

室内可见光异步定位系统光学边界研究

陈颖聪^{1,4}, 文尚胜^{1,2}, 关伟鹏³, 邓智聪¹, 向昌明^{1,2}

- (1. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东 广州 510640;
2. 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;
3. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640;
4. 佛山市南海区广工大数控装备协同创新研究院, 广东 佛山 528225)

摘要: 为了研究室内可见光 ID 定位系统中可见光分布对定位功能实现的关系, 搭建可见光通信异步 ID 定位系统, 通过模拟仿真与实验相结合的方法, 得出定位系统的定位范围和传输误码率分布。实验结果表明: 利用 Matlab 可以近似地模拟实际模型的空间光分布, 在光分布的三维分布图中找出定位系统光学边界, 准确地调节定位系统的定位阈值。进一步搭建了 50 cm×50 cm×50 cm 的定位系统原型, 在光学边界范围内实现无误码率的异步通信和定位功能, 而在定位边界上, 信号传输的误码率迅速上升, 当信噪比为 25 dB 时, 在光学边界上会出现 8 cm 的信号盲区, 适当增加系统的信噪比, 将有效降低信号盲区的大小。

关键词: 可见光通信; 室内定位; 光强分布; 误码率

中图分类号: TN929.12; TN312+.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1222001

Research on optical boundary of indoor visible light asynchronous positioning system

Chen Yingcong^{1,4}, Wen Shangsheng^{1,2}, Guan Weipeng³, Deng Zhicong¹, Xiang Changming^{1,2}

- (1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. State Key Laboratory of Luminescence Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
3. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
4. Foshan Nanhai Guangdong Technology University CNC Equipment Cooperative Innovation Institute, Foshan 528225, China)

Abstract: The relationship of the visible light distribution and the positioning function of the indoor ID positioning system was studied. An asynchronous positioning system based on visible light communication was constructed. Through simulation and experiment, the positioning range and bit error rate of the system were measured. The result shows that, the light distribution of the actual model can be approached by the Matlab software. After that, a 50 cm×50 cm×50 cm prototyping was built. Inside the optical boundary, the communication and positioning function can be achieved. And around the optical boundary, the bit error rate of the system rose. When the SNR was 25 dB, an 8 cm signal blind zone was shown around the optical

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 国家文化科技提升计划(GJWHKJTSXM20154464); 广东省科技计划(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: 陈颖聪(1991-), 男, 硕士生, 主要从事可见光无线通信方面的研究。Email: cyc_scut@163.com

导师简介: 文尚胜(1964-), 男, 教授, 主要从事 LED 及 OLED 等方面的研究。Email: shshwen@scut.edu.cn

boundary. The zone can be reduced by improving the SNR of the positioning system.

Key words: visible light communication; indoor positioning; light distribution; bit error rate

0 引言

为了实现室内定位, 基于射频技术和可见光通信技术的室内定位技术随之诞生, 其中 iBeacons 就是利用射频技术进行定位的。射频技术主要包括蓝牙、无线网络等^[1-2], 利用这些方法可以实现米级别的定位, 足以满足超市内定位水平的要求。但是基于射频技术的定位方式, 无可避免地引入电磁干扰, 而且随着用户数量的增加, 系统的可靠性将会下降。可见光通信技术则是利用 LED 光源的亮暗变化实现信号的传输。由于该技术使用 LED 光源作为发射装置, 不仅具有无电磁干扰, 节能环保等特性, 而且已经广泛安装在各大型建筑内, 改装成本低, 更适合用于大型室内定位系统^[3]。

利用三角定位法, 根据位置的几何计算, 可见光通信定位系统可以达到高精度的定位。但这种方法需要每个 LED 灯的传输信号时钟的同步, 而且解码复杂, 难于实现, 研究工作大多限于仿真实验, 精度可达厘米级别^[4]。另外, 有研究人员采用图像处理的方法进行定位。利用鱼眼摄像头捕捉 LED 灯的位置分布, 虽然实现了定位, 但是其采集的速率较慢, 不利于实现 LED 灯具其他光信息的广播^[5]。接近法为折中的定位方法, 其利用网点作为参考点向空间广播独特的位置光信息, 接收端通过判定采集信号强度最大的参考点信号, 从而定位于该节点位置, 该方法易于实现, 而且精度一般不低于网格本身的分辨率, 完全满足于室内定位功能的需要, 而且系统各节点可以异步发送, 响应速度快, 系统带宽大, 可以广播更多的信息。

Shahid 等人^[6]对接近法定位方法进行了介绍, 并且详细地说明了其应用价值。陈灿峰等人^[7]同样采用接近法, 通过设计接收端的光学天线实现精度约为 20 cm 的定位, 但该方法只能保证在光源正下方 5 cm 半径范围内有足够低的通信误码率, 通信区域非常小。娄鹏华等人^[8]等人利用 LED 标签, 实现 Android 操作环境下的室内定位和位置服务系统, 但

未对定位系统的原理和实际应用中影响因素, 如 LED 的特性、灯的高度、灯间距、光学边界等参数进行考虑。

因此, 文中主要对接近法定位方法进行研究, 从其实现原理和关键难点出发, 根据实际环境中 LED 灯的布局 and 特性, 结合 Matlab 快速找出该定位方式稳定工作的边界条件, 并根据仿真条件搭建原型机验证。减少实际应用设计调试的次数, 为高稳定的接近法定位服务通信系统设计提供参考。

1 定位系统设计和讨论

接近法定位方法的工作原理如图 1 所示, 在发射端, 每一个 LED 灯具均赋予独特的 ID 序列作为信标进行广播。首先利用 MCU 芯片, 对 ID 信号进行数字编码, 数字信号通过控制 LED 驱动将电信号 ID 序列转换为光信号 ID 序列。电信号转换为光信号之间的调制过程一般可分为模拟调制和数字调制, 如图 2 所示。模拟调制是将数字转换为模拟信

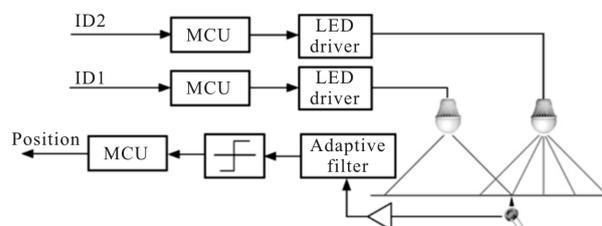
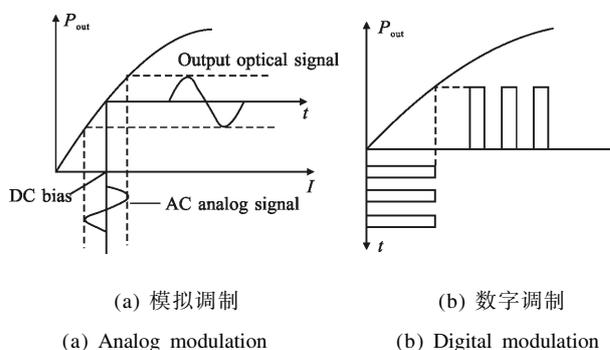


图 1 定位系统的系统框图

Fig.1 Diagram of positioning system



(a) 模拟调制 (a) Analog modulation (b) 数字调制 (b) Digital modulation

图 2 LED 的调制特性

Fig.2 Modulation character of the LED

号,加载到一定的偏置电压上,控制 LED 光信号输出。数字调制则直接根据数字信号控制 LED 亮火来实现。由于系统广播电信号的速率远远低于 LED 芯片的 3 dB 带宽,其传输速度不高,因此接近法的定位系统一般采用第二种调制方式。在接收端,MCU 对光电二极管将捕捉的信源 ID 信号解码获得所对应 LED 灯的位置坐标,实现定位功能。

从接近法定位方式的原理看,其关键在于如何从混合信号中通过电压判断方法分离出目标信号。图 3 给出了接近法信号提取的原理图,其中 Signal 1 是指光电二极管接收到的 LED 灯 1 的信号;Signal 2 是指光电二极管接收到的 LED 灯 2 的信号;Signal 3 是光电二极管接收到的实际信号;Signal 2' 是经过电压判断后的信号, V_{ref} 是电压判断阈值。

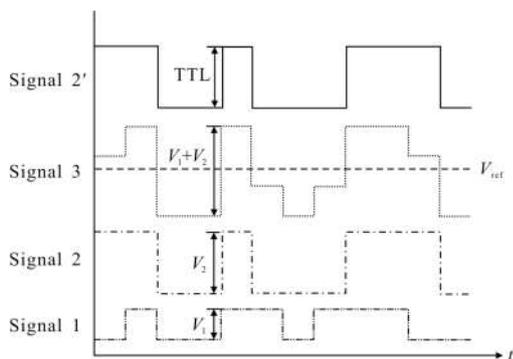


图 3 接近法信号提取原理

Fig.3 Principle of signal restoration based on approach method

光信号在空间中传播时会产生衰减,Signal 1 和 Signal 2 到达光电二极管的距离不同,将转换成不同大小的电信号。假设光电二极管靠近于 LED 灯 2,如图 1 所示,Signal 2 的信号强度要大于 Signal 1 的信号强度,两个不同大小的信号在时域上相互叠加,得到光电二极管接收到的实际信号 Signal 3。通过调节电压判断的阈值 V_{ref} 在 Signal 1 和 Signal 2 峰值电压之间,即可从混合信号中分离信号强度较强的信

号。当 Signal 3 信号高于阈值电压时,恢复为高电平,低于阈值电压时恢复为低电平,从而抽取出 LED 灯 2 的信号 Signal 2'。为了与 MCU 接口电压匹配,Signal 2' 被放大为 TTL 电平。当光电二极管位于两灯中间,其衰减的大小接近,由于电路存在噪声,电压的判断会出现误差的情况,因此在边界上,系统的稳定性会大大降低,讨论系统的边界条件必不可少。

2 实验与讨论

2.1 光学边界确定

根据接近法定位的原理,搭建实验平台如图 4 所示。灯与灯之间的间隔为 50 cm,离目标平面的距离也为 50 cm。四个 LED 发出不同光信号在空间中混合,由光电二极管 S6968 进行采集,经过滤波放大和电压比较电路,提取出对应 LED 灯的光信号,并在 MCU 中解码,得到位置 ID 电信号。

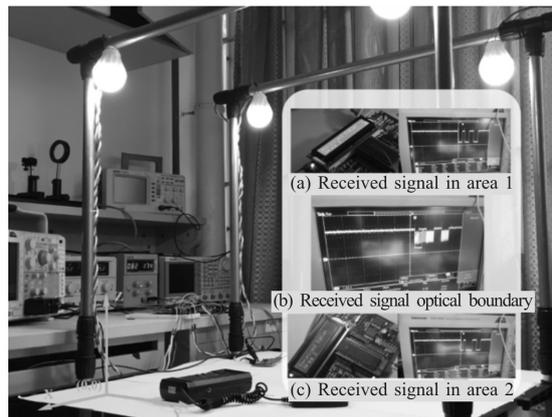


图 4 可见光通信 ID 定位原型机

Fig.4 Prototyping of ID-based visible light communication positioning system

表 1 为单个 LED 灯具点亮时目标平面的照度分布图,其中环境照度为 18 lx,每隔 5 cm 测量一个照度值,其中坐标(0,0)为 LED 灯正下方的坐标点,纵栏表示 x 轴,横栏表示 y 轴,如图 5 所示。可以看出,

表 1 单个 LED 灯在目标平面上的照度分布值

Tab.1 Illumination distribution on received plane under one LED

Location/cm	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
-10	240	218	178	134	96	70	58	47	47	33	30
-5	323	281	213	155	109	78	60	48	38	33	29
0	373	329	245	170	116	82	65	51	39	32	28
5	340	305	232	160	109	79	62	48	37	32	28
10	260	230	182	137	96	70	54	44	36	29	25

在 LED 灯具的正下方,照度值达到最大值 373 lx,并沿 y 轴等比例逐渐减少,在 50 cm 处,即相邻的 LED 球泡灯正下方,所产生的照度值只有 28 lx。在 x 轴方向上,正半轴和负半轴的照度值并不对称,这是由于在改装普通 LED 灯具时,新增的通信模块影响了 LED 芯片位置的固定,导致 LED 芯片极大光强处稍微偏向 x 轴的正半轴。其在空间上的照度分布如图 5 所示,以原点(0,0)为圆心,呈圆环状衰减,符合照度与距离的衰减关系。

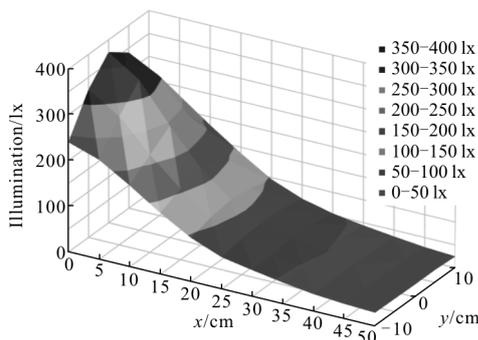


图 5 单个 LED 灯在目标平面上的照度分布图

Fig.5 Illumination distribution map on received plane under one LED

采用 Matlab 软件模拟单灯时的照度分布,将 LED 光源的发光强度表达式转换为笛卡尔坐标系中,可以得到 LED 的照度分布^[9-10],如公式(1)所示。

$$E(x, y, z) = \frac{z^m I_0}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2]^{\frac{m+2}{2}}} \quad (1)$$

式中:(x_0, y_0, z_0) 表示 LED 光源的位置坐标;($x_0, y_0, 0$)表示受照平面上各个点的坐标。设定 LED 的半功率角为 60°,LED 光源位置与受照平面之间的垂直距离为 50 cm,其受照平面上照度分布的归一化曲线如图 6 所示。其中,虚线为实测采样数据所拟合出的照度随距离

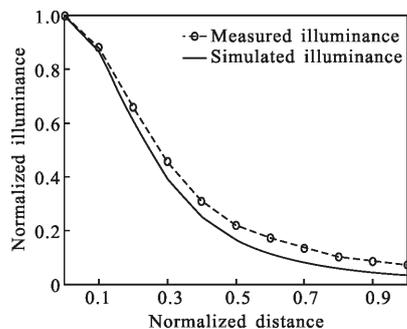


图 6 照度随距离分布归一化曲线

Fig.6 Relationship between normalized illumination and distance

分布曲线;而实线则为 Matlab 仿真的照度距离分布归一化曲线。从图中可见,仿真结果与实测数据拟合度非常接近,可以使用仿真模型近似实际模型。

进一步,通过 Matlab 建模,得到多灯情况下的照度分布情况,从而研究光学边界。两个 LED 灯之间待测的光学边界一般是在其连线的中点上,而从单灯的照度分布情况可知,在离 LED 灯原点 50 cm 时,LED 灯的照度已经比较低。第三个 LED 灯与待测 2 灯的光学边界之间的距离更是大于 50 cm。因此,在研究光学边界时,忽略其他 LED 灯的影响。在 Matlab 中放置两个 LED 光源,其半光强角度设定为 60°,两个 LED 光源间距为 50 cm,离目标平面距离为 50 cm,其三维空间归一化照度分布如图 7 所示。在目标照度平面内,两个 LED 光源的光已经完全混叠在一起,如果选取最外层照度值为电压比较的阈值,将会无法恢复出对应 LED 的光信号,导致定位系统无法运行。而在 LED 灯正下方的地方,两个 LED 的光照度相互独立,将其设为定位边界,定位系统将只接收到定位边界圆以内的光信号,不受其他 LED 光信号的干扰。

将接收模块的电压判断阈值调到最大光学边界上,在各 LED 下方,均能识别到相应 LED 发出的信号。当接受模块移动到光学边界上,从图 4 的示波器可以看出,接收到的信号受到干扰,不能正确接收。这是由于在实际电路中,信号会因为电路噪声的影响,存在一定的波动。在定位边界上,光电二极管距离两个 LED 的距离相等,接收到的 Signal 1 和 Signal 2 强度相近,电路噪声严重影响到信号的判别。为了得到稳定的系统,除了找出光学边界的位置,还需要对光学边界上的通信性能进行研究。

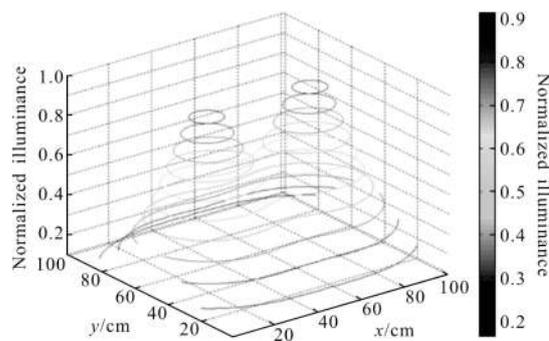


图 7 两个 LED 灯情况下,目标平面的照度分布图

Fig.7 Illumination distribution on the received plane under two LED sources

2.2 系统误码率分析

采用 Matlab 软件对通信系统误码率进行模拟, 图 8 给出的是光电二极管靠近 LED 灯 1 时的原理框图, 其中 R 为光电转换效率, $E(x)$ 为空间传播时的亮度衰减。首先初始信号通过 OOK 调制后, 乘以在空间传播的衰减, 衰减大小由公式(1)给出。然后光信号转换为电信号并混合叠加。经过电压比较和解调还原出 LED 灯 1 的信号 Signal 1'。最后通过比较原始信号与还原信号, 即可以求出误码率。

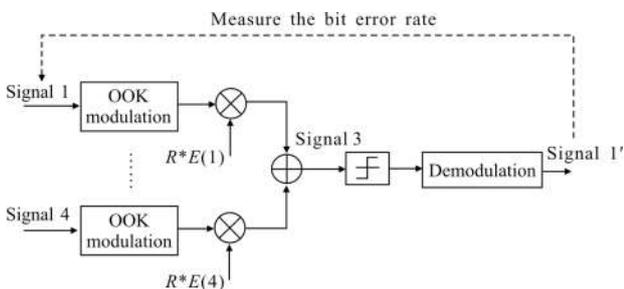


图 8 在 LED 灯 1 下的通信系统误码率仿真流程图

Fig.8 Block diagram of the BER simulation under LED 1

选择定位边界相切时的照度值为电压判断的阈值, 对两个 LED 灯连线上的点作误码率分析, 得到的误码率分布如图 9 所示。当系统信噪比为 25 dB 时, 在 LED 灯正下方到 15 cm 的半径内, 系统误码率为 10^{-6} , 能稳定恢复出对应 LED 灯的光信号。当接近光学边界时, 信号开始互相干扰, 误码率增加, 在光学边界上存在 8 cm 的区域其误码率大于可纠正的允许范围。通过减少噪声大小, 提高系统信噪比, 在信噪比为 30 dB 的情况下, 光学边界上的信号盲区减少到 4 cm。

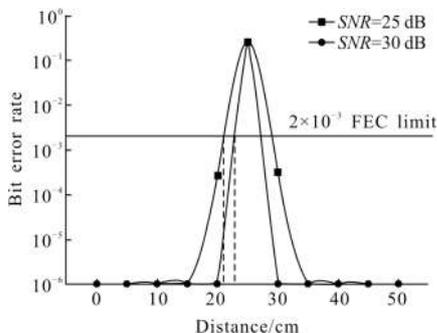


图 9 两个 LED 灯在目标平面上通信误码率随距离的关系

Fig.9 Relationship between the BER and distance on the received plane under two LED sources

3 结论

通过搭建可见光通信异步室内定位系统原型机, 并分析接近法定位方法的定位原理, 得出接近法定位与空间光分布的关系, 对信标法定位的理论进行了补充。利用 Matlab 仿真, 可以准确地模拟 LED 灯在空间光分布的情况, 进一步根据 LED 灯光强分布的三维效果图, 直观地找到接近法的定位边界。而在定位边界上, 会存在一定的信号盲区, 当系统信噪比为 25 dB 时, 信号在定位边界附近误码率超过 2×10^{-3} , 信号盲区达到 8 cm。适当地提升系统的信噪比, 当信噪比为 30 dB 时, 信号盲区可以有效地降低为 4 cm。搭建的定位系统原型机不仅能实现了异步室内信息广播定位, 而且根据仿真模型, 不需反复调试, 即可得到最优的判决门限, 从原理出发, 避免使用试错法的调试方法, 减少了定位系统调试时间。

参考文献:

- [1] 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. (in Chinese)
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.
- [2] Wang Yuqi, Gong Yingkui. An indoor positioning method of visible light communication based on visual information[J]. *Computer Technology and Development*, 2016, 26(1): 200-204. (in Chinese)
王语琪, 巩应奎. 一种基于视觉信息的可见光通信室内定位方法[J]. *计算机技术与发展*, 2016, 26(1): 200-204.
- [3] Chen Quanrun, Zhang Tao, Zheng Weibo, et al. Present research situation and application prospects of VLC based on white LED [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(4): 455-460. (in Chinese)
陈泉润, 张涛, 郑伟波, 等. 基于白光 LED 可见光通信的研究现状及应用前景[J]. *半导体光电*, 2016, 37(4): 455-460.
- [4] Guo Shuxu, Zang Lingling, Han Mingzhu, et al. Interval pulse position modulation in visible light communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1760-1765. (in Chinese)

- 郭树旭, 臧玲玲, 韩明珠, 等. 可见光通信的间隔多脉冲位置调制[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1760-1765.
- [5] Nakazawa Yohe, Makino Hideo, Nishimor Kentaro, et al. LED-tracking and ID-estimation for indoor positioning using visible light communication [C]//2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2015: 87-94.
- [6] Ayub Shahid, Kariyawasam Sharadha, Honary Mahsa, et al. Visible light ID system for indoor localization [J]. *IET International Conference on IEEE*, 2013, 641: 254-257.
- [7] Chen Canfeng, Tan Wei. Visible light communication based indoor positioning system [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, 51(5): 82-87. (in Chinese)
陈灿峰, 谭伟. 一种基于可见光信标的室内定位系统及实现 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(5): 82-87.
- [8] Lou Penghua, Zhang Hongming, Lang Kai, et al. A location-based services system using indoor visible light sources [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23 (12): 2298-2303. (in Chinese)
娄鹏华, 张洪明, 郎凯, 等. 基于室内可见光照明的位置服务系统 [J]. 光电子·激光, 2012, 23(12): 2298-2303.
- [9] Shen Zhenmin, Lan Tian, Wang Yun, et al. Simulation and analysis for indoor visible-light communication based on LED [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (8): 2496-2500. (in Chinese)
沈振民, 蓝天, 王云, 等. 基于 LED 灯的室内可见光通信系统仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2496-2500.
- [10] Li Jing. Research of visible light indoor positioning technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)
李菁. 可见光室内定位技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.