

# 基于可见光通信室内定位的研究现状与发展

张晓锋, 王敏, 王瑾\*

中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 可见光通信(VLC)室内定位技术将照明与通信相结合。相比传统的室内无线定位手段,VLC室内定位技术具有绿色环保、成本低廉、无电磁干扰、定位精度高和应用场合广泛等优势,具有广阔的应用前景。总结了基于光电传感器和图像传感器两类VLC室内定位技术的原理与特点,重点阐述了当前VLC室内定位技术存在的问题(光源布局不合理、码间干扰和接收装置的灵敏性和稳定性不高)及解决方法(合适的编码方式、正交频分复用技术、分集接收技术和滤波技术等),讨论了VLC室内定位技术的发展趋势和应用前景。

**关键词** 光通信; 室内定位; 码间干扰; 正交频分复用; 分集接收

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.100001

## Research Status and Development of Indoor Positioning Based on Visible Light Communication

Zhang Xiaofeng, Wang Min, Wang Jin

*School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences,  
Wuhan, Hubei 430074, China*

**Abstract** The visible light communication (VCL) based indoor positioning technology combines lighting with communication. Compared with the traditional indoor wireless positioning means, the VCL based indoor positioning technology shows many advantages such as green, energy saving and environmental protection, low cost, no electromagnet interference, high precision and wide applications, and it has broad application prospects. We summarize the principles and characteristics of two types of VLC based indoor positioning technologies based on photoelectric detectors and image sensors. We focus on the major problems that exist in VLC based indoor positioning technology such as irrational layout of light source, inter-symbol interference and receiving device with low sensitivity and stability. In addition, some solutions are also proposed, such as proper encoding, orthogonal frequency division multiplexing, diversity reception and filtering techniques. Finally, the future development trend and application perspective of VLC based indoor positioning technology are discussed.

**Key words** optical communications; indoor positioning; inter-symbol interference; orthogonal frequency division multiplexing; diversity reception

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510; 230.3670

## 1 引言

随着室内环境复杂度的增加,人们对位置信息的需求越来越高。全球定位系统(GPS)的定位技术在室外定位中已经趋于成熟,但是室内环境中的无线电信号被建筑物阻挡,使得接收信号较弱,从而导致定位精度不能满足室内标准,因此GPS等卫星定位技术难以适用于室内环境<sup>[1]</sup>。目前常见的室内定位技术有超声波定位技术、红外定位技术、无线局域网(WIFI)定位技术和蓝牙定位技术等。超声波定位技术根据回波与发射波之间的时间差进行测距,具有很高的定位精度,但是需要在空间布置大量的测量设备,定位成本较高;

**收稿日期:** 2017-04-14; **收到修改稿日期:** 2017-05-15

**基金项目:** 教育部博士点基金(20120145120011)

**作者简介:** 张晓锋(1975—),男,硕士,讲师,主要从事计算机网络、光通信等方面的研究。E-mail: zxfengxz@cug.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: wangjin@cug.edu.cn

蓝牙定位技术通过测量接收信号的强度进行定位,适合短距离、小范围定位,但是稳定性差;WIFI定位技术通过测量用户到无线热点的距离进行定位,易受其他信号的干扰,而且定位器的能耗也比较高;红外定位技术的定位精度高,但是传播距离短、系统成本较高,因此发展受到一定的限制<sup>[2]</sup>。近些年,可见光通信(VLC)得到了飞速发展,基于VLC的室内定位技术相对于以上定位技术具有以下优势。

1) 功耗低。VLC室内定位系统以发光二极管(LED)为光源,LED具有寿命长、功耗低、尺寸小和绿色环保等优点。

2) 定位精度高。LED兼顾照明条件,遍布室内,接收信号比较强,而且定位系统稳定性好。

3) 成本低。VLC室内定位依托于室内LED的天然条件,不需要额外布置特殊的发射点,降低了设备和人工维护费用。

4) 应用场合广。LED的普及和无电磁干扰的优势使得VLC室内定位能够应用于许多苛刻的场合。

基于上述优点,可见光室内定位技术逐渐成为当今的研究热点。现阶段LED室内定位技术还处于起步阶段,但随着VLC室内定位技术的发展,VLC室内定位行业近几年发展非常迅速。许多相关高校和企业的研究机构提出了技术方案,这些机构包括荷兰飞利浦公司、美国马里兰大学、德国海英里希赫兹、美国宾夕法尼亚州立大学、牛津大学,以及国内的清华大学、北京邮电大学、复旦大学、北京理工大学、大连海事大学、中国地质大学(武汉)和华策光通信科技有限公司等。本文首先对当前VLC室内定位技术进行总结,然后对LED室内定位技术存在的问题进行了阐述与分析,最后对基于LED的室内定位技术的发展前景进行了展望。

## 2 VLC室内定位方法

VLC室内定位技术利用LED发出的高速明暗闪烁的信号来传递信息(如发射端的坐标等),通过微控制单元将存储的坐标位置数据快速编码成LED光信息,通过接收端的光传感器等装置接收信号并将光信号转化为电信号,最后对解调出的数据进行计算并给出接收机的实际位置<sup>[3-5]</sup>。从目前国内外利用VLC进行室内定位的研究进展来看,研究人员提出的定位算法根据定位机制可分为基于邻近关系的定位算法、基于几何关系的定位算法、基于场景分析的定位算法和基于航迹推算的定位算法;根据定位范围可分为广域室内定位和局域室内定位<sup>[6]</sup>;按照探测器件的不同可分为图像传感器成像定位和光电探测信号定位<sup>[7]</sup>。

### 2.1 基于图像传感器的成像定位方法

基于图像传感器的成像定位系统示意图如图1所示。在LED与图像传感器之间的平面放置一个透镜,发射点、透镜中心和接收点在同一直线上,根据图中的几何关系可得到待测点的位置信息。

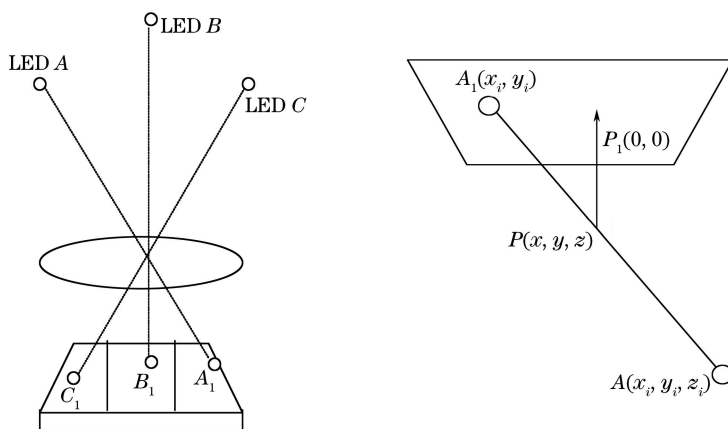


图1 基于图像传感器的成像定位系统示意图

Fig. 1 Schematic of imaging positioning system based on image sensor

在采用图像传感器进行定位的过程中,定位精度与分辨率之间有直接关系。随着图像传感器分辨率的增加,定位精度也随之提高。成像过程中的成像点有可能占据多个像素点,导致量化误差的产生,从而影响定位精度。如何减小量化误差是图像传感器定位的一大难点<sup>[8]</sup>。Moon等<sup>[9]</sup>对图像传感器的成像定位法进行了适当改进,采用双图像传感器算法,提高了定位精度,使得 $x$ 和 $y$ 轴上的误差分别达到了2.26 cm和

5.51 cm。Nakazawa 等<sup>[10]</sup>利用 LED 发射信息(信息中包含 LED 位置编码和循环冗余校验码)、采用四脉冲位置调制(4-PPM)并利用鱼眼透镜照相机装置完成了 5.4 m×7.5 m 的空间定位,水平定位误差与垂直定位误差在 10 cm 内。管扬等<sup>[11]</sup>利用 LED 与摄像头进行成像室内定位,通过适当匹配 LED 的闪烁频率与摄像头的曝光时间,拍摄图像中亮暗相间的条纹(不同的亮暗条纹代表不同编码),对图片进行扫描以获取编码序列并获得 LED 的发射信息,从而获取摄像头与 LED 的相对位置,并结合接收端姿态传感器(电子罗盘)的数据实现定位功能。侯文佐等<sup>[12]</sup>提出了一种依托智能移动终端来实现定位的方法,该方法通过终端成像获取 LED 光源标签和图像信息,使用无损卡尔曼滤波(UKF)算法完成了目标坐标和姿态信息的估算。白勃等<sup>[13]</sup>利用图像传感器接收光信息,并通过相机定标模型计算出接收机的位置和姿态信息,仿真得到 5°级别的姿态角度信息。

## 2.2 基于光电探测器件的定位方法

光电探测器件的定位算法可分为 4 类。基于到达角度(AOA)、到达时间(TOA)和接收信号强度(RSS)的算法属于传统定位算法,需要实时测量,且接收端的功耗较大。基于到达时间差(TDOA)和信号往返时间(RTOF)的算法是对 TOA 定位算法的延伸与改进,对发射机与接收机的同步没有严格要求<sup>[14-18]</sup>。基于 LED 身份信息(LED-ID)的方法是在 LED 满足照明的同时,将当前的位置信息循环加载到 LED 光源上,通过无线光链路传输到移动终端,系统根据接收到的信息解析出在环境中的相对位置<sup>[19]</sup>。Krommenacker 等<sup>[20]</sup>在定位法的基础上提出了一种自适应的 Cell-ID 定位法,采用开关键控(OOK)调制发送位置信息,并将定位系统应用在矿井环境中。黄吉羊等<sup>[21]</sup>以特征光源为固定单元、球形采光装置为移动单元,建立了一种基于 AOA 的三维定位模型,实现了 360°全方位采光,通过光纤和光传感器在 3 m 高的房间里实现了定位,并使得定位误差达到 0.03 m。Eroglu 等<sup>[22]</sup>采用 AOA 定位方法,并利用 UKF 改善了定位效果,使得导航路径误差明显减小。吴楠等<sup>[23]</sup>提出一种基于 RSS 的多个 LED 定位(MLED-RSS)算法,在 6 个 LED 中选择可以组成非钝角三角形的 3 个 LED 作为光源,减弱 RSS 的遮挡效应,仿真结果证明该算法可以取得小于 3.5 cm 的定位误差。

## 3 VLC 室内定位存在的问题及解决方法

与其他定位方法相比,基于 VLC 的室内定位虽然有较多优势,但在技术和实现方面还面临较多问题。

### 3.1 光源布局

在可见光室内定位系统中,光源布局要满足照明与通信的双重需求,LED 的布局要考虑室内光照度分布和接收光功率的分布,不同的光源布局和功率分配会导致不同的照度分布和光功率分布,从而对定位系统的精度造成不同的影响,因此,只有合理布局光源,才能使照度分布尽量均衡并满足国际照明标准<sup>[24]</sup>。在满足照明标准的同时,房间空间大小、光源 LED 的个数、光源与光源之间的距离也是需要考虑的因素<sup>[25-26]</sup>。现有的定位系统可以采用二光源、三光源和多光源进行定位<sup>[27]</sup>。在定位系统的网络结构中,光源间的间距过大将会导致 RSS 过小,信号将被背景光噪声等淹没,使得信噪比(SNR)下降;如果间距过小,不同组网间会相互干扰,造成码间干扰(ISI),使得定位精度下降。Ding 等<sup>[28]</sup>采用 5 m×5 m×3 m 的布局,将 16 个 LED 发射器均匀分布在天花板上,虽然照度能够满足均匀分布,但是角落处的 SNR 较低。因此,在实际应用系统中,为使定位效果最佳,需根据不同的室内形状和大小以及室内设施的分布情况来设置 LED 的布局,以达到最理想的定位效果。

### 3.2 码间干扰

在 VLC 系统中,通常安装在天花板上的 LED 由多个发光 LED 阵列组成,具有较大的发光表面积,而且光在大气信道中传播时会发生反射现象,因而发射机与接收机之间存在多条不同的光路径,不同的光路径到达接收机的时间不同,将会引起 ISI<sup>[29]</sup>。图 2 为多径效应引起的 ISI 示意图。

图 2 中反射路径 2 上的信号与直射路径 1 的信号在到达接收机时产生了时延差,LED 调制信号的两个相邻码元在到达接收探测器时会发生混叠现象,接收端进行抽样判决时可能会出现误码情况<sup>[30-31]</sup>。此外,信道畸变也会导致 ISI,信道不理想会使码元发生拓宽与延迟,造成信号混叠。许多文献中都忽略了非直射链路,只考虑直射链路,这样会降低定位系统精度<sup>[32-34]</sup>。目前许多研究人员致力于研究抑制 ISI 的方法,主流

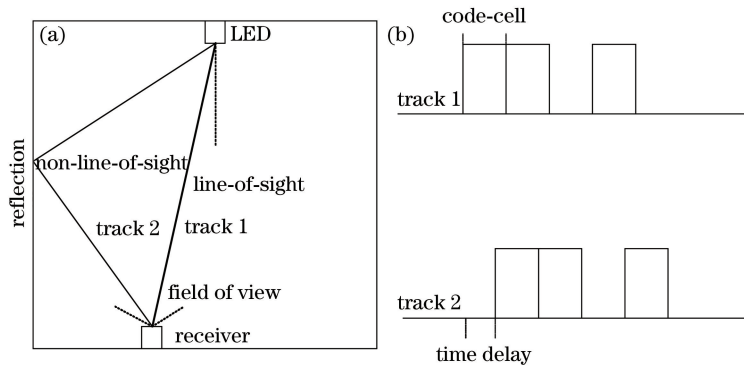


图 2 (a) 多径示意图; (b) 多径效应引起的 ISI

Fig. 2 (a) Multipath diagram; (b) inter-symbol interference caused by multipath effect

的方法有合适的编码技术、正交频分复用(OFDM)技术和分集接收技术。

### 3.2.1 合适的编码技术

目前在 LED 室内定位中比较常见的一种调制方式是 OOK 调制,如果将发射端要发射的信息采用开关键控-归零(OOK-RZ)编码方式代替开关键控-非归零(OOK-NRZ)编码,由于归零码元末尾有一段“0”时间,使得相邻码元之间具有一定的保护时间(码元周期与脉冲宽度的差),如果延迟时间小于保护时间,则不会产生 ISI,但是在实际应用中,该方法降低 ISI 的能力比较有限,其所需的带宽也比较大<sup>[35]</sup>。此外,不同的场景可以采用不同的编码,也可以采用多种编码相结合的方式。Yang 等<sup>[36]</sup>提出了一种差分脉冲幅度调制方式,发射芯片控制 LED 组轮流发射二进制非归零码,将接收端接收信号功率差值作为解调信号,该方式在抗干扰能力方面相比脉冲幅度调制方式具有较大提升,实验证明该调制方式使得速率达到 200 Mbit/s,误码率小于  $7.8 \times 10^{-5}$ 。

### 3.2.2 OFDM 技术

OFDM 技术可以有效抑制 ISI,具有较强的抗多径干扰能力,在无线通信中得到了广泛应用<sup>[37-39]</sup>,在 LED 室内定位中可以采用 OFDM 技术来减小多径干扰带来的定位误差<sup>[40-42]</sup>。OFDM 定位系统示意图如图 3 所示。图中 P/S、S/P 分别表示并串、串并转换,D/A、A/D 分别表示数模、模数转换。

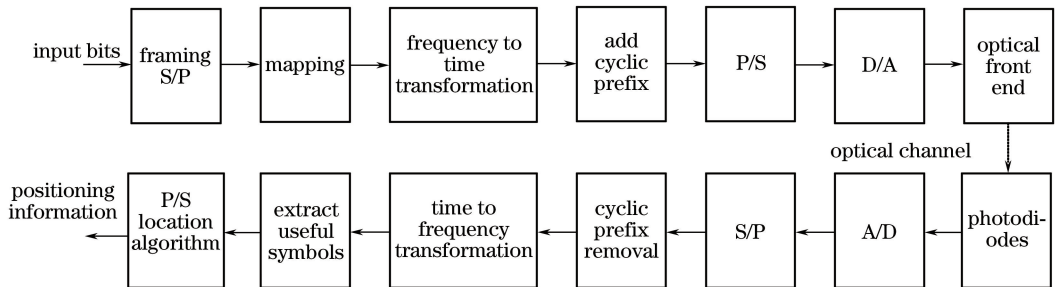


图 3 OFDM 定位系统示意图

Fig. 3 Schematic of OFDM positioning system

OFDM 的基本原理是将高速的数据流转换为多路并行的低速数据,并在多个子载波上同时传输,然后在接收端通过相关解调恢复数据<sup>[43]</sup>。在 VLC 定位系统中,先对电信号进行 OFDM 编码,再加入直流偏置,编码信号被 LED 调制为光信号后进行传播<sup>[44]</sup>。码速率的降低使得由多径干扰导致的时延变小,当 OFDM 码元插入保护时间后,信号的延时被保护时间覆盖,使得 ISI 降低<sup>[45-46]</sup>。关于 OFDM 技术在 VLC 系统中作用的研究较多,但是将 OFDM 应用于 VLC 室内定位中的文献较少<sup>[47-48]</sup>。

### 3.2.3 分集接收技术

分集接收技术是一种抗衰落技术,可以有效提高多路信道传输的可靠性。虽然 LED 室内定位系统中的信号衰落效应不明显,但是采用分集接收技术可以提高 SNR 和减小 ISI<sup>[49]</sup>。分集接收方式的主要思想是通过某些方法在接收端获取多路信号,并按照系统所需的条件进行合并,使得接收的信号能量最大。分集接收



方式可分为空间分集、频率分集、时间分集和极化分集。在 LED 室内定位技术中,主要采取空间分集接收技术,其分集接收原理如图 4 所示。

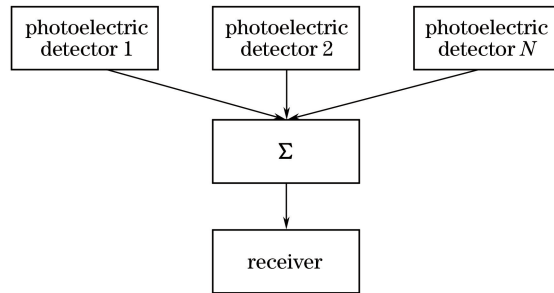


图 4 分集接收原理

Fig. 4 Diversity reception principle

在接收端的不同方向安装多个传感器,以接收各个方向的光信号,对多个接收信号进行比较,一般选取 SNR 最大的信号进行定位。考虑成本与性能,在 LED 室内定位中,信号传输速率不需要太高,因此可以将多个传感器的接收信号进行求和,求和后的信号功率大于单个传感器的接收功率,从而使得 SNR 有较大的提高。研究表明,安装分集接收装置后,平均 SNR 提高了 2 dB<sup>[50]</sup>。李春明等<sup>[51]</sup>提出将自适应技术与分集接收技术相结合,对各路子信号进行加权得出输出信号,利用输出信号和预先设定的期待响应,得到输出误差,最后根据输出误差调整系统权值以得到最理想的输出信号,并提高了信号可靠性。关伟鹏等<sup>[52]</sup>对 LED 身份信息进行码分多址调制,并采用分集接收技术来提高接收增益,使得系统的最大误差为 6.18 cm,且超过 88% 的测试点的定位精度达到 5 cm。

### 3.3 接收装置

室内环境中人的走动或者障碍物的遮挡使得实际定位过程中接收端会不可避免地形成阴影效应<sup>[53]</sup>,因此接收装置需要采用大视场广角光学接收技术来保证同时接收直射信号与散射光信号,避免产生阴影<sup>[54]</sup>。此外,目前大部分的定位算法都需要单独解调电路,但是许多接收电路的灵敏度与稳定性不高,而且没有专门的集成芯片用于定位接收,故在设计接收电路时需要考虑以下问题。

1) 光电探测器。接收装置的核心是光电探测器件和后续的信号处理单元,因此采用何种光电探测器是必须要考虑的因素。光电探测器件应具有灵敏度高、响应速率快和截止频率高等特点。选取合适的光电探测器件,需要综合考虑其灵敏度、偏置电压和暗电流等参数。此外,光电探测器的感光面积也需要考虑,探测面积小会使接收信号较弱,但是如果通过大幅增加光电探测器的物理面积来接收更多的光信号,不仅会增加接收装置的成本和探测器的内部噪声,还会影响接收机的响应带宽。光学聚光器是一种起会聚光线作用的聚光系统,在光电探测器件之前放置光学聚光器可以增强会聚在光电探测器表面的光强<sup>[55-56]</sup>。

2) 滤波技术。对信号进行滤波处理是接收过程中必不可少的一个环节。背景光噪声、电路热噪声和散粒噪声都会影响接收端的定位效果。背景光噪声为低频噪声,电路中电子器件噪声为高频噪声。针对不同的信号频率,设计中心频率与带宽适合的带通滤波器。对于带通滤波器,采用无源滤波电路结构还是有源滤波电路结构需要根据具体的光电转化信号来决定。

3) 解调技术。在 VLC 室内定位中,由于各种噪声的存在、信号在信道传播过程中的衰减,在接收端需要考虑如何判决信号码元,以解调出发射端发出的 LED 位置信息。针对基于 RSS 定位系统中的噪声问题,可以通过 2 种方法降低误码率:第 1 种方法是利用接收功率差实现解调,接收端的接收功率存在自然光等噪声,采用功率差法对接收端的接收功率进行差分运算,则噪声成分可以部分抵消,从而减小噪声带来的影响,降低解调过程的误码情况;第 2 种方法是采用自适应阈值检测判决码元,发射端发射 LED 的位置信息,接收端解调 LED 的位置信息并通过接收功率计算其与 LED 的距离。发射端发送数据结构如图 5 所示。

帧结构采用帧头加数据的方式,帧头采用伪随机(PN)码序列(以下以  $m$  序列为例),接收端将接收数据与本地参考序列进行互相关运算,根据  $m$  序列良好的自相关特性,当本地参考序列与帧头对齐时会出现峰值,以此峰值判定帧头位置,根据帧头的功率(0、1 码元代表的两种功率)进行迭代,获取随接收功率变化的

frame header (PN code)	data 1	frame header (PN code)	data 2	...
------------------------	--------	------------------------	--------	-----

图 5 发送数据结构

Fig. 5 Structure of sending data

自适应阈值,并对数据段的码元信息进行判决,从而解调出发射端发射的位置信息。

除上述根据  $m$  序列的自相关特性来判决帧头位置之外,还可以根据累积法来判定帧头位置。发射数据中帧头码元固定,而数据与噪声具有随机性,根据帧长分割接收的数据,再通过累积相加,帧头部分幅度会稳定增加,而数据段幅度会部分加强或抵消。帧头确定后再根据帧头功率进行相关准则(如 UKF、匹配滤波等)迭代得到门限,最后判决出数据段的码元。累积法仿真结果如图 6 所示,数据结构采用 100 位(帧头 15 位),并进行 1000 次累加。由图 6 可以看出,累积法具有一定的可行性。

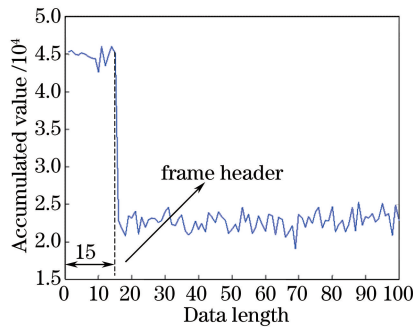


图 6 累积法仿真结果

Fig. 6 Simulation result of accumulation method

4) 接收机抖动。接收机抖动可以分为角度倾斜和垂直距离抖动。已有文献研究接收装置处于水平方向的情况,考虑到实际生活中移动终端的使用情景,移动终端一般是倾斜置于手中,接收端与水平面之间有一定的夹角,因此除了考虑接收端水平方向的情况外,还需要考虑接收端倾斜(即接收角度)的情况。Yasir 等<sup>[57]</sup>在接收装置中加入加速度计,获取接收装置的角度信息,使得定位条件更符合实际生活场景。此外,针对接收机倾斜问题,本课题组将基于 RSS 的定位算法与加速度计相结合,根据接收机处于不同角度时接收功率的不同来实现定位。针对接收机垂直抖动问题,本课题组提出了基于信赖域的三维定位算法,提高了定位精度。

5) 功耗。如今智能移动终端逐渐普及,接收装置与移动设备相结合是未来必然的发展趋势,由此给移动智能终端带来的巨大能耗也是亟待解决的问题。为减小接收装置给移动终端带来的功耗,需要优化接收电路,提高电路效率。

## 4 VLC 室内定位技术的发展态势

利用科学引文索引(SCI)数据库对 2007—2016 年的 VLC 室内定位研究文献进行了检索,检索结果如图 7 所示。大部分文献来源于 IEEE Communications Letters, Optical Engineering, Optical Review, Journal of Light Technology等期刊。关于 VLC 室内定位的论文逐渐递增,特别是在 2011 年以后,其增长趋势非常明显。

如图 8 所示,在 2017 年 3 月对全球硕博论文文摘库(PQDT)和中国知网数据库(CNKI)进行了检索,关键词选为 indoor location 和 VLC,检索结果显示许多高校对 VLC 室内定位开展了诸多研究,研究论文数量呈快速增长趋势,并有望继续保持。

由于海外关于 VLC 室内定位方面的专利较少,这里主要统计了国内关于 VLC 室内定位方面的专利,统计结果如图 9 所示。2012 年之前,关于 VLC 室内定位的专利较少,说明关于 VLC 室内定位方面的研究正处于起步阶段。2012 年之后,VLC 室内定位专利数量上升较快,表明 2012 年之后 VLC 室内定位有了重大突破,技术日渐成熟,由研究阶段逐步转向应用阶段。

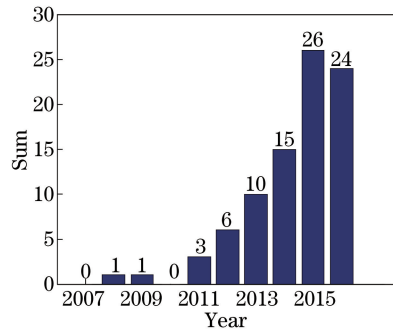


图7 VLC室内定位在SCI期刊上发表的文章统计

Fig. 7 Statistics of papers related with VLC based indoor location published in SCI journals

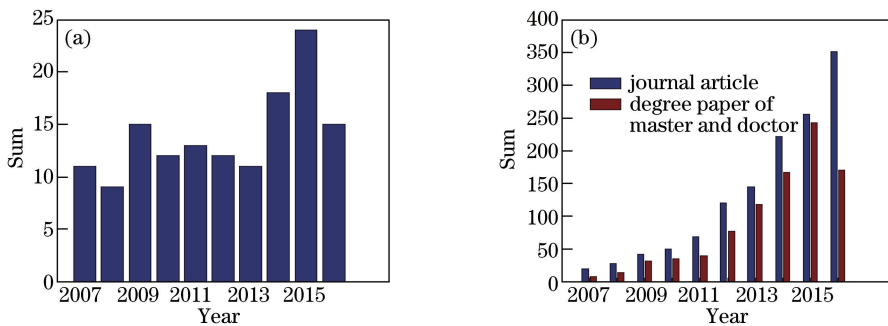


图8 关键词为 indoor location 和 VLC 的文章统计。(a) PQDT;(b) CNKI

Fig. 8 Statistics of published papers in which indoor location and VLC are the keywords. (a) PQDT; (b) CNKI

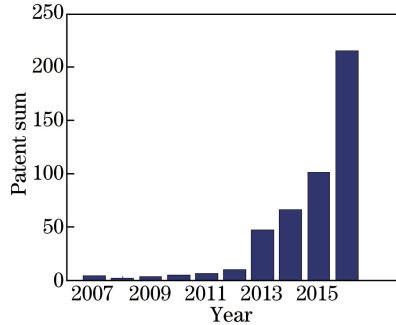


图9 VLC室内定位的专利数统计柱状图

Fig. 9 Statistical histogram of patents related with VLC based indoor location

## 5 重点研究方向建议

考虑到光传播过程中的多径效应和背景光等的影响,为实质性地展开 VLC 室内定位算法的研究,不能单方面考虑某一种干扰。在 VLC 室内定位技术的应用方面,对接收端的指标要求需考虑成本和能否大范围推广等问题。建议今后重点从以下几方面开展工作。

1) 重点研究图像传感器成像室内定位技术。图像传感器能够在不相互干扰的情况下获取图像和数据信息。相比 PIN 二极管和雪崩二极管,图像传感器受到的干扰相对较小。此外,由于手机、iPad 等移动设备自带摄像头等装置,对于硬件的额外需求较小,接收端更能与移动智能终端相结合,便于推广和普及。

2) VLC 室内定位中的数值模拟。传统的大多数算法没有考虑实际中的多种干扰(或是只考虑某一种干扰情况),在研究过程中,要通过实际测量参数与实际传播路径来定量模拟 VLC 室内定位,将多径效应、起伏背景光和人为干扰等加入定位算法,通过实际数据量来确定定位系统,得出更加符合实际情况的定位算法。

3) 针对室内活动规律与场景,考虑移动装置的接收角度和房间物品遮挡等因素,加入姿态传感器来模

拟实际接收情形,或是采用与其他定位算法相结合的算法来提高定位精度。

## 6 VLC 室内定位应用前景

随着经济和技术的发展,室内照明系统不断完善与美化,LED 逐步取代了传统的白炽灯和荧光灯,为 LED 室内定位提供了便利。互联网地图和移动智能终端的飞速发展,也将给 VLC 室内定位带来新的市场<sup>[58-59]</sup>。VLC 室内定位的运用场合广泛,例如大型商场、停车场、矿井、机场和车站等,这些室内定位场合是许多定位企业(如百度、高德等)难以驾驭的地方。

目前高德平台致力推行线上到线下(O2O)的应用,可以显示附近的人、店和车等。图 10(a)所示为高德地图显示的武汉光谷世界城,高德地图通过数据库显示了世界城内的各大店面(不同楼层),但进入世界城后,高德地图无法显示更精确的位置。如图 10(b)所示,VLC 室内定位可以很好地弥补该问题。通过 VLC 室内定位可以确定当前位置,并可以根据个人偏好规划路径。LED 室内路径规划可以采用迪杰斯特拉算法。传统迪杰斯特拉算法可得到起点到终点的最短距离,利用 LED 进行室内路径规划时可以考虑多种因素(如距离、人流量和用户偏好度等),将各种因素的权值进行融合并加入迪杰斯特拉算法,获取起点到终点的最优路径。例如,当前位置为翠华餐厅,目的地为冰雪皇后店面,运用 VLC 室内定位技术,地图可显示出多条路径,例如人流量少的路径 1,路线最短的路径 2,若是偏好美食则可以选择路径 3,因此室外、室内定位结合将会更加满足人们的生活需求。高德等企业还提供应用程序数据接口,使得未来 VLC 室内定位可以借助传统的互联网地图资源平台飞速发展,成为定位行业的新兴市场。



图 10 武汉光谷世界城室内地图。(a)高德地图显示光谷世界城室内图;(b)基于 VLC 室内定位的光谷世界城室内路线规划图

Fig. 10 Maps of optical valley world city in Wuhan. (a) Map of optical valley world city in auto navi map;

(b) path planning map of optical valley world city based on VLC indoor location

在类似图书馆这样庞大、复杂的室内环境中,读者也需要确定自身和书籍的位置信息。对于面积较大的图书馆,即使有传统路标与编目信息的帮助,读者也不容易寻找到目标。基于可见光的室内导航则可以解决这个问题。每个安装在图书馆的 LED 发出调制信号,对应唯一的位置信息,将编码信息与位置信息的对应关系存储于图书馆导航服务器中,读者通过移动设备摄像头拍摄 LED,解码出编码信息,通过将无线网络与图书馆的导航服务器连接,获取 LED 位置。读者通过移动端应用程序输入书籍信息,利用图书馆的数据库与导航服务系统规划出详细的路径,使读者可以快速、准确地找到目标。因此,若是使用 LED 图书馆定位系统,读者只需要在移动端输入书籍资料信息便可以显示当前位置到目标位置的路径,这将给读者带来了极大的便利,具有很大的应用价值。

室内定位的发展也可由点到面辐射,从“定位到人”到“定位到物”。VLC 室内定位最初是实现人的定



位,满足人们对室内位置的需求。由于可见光应用广泛,也可用于对物品的定位。目前机器人、无人机等领域飞速发展(如大疆研制的无人机,百度在最强大脑中推出的智能机器人“小度”等),这些应用需要精确的定位,因此可在机器人和无人机上安装可见光接收模块,从而满足定位需求。Keon<sup>[60]</sup>将 VLC 接收端放置在距离天花板 170 cm 的机器人上,实现了 5 个目标点的路径规划,并且误差低于 3 cm。在仓库、物流单位等场所,对物品的定位成为另一需求<sup>[61]</sup>。通过物品的定位检测,可以知道物品的位置、移动过程,这会极大地方便仓库管理与物流管理。此外,将人、物的定位信息转换为人与人、人与物、物与物的全双工通信方式也是 VLC 室内定位的发展前景。

## 7 结束语

随着 LED 照明技术与 VLC 技术的发展,VLC 定位技术将是室内定位的主要发展方向。研究人员在 VLC 室内定位算法、关键技术和应用等方面提出了诸多方案,并取得很大进展。作为一个新型、绿色的定位技术,VLC 室内定位技术目前还不够完善,LED 室内定位从理论研究转向应用还面临许多挑战。攻克关键技术难题并与其他定位技术相结合,则会使 VLC 室内定位技术得到更好的发展。

## 参 考 文 献

- [1] Liu X, Yang A Y, Wang Y, *et al.* Combination of light-emitting diode positioning identification and time-division multiplexing scheme for indoor location-based service[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(12): 120601.
- [2] Hussein A T, Alresheedi M T, Elmoghani J M H. 20 Gb/s mobile indoor visible light communication system employing beam steering and computer generated holograms[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(24): 5242-5260.
- [3] Tiwari S V, Sewaiwar A, Chung Y H. Optical bidirectional beacon based visible light communications[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26551-26564.
- [4] Zhang Yufei, Zhang Hongming, Wang Peng, *et al.* Long-distance wireless optical communication using source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050602.  
张宇飞, 张洪明, 王鹏, 等. 基于发光二极管光源的远距离可见光通信[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050602.
- [5] Xu Xiao, Chen Mingsong, Tang Lingli. Experimental study based on RGB LED visible light communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 100601.  
许笑, 陈名松, 汤玲利. 基于 RGB LED 可见光通信的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 100601.
- [6] Mostafa A, Lampe L. Optimal and robust beamforming for secure transmission in MISO visible-light communication links[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(24): 6501-6516.
- [7] Xu Y F, Zhao J Q, Shi J Y, *et al.* Reversed three-dimensional visible light indoor positioning utilizing annular receivers with multi-photodiodes[J]. Sensors, 2016, 16(8): 1254.
- [8] Hossen M S, Park Y, Kim K. Performance improvement of indoor positioning using light-emitting diodes and an image sensor for light-emitting diode communication[J]. Optical Engineering, 2015, 54(4): 0451014.
- [9] Moon M, Choi S, Park J, *et al.* Indoor positioning system using LED lights and a dual image sensor[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2015, 19(6): 586-591.
- [10] Nakazawa Y, Makino H, Nishimori K, *et al.* Indoor positioning using a high-speed, fish-eye lens-equipped camera in visible light communication [C]. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2013: 14319173.
- [11] Guan Yang, Sun Dedong, Yin Shugang, *et al.* High precision visible light indoor positioning based on image communication[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1206001.  
管扬, 孙德栋, 殷树刚, 等. 基于成像通信的高精度可见光室内定位方法[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206001.
- [12] Hou Wenzuo, Wang Daming, Yang Yang. New method of indoor high accuracy imaging positioning based on LED light source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 060606.  
侯文佐, 王大鸣, 杨阳. 基于 LED 光源的室内高精度成像定位新方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 060606.

- [13] Bai Bo, Tian Hua, Li Xiaobo. Wireless positioning algorithm based on emitting diode lights and camera calibration[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0205003.  
白勃, 田骅, 李晓波. 基于发光二极管光源的相机定标无线定位算法[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0205003.
- [14] Arafa A, Dalmiya S, Klukas R, *et al.* Angle-of-arrival reception for optical wireless location technology[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7755-7766.
- [15] 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.
- [16] Steendam H, Wang T Q, Armstrong J. Theoretical lower bound for indoor visible light positioning using received signal strength measurements and an aperture-based receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(2): 309-319.
- [17] Zhai C Y, Deng Z L, Jiao J C, *et al.* Dynamic weighted data fusion algorithm based on TDOA/RSSI for indoor location [C]. China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings, 2016: 365-374.
- [18] Gaber A, Omar A. A study of wireless indoor positioning based on joint TDOA and DOA estimation using 2-D Matrix pencil algorithms and IEEE 802.11ac[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(5): 2440-2454.
- [19] Yoo M. Enhanced VLC-TDOA algorithm for indoor positioning without LED-ID [J]. The Journal of the Korean Institute of Communication Science B, 2013, 38(8): 672-678.
- [20] Krommenacker N, Vasquez O C, Alfaro M D, *et al.* A self-adaptive cell-ID positioning system based on visible light communications in underground mines [C]. IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA), 2016: 16525691.
- [21] Huang Jiyang, Meng Jun, Zhang Ran. Three-dimensional indoor positioning technology based on characteristic light source[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(7): 1393-1401.  
黄吉羊, 孟潜, 张燃. 基于特征光源的三维室内定位技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(7): 1393-1401.
- [22] Eroglu Y S, Guvenc I, Pala N, *et al.* AOA-based localization and tracking in multi-element VLC systems[C]. IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2015: 15201591.
- [23] Wu Nan, Wang Xudong, Hu Qingqing, *et al.* Multiple LED based high accuracy indoor visible light positioning scheme [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2015, 37(3): 727-732.  
吴楠, 王旭东, 胡晴晴, 等. 基于多LED的高精度室内可见光定位方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3): 727-732.
- [24] Wang Li, Guo Maotian, Tian Hui. A visible light communication light source layout model and performance analysis [J]. Laser Journal, 2016, 37(3): 92-94.  
王丽, 郭茂田, 田辉. 一种可见光通信光源布局模型及性能分析[J]. 激光杂志, 2016, 37(3): 92-94.
- [25] Hao H G, Zhang D D, Tang S. Analysis of the LED lamp arrangement for uniformity of illumination in indoor VLC system[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2014, 18(6): 663-671.
- [26] Gu W, Zhang W, 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.
- [27] Mousa F I K, Hoa L, Ghassemlooy Z, *et al.* Indoor localization system utilizing two visible light emitting diodes[J]. Optical Engineering, 2016, 55(11): 116114.
- [28] Ding J P, Huang Z T, Ji Y F. Evolutionary algorithm based power coverage optimization for visible light communications[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(4): 439-441.
- [29] De Lausnay S, De Strycker L, Goemaere J, *et al.* A survey on multiple access visible light positioning [C]. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EMERGITECH), 2016: 38-42.
- [30] Huang H, Feng L, Guo P, *et al.* Iterative positioning algorithm to reduce the impact of diffuse reflection on an indoor visible light positioning system[J]. Optical Engineering, 2016, 55(6): 066117.
- [31] Mmbaga P F, Thompson J, Haas H. Performance analysis of indoor diffuse VLC MIMO channels using angular diversity detectors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1254-1266.
- [32] Guan W, Wu Y, Wen S, *et al.* High precision three-dimensional iterative indoor localization algorithm using code division multiple access modulation based on visible light communication [J]. Optical Engineering, 2016, 55(10):

106105.

- [33] Kizilirmak R C. Impact of repeaters on the performance of indoor visible light communications[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2015, 23(4): 1159-1172.
- [34] Xiang Y, Zhang M, Kavehrad M, *et al.* Multiband channel characteristics for indoor visible light communications[J]. Optical Engineering, 2014, 53(10): 106101.
- [35] Cai H, Zhang J, Zhu Y, *et al.* Optimal constellation design for indoor  $2 \times 2$  MIMO visible light communications[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(2): 264-267.
- [36] Yang S, Kwon D, Kim S, *et al.* Overcoming bandwidth limitation of light-emitting diode in visible light communication using differential pulse amplitude modulation[J]. Optical Engineering, 2015, 54(12): 126102.
- [37] Al-Moliki Y M, Alresheedi M T, Al-Harhi Y. Robust key generation from optical OFDM signal in indoor VLC networks[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22): 2629-2632.
- [38] Karunatilaka D, Kalavally V, Parthiban R. Improving lighting quality and capacity of OFDM based WDM-VLC systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(20): 2149-2152.
- [39] Yang F, Gao J, Liu S. Novel visible light communication approach based on hybrid OOK and ACO-OFDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(14): 1585-1588.
- [40] Xie G, Yu H, Zhu Y, *et al.* A linear receiver for visible light communication systems with phase modulated OFDM [J]. Optics Communications, 2016, 371: 112-116.
- [41] Gu W, Aminikashani M, Deng P, *et al.* Impact of multipath reflections on the performance of indoor visible light positioning systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(10): 2578-2587.
- [42] Kim D, Yang S, Kim H, *et al.* Frequency optimization for visible light communication based on carrier allocation in offset OFDM[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(6): 1431-1437.
- [43] Chen C, Ijaz M, Tsonev D, *et al.* Analysis of downlink transmission in DCO-OFDM based optical attocell networks [C]. IEEE Global Communications Conference, 2014: 2072-2077.
- [44] Bouchet O, Perrufel M, Topsu S, *et al.* Acemind new indoor full duplex optical wireless communication prototype[C]. SPIE, 2016, 9979: 9979OF.
- [45] He C, Wang T Q, Armstrong J. Performance of optical receivers using photodetectors with different fields of view in a MIMO ACO-OFDM system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(23): 4957-4967.
- [46] Song J, Ding W B, Yang F, *et al.* An indoor broadband broadcasting system based on PLC and VLC [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(2): 299-308.
- [47] Aminikashani M, Gu W, Kavehrad M. Indoor positioning with OFDM visible light communications[C]. IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 2016: 505-510.
- [48] Aminikashani M, Gu W, Kavehrad M. Indoor location estimation with optical-based orthogonal frequency division multiplexing communications[J]. Optical Engineering, 2016, 55(5): 056116.
- [49] Odeyemi K O, Owolawi P A, Srivastava V M. Performance analysis of free space optical system with spatial modulation and diversity combiners over the Gamma Gamma atmospheric turbulence [J]. Optics Communications, 2017, 382: 205-211.
- [50] Yasir M, Ho S, Vellambi B N. Indoor position tracking using multiple optical receivers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1166-1176.
- [51] Li Chunming, Wang Yanpeng, Qin Xiaoxiang. Adaptive diversity receiving technology for indoor visible light communication[J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(5): 1161-1165.  
李春明, 王彦朋, 秦小翔. 室内可见光通信中的自适应分集接收技术[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(5): 1161-1165.
- [52] Guan Weipeng, Wu Yuxiang, Wen Shangsheng, *et al.* Indoor positioning technology of visible light communication based on CDMA modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1106006.  
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): 1106006.
- [53] Kim J, Kang S, Lee S. VLC-based location data transferal for smart devices[J]. Optical Switching and Networking, 2017, 23: 250-258.

- [54] Nuwanpriya A, Ho S, Chen C S. Indoor MIMO visible light communications: Novel angle diversity receivers for mobile users[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(9): 1780-1792.
- [55] Ngoc-Tan N, Suebsomran A, Sripimanwat K, *et al.* Design and simulation of a novel indoor mobile robot localization method using a light-emitting diode positioning system[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2016, 38(3): 305-314.
- [56] Kim J Y, Kim J S, Kang G T, *et al.* An indoor positioning system for mobile robots using visible light communication and fuzzy logic[J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2016, 22(2): 75-82.
- [57] Yasir M, Ho S, Vellambi B N. Indoor positioning system using visible light and accelerometer [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(19): 3306-3316.
- [58] Huynh P, Yoo M. VLC-based positioning system for an indoor environment using an image sensor and an accelerometer sensor[J]. Sensors, 2016, 16(6): 783.
- [59] Ding W B, Yang F, Yang H, *et al.* A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications[J]. Computers in Industry, 2015, 68: 170-178.
- [60] Keon Y Y. Development of a localization system based on VLC technique for an indoor environment [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2015, 10(1): 436-442.
- [61] Guzman G B, Serrano L A, Jimenez V P G. Cooperative optical wireless transmission for improving performance in indoor scenarios for visible light communications[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2015, 61(4): 393-401.