<sup>[14]</sup>的同时大大提升了VLC定位系统的稳定性以及可靠性。

## 2 系统原理

### 2.1 室内光无线信道模型

基于 VLC 的室内定位系统的信道模型如图 1 所示,图中  $\psi$  为接收端的方位角。位于天花板的每三个 LED 灯具作为一个定位单元(定位单元的大小为  $L \times W \times H$ ),定位单元内的 LED 灯具发送对应于不同物理位置的 ID 位置信息,移动终端通过光电检测器提取 ID 位置信息来实现定位。每个 LED 灯具都携带着经过 CDMA 编码后的在自由空间中传播的 ID 定位信息,室内 VLC 定位系统中主要考虑直射视距链路(LOS)。描述 LOS 信道的最主要参数为信道的直流增益<sup>[15]</sup>,且 LOS 链路中,信道的增益只需考虑 LOS 传播路径便可获取。LED 属于朗伯光源<sup>[3]</sup>,其辐照度  $I(\theta)$  可表示为

$$I(\theta) = \frac{m_t + 1}{2\pi} \cos^{m_t}(\theta), \quad (1)$$

式中  $\theta$  为相对于 LED 垂直轴的发射角,  $m_t$  表示朗伯发光阶数,表达式为

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

其中  $\theta_{1/2}$  为 LED 灯具的半功率角。故此,信道的直流增益为

$$H(0) = I(\theta) \cdot \frac{A}{d^2} \cdot T_s \cdot g \cdot \cos^{m_r}(\varphi), \quad (3)$$

式中  $A$  为光电检测器的有效面积;  $\varphi$  为相对于接收轴的入射角;  $T_s$  为光滤波器的增益;  $g$  为聚光透镜增益;  $d$  为发射端与接收端之间的距离;  $m_r$  为接收端的朗伯阶数,与光电检测器件的半功率角  $\varphi_{1/2}$  有关,即<sup>[11]</sup>

$$m_r = -\frac{\ln 2}{\ln [\cos(\varphi_{1/2})]}. \quad (4)$$

故此,接收端信号强度  $P_r$  为

$$P_r = \gamma \cdot H(0) \times \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T X(t) dt + N(t), \quad (5)$$

式中  $\gamma$  为光电检测器件的转换效率,  $X(t)$  为经过强度调制后的信号,  $N(t)$  为信道噪声。

接收端的光电检测器件通过 IM/DD 技术来接收定位的光信号,通过检测 ID 信息来确定定位的位置区域,对光信号功率衰减因子的检测可分别计算出光电检测器件与定位区域内三个 LED 灯具的距离,然后使用三角定位算法即可实现对接收端的精确定位。然而三角定位算法中存在多个参考点,不同参考点光源所发射的光信号之间往往在时域和频域上都是重叠的,且受多径效应的作用,容易产生严重的码间干扰,极大地影响了定位的精度。因此使用 CDMA 调制技术,每个 LED 灯具经特定的扩频码编码,利用扩频码的正交性,进而在时域和频域均重叠的 ID 信息实现分离。

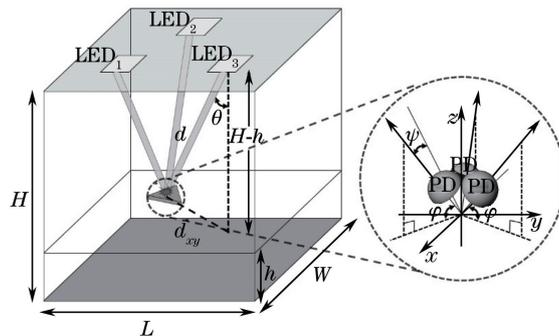


图 1 室内 VLC 定位系统的信道模型

Fig. 1 Channel model of indoor VLC positioning system

### 2.2 CDMA 编码原理

直接序列码分多址(DS-CDMA)调制利用扩频码的正交性,将在时域和频域均重叠的信号实现分离,进而实现码分复用<sup>[16]</sup>,解决了 VLC 定位系统中多个参考点导致码间干扰的问题。CDMA 编码主要为扩频序

列,包括信道化编码、基站码和用户码。信道化编码用于区分来自同一 LED 灯具的传输信道,即区分一个扇区内的多个下行链路。扰码序列(即基站码和用户码)的配置是按照小区进行的,其目的是将不同移动终端间或 LED 灯具的光信号区分开来,完成接收地址的分离。

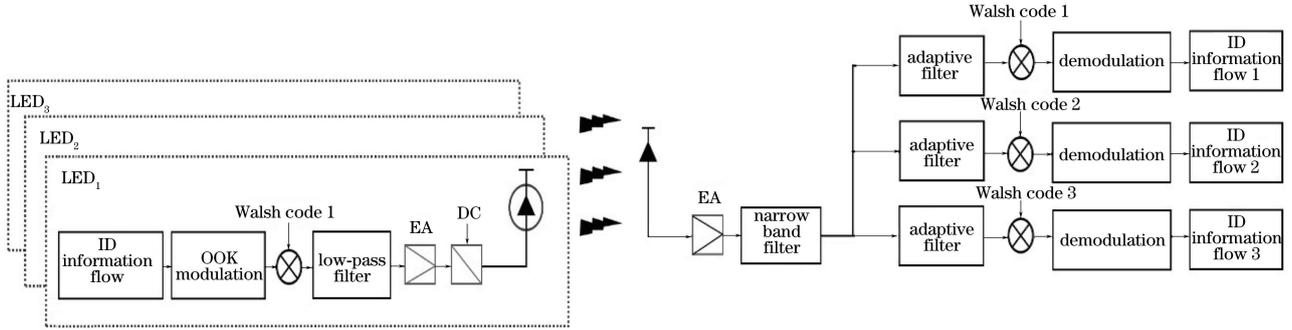


图 2 基于 CDMA 调制的 VLC 定位系统的框图

Fig. 2 Block diagram of the VLC positioning system based on CDMA

图 2 为基于 CDMA 调制的 VLC 定位系统的框图,如图所示,加载到每个 LED 上的 ID 定位信息通过与用户特定的伪随机码(PN)相乘进行扩频操作;扩频操作在开关键控(OOK)基带调制之后和可见光信号形成之前进行。扩频调制主要分为扩频和加扰两步,首先采用扩频码对数据进行扩频,再将扰码加载到扩频后的信号中。采用  $m$  序列作为信道的编码, Walsh 序列作为地址编码。一个长度为  $2^n$ 、具有  $2^n$  个元素的 Walsh 码可以通过哈达玛矩阵产生<sup>[17]</sup>:

$$\mathbf{H}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{n-1} & \mathbf{H}_{n-1} \\ \mathbf{H}_{n-1} & \mathbf{H}_{n-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

生成一组具有良好相关性的二进制序列  $C_i = \{C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,M}\}, i = 1, 2, \dots, M$ , 满足<sup>[18]</sup>

$$\langle C_i \cdot C_j \rangle = \sum_{k=1}^M C_{i,k}^* C_{j,k} = \begin{cases} M, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $\langle \cdot \rangle$  是内积运算,  $(\cdot)^*$  是共轭运算,  $M$  是正交码  $C_i$  的长度。一般来说,正交码的数目为  $M$ , 系统所能容纳的最多的不同 ID 位置信息(即不同 LED 灯)数目也为  $M$ 。不同 LED 灯具的 ID 位置信息流经过 OOK 调制后变成带宽为  $B_1$  的信号  $S_i$ , 然后不同的 ID 位置信息再由正交码  $C_i = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$  分别扩频调制成带宽为  $B_2$  的宽带信号( $B_2$  大于  $B_1$ ), 经放大电路(EA)、直流偏置(DC)驱动 LED 发出可见光信号, 在接收端第  $k$  个定位用户的第  $n$  个 ID 位置信息符号的混合光信号为

$$r_{n,k} = P_r \cdot (S_{1,n}C_{1,k} + S_{2,n}C_{2,k} + S_{m,n}C_{m,k}) = P_r \cdot \sum_{i=1}^m S_{i,n}C_{i,k}, \quad (8)$$

式中  $S_{i,n}$  为第  $i$  个 LED 灯具发出的第  $n$  个 ID 信息符号, 而  $m$  为系统实际的 LED 灯具的数目, 并且满足

$$1 \leq m \leq M. \quad (9)$$

由(7)式可得第  $n$  个 ID 信息符号经过第  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) 个自适应滤波器后的输出为

$$Y_{j,n} = \langle r_{n,k} \cdot C_j \rangle = \sum_{k=1}^M (C_{j,k} \cdot P_r \cdot \sum_{i=1}^m S_{i,n}C_{i,k}) = P_r \cdot S_{i,n}, \quad (10)$$

所获得的  $Y_{j,n}$  再通过对 ID 信息符号进行积分, 即

$$Y_j = \sum_{n=1}^N Y_{j,n}, \quad (11)$$

式中  $N$  为 ID 位置信息的码长。经过抽样判决后, 即可得到每个 LED 灯具所发射的 ID 信息并确定定位的位置区域以及获得衰减因子  $H(0)$ , 再通过 RSS 三角定位算法可以获得定位区域内精确的位置信息。

由香农公式  $C_0 = B_0 \times \log(1 + S_0/N_0)$  可知(其中  $C_0$  为系统信道容量;  $B_0$  为信道的带宽;  $S_0$  为信号的功率, 单位为瓦;  $N_0$  为噪声功率, 单位为瓦), 信号带宽的增大使扩频系统可以在信道信噪比较低的情况下实现通信, 大大增强了噪声的抗干扰能力; 与此同时, 接收端的解扩操作(如图 3 所示), 可以使干扰噪声扩展到较宽的频带内, 将有用信号恢复成窄带信号, 通过窄带滤波器选取出有用的信号, 从而解决了 VLC 定位系

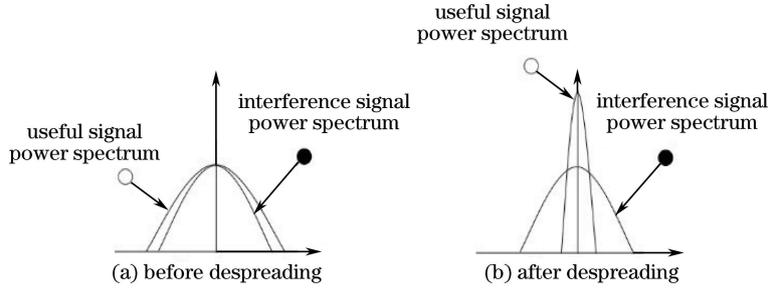


图 3 直接序列扩频系统频谱示意图

Fig. 3 Spectrum diagram of direct sequence spread spectrum system

统中因背景噪声的干扰而影响定位质量的问题。

### 2.3 RSS 三角定位算法

接收端通过 RSS 三角定位算法实现定位区域内精确的位置定位。所获得的定位信息  $Y_j$  的强度与自适应滤波器中设定值进行比较,可获得在自由空间中的衰减因子  $H(0)$ ,根据(3)式可得对应光电检测器件与 LED 灯具的距离为

$$d = \sqrt{\frac{I(\theta) \cdot A \cdot T_s \cdot g \cdot \cos^m(\varphi) P_t}{P_r}}, \quad (12)$$

式中  $P_t$  为 LED 灯具的发射功率,  $\theta = \arccos \frac{H-h}{d}$ ,  $h$  为光电检测器件(PD)所在平面的高度,当 PD 水平放置时  $\varphi = \theta$ 。已知发射 ID 信息的 LED 灯具的具体位置,则接收端通过接收至少三个 LED 灯具的信号,再运用三角定位算法,可以确定接收端在当前二维平面上的位置  $d_{x,y}^2 = d^2 - (H-h)^2$ 。通过求解

$$\begin{cases} (x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 = d_{a,x,y}^2 \\ (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 = d_{b,x,y}^2 \\ (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = d_{c,x,y}^2 \end{cases} \quad (13)$$

即可获得接收端的位置  $(x, y)$ ,式中  $(x_a, x_b, x_c)$  和  $(y_a, y_b, y_c)$  分别为图 4 中所示的  $a, b, c$  三个 LED 灯具的  $x$  与  $y$  轴坐标,  $(d_{a,x,y}, d_{b,x,y}, d_{c,x,y})$  分别为  $a, b, c$  三个 LED 灯具到接收端的水平距离。通过求解

$$\begin{cases} 2x(x_a - x_c) + x_c^2 - x_a^2 + 2y(y_a - y_c) + y_c^2 - y_a^2 = d_c^2 - d_a^2 \\ 2x(x_b - x_c) + x_c^2 - x_b^2 + 2y(y_b - y_c) + y_c^2 - y_b^2 = d_c^2 - d_b^2 \end{cases} \quad (14)$$

可以获得接收机准确的位置  $(x, y)$ 。

进一步采用分集接收技术来提高接收增益以降低误码率(BER)<sup>[5]</sup>,接收端采用三个相同的边长为 0.01 m 的等边三角形排列的光电检测器件(如图 4 所示),各个光电检测器件的位置坐标均可由(13)式中的

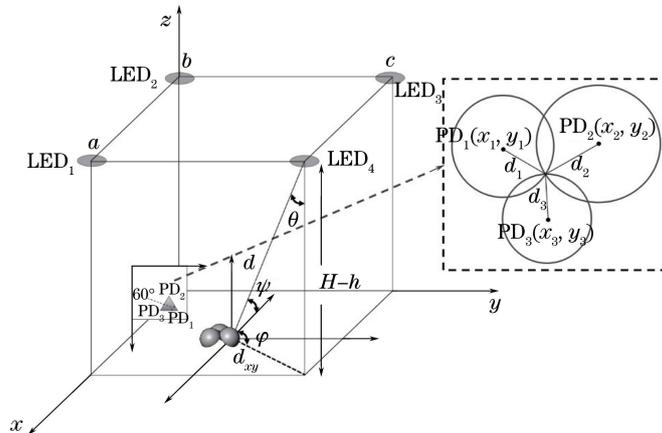


图 4 RSS 三角定位算法几何原理框图

Fig. 4 Geometric principle block diagram of triangulation positioning algorithm

三个二次方程组解出,再通过估算平均值对应的三角形重心,最终得出接收端的位置坐标。利用分集接收技术可提供分集增益,进而降低系统的误码率,可大大提升定位的精度。

### 3 模拟仿真及结果分析

#### 3.1 VLC 定位模型的设计

采用 Matlab 软件对所提出的基于 CDMA 调制的可见光通信 RSS 三角定位系统进行建模仿真,通过搭建定位的数学模型,仿真并估算出系统的定位位置误差来论证系统性能的优越性。通过 Origin 软件对 Matlab 软件仿真得出的数据进行可视化操作,并进行理论分析讨论。

在 VLC 系统中,噪声的总方差  $N(t)$  具有高斯分布,为粒散噪声  $\sigma_{\text{shot}}^2$  与热噪声  $\sigma_{\text{thermal}}^2$  之和,即<sup>[19]</sup>

$$N(t) = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2, \quad (15)$$

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

$$\sigma_{\text{thermal}}^2 = \frac{8\pi k T_K}{G_o} \eta A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_K \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^3, \quad (17)$$

式中  $q$ 、 $r$ 、 $B$ 、 $k$ 、 $I_{\text{bg}}$ 、 $T_K$ 、 $G_o$ 、 $\Gamma$  和  $\eta$  分别是元电荷量、光电转换效率、接收电路的等效噪声带宽、玻尔兹曼常数、背景电流、绝对温度、开环增益、场效应晶体管的信道噪声因子和光电检测器件的固定电容; $I_2$  和  $I_3$  是噪声带宽的因子。光信号在自由空间传播过程中的背景噪声和接收端放大器等噪声可以近似看作受到加性高斯白噪声(AWGN)的干扰<sup>[20]</sup>。实验的主要仿真参数如表 1 所示,表中 FOV 为视场角。

表 1 实验仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Room dimension / m <sup>3</sup>	2×2×4
Power of each LED bulb / W	16
SNR of the position system / dB	20
Position of each LED <sub>1</sub> bulb (x, y, z) / m	(0, 0, 4)
Position of each LED <sub>2</sub> bulb (x, y, z) / m	(0, 2, 4)
Position of each LED <sub>3</sub> bulb (x, y, z) / m	(2, 0, 4)
Height of receiver h / m	1
FOV of transmitter / (°)	60
FOV of receiver / (°)	60
Effective area of PD A / cm <sup>2</sup>	1.0
Photoelectric conversion efficiency $\gamma$ / (A·W <sup>-1</sup> )	0.35
Gain of optical filter T <sub>s</sub>	1.0
Gain of optical concentrator g	1.5

#### 3.2 仿真的结果及分析

建立一个 2 m×2 m×4 m 的室内空间单元,其中 LED 位于单元的端点处。测试定位位置区域的分辨率为 0.25 m,测量的定位点为 28 个。仿真的结果如图 5 所示。由图 5 中可以看出,仿真的定位位置区域与真实的位置区域相当接近,其中最大的定位位置误差在(0.25, 1.75)附近,误差约为 9.5 cm,这表明该定位模型可获得较高的定位精度。同时,从图 5 中也可以得出,位于定位区域内中间位置的定位误差少于定位区域边缘位置的定位误差,这主要是因为定位边缘区域比定位中部区域的 LED 传输的距离以及 LED 的发射角均要大。根据(3)式可知,这会导致更大的光信号衰减,从而导致接收端的信噪比下降,进而导致系统的误码率上升。一般可以通过合理的均衡处理以及适当的灯具布局等方法来改善这一问题。

针对上述出现的不同定位区域内定位误差不一致的情形,通过 Origin 软件绘制出不同信噪比下的定位误差关系图,如图 6 所示。图中横坐标代表定位精度误差,纵坐标代表对应精度误差定位点的数目所占总的所测量的定位点的数目的百分比。

由图 6 可看出,当系统的信噪比为 30 dB 时,75%的位置误差小于 4 cm,定位系统的精度可达 6 cm(此

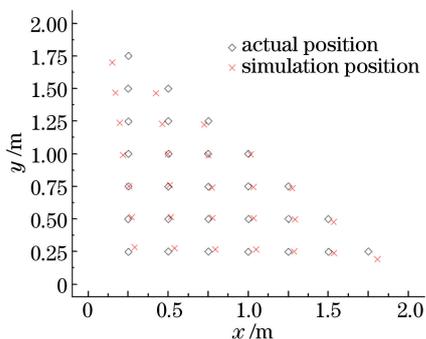


图 5 在信噪比为 20 dB 时的 VLC 系统定位精度仿真示意图

Fig. 5 Positioning accuracy of the VLC system with signal-to-noise ratio of 20 dB

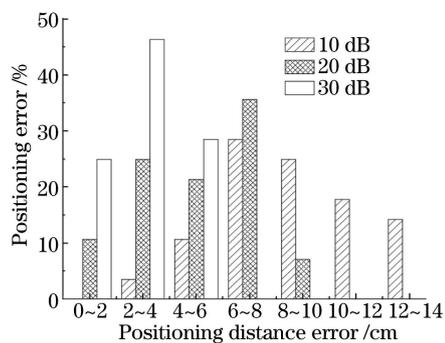


图 6 不同信噪比下 VLC 定位系统的位置误差

Fig. 6 Different positioning errors of the VLC positioning system with different signal-to-noise ratios

即为系统的定位最大误差);而当系统的信噪比为 10 dB 时,定位的精度达 12 cm。这主要是由于当系统的信噪比越大,系统的误码率越低,系统的容错性越好,因而定位精度越高。这与 2.3 节中所提出的可通过提高接收信号的信噪比进而提升定位系统的精度的结论相一致。进一步为了表征分集接收技术对于 VLC 定位系统性能的影响,仿真了一个基于分集接收技术的 CDMA-RSS 三角算法的 VLC 定位系统,仿真的主要参数不变(同表 1 所示),得出基于分集接收技术的 VLC 定位系统效果图,如图 7 所示。

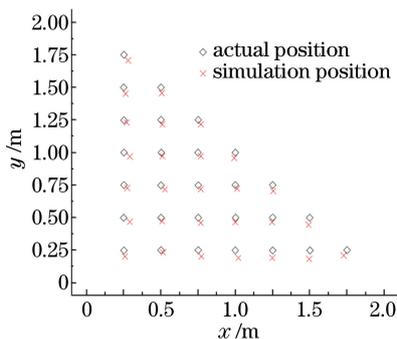


图 7 基于分集接收技术的 VLC 系统定位精度

Fig. 7 Positioning accuracy of the VLC system based on diversity reception technology

在信噪比为 20 dB 时,基于分集接收技术的 VLC 定位系统的最大定位误差为 6.8 cm,与图 5 相比整体定位效果更佳。这主要是由于通过分集接收技术提高了接收信噪比,进而降低了系统的误码率,从而使得定位的精度得以提高。因此可利用分集接收技术提高系统分集增益的特性来提高系统的接收信噪比,进而提高 VLC 定位系统的定位精度,但仍然存在定位误差分布不均匀的问题。进一步为了稳定所述 VLC 定位系统的位置误差的波动性,也可通过合理布局参考点光源以及改善接收端光电检测器件的转换效率和放大噪声、滤波电路噪声等方法解决。

在 VLC 定位系统中,由于空间光强的分布影响了系统信噪比分布的均匀性,进而影响了系统误码率分布的波动性,因此影响定位的位置精度的最主要因素应该是定位的参考点的分布。为了验证这一假设,改变定位位置区域内各 LED 参考点光源 1、2、3 的位置坐标为:(0,0,4)、(0,2,4)(1,2,4),其余的 VLC 定位系统参数不变(如表 1 所示),仿真了一个基于分集接收技术的 CDMA-RSS 三角定位算法的 VLC 定位系统。测试的定位位置区域的分辨率为 0.25 m,测量的定位点为 41 个。通过增加测量点的数目,可以进一步验证系统的稳定性,仿真的结果如图 8 所示。

对比图 7 与图 8 可得出,图 8 中仿真出的定位位置坐标与真实的位置坐标更加接近,且位于定位区域边缘带的定位精度波动性不大,而且中间区域的定位位置精度更高。其中,最大的定位位置误差分别在三个参考点 LED 灯具所处的位置,即(0,0)、(0,2)和(1,2),这主要是因为该三个位置点与对应点 LED 灯具的距离较小,受对应 LED 灯具的光强影响比另外两个 LED 灯具的影响更大,故此运用第 2.3 节所推导的 RSS 三角定位算法估算位置坐标时,误差更大,然而可以通过定位终端中恰当的均衡处理或者阈值设定等简单操作来

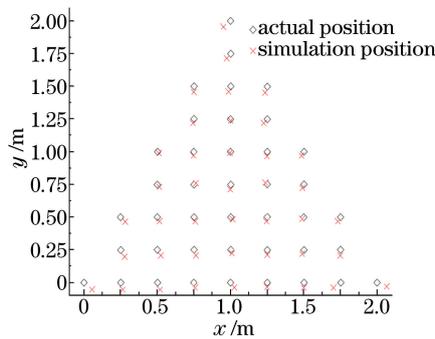


图 8 改变参考点光源位置后的 VLC 定位精度

Fig. 8 Positioning accuracy of the VLC system after changing the position of reference sources

解决这三个定位点的误差问题。除了这三个特定点以外,其余位置点的最大误差约为 6.18 cm,而最小的定位误差位于点(1.0,1.0),误差约为 1.09 cm;且超过 88%的定位点的位置精度在 5 cm 以下。本节所设计的 VLC 定位系统的整体的定位精度误差分布比较均匀,这主要是由于相比 3.2 节,本节中三个 LED 灯具分布更对称,从而使空间光强分布更均匀,即 VLC 定位系统中的信噪比分布更均匀,系统的误码率波动不大,使得定位精度波动性少,系统性能更加稳定。因此可以通过对室内定位系统空间光强分布合理使用的算法来进行设计,以提高 VLC 定位系统定位精度的稳定性。

## 4 结 论

结合理论分析与模拟仿真,提出了一种基于分集接收技术的 CDMA-RSS 三角定位算法的可见光室内高精度定位技术。对每个 LED 灯具所发射的 ID 定位信息进行 CDMA 扩频操作后驱动 LED 灯具发射可见光信号;接收端通过分集接收来对光信号进行捕获以及识别,对接收信号进行 CDMA 解调操作获取 ID 信息进而获得定位的位置区域;识别光强衰减因子,进而测试在定位位置区域内接收端与各 LED 灯具参考点光源之间的距离,对分集接收所获得定位距离进行加权合并,最终得到准确的定位位置坐标。

用 Matlab 软件对所提出的算法系统进行模拟仿真,结果表明:当系统的信噪比为 20 dB 时,定位系统的最大误差为 6.18 cm,超过 88%的定位点的定位精度被控制在 5 cm 以内,达到较高的 VLC 定位水平,大大简化了 VLC 定位系统的控制复杂程度。而且将 CDMA 调制技术应用于 VLC 定位系统中,解决了定位系统中由于多径效应以及多个参考点所导致的码间干扰问题,具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Gu W J, Zhang W Z, Wang J, *et al.* Three dimensional indoor positioning based on visible light with Gaussian mixture sigma-point particle filter technique[C]. SPIE, 2015, 9387: 93870O.
- 2 Zhang W Z, Chowdhury M I S, Kavehrad M. Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications[J]. Opt Eng, 2014, 53(4): 045105.
- 3 Chi Nan. Key devices and applications of LED visible light communication[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015: 238-247.  
迟楠. LED 可见光通信关键器件与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 238-247.
- 4 Yang S H, Kim D R, Kim H S, *et al.* Indoor positioning system based on visible light using location code[C]. Proceedings of 2012 4th International Conference on Communications and Electronics, 2012: 360-363.
- 5 Guan Weipeng, Wen Shangsheng, Huang Weiming, *et al.* Research on visible light communication receiving system based on artificial neural networks[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1105002.  
关伟鹏, 文尚胜, 黄伟明, 等. 基于神经网络的可见光通信接收系统的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1105002.
- 6 Zhou Z, Kavehrad M, Deng P. Indoor positioning algorithm using light-emitting diode visible light communications[J]. Opt Eng, 2012, 51(8): 085009.
- 7 Kim H S, Kim D R, Yang S H, *et al.* An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique[J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(1): 134-144.

- 8 Luo P F, Ghassemlooy Z, Le Minh H, *et al.* Experimental demonstration of an indoor visible light communication positioning system using dual-tone multi-frequency technique[C]. Proceedings of 2014 3rd International Workshop in Optical Wireless Communications, 2014: 55-59.
- 9 Wu P, Lian J, Lian B W. Optical CDMA-based wireless indoor positioning through time-of-arrival of light-emitting diodes [C]. Proceedings of 2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks, 2015: 1-3.
- 10 Jung S Y, Hann S, Park C S. TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(4): 1592-1597.
- 11 Yang S H, Jung E M, Han S K. Indoor location estimation based on LED visible light communication using multiple optical receivers[J]. IEEE Commun Lett, 2013, 17(9): 1834-1837.
- 12 Yang S H, Kim D R, Kim H S, *et al.* Visible light based high accuracy indoor localization using the extinction ratio distributions of light signals[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2013, 55(6): 1385-1389.
- 13 Yang S H, Kim H S, Son Y H, *et al.* Reduction of optical interference by wavelength filtering in RGB-LED based indoor VLC system[C]. Proceedings of 2011 16th Opto-Electronics and Communications Conference, 2011: 551-552.
- 14 Lu Zeqing. FPGA-based implementation of adaptive filter[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014: 1-5.  
鲁泽清. 基于FPGA的自适应滤波器实现[D]. 成都: 成都理工大学, 2014: 1-5.
- 15 Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communications[J]. Proceedings of IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- 16 Xie S Y, Zhang C J. Code division multiple access based visible light communication in vehicle adaptive cruise control under emergency situation[J]. Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Information and Automation, 2013: 219-224.
- 17 Wang Zhebo. Research on channel estimation and multiuser access for MC-CDMA modulated two-way relay systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 20-26.  
王浙波. MC-CDMA双向中继的信道估计算法和多用户接入研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 20-26.
- 18 Qian H, Dai S C, Zhao S, *et al.* A robust CDMA VLC system against front-end nonlinearity[J]. IEEE Photonics J, 2015, 7(5): 7801809.
- 19 Guan Weipeng, Wen Shangsheng, Hu Huixin, *et al.* Research on visible light communication system based on hybrid modulation technique[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2015, 26(11): 2125-2132.  
关伟鹏, 文尚胜, 胡卉馨, 等. 基于双重调制技术的可见光通信系统研究[J]. 光电子·激光, 2015, 26(11): 2125-2132.
- 20 Ma X, Lee K, Lee K. Appropriate modulation scheme for visible light communication systems considering illumination [J]. Electron Lett, 2012, 48(18): 1137-1139.