

## 激光与光电子学进展

## 可见光定位系统中最小频率分辨率机理研究

龚树备, 钱智坤, 曹炳尧\*

上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

**摘要** 最小频率分辨率对可见光定位系统的容量起到重要作用, 更小的分辨率能够支持更多的可用地址。为拓展系统容量, 本文首先对物距、图像传感器的曝光时间等可见光成像的主要影响因素进行研究, 并围绕上述因素对最小频率分辨率进行定量分析, 最后通过搭建的可见光定位系统, 以成像区域大小和明条纹数为特征, 采用主流的发光二极管身份(LED-ID)识别算法, 测试了不同物距下准确识别LED-ID所需的最小频率分辨率。实验结果表明: 在物距分别为50、100、200 cm时, 对应的最小频率分辨率为60、100、200 Hz, 随着物距增加, 图像检测能力下降, 最小频率分辨率随之增加。在LED-ID识别率至少满足95%时, 可选择适当的频率间隔以高效分配可用地址, 在物距为250 cm时, 系统容量提升了120%, 为实际应用场景中频率间隔的选择提供了有效参考。

**关键词** 光通信; 可见光定位; 图像传感器; 发光二极管身份; 最小频率分辨率

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220796

## Mechanism of Minimum Frequency Resolution in a Visible Light-Positioning System

Gong Shubei, Qian Zhikun, Cao Bingyao\*

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University,  
Shanghai 200444, China

**Abstract** The minimum frequency resolution plays a critical role in ensuring the capacity of visible light-positioning systems. Lower resolutions can support more available addresses. In this study, the primary factors influencing visible light imaging, such as the object distance and exposure time of the image sensor, were investigated to expand the system capacity. Next, a quantitative analysis of the minimum frequency resolution was conducted based on the above factors. Finally, the minimum frequency resolutions required to accurately achieve light-emitting diode identity (LED-ID) at different object distances were determined using the mainstream LED-ID recognition algorithm based on the visible light-positioning system, characterized by the imaging region size and the number of bright stripes. The experimental results reveal that when the object distances are 50, 100, and 200 cm, the minimum frequency resolutions are 60, 100, and 200 Hz, respectively. With an increase in the object distance, the image detection ability decreases, and the minimum frequency resolution increases. When the LED-ID recognition rate reaches at least 95%, an appropriate frequency interval can be selected to efficiently allocate available addresses. When the object distance is 250 cm, the system capacity increases by 120%. This study provides a valuable reference for selecting frequency intervals in practical application scenarios.

**Key words** optical communication; visible light positioning; image sensor; light-emitting diode identity; minimum frequency resolution

## 1 引言

随着移动通信技术的发展, 基于位置服务(LBS)

的多种智慧应用已成为现代社会的重要组成部分, 全球定位系统(GPS)虽可以提供高质量的室外定位服务, 但由于建筑物的阻挡和室内结构的复杂性, 难以有

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-03-20; 录用日期: 2022-04-28; 网络首发日期: 2022-05-08

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2900800)、上海市科委项目(20511102400, 20ZR1420900)、高等学校学科创新引智计划(111)(D20031)

通信作者: \*caobingyao@shu.edu.cn

效地应用于室内定位,室内定位技术成为当今的研究难点和热点。目前室内定位通常采用射频技术,如基于射频识别(RFID)的定位技术<sup>[1]</sup>、基于超宽带(UWB)的定位技术<sup>[2]</sup>、基于无线局域网(Wi-Fi)的定位技术<sup>[3]</sup>、基于蓝牙(Bluetooth)的定位技术<sup>[4]</sup>等,而传统射频定位技术具有成本高、定位精度较低等缺点。与传统定位技术相比,基于可见光通信(VLC)的可见光定位(VLP)具有成本低、定位精度较高、频谱资源丰富、抗电磁干扰等诸多优点<sup>[5-6]</sup>,近年来受到广泛关注。

依据接收端不同,可见光定位可以分为基于光电探测器(PD)的非成像定位技术和基于图像传感器的成像定位技术。基于PD的大多数研究在仿真层面能够达到厘米级的定位精度。文献[7]提出极限学习神经网络的定位方法,通过仿真定位精度达到1.17 cm。文献[8]将指纹定位的权重求解问题转换为稀疏矩阵的重构问题,平均定位误差为3.67 cm。文献[9]中提出优化径向基函数神经网络的方法,定位误差小于10 cm。以PD作为接收端时,依赖于接收信号强度或角度的测量,对于高精度的测量,在实际应用中易受环境光干扰,而导致有较大的定位误差<sup>[10]</sup>。以图像传感器作为接收端时,定位方法是通过获取多个光源呈现在传感器上的图像,结合图像处理算法与几何空间关系计算出实际位置,对于背景光干扰不敏感<sup>[11]</sup>,定位精度较高。Luxapose系统<sup>[12]</sup>中提出通过手机摄像头作为接收端,结合到达角(AOA)算法以及快速傅里叶变换等方法完成定位。文献[13]通过一个图像传感器结合两盏LED实现了三维定位,定位精度达到厘米级。文献[14]中通过对LED上做一个红色标记点,结合图像中的LED投影的几何参数推导出接收端实际位置,实现了单个LED的定位。

基于图像传感器的定位方法由于其独特的优势逐渐成为主流,其通常采用通断键控(OOK)调制来驱动LED,使用不同的调制频率为LED分配一个身份信息,即LED身份(LED-ID),由于接收端上限频率的限制,能够分配的可用地址有限,这限制了大面积室内可见光定位的应用,许多研究人员进一步地对可见光定位系统容量等进行了研究。文献[15]中提出通过不同频率间的或运算可提供153种ID,在LED被遮挡1/3的面积时仍可正确识别,但该方案较难满足大型室内定位场景的应用。文献[16]中对LED进行改造,通过引入红绿蓝(RGB)三种颜色增加了特征的丰富性,较大程度提升了系统容量,但该方法对LED的改造成本高,且需要图像传感器与LED严格平行,有较大的局限性。

从上述近期的研究来看,更多的可识别LED-ID,对于提高系统容量、满足大型定位场景的应用具有重要意义。而影响容量最为关键的指标是最小频率分辨

率,即可被图像传感器准确识别的相邻频率的最小间隔。为了研究其控制因素和受影响机理,本文首先分析了LED-ID成像的主要受控因素,包括物距、灯具尺寸、图像传感器的主要参数等,并结合上述参数对最小频率分辨率的影响原因机理进行分析,同时结合实际LED-ID识别算法验证了不同物距下最小频率分辨率的极限情况以及选取适当频率间隔对系统容量的提升效果。

## 2 基于可见光成像的室内定位技术

### 2.1 可见光成像原理

图像传感器主要分为电荷耦合器件(CCD)和互补金属氧化物半导体器件(CMOS)两种,与之对应的有全局快门与卷帘快门两种成像原理。CCD采用全局快门,在同一时间段内图像传感器的每行像素同时曝光,卷帘快门则是对每行像素逐行曝光。对LED采用OOK调制以一定频率闪烁时,通过卷帘快门可以将LED的开或关反应为成像时明暗相间的条纹。

如图1所示,当LED光源处于开状态,CMOS传感器在曝光对应行像素时会在其成像平面上对应一个亮条纹,当LED光源处于关状态,则会对应产生一个暗条纹,当所有行都曝光完成后,此时在图像上呈现明暗相间的条纹。

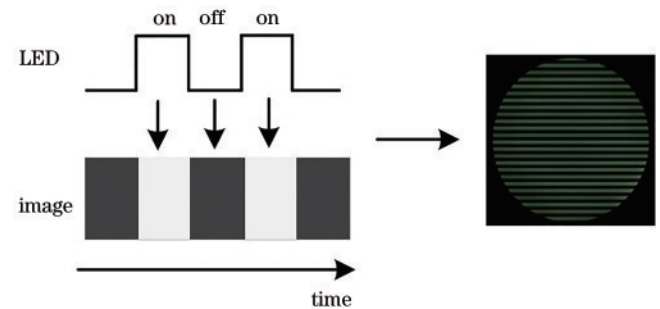


图1 可见光成像原理

Fig. 1 Principle of visible light imaging

### 2.2 LED调制与识别算法

基于图像传感器的定位方法需要准确识别每个LED,每个LED以不同频率闪烁来产生具有不同特征的明暗条纹可对应到唯一的LED-ID。如图2所示,在接收端扫描频率不变的情况下,以不同频率闪烁的LED,在固定物距下会产生不同宽度、不同数量的明暗条纹。当LED灯具闪烁的频率越高,明暗条纹之间的间距就会变小,数量越多,反之间距变大,数量变少。通过相应的图像处理技术来完成特征的提取,结合预先建立的LED-ID指纹库进行匹配,解析出对应的身份(ID),获取对应的地址信息。

要实现LED-ID的识别,首先要从图像中获取LED成像区域。常见的图像处理技术包括图像去噪、灰度转换、二值化,闭运算、轮廓检测等方法以提取每

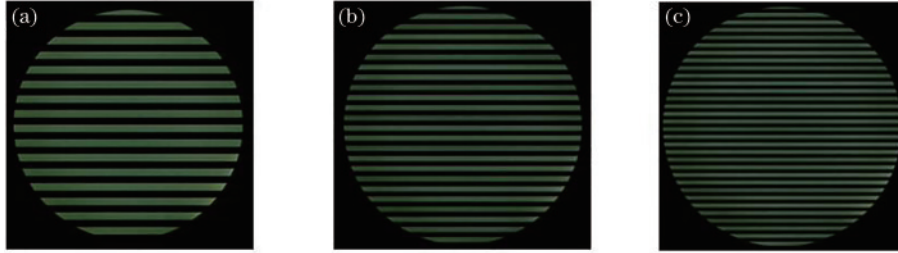


图 2 不同频率下的成像对比。(a)1000 Hz;(b)1500 Hz;(c)2000 Hz

Fig. 2 Imaging comparison at different frequencies. (a) 1000 Hz; (b) 1500 Hz; (c) 2000 Hz

个LED的成像区域。机器学习算法在可见光定位中已经有广泛的应用,在找到LED的成像区域后,可结合机器学习等方法提取图像中特征信息,包括频率特征(明条纹的数量)、LED像素区域的大小(像素区域的直径或面积)等,或通过傅里叶变换来完成LED-ID的识别,最后结合几何关系的转换完成三维定位。

### 3 成像影响因素与最小频率分辨率

#### 3.1 成像影响因素

准确识别LED是实现可见光定位的前提,而LED的成像会影响LED的识别,本节分析了LED成像的主要影响因素,包括LED与图像传感器的距离、图像传感器的感光度、曝光时间等因素。

**曝光时间:**曝光时间是指快门打开后光线进入到感光器件的时间,曝光时间需要小于LED闪烁周期的一半,如LED以500 Hz的频率进行闪烁时,其周期为2 ms,即1 ms开与1 ms关,若曝光时间超过1 ms,则每行像素都会暴露在部分开周期中,降低了对比度,当曝光时间过长时,会导致图像传感器捕获的明暗条纹中亮条纹宽度变宽,覆盖相邻暗条纹,影响LED的识别。

**感光度:**感光度(ISO)代表了图像传感器中感光元件对光线的灵敏度,感光度越高,感光元件的感光能力越强,在相同曝光时间下,像素更快地达到饱和,感光度较高时,明暗条纹对比度较低,在实际应用中需要调低ISO以增强对比度。

**物距与焦距:**图像传感器与LED之间的物距、图像传感器的焦距以及灯具尺寸均会影响LED的成像区域大小,其示意图如图3所示。

设物距为 $h$ 、灯具尺寸为 $l$ 、图像传感器的焦距为 $f$ ,现用 $D$ 表示LED成像区域的直径大小,由几何关系可得

$$D = \frac{f \times l}{h} \quad (1)$$

当焦距越大时,灯具尺寸越大、LED与图像传感器的距离越近时,LED成像区域越大,能够覆盖更多的像素点,图像中特征信息较丰富,反之成像区域越小,含有的特征信息有限,进而影响LED的识别。

#### 3.2 最小频率分辨率分析

设可见光定位系统中上限、下限频率分别为 $f_{\max}$ 、

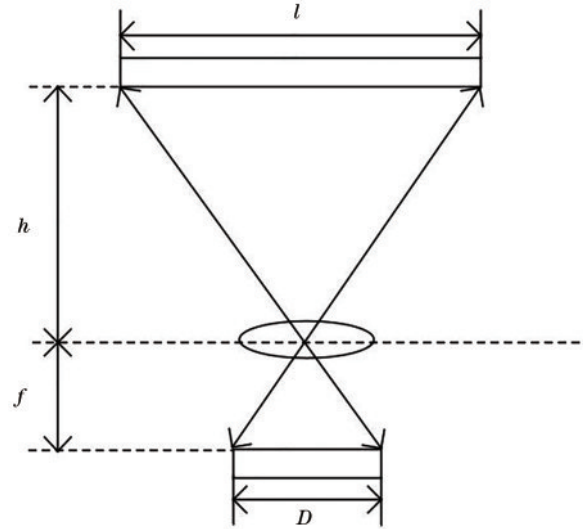


图 3 成像区域大小的影响因素

Fig. 3 Influencing factors of imaging region size

$f_{\min}$ ,由于人眼的限制调制LED的下限频率需要大于100 Hz<sup>[17-18]</sup>,上限频率 $f_{\max}$ 则主要受图像传感器采集频率等硬件因素的限制<sup>[19]</sup>,当LED的调制频率超过该上限频率时,无法获得清晰可见的明暗条纹<sup>[20]</sup>。

在其他参数不变的情况下,不同的调制频率会在LED成像区域上形成不同数量、不同宽度的明暗条纹,设不同调制频率间的最小频率分辨率为 $\Delta f$ ,可见光定位系统可分配地址数如式(2)所示,当 $\Delta f$ 越小,可分配地址数越多,但LED不同调制频率之间的间隔较小时,在成像上没有明显的变化而无法准确识别对应的LED。

$$N = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\Delta f} \quad (2)$$

如图4所示,设LED闪烁周期为 $T$ ,CMOS中的一行像素的曝光时间为 $T_e$ ,读出时间为 $T_r$ ,不同行像素曝光时存在一定的时间间隔。当LED处于开周期时往往有多行像素在同时曝光,则该多行像素在成像时呈现明条纹,若频率分辨率 $\Delta f$ 较小,即 $\Delta T$ 变化较小时,在当前LED开周期内会有相同行数的像素在同时曝光,产生的条纹数量和条纹宽度不会改变,因此通过频率调制时需要预留一定的频率间隔产生足够的特征信息完成LED的识别。

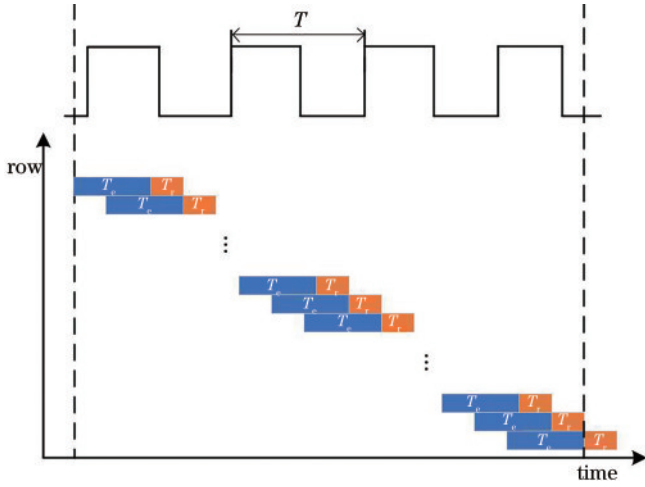


图 4 LED 调制频率与卷帘快门

Fig. 4 LED modulation frequency and roller shutter

但随着物距的增加(此处物距不仅表示为 LED 与传感器的直线距离,还可以间接表示 LED 的直径等因素的等效),图像传感器上所接收的光强与 LED 的成像面积随之减少,成像中的包含的条纹数等特征信息减少,这些因素降低了图像检测的能力,进而影响最小频率分辨率。当物距增加时,为保证 LED 的准确识别,需要增加最小频率分辨率。

因此,最小频率分辨率受物距的影响较大且成正相关的关系,从成像的角度,在 LED 的驱动频率与图像传感器的扫描频率不变时,成像中的条纹宽度不会改变,理论上的最小频率分辨率存在一个最优解,该最优解应满足在当前成像区域内能够产生一条不同宽度的明条纹。

## 4 实验与分析

### 4.1 实验系统搭建

实验装置与系统框图如图 5 所示,在实际的可见光定位系统应用中存在多个 LED 信源,但基于图像传

感器的定位技术能够从空间上分离多个 LED 信源,并分别对分离后的单 LED 信源进行识别,抗干扰能力强,因此仅选用单个 LED 进行实验。

在发射端,实验中通过 MCU(STM32F103)产生 OOK 调制以不同频率驱动 LED 并为其分配 LED-ID,占空比设置为 50%,选取普通商用的圆形 LED 灯筒作为发光源,其发光直径为 17.4 cm,功率为 3 W。使用树莓派 4B 作为接收端,图像传感器采用树莓派 4B 官方摄像头,并设置 ISO 值为 100,曝光时间为 125  $\mu$ s。

在实际应用场景中,由于曝光时间与感光度主要会影响 LED 成像区域中的明暗条纹的对比度,为增强明暗条纹对比度会选择较小的感光度以及尽可能小的曝光时间,此时曝光时间以及感光度的值没有严格限制,能获得清晰的明暗条纹图像即可。而 LED 通常会布设不同的物距,LED 成像区域的大小与其中的条纹数量随之发生变化,因此实验中选取物距为变量,研究其与最小频率分辨率的关系。通过调节图像传感器与 LED 的物距,并结合主流 LED-ID 识别算法<sup>[21]</sup>,选取成像区域大小和明条纹数为二维特征,以 50 cm 为步长,测量了 50~250 cm 范围内不同物距、不同频率间隔下的 LED-ID 识别率。

实验关键参数设置如表 1 所示。

表 1 实验关键参数

Table 1 Key parameters of experiment

Parameter	Value
Resolution of image sensor / pixel	960×720
ISO of image sensor	100
Exposure time of image sensor / $\mu$ s	125
Diameter of LED / cm	17.4
Voltage of LED / V	132
Current of each LED / mA	23

### 4.2 实验步骤与结果分析

实验中首先测试了 LED 识别率与频率间隔的关

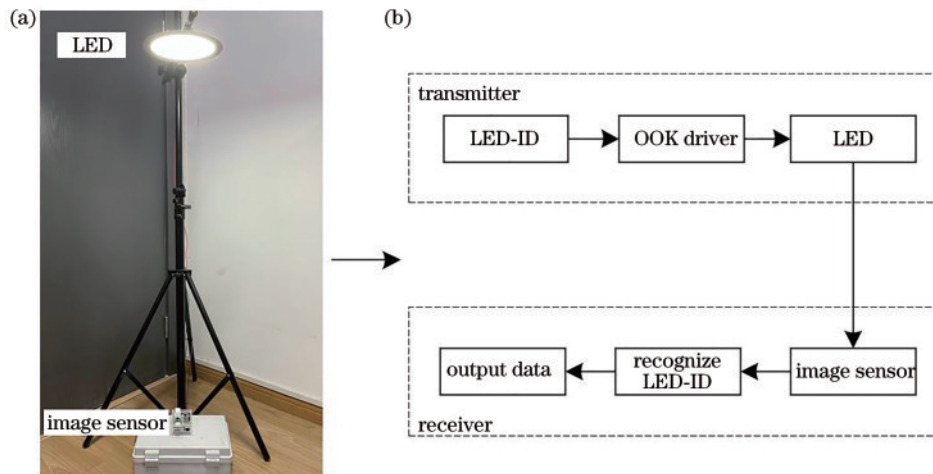


图 5 实验装置与系统框图。(a)实验装置;(b)系统框图

Fig. 5 Experimental device and system block diagram. (a) Experimental device; (b) system block diagram

系,选取物距为 200 cm,其他实验参数如表 1 中所示,基准频率为 2000 Hz,其中频率间隔步长为 10 Hz,从 10 Hz 到 100 Hz 逐步增加,每组训练集与测试集均测量 200 次。

如图 6 所示,当频率间隔为 10 Hz 时,LED 的识别率仅为 55%,当频率间隔达到 70 Hz 时,能够超过 95%

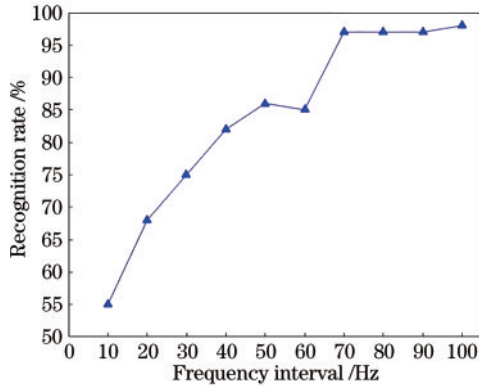


图 6 不同频率间隔下 LED-ID 识别率

Fig. 6 LED-ID recognition rates at different frequency intervals 的识别率。在频率间隔为 60 Hz 时,由于测量误差以及频率间隔较小时识别算法有一定的计算误差,相比

于 50 Hz 时的识别率稍有下降。整体趋势上,当频率间隔越大时,产生的图像特征之间差异越大,LED 识别率越高。

进一步地,本实验中选取了不同物距来研究其对最小频率分辨率的影响,不同物距下成像效果如图 7 所示,随着物距的增加,LED 成像面积随之减少,此时明暗条纹的宽度不会发生变化而明暗条纹数量显著减少。

进一步地,选取基准频率 2000 Hz,物距分别选取 50、100、150、200、250 cm,频率间隔步长为 20 Hz,从 20 Hz 到 200 Hz 逐步增加。不同物距下不同频率间隔的 LED 识别率如图 8 所示,当物距为 50 cm、频率间隔为 60 Hz 时,LED 的准确识别率可达 100%,即此时最小频率分辨率为 60 Hz;当物距为 100 cm 时,所需的最小频率分辨率为 100 Hz;当物距为 200 cm 时最小频率分辨率为 200 Hz。随着距离的增加,降低了图像检测能力,需要相应地增加最小频率分辨率以保证 LED 的准确识别。此外,在保证最小频率分辨率的情况下,LED-ID 识别率达到 100%,LED 已经准确识别并正确解析地址信息,此时可见光定位精度理论上仅与所采用的几何空间关系转换算法有关,不影响定位精度。

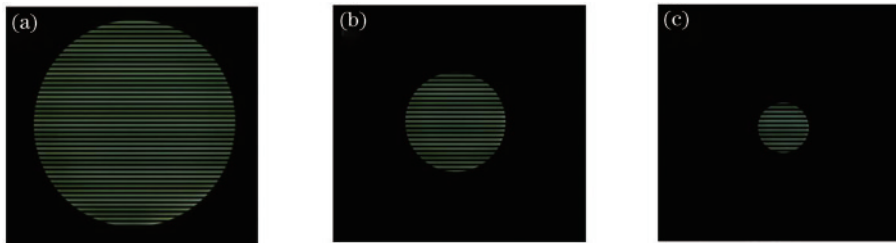


图 7 不同物距下的成像对比。(a) 50 cm; (b) 100 cm; (c) 200 cm

Fig. 7 Imaging comparison at different object distances. (a) 50 cm; (b) 100 cm; (c) 200 cm

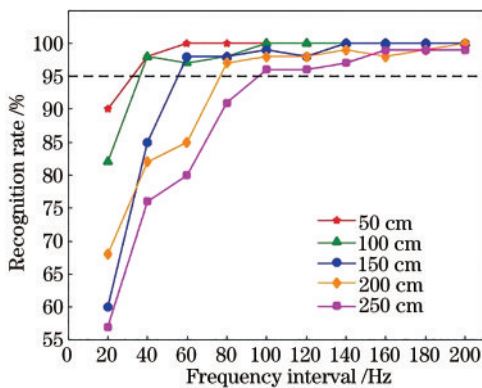


图 8 物距对最小频率分辨率的影响

Fig. 8 Influence of object distance on minimum frequency resolution

在实际应用场景中,若定位场景较小,即分配少量的可用地址即可满足使用,则 LED 之间的频率间隔可设置为大于或等于最小频率分辨率(对应 LED-ID 识别率达到 100% 的最小频率间隔),以保证 LED 准确

识别正确解析其地址信息。若所需较大的系统容量,则可适当减小频率间隔以满足大型定位场景。如图 8 所示,在不同物距下,频率间隔以 20 Hz 为步长递增时,LED 识别率在较低水平至 95% 范围内有显著提升,而当识别率从 95% 提升至 100% 过程中,其变化趋势趋于平缓。即识别率接近 100% 时,相同的频率间隔对提升识别率的效果显著下降。如图 9 所示,依据识别率变化趋势,选取识别率不低于 95% 的频率间隔,此时的频率间隔相比最小频率分辨率显著减小。在物距分别为 50、100、150、200、250 cm 时,其频率间隔可分别选择为 40、40、60、80、100 Hz,对应的最小频率分辨率为 60、100、140、200、220 Hz,在上下限频率确定的情况下,由式(2)可得其可用地址数量分别提升了 50%、150%、133%、150%、120%,虽然 LED-ID 识别率稍有降低,但显著提升了系统容量,能够满足更大的应用场景,且在整体趋势上提升后的系统容量在较小物距处依旧大于较大物距。

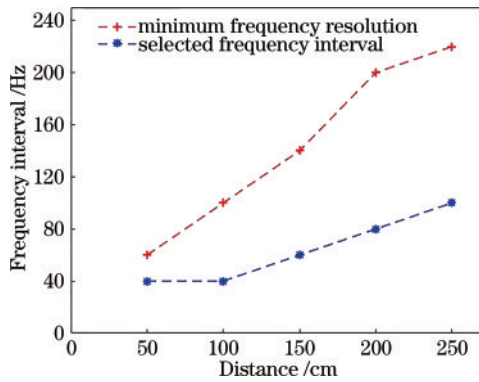


图 9 最小频率分辨率与所选频率间隔对比

Fig. 9 Comparison between minimum frequency resolution and selected frequency interval

## 5 结 论

针对可见光定位系统容量有限的问题,本文研究了最小频率分辨率的影响机理。经实验验证,最小频率分辨率与物距成正相关关系,在物距为 50 cm 时最小频率分辨率为 60 Hz,当物距为 200 cm 时,最小频率分辨率则增加到 200 Hz。在其他参数不变的情况下,随着物距的增加 LED 成像面积减少,图像中特征信息量下降,为保证 LED 的准确识别需要增大最小频率分辨率。在实际的可见光定位系统应用中,结合最小分辨率的物理机理和识别算法准确性,还可通过适当牺牲识别准确性,达到更好的频率间隔,获得更高的系统容量。在 250 cm 的物距下,当识别率下降到 95% 时,可用地址数增加了 120%,能够更好地满足大型定位场景的需求,具有一定的应用价值。室内定位的应用场景越来越大,进一步拓展系统容量将是未来的研究重点,可结合其他室内定位技术取长补短实现融合定位,以及优化 LED 信源布局以拓展系统容量,同样还包括更好的识别算法以提升 LED-ID 识别精度。

## 参 考 文 献

- [1] 兰庆庆, 肖本贤. 基于网格的密度峰值聚类算法的 RFID 定位[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10): 73-78.  
Lan Q Q, Xiao B X. Grid-based density peak clustering algorithm for RFID positioning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(10): 73-78.
- [2] Zhu X M, Yi J J, Cheng J Y, et al. Adapted error map based mobile robot UWB indoor positioning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 6336-6350.
- [3] 赖朝安, 龙漂. 基于高斯过程回归和 WiFi 指纹的室内定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 186-193.  
Lai C A, Long P. Indoor localization method based on Gaussian process regression and WiFi fingerprint[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(2): 186-193.
- [4] 靳赛州, 陈国良, 张超, 等. 一种基于区域优选的自适应蓝牙指纹定位算法[J]. 测绘科学, 2020, 45(8): 51-56.  
Jin S Z, Chen G L, Zhang C, et al. An adaptive Bluetooth fingerprint localization algorithm based on region preference[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(8): 51-56.
- [5] 丁举鹏, 易芝玲, 王劲涛, 等. 可见光定位系统中发光二极管的空间波束效应分析[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0523001.  
Ding J P, Yi Z L, Wang J T, et al. Analysis of light-emitting diodes spatial beam effect in visible light positioning system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0523001.
- [6] 徐世武, 吴怡, 王徐芳. 基于稀疏度自适应和位置指纹的可见光定位算法[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1806003.  
Xu S W, Wu Y, Wang X F. Visible light positioning algorithm based on sparsity adaptive and location fingerprinting[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1806003.
- [7] 秦岭, 王东星, 王凤英, 等. 基于极限学习机神经网络的室内可见光定位方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0304002.  
Qin L, Wang D X, Wang F Y, et al. Indoor visible light positioning method based on extreme learning machine neural network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0304002.
- [8] 徐世武, 吴怡, 王徐芳. 基于粒子群优化压缩感知的可见光定位算法[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0306004.  
Xu S W, Wu Y, Wang X F. Visible light positioning algorithm based on particle swarm optimization compressed sensing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0306004.
- [9] 张慧颖, 于海越, 王凯, 等. 基于 KPCA-K-means++ 和 GA-LMS 模型的改进 RBF 神经网络室内可见光定位[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1906001.  
Zhang H Y, Yu H Y, Wang K, et al. Indoor visible light positioning of improved RBF neural network based on KPCA-K-means++ and GA-LMS model[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1906001.
- [10] Guan W P, Wen S S, Liu L Z, et al. High-precision indoor positioning algorithm based on visible light communication using complementary metal-oxide-semiconductor image sensor[J]. Optical Engineering, 2019, 58(2): 024101.
- [11] Guan W P, Chen S H, Wen S S, et al. High-accuracy robot indoor localization scheme based on robot operating system using visible light positioning[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 7901716.
- [12] Kuo Y S, Pannuto P, Hsiao K J, et al. Luxapose: indoor positioning with mobile phones and visible light[C]// Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, September 7-11, 2014, Maui, HI, USA. New York: ACM Press, 2014: 447-458.
- [13] Kim J Y, Yang S H, Son Y H, et al. High-resolution indoor positioning using light emitting diode visible light and camera image sensor[J]. IET Optoelectronics, 2016, 10(5): 184-192.
- [14] Zhang R, Zhong W D, Kemao Q, et al. A single LED

- positioning system based on circle projection[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 7905209.
- [15] 曲若彤, 冯立辉, 杨爱英, 等. 可见光定位系统中扩展 LED ID 的双频率或运算调制方法[J]. 光学技术, 2020, 46(6): 677-683.
- Qu R T, Feng L H, Yang A Y, et al. Dual frequency or arithmetic modulation method for expanding LED ID in visible light positioning system[J]. Optical Technique, 2020, 46(6): 677-683.
- [16] Guan W P, Li J Y, Wen S S, et al. The detection and recognition of RGB-LED-ID based on visible light communication using convolutional neural network[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1400.
- [17] Chiu H J, Lo Y K, Lin Y L, et al. A cost-effective PWM dimming method for LED lighting applications[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2015, 43(3): 307-317.
- [18] 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.
- Guan W P, Wen S S, Hu H X, et al. Research on visible light communication system based on hybrid modulation technique[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2015, 26(11): 2125-2132.
- [19] 关伟鹏. 基于图像传感器的高精度室内可见光定位算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- Guan W P. Research on high precision indoor visible light positioning algorithm based on image sensor[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [20] Li J Y, Guan W P. The optical barcode detection and recognition method based on visible light communication using machine learning[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2425.
- [21] Xie C Y, Guan W P, Wu Y X, et al. The LED-ID detection and recognition method based on visible light positioning using proximity method[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 7902116.