DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2017.02.006

吴楠[1]　杨爱英[1]　冯立辉[1]　忻向军[2]

可见光定位关键技术的研究与展望

摘要

室内定位由于在工业生产和日常生活中存在重要的应用价值而成为研究的热点,传统的 Wi-Fi、蓝牙等无线定位技术由于电磁干扰和多径效应等原因很难实现高精度的室内定位.经过调制的白光 LED 在满足照明需求的同时能够传送位置信息,实现室内的高精度定位.首先介绍了可见光定位系统中常用的几种调制方式,对不同调制方式的特点做出比较,提出了一种适用于可见光定位的调制方式;然后,介绍并讨论了可见光定位系统的两种解调方法;之后介绍了几种可见光定位的算法,并对每一种算法的性能进行详细的分析;最后对于可见光定位中存在的问题进行了讨论与展望.

关键词

室内定位;可见光;调制方式;定位算法

中图分类号 TN929

文献标志码 A

0　引言

随着时代的发展,室内定位逐渐成为一个热门的问题.传统的定位方法主要采用 GPS 实现定位.GPS 目前已经广泛应用在室外定位导航中,并且有着不错的定位精度.然而,由于多径效应和信号穿过墙壁时强度的衰减等因素的影响,GPS 在室内定位中的精度和稳定性十分不理想[1].为了解决室内定位的需求,国内外各机构展开了大量的研究,力求寻找一种高精度、高稳定性、低复杂度的安全有效的室内定位方案.早在 1992 年 AT&T 剑桥实验室就开发出了 Active Badge 定位系统,此系统是基于红外线的定位方案[2].2000 年微软研究院提出了 RADAR 定位系统,此系统基于接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication,RSSI)来进行室内定位,它的硬件组成是基于 802.11 协议的 WLAN[2].同年 MIT 开发出了 Cricket 室内定位系统,此系统是基于射频+超声波的 TDOA 定位系统[2].此外,最近几年国内外一些公司也开发出了许多种定位方案.苹果公司于 2013 年发布了 iBeacon 室内定位方案,采用蓝牙通信的方法,向空间中预先布设的 iBeacon 设备发送信息,并且通过蓝牙信号强度来估计设备与 iBeacon 的距离.国内北京智慧图科技有限公司开发出的 Rtmap 和专用的“寻鹿”app,采用 Wi-Fi 和蓝牙信号进行定位,可以达到 3 m 以内的定位精度和 2~3 s 的刷新频率;华策光通信科技有限公司开发的 Ubeacon 系统使用经过调制的白光 LED 进行信号的发送,通过智能手机接收光信号进行解算实现定位,精度可达 1 m;清研讯科(北京)科技有限公司开发的 LocalSense 定位系统采用无线脉冲技术,通过测量脉冲传播的时间来实现定位,精度可以达到 10 cm.

与室外定位相比,室内定位环境较小,障碍物较多,因此室内定位方案需要具有精度高、稳定性强的特点.此外从大规模推广的角度考虑还需要具有系统简单、成本低、对人安全等特点.传统的 Wi-Fi、蓝牙等无线定位方案由于电磁波的信道衰减和多径效应,以及大量无线终端的互相干扰等原因,很难实现较高的定位精度,理论上来说 3~5 m 已经是无线定位精度的极限.激光、超宽带无线脉冲等定位方案虽然可以将定位精度提高到分米级别,然而由于相关设备较为复杂,成本难以降低[3].从定位精度和系统成本两方面来考虑,可见光定位是一种有效的定位方案.可见光定位基于可见光通信技术,采用白光 LED 作为发射端,在提供照明的同时向外发送经过调制的光信号,从

收稿日期 2017-01-03

资助项目 国家自然科学基金(61475094,61675025)

作者简介

吴楠,男,硕士生,主要研究方向为可见光通信.sirius112358@163.com

杨爱英(通信作者),女,博士,教授,主要研究方向为光纤通信和可见光通信.yangaiying@bit.edu.cn

1　北京理工大学　光电学院,北京,100081

2　北京邮电大学　电子工程学院,北京,100876

而实现信息的传输[4-5],在接收端通过接收机对信号进行解调和计算,实现定位功能.相比于传统无线通信,可见光频率较高,可以有效地避免电磁波的相互干扰[6].可见光通信信道一般为 LOS 信道,多径效应对信道的影响较小,因此可见光定位可以实现 10 cm 以内的定位精度.LED 是公认的下一代照明的绿色光源,基于 LED 的可见光定位采用白光 LED 发射信号,利用智能手机等终端进行接收,系统简单、成本低廉,便于大规模推广.

1 可见光定位系统结构概述

典型的 LED 可见光定位系统结构如图 1 所示.

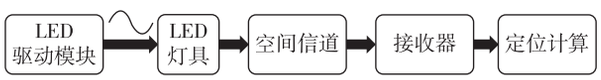


图 1 可见光定位系统示意

Fig. 1 Visible light positioning system

一个完整的可见光定位系统由驱动模块、LED 灯具、接收机等部分组成.系统的发射端是多个 LED 组成的阵列,在提供照明的同时向外发射光信息,光信号经过空间信道传播由接收机接收,通过定位算法解算出接收机的位置.系统的工作流程主要分 3 步:光信号调制、光信号接收、位置解算.光信号调制将位置信息经过调制加载到每个 LED 上,使处于不同位置的 LED 携带不同的位置信息.光信号接收是指采用特定的接收机(CCD、PD 等)对 LED 发出的信号进行接收,一般在接收到光信号时存在光电转换过程,将光信号转换成电信号进行处理.最后对接收机接收到的信号进行定位算法处理,解算出接收机的位置坐标.可见光定位系统一般通过上述 3 个步骤实现定位,接下来本文将从信号调制、接收解调、定位算法 3 个方面出发,介绍可见光定位系统的关键技术.

2 可见光定位调制方法

可见光定位是基于 LED 可见光通信技术的室内定位方法,IEEE 802.15.7 定义了可见光通信的标准,主要是对于可见光通信的调制方案和调光支持的研究[7].在定位系统中白光 LED 作为发射端,既要提供向外发送信息的功能,又要兼顾室内的照明效果.IEEE 802.15.7 中也提出了可见光通信在实际应用中需要解决闪烁和调光两个问题.由于闪烁会导致人眼受到损伤,LED 在调制时一般需要注意闪烁频率的问题.目前并没有关于闪烁频率的统一标准,一般认为超过 200 Hz 的频率是对人体无害的.此外,为了高效利用能源,满足不同场景的照明需求,可见光通信要求 LED 光源具备调光功能,在任意光强等级使系统都能维持正常通信.下面将介绍几种不同的调制方案及其各自的特点.

2.1 OOK 调制

通断键控(On-Off Keying,OOK)又名二进制振幅键控(2ASK),通过单极性不归零码序列来控制正弦载波的开启与关闭.在可见光通信中,通过控制发射端 LED 的开和关来表示“1”和“0”两种状态.需要指出的是,这里的开和关并非表示严格意义上的灯具的亮或灭,而是表示 LED 亮度的两种不同的状态[8].OOK 调制在无线通信领域已有广泛的应用.作为一种较为简单的调制方式,OOK 具有系统简单、易于实现等优点.

LED 产生白光的途径主要分为两类.一种是利用蓝光 LED 芯片激发黄色荧光粉产生白光,另一种是利用 RGB(Red、Green、Blue)三色混合产生白光.RGB 三色 LED 成本较高,目前市场上的 LED 灯具主要采用蓝光 LED 芯片激发黄色荧光粉产生白光的方案.由于黄色荧光粉存在一定的响应时间,所以会导致这种 LED 用作光通信时速率受到限制.文献[9]利用 NRZ-OOK 编码的 LED 可见光通信速率是 10 Mbps.近年来,利用蓝光滤光片和雪崩二极管接收等方法可以将 OOK 调制的通信速率提高到 230 Mbps.相比之下 RGB 三色 LED 利用 NRZ-OOK 调制的通信速率则可以达到 470 Mbps.

OOK 系统简单,对于可见光定位系统来说实现较为容易,但是在抗噪性方面存在不足.

2.2 PPM 调制

脉冲位置调制(Pulse Position Modulation,PPM)通过编码产生脉冲信号,对可见光通信中的信号进行调制.PPM 调制将一个信号持续时间分成 N 个相同的时隙,通过脉冲信号在时隙的位置来表示不同的信息.时隙数 N 和信号位数 n 存在 $N=2^n$ 的关系,对于一组二进制信号 $m_1,m_2,\cdots,m_n$,信号在时隙中的位置为 $K=2^0\times m_1+2\times m_2+\cdots+2^{n-1}\times m_n$.例如,对于 4-PPM 调制系统,图 2 中的 4 个脉冲就分别表示“00”、“01”、“10”、“11”4 个不同的信号.

相比 OOK 调制,PPM 调制系统的收发机较为复杂,在接收端需要对时隙和码元进行同步.此外,PPM 调制存在系统频谱效率低的缺点.由于每个时

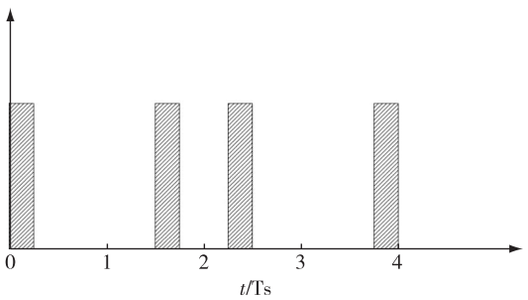


图 2　PPM 调制示意

Fig. 2　PPM modulation diagram

隙中仅有一个脉冲,因此当 n 很大时信号的占空比很低,这就导致整个系统的数据传输速率较低.

为了克服 PPM 系统存在的缺点,人们提出了许多改进的方案.文献[10]提出差分脉冲位置调制(Differential Pulse Position Modulation, DPPM).DPPM 与 PPM 相似,只是把 PPM 一个脉冲结束后多余的时隙删除,使下一个时隙紧跟在上一个脉冲信号结束之后.DPPM 相比 PPM 带宽效率较高,由于每个调制波形均以脉冲结束,因此 DPPM 收发机也较为简单.除此之外,还有子载波脉冲位置调制(Sub-Carrier Pulse Position Modulation,SC-PPM)、变脉冲位置调制(Variable Pulse Position Modulation, VPPM)等调制方案,分别在抗干扰和调光方面对于 PPM 调制进行了改进和提升.

2.3　OFDM 调制

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,OFDM)是一种新型的高效编码技术.OFDM 基于 FFT 和 IFFT 算法,将高速串行数据变换成多路并行子数据流,在正交子信道上传输[11].随着 DSP 技术的发展,采用 DSP 作为系统收发机可以快速实现数据的调制和解调.OFDM 具有带宽效率高、抗多径干扰能力强的优点.OFDM 的发送和接收流程如图 3 所示.

OFDM 调制在发射端经过 QAM 映射、串并转换、预均衡、快速傅里叶变换(IDFT)、加循环前缀和并串转换的过程.串并转换将单路串行信号转换成多路的并行信号,并且进入每个支路单独进行调制.进入子信道的数据流经过快速傅里叶变换变成各子信道子载波的集合.由于信号的多径效应带来的码间串扰,在接收端各子载波之间不再保持良好的正交状态,所以需要在发射端快速傅里叶变换之后加入保护间隔.为了使信号工作在 LED 工作区,需要将产生的 OFDM 信号经过功率放大器放大,再通过偏

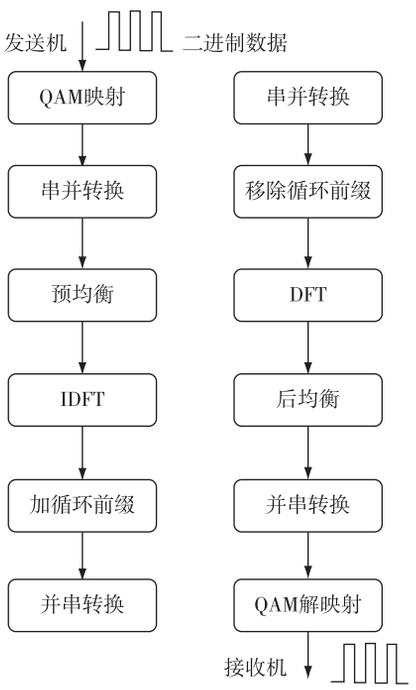


图 3　OFDM 收发机流程

Fig. 3　OFDM system flow chat

置树,这样发射端的流程就已经完成.在接收端通过光电二极管(PD)接收到 LED 的光信号,经过和发射端相反的过程完成解调,还原出原始信号.

尽管 OFDM 调制具有频谱利用率高、抗多径干扰强的特点,但是在可见光通信中还是存在不足.由于 LED 的电流和发光强度之间是非线性的关系,使得采用 OFDM 调制的可见光通信系统的峰值平均功率比(Peak-to-Average Power Ratio,PAPR)较高,这会导致 LED 光源在数据传输过程中发生闪烁,影响照明效果和 LED 寿命[12].此外,OFDM 系统的特性要求在发射端每个 LED 都需要模-数转换器(ADC),在接收端需要配置数-模转换器(DAC),这不仅会增加整个定位系统的成本,而且会导致系统复杂度增加,不利于推广应用.

2.4　FSK 调制

频移键控(Frequency Shift Keying,FSK)通过对信号的频率进行调制,利用不同频率代表不同的信息.FSK 调制的流程如图 4 所示.

在 FSK 调制系统中,两独立的振荡器根据数据的比特流产生两种频率不同的信号.f_H 和 f_L 分别代表数据流中的“0”和“1”.由于信号是根据数据流中的“0”、“1”信号在两振荡器中切换,所以该方法产生的信号是非连续的.产生连续 FSK 信号的方法是

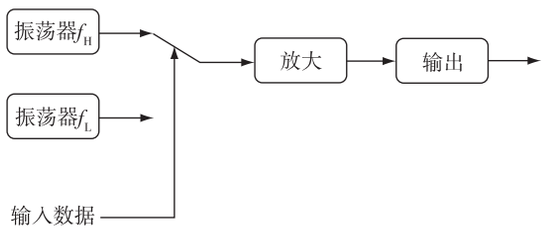


图 4　FSK 调制流程

Fig. 4　FSK modulation diagram

首先产生 FSK 基带信号,然后利用基带信号对单一载波振荡器进行频率调制.

FSK 系统具有实现容易、抗噪声和抗衰减性能较好的优点,在传输速率要求不高的中低速通信领域得到了广泛的应用.

2.5　调制方式总结

上文介绍了几种可见光通信中常用的通信方式,并且比较了各种调制方式的特点.可见光通信的目的是实现信息的高速有效传递,所以需要一种速率高、抗干扰强的调制方式.可见光定位与通信则有所不同.由于在可见光定位系统中,每个 LED 作为信号的发射端向外发送的只有各自的位置信息,相比于一般的通信系统传送的信息量要少很多,所以可见光定位系统对于信息的传输速率并没有太高的要求,一般在几十 kbps 即可满足要求.相比之下可见光系统更加看重调制方式的抗干扰能力以及整体的复杂程度等方面的特性.所以综合上述几种调制方式的特点,FSK 调制由于复杂度较低、实现简单以及较好的抗干扰能力成为可见光定位系统的理想调整方案(表 1).

表 1　不同调制方式性能比较

Table 1　Performance comparison of different modulation methods

调制方式	速率	调光	闪烁问题	抗干扰	复杂度
OOK	偏慢	支持	高	弱	低
PPM	中等	支持	低	中	中等
OFDM	高	不支持	低	强	高
FSK	中等	不支持	低	中	较低

3　可见光定位接收方法

目前可见光定位系统的接收方式主要分为两种,一种是利用图像传感器进行成像的接收,另一种是利用光电二极管等设备进行非成像的接收.

3.1　成像接收

图像传感器可以用来接收光信号,利用图像传感器接收光信号有多种方法.文献[13]利用图像传感器加透镜的方法对 LED 阵列成像,并通过距离的几何关系计算目标位置.此外,目前广泛应用的智能手机的摄像头就是一个典型的图像传感设备.手机摄像头的集成电路上存在阵列排布的光电探测器,利用手机的摄像头接收光信号,可以将智能手机转换成一个可见光定位的终端设备,且无需外加其他模块,方便使用和推广.

采用手机摄像头的图像传感器接收方案虽然具有使用方便的优点,但是光电传感器数量过多会减少相机拍摄时每秒的帧数(framespersecond,fps),一般智能手机每秒最大为 40 帧,这会极大地限制信息传输的速率.手机摄像头在拍摄过程中存在卷帘快门(Rolling Shutter)效应.由于相机传感器上存在大量的光电探测器,因此相机在拍摄过程中并不是一次完成全部像素点的扫描,而是逐行进行扫描,这就是相机的 Rolling Shutter 效应.利用相机的 Rolling Shutter 效应可以提高信息的传输速率.如图 5 所示,对于 FSK 系统,假设 LED 在发送信号时不断在亮-暗状态之间切换,当 LED 处于“亮”的状态时,图像传感器会接收到一行亮纹(图 5a),当 LED 处于“暗”的状态时,图像传感器会接收到一行暗的条纹(图 5b),重复以上过程,最后图像传感器接收到的是明暗相间条纹的 LED 灯的像(图 5c).根据接收到图像上的条纹间距可以解算出 LED 发送端发送的光信息.

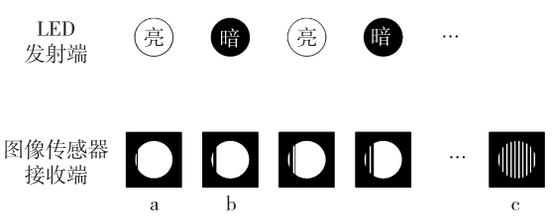


图 5　图像传感器 Rolling Shutter 效应示意

Fig. 5　Rolling Shutter effect of image sensor

3.2　非成像接收

在光信号的非成像接收中,采用光电二极管是一种典型的接收光信号的方法.光电二极管是由 PN 结组成的半导体器件,可以将接收的光信号转换成电流信号.由于光电二极管的存在,这种接收方案需要独立的模块,在模块中完成光-电信号的转换.图 6 是北京莱博思光电科技有限公司研发的光信号接收模块,信号可以由光电二极管接收通过音频接口传入手机做后续的计算处理(图 6a),或者在有计算功能的独立模块中完成定位解算(图 6b),然后通过蓝

牙等方法向外发送解算后的位置信息.



图 6　可见光定位接收模块

Fig. 6　Receive module of visible light positioning system

与图像传感器相比,光电二极管采样速率较高,一般可以达到兆赫级别的采样速率.

4　可见光定位算法分析

目前可见光定位算法主要分为成像定位和非成像定位两大类.成像定位算法利用图像传感器接收多个 LED 灯发射出的信号,然后解算出位置信息.非成像定位算法包括 ID 法、场景分析法、三角测量法等,其中三角测量法是应用比较广泛的定位算法.三角测量法通过对距离或者角度的测量来实现定位计算,包括测量到达角度(AOA)、到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)、信号强度(RSS).可见光定位算法分类如图 7 所示.

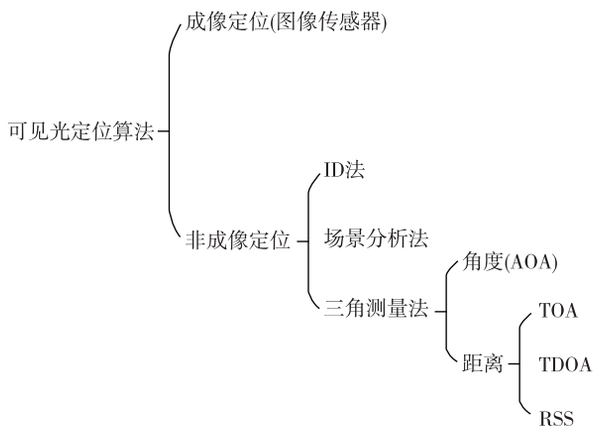


图 7　可见光定位算法分类

Fig. 7　Classification of visible light positioning algorithms

4.1　成像定位算法

文献[13]提出的成像定位算法,整个系统结构如图 8 所示.该系统采用三个坐标已知的 LED 作为发射端,LED 发射的光线经过成像透镜,在接收端分别被图像传感器接收,并且解算出各自的三维位置坐标.

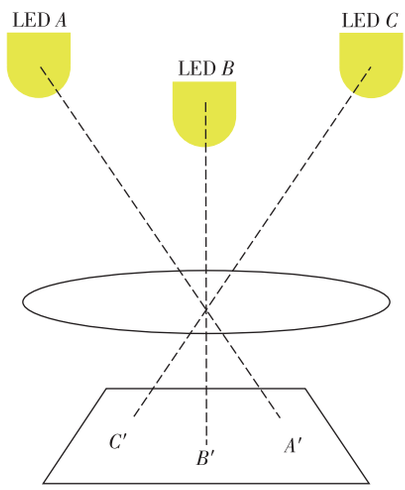


图 8　成像定位算法示意

Fig. 8　Image positioning algorithm

该定位算法必须满足共线条件,即发射点、透镜中心和接收点保持在同一直线上.如图 9 所示.

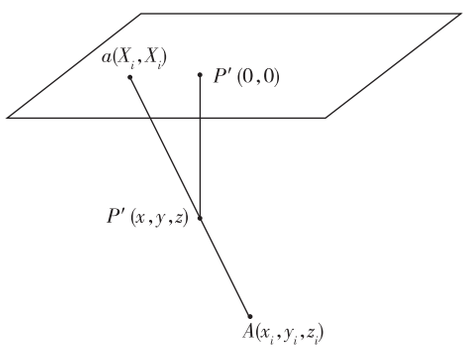


图 9　共线条件

Fig. 9　Collinearity condition

在共线条件下,待测点的位置坐标可以由方程组(1)表示:

$$\begin{aligned} X_i &= -c\frac{m_{11}(x_i-x)+m_{12}(y_i-y)+m_{13}(z_i-z)}{m_{31}(x_i-x)+m_{32}(y_i-y)+m_{33}(z_i-z)},\\ Y_i &= -c\frac{m_{21}(x_i-x)+m_{22}(y_i-y)+m_{23}(z_i-z)}{m_{31}(x_i-x)+m_{32}(y_i-y)+m_{33}(z_i-z)}, \end{aligned} \tag{1}$$

其中 c 是透镜的焦距,$m_{i,j}(i,j=1,2,3)$ 是旋转矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的元素,定义由式(2)给出,其中 ω、Ψ、κ 分别是入射光线的水平角、垂直角和旋转角.

$$\begin{cases} m_{11} = \cos\varphi\cos\kappa, \\ m_{12} = -\cos\varphi\cos\kappa, \\ m_{13} = \sin\varphi, \\ m_{21} = \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa + \cos\omega\sin\kappa, \\ m_{22} = -\sin\omega\sin\varphi\cos\kappa + \cos\omega\sin\kappa, \\ m_{23} = -\sin\omega\cos\varphi, \\ m_{31} = -\cos\omega\sin\varphi\cos\kappa + \sin\omega\sin\kappa, \\ m_{32} = \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa + \sin\omega\cos\kappa, \\ m_{33} = \cos\omega\cos\varphi. \end{cases} \tag{2}$$

按照上述步骤即可求出待测点坐标.成像定位算法精度和传感器分辨率有关,一般具有较高的定位精度.

4.2 非成像定位算法

可见光定位中非成像定位算法主要包括较为简单的 ID 定位法、通过分析对比光强信息的场景分析法以及通过计算距离的三角测量法,其中三角测量法通过测量角度、时间、光强等参数来计算位置.

4.2.1 ID 法

在 LED-ID 定位法中,控制终端将位置信息通过编码调制加载到 LED 灯具上,使每个 LED 灯具携带各自独有的位置信息.LED 将信息以光信号的形式发射出去,在接收端通过接收机接收,通过对光信号的识别判断接收的 ID 信息来实现定位,具体如图 10 所示.

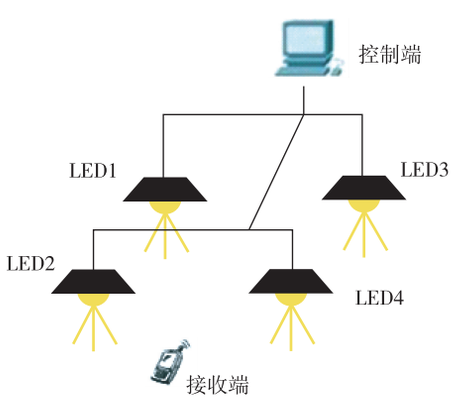


图 10 ID 定位法示意

Fig. 10 ID positioning algorithm

ID 定位法系统结构简单,采用简单编码调制方式即可实现.由于该算法定位时仅凭借单个 LED 的信号实现判决,所以定位精度理论上为两个 LED 间距的一半.

4.2.2 场景分析法

场景分析法通过将接收机接收到的光强信息与已知的光强分布做对比,寻找出光强特征相似的点作为接收机的坐标.场景分析法实现定位主要分为两步:指纹库的建立和实时定位.建立指纹库一般是对场景做网格状划分,测量各点的光强信息并记录在指纹库中.实时定位阶段则是将接收机接收到的光强信号与指纹库中的各点做对比,从而找出相似的点作为定位坐标.

由于场景分析法并不是基于距离的测量和计算实现定位,所以该方法并不受信道的多径反射等干扰的影响,并且可以实现 3D 定位.场景分析法的定位精度主要取决于指纹库建立时的网格划分精度,理论精度为网格两点之间间距的一半.然而,由于场景分析法需要预先建立指纹库,所以该方法的可移植性和灵活性较差.此外,当场景面积较大时,指纹库的建立工作量十分巨大,所以寻找一种合理的简化指纹库的建立方法是该方法未来需要解决的问题.

4.2.3 三角测量法

AOA 法通过测量多个 LED 灯到达接收机的角度来实现定位,其原理如图 11 所示.

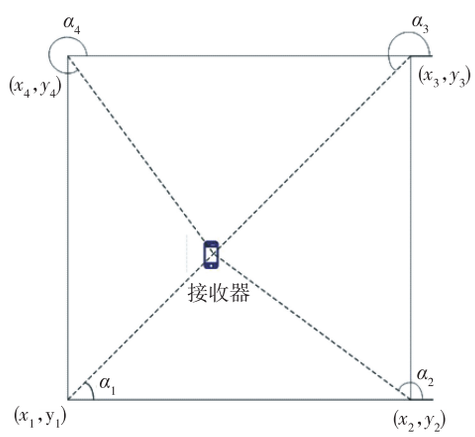


图 11 AOA 定位原理

Fig. 11 Schematic of AOA positioning algorithm

图 11 展示的是 AOA 定位系统在二维平面内的示意.LED 发射端的位置坐标(x_i,y_i)已知,在接收端检测到 LED 灯具的到达角度 α_i,则可确定接收机的位置在从点(x_i,y_i)出发水平角为 α_i 的延长线上.通过综合场景内多个 LED 发射的光信息,并结合最小二乘法即可估计出接收机的位置.AOA 定位方法精度较高,但是角度的测量是该定位法需要解决的重要问题,一般系统的接收机需要配置角度传感器[14].

TOA 定位系统通过测量信号从 LED 发射端发射到接收机接收所用的时间(t_i)来计算接收机与 LED 灯具的距离(R_i),$R_i = c \times t_i$,其中 c 为光速.要实现对于接收机的定位,至少需要接收到三个 LED 发射出的信号.系统原理如图 12 所示.

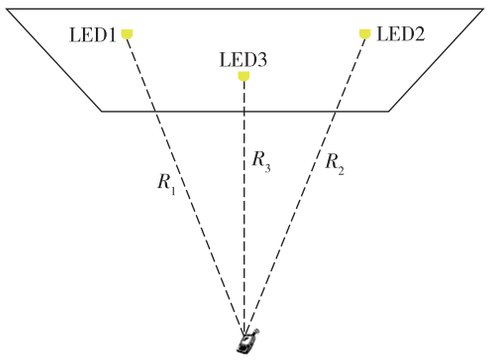


图 12　TOA 定位原理

Fig. 12　Schematic of TOA positioning algorithm

TOA 系统需要所有发射机和接收机时钟同步才能测量出正确的到达时间,所以系统的定位精度和时钟同步率有关.一般来说要实现厘米级的定位精度需要各发射机之间的时间同步到 1 ns 以内.所以,TOA 定位理论上可以达到较高的定位精度,但是相应的成本也比较高.

与 TOA 定位不同,TDOA 通过测量信号从不同的发射端到达接收端的时间差来实现定位[15].TDOA 通过测量一组到达时间差来确定一条双曲线,通过三条双曲线的交点来确定接收机的位置,所以该方法同样至少需要三个 LED 发射端.TDOA 测量的是信号的到达时间差,所以不需要发射端和接收端保持时间同步,仅需要发射端之间时间同步即可[16].

RSS 定位算法通过对光强的检测来计算距离,从而实现定位.对于基于 LED 可见光通信的定位系统,我们主要考虑下行的直射链路的信道,信道增益系数的数学表达式为

$$H(0) = \frac{(m+1)A\cos^m(\varphi)\cos(\theta)}{2\pi d^2}, \tag{3}$$

其中 φ 是 LED 和接收机连线与垂直方向的夹角,d 是 LED 与接收机之间的距离,A 是接收机上光电探测器的有效面积,θ 是入射光线与接收机垂直方向的角度,m 是朗伯阶数,$m = -\ln 2/\ln(\cos \varphi_{1/2})$,$\varphi_{1/2}$ 是 LED 的半功率角,即光强下降到轴向光强一半时对应的角度.整体示意如图 13 所示.

利用式(3)所示的信道衰减模型,我们可以根据

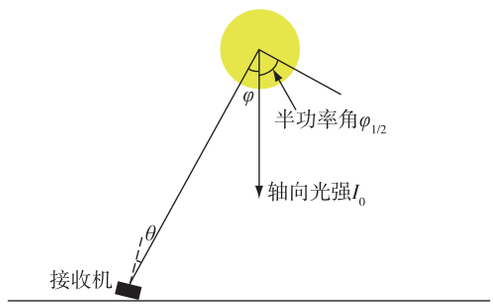


图 13　LED 辐射模型

Fig. 13　Radiation model of LED

接收机接收到的光强来计算接收机和 LED 发射端的距离.一般在 RSS 定位系统中,一个接收机会同时接收到多个 LED 发射端发射的光强信号.如果在发射端对 LED 进行 FSK 调制,使其携带位置信息,则可以判断出接收机距离多个已知坐标 (x_i, y_i, z_i) 的距离 $R_i (i = 1, 2, \cdots)$,所以接收机位置 (x, y, z) 可以由下面的方程组求出:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 = R_1^2, \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 = R_2^2, \\ \cdots \\ (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = R_i^2, \end{cases} \tag{4}$$

其中 i 表示定位时接收到发射机信号的数量,一般 i 等于 3 或 4,此时该方程组为超定方程组,可以采用最大似然估计的方法计算出接收机的坐标.

RSS 定位法的精度和光强分布有关,建立合理的信道模型可以大幅提高定位精度.此外,可以通过在发射端和接收端设计合理的光学天线来获得较为良好的光强分布.由于智能手机等移动端本身具有一定的光强度检测的硬件基础,集成光电二极管的检测设备也可以做到低成本、小型化,所以 RSS 定位法是三角测量法中最容易实现的定位方案.

4.3　定位方法总结

对于上述几种 LED 室内可见光定位算法的性能及特点进行比较,结果如表 2 所示.

成像定位算法利用图像传感器对 LED 的距离进行估算,进而实现定位.该方法的定位精度与系统各部分的分辨率有关,一般具有较高的定位精度.由于智能手机的普及,利用手机摄像头作为图像传感器接收并处理信号可以有效降低系统成本和复杂度.因此该方案具有较高的研究价值和应用前景.

在非成像定位算法中,ID 定位法利用每个 LED 发出的标签信号来实现定位.该方法具有系统简单、

表 2　LED 可见光定位算法比较

Table 2　Comparison of different visible light positioning algorithms

定位算法			精度	复杂度	速度	抗干扰	可移植性	成本
成像定位			高	较高	快	强	强	较高
非成像定位	ID 法		取决于灯的间距	低	较快	弱	较弱	低
	场景分析法		取决于网格划分密度	高	较快	弱	较弱	较高
	三角测量法	AOA	高	较高	中等	较强	强	较高
		TOA	较高	较低	中等	较强	强	较高
		TDOA	较高	较低	中等	较强	强	较高
		RSS	中等	较高	中等	中等	较强	低

易于实现的优点.然而 ID 法的定位精度取决于灯具布设的密度,因此一般定位精度较低,并且抗干扰能力较差.场景分析法利用采集到的光信号与指纹库对比实现定位,定位速度较快,且不存在距离计算过程,功耗需求低.然而场景分析法定位需要事先建立指纹库,对于不同场景的可移植性较差.此外,由于 LED 光通量存在衰减,随着时间的推移指纹库的数据会逐渐失效,影响定位效果.

三角测量法是定位算法中的传统算法.在三角测量法中,AOA 算法通过角度测量来计算方位,具有较高的精度.然而由于 AOA 算法需要特定的角度传感器,所以不便于和现有的智能设备结合并推广.TOA 和 TDOA 定位算法通过对到达时间或者时间差的测量来计算距离,虽然 TDOA 算法不需要发送端和接收端时钟同步,但是这两种算法都需要发送端各 LED 之间实现同步.在室内环境面积较大、LED 数量很多的情况下各发射端之间同步是很难实现的,因此这两种方法都不便于大规模的推广和应用.RSS 从 LED 的下行链路的信道模型出发,建立光照和距离之间的关系,通过测量光强来计算距离,目前已经实现了 10 cm 以内的定位精度.综上所述,RSS 定位算法精度较高,且系统简单,易于实现,是可见光定位算法中性价较高的一种定位算法.

5　总结与展望

本文对可见光定位系统的调制、接收方案以及定位算法做了介绍与比较,在所有调制和算法方案中,综合定位效果和系统成本考虑,重点提出了采用 FSK 调制、RSS 算法的定位方案.相比于其他定位方案,该系统具有较高的定位精度和抗干扰能力,并且结构简单、容易实现、成本低廉,具有较高的推广价值.该系统后续主要需要解决如下几个技术问题:1)对于 NLOS 信道采用适当的迭代算法解决 RSS 算法中常见的由于墙壁反射等多径效应带来的精度下降的问题;2)对于 LOS 信道需要解决环境光(如太阳光)造成的噪声干扰;3)开发可见光定位与惯性导航定位结合的组合定位算法,解决由于光信号被遮挡造成的可见光定位无法工作的问题;4)通过对定位系统发送端和接收端光学天线的设计,提高定位系统整体的精度和稳定性.

可见光定位具有精度高、无电磁辐射、成本低等优点,在仓储定位、地下矿井定位等工业生产场景以及商场、地下停车场、医院等日常生活领域具有极高的应用前景.伴随着 LED 的大规模推广与应用,相信可见光定位必将成为未来室内定位的主流方案.

参考文献

References

[1] 许银帆,黄星星,李荣玲,等.基于 LED 可见光通信的室内定位技术研究[J].中国照明电器,2014(4):11-15
XU Yinfan, HUANG Xingxing, LI Rongling, et al. Research on indoor positioning algorithm based on LED visible light communication [J]. China Light and Lighting,2014(4):11-15

[2] 万群,郭贤生,陈章鑫.室内定位理论、方法和应用[M].北京:电子工业出版社,2012
WAN Qun, GUO Xiansheng, CHEN Zhangxin. Indoor localization:Theory,method and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2012

[3] 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(1):34-41
ZHAO Jiaqi, CHI Nan. Comparative research on several key indoor positioning technologies based on LED visible light communication[J]. Light and Lighting, 2015(1): 34-41

[4] 骆宏图,陈长缨,傅倩,等.白光 LED 室内可见光通信的关键技术[J].光通信技术,2011,35(2):56-59
LUO Hongtu,CHEN Changying,FU Qian,et al.Key technologies of indoor visible light communication based on white LED [J]. Optical Communication Technology, 2011,35(2):56-59

[5] 刘宏展,吕晓旭,王发强,等.白光 LED 照明的可见光通信的现状及发展[J].光通信技术,2009,33(7):56-59
LIU Hongzhan, LÜ Xiaoxu, WANG Faqiang, et al. The current situation and development trend of indoor visible light communication by white LED illumination [J]. Optical Communication Technology,2009,33(7):53-56
[6] 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
SHEN Rui, ZHANG Jian. Indoor location method based on visible light communication[J].Journal of Information Engineering University,2014,15(1):41-45
[7] Rajagopal S, Roberts R D, Lim S K. IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support [J]. IEEE Communications Magazine, 2012,50(3):72-82
[8] Pathak P H,Feng X,Hu P,et al.Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2015,17(4):2047-2077
[9] Park S B,Jung D K,Shin H S,et al.Information broadcasting system based on visible light signboard[J].Wireless and Optical Communications,2007:311-313
[10] Zwillinger D. Differential PPM has a higher throughput than PPM for the band-limited and average-power-limited optical channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory,1988,34(5):1269-1273
[11] 迟楠.LED 可见光通信技术[M].北京:清华大学出版社,2013
CHI Nan. LED visible light communication technologies [M].Beijing:Tsinghua University Press,2013
[12] Afgani M Z,Haas H,Elgala H,et al.Visible light communication using OFDM[C]//IEEE 2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities,2006,DOI:10.1109/TRIDNT.2006.1649137
[13] Yoshino M,Haruyama S,Nakagawa M.High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor[C]//IEEE Radio and Wireless Symposium, 2008,107(6):439-442
[14] Erogluy Y S,Guvency I,Palay N,et al.AOA-based localization and tracking in multi-element VLC systems[C]// IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON),2015:1-5
[15] Do T H,Hwang J,Yoo M.TDoA based indoor visible light positioning systems[C]//Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN),2013:456-458
[16] 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

Review on indoor positioning technology based on visible light communications

WU Nan[1] YANG Aiying[1] FENG Lihui[1] XIN Xiangjun[2]
1 School of Optoelectronics,Beijing Institute of Technology,Beijing 100081
2 School of electronic Engineering,Beijing University of Posts and Telecommunications,Beijing 100876

Abstract Various indoor positioning techniques have been developed and widely applied in both manufacturing processes and people's lives.Due to the electromagnetic interference and multipath effects,traditional Wi-Fi,Bluetooth and other wireless locating technologies are difficult to achieve high accuracy.Modulated white LED can provide both illumination and location information to achieve highly accurate indoor positioning.In this paper,we first introduce several modulation methods of visible light positioning systems and compare the characteristics of different modulation methods.Then,we propose a viable indoor positioning scheme based on visible light communications and discuss two different demodulation methods.In the following,we introduce several positioning algorithms used in visible light communication system.Finally,the problems and prospects of the visible light communication based indoor positioning are discussed.

Key words indoor positioning;visible light;modulation format;positioning algorithms