

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210984

基于动态增益的可见光定位系统研究*

程贵东 蔡喜平 刘健 卢钰松 胡延静
(黑龙江大学物理科学与技术学院 哈尔滨 150080)

摘要: 采用固定增益的RSS可见光定位技术可探测的信号光强变化范围小,在弱信号区域定位精度很低、有效定位空间小。提出了基于动态增益的RSS可见光定位系统,通过将接收电路输出信号反馈至控制电路,自动调节主放大器的增益,扩大可探测的信号光强变化范围,提高在弱信号区域的定位精度,从而扩大有效定位空间。实验结果表明,在空间大小为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1.89\text{ m}$ 的实验环境内,可以实现在 $1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ 的空间内高精度定位,相比于固定增益的定位系统有效定位空间扩大了约86.72%。在弱信号区域二维定位对比实验中,较固定增益的定位系统平均定位误差降低了47.05%。系统平均误差均小于5 cm。表明基于动态增益的RSS可见光定位系统在满足室内定位精度要求的同时,可以增大定位空间范围、提高弱信号区域定位精度。

关键词: 室内定位;可见光定位;非成像法定位;RSS定位;三维定位

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

The research on visible light positioning system based on an amplifier with dynamic gain

Cheng Guidong Cai Xiping Liu Jian Lu Yusong Hu Yanjing
(School of Physical Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: To a RSS visible light positioning system based on an amplifier with fixed gain, the detectable range of the light intensity is small, which leads to very low positioning accuracy in the area with weak signal and then results in a decreased space of effective positioning. A RSS visible light positioning system based on an amplifier with dynamically adjustable gain is proposed, where the gain of the main amplifier is adjusted automatically in light of the feedback from the output of the signal processor, thus the detectable range of the light intensity is extended, the positioning accuracy in the weak signal area is improved and the effective positioning space is expanded. Experiments show that within experimental space of $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1.89\text{ m}$, the positioning with high precision can be reached in $1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ space range, where the effective positioning space is expanded approximately 86.72% in comparison to a fixed gain positioning system. Experiments in a two dimensional plane indicate that in the coverage with low signal intensity, the average positioning error is decreased 47.05% for the dynamic gain system compared with the fixed gain system. The average system error is lowered to be less than 5 cm. The study leads to the conclusion that the positioning space is expanded effectively and the positioning accuracy in the weak light signal region is enhanced while the predefined high accuracy requirement of positioning is promised.

Keywords: indoor positioning; visible light positioning; non-imaging positioning; RSS positioning; three-dimensional positioning

0 引言

随着人工智能和物联网技术的发展,室内定位的需求不断增加。室外定位系统如全球导航卫星系统、北斗卫星导航系统等可以实现户外高精度定位,但在室内应用时,由于建筑物墙壁等对卫星信号强度的大幅衰减,定位精度无

法达到室内定位要求^[1]。目前,常用的室内定位技术主要有基于WiFi^[2]、蓝牙^[3]、红外^[4]、超宽带(ultra wide band, UWB)^[5]、超声波^[6]和可见光^[7]等手段的定位技术。相比于其他定位技术,可见光定位(visible light positioning, VLP)的主要优势在于:无电磁污染;绿色节能;成本低;定位精度高;可以同时实现照明、通信和定位;可利用常见光

收稿日期:2022-08-07

* 基金项目:黑龙江大学研究生创新科研项目(YJSCX2022-257HLJU)资助

源发光二极管(light-emitting diode, LED)定位,无需单独安装定位系统,使用更加方便。

VLP可分为成像法和非成像法。成像法是采用电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)或互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)成像器件的定位方法,主要通过图像处理获取定位目标的空间位置坐标,需要强大的图像处理能力,复杂度高。非成像法是指采用光电二极管(photo diode, PD)作为接收器件的方法^[8]。可以采用的非成像方法包括基于接收信号强度(received signal strength, RSS)^[9]、到达时间(time of arrival, TOA)^[10]、到达时间差(time difference of arrival, TDOA)^[11]、到达角度(angle of arrival, AOA)^[12]以及混合机制等方法^[13]。其中基于RSS的定位方法由于具有理论精度高、系统复杂度低等优点而被广泛采用^[14]。

基于RSS的可见光三维定位主要研究内容之一是通过优化定位算法提高系统定位精度,如基于蚁群算法的室内可见光高精度三维定位系统,在 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 的实测定位范围内实现了全部定位点均小于 5 cm 的定位误差^[15];将s型函数数据预处理方法应用于核岭回归机器学习算法的可见光室内定位算法,在 $1/2 \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的三棱柱状实测空间定位范围内实现了水平方向 1.96 cm 和垂直方向 2.16 cm 的平均定位误差^[16]。基于骨干粒子群算法的副载波调制可见光室内定位系统在 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的实测定位范围内实现了约 3 cm 的平均定位误差^[17]。在保证定位精度的同时,算法的收敛速度也是定位中的需要着重考虑的因素,本文将采用一种新的更加高效的全局优化算法—蛇优化(snake optimizer, SO)算法^[18],以提高计算效率,进而提高三维定位速度。

基于RSS可见光定位的基本原理是预先通过实验测量建立空间点的光强和该点到光源距离的对应关系,获取光强随空间位置的分布规律,定位时通过测量光强大小结合定位算法算出位置坐标。为了实现高精度,通常在放大电路中采用固定增益以保证在实际定位时光强分布与预先获得的光强分布一致。在设定电路增益时,如果增益设置过大,信号光强的增加极易导致电路出现饱和,会使定位空间中信号光强大的区域无法定位;如果设置小,则会导致在定位的边缘等信号强度较弱区域接收到的信号强度过小,会产生很大的定位误差,从而缩小有效定位空间范围。特别在三维定位时,这种问题尤其突出。所以采用固定增益的RSS可见光定位必须首先根据实际情况设定合理的放大器增益,灵活性不高;只能在一个较小的空间范围内实现定位,如文献[15-17]中的最大定位范围仅为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 。

为了提高系统弱信号区域定位精度,扩大系统的定位空间范围,提高系统使用的灵活性,提出了一种采用动态增益的RSS可见光定位技术。该技术将可变增益放大器作为主放大器加入到可见光定位系统的接收端中,通过对接

收端主放大器增益的自动调节以适应更大范围的光强变化,实现更大空间范围的定位。可以在接收光强过大时,自动降低增益;在接收光强较弱时,增大系统增益,以提高信噪比,进而提升定位精度。设计基于动态增益的可见光定位系统,在 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.89\text{ m}$ 的空间内进行三维定位实验,并与采用固定增益的RSS定位技术进行实验对比,确定对有效定位空间和弱信号区域定位精度等定位性能的改善。此方法将在保证满足室内定位精度需求的情况下有效扩大系统的定位空间范围,提高系统弱信号区域的定位精度,并将为可见光室内定位的实际应用提供参考。

1 可见光定位模型

基于可见光通信的室内定位模型如图1所示,将4个LED置于空间顶部,为使照度分布均匀4个LED呈矩形分布。以LED4在空间底部的投影点O为坐标原点建立如图所示直角坐标系。LED_{*i*}(*i*=1,2,3,4)的坐标为(*x_i*, *y_i*, *h*),其中*h*为LED到空间底部的垂直距离。接收器坐标为(*x*, *y*, *z*),*z*为接收器感光平面到空间底部的垂直距离。

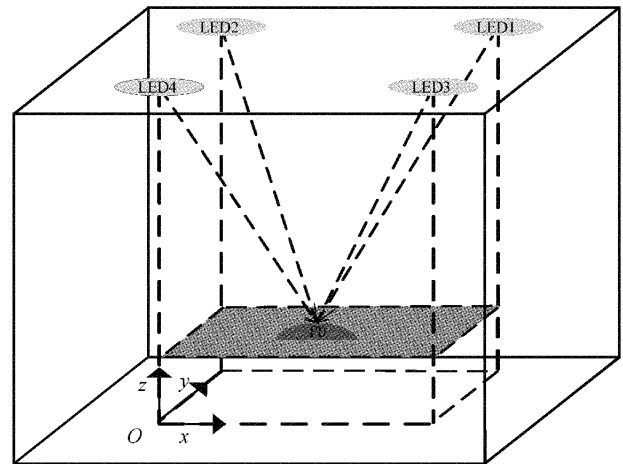


图1 室内可见光定位模型

可见光信号在室内的传输路径分直射和漫反射两种,由于漫反射信号强度远小于直射信号强度,故在定位中仅考虑直射路径。信道模型如图2所示。

直射路径信道直流增益为^[19]:

$$H = \frac{ATG(m_l + 1)}{2\pi d} \cos^{m_l}(\theta) \cos^{m_r}(\phi) \quad (1)$$

式中:*m_l*为LED的朗伯辐射阶数,*A*为PD的感光面积,*m_r*为LED的朗伯辐射阶数,*d*为LED到PD的距离, θ 为光线辐射角,*m_r*为PD的朗伯辐射阶数, ϕ 为光线到达PD的入射角,*T*为光学滤波器增益,*G*为光学聚光器增益。实验时LED和PD均水平放置,即 $\theta = \phi$,故上式变为^[17]:

$$H = \frac{ATG(m_l + 1)(h - z)^{m_l + m_r}}{2\pi d^{m_l + m_r + 2}} \quad (2)$$

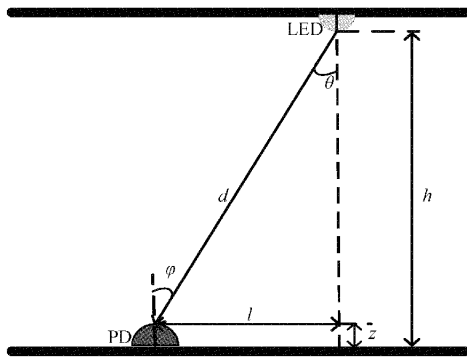


图 2 可见光直射信道模型

2 定位系统原理

2.1 定位系统

定位系统采用频分复用技术。每个 LED 发射不同频

率信号作为其身份信息 (identity, ID)。接收端并行设置 4 条支路,各支路通过窄带滤波电路选择对应的 LED 的信号频率,滤除其他频率信号,并通过后续电路分别对对应频率信号进一步处理,将支路处理后输出的电压信号作为对应 LED 在该位置的信号强度。计算当前位置到对应 LED 的距离,通过定位算法得出当前的位置信息。图 3 为基于动态增益的 RSS 可见光定位系统原理图。发射端信号发生模块产生频率调制信号,再通过驱动电路驱动 LED 发光。PD 将接收到的光信号转换为电信号,再经放大、滤波、检波处理输出至模数转换器 (analog-to-digital converters, ADC) 采集输出电压数据。将 ADC 的输出电压值反馈至增益调节模块,动态调节可变增益放大器的增益。采用 STM32F103ZET6 单片机和数模转换器 (digital-to-analog converter, DAC) 设计了增益调节模块,增益调节模块将当前 ADC 的输出与测量阈值进行比较,实时调节放大器的增益。

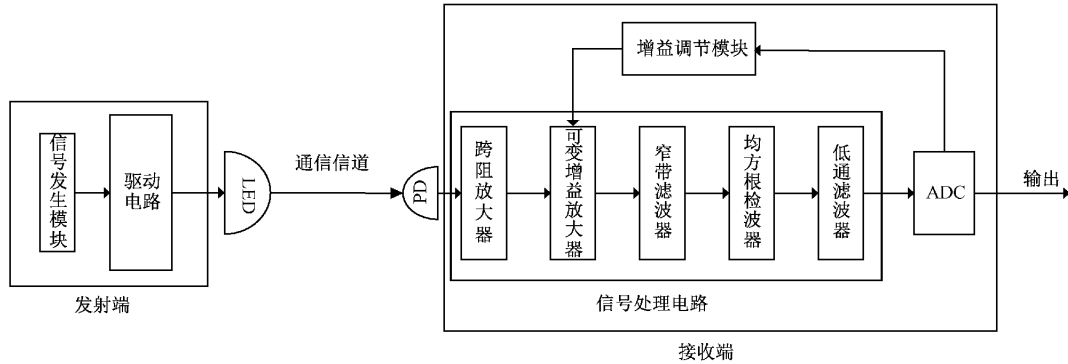


图 3 基于动态增益的 RSS 可见光定位系统原理

增益调节模块的电压输出范围为 0~3.3 V,最小可调电压变化量为 0.8 mV,可实现可变增益放大器 0~40 dB 的增益变化范围和精度为 0.03 dB 的增益变化控制,能够满足对接收端增益变化的需求。窄带滤波器对中心频率为 f 的信号增益为常数 C' ,低通滤波器对低频信号的增益常数为 C'' 。

根据式(2)和图 3 将系统定位低通滤波器输出的电压幅值表示为:

$$U(t) = C \frac{(m_r + 1)(h - z)^{m_r + m_r}}{d^{m_r + m_r + 2}} + u \quad (3)$$

其中, u 为电路偏置电压, C 为常数项,可以表示为:

$$C = \frac{\gamma R' \beta C' K C'' A T G P_0}{2\pi} \quad (4)$$

式中: γ 为 PD 的响应度, R' 为跨阻阻值, β 为可变增益放大器当前的放大倍数, K 为检波器的电压传输系数, P_0 为 LED 的发射功率。由可变增益放大器的数据手册可知:

$$\beta = 10^{\frac{40(V_c - 0.5) - 20}{20}} \quad (5)$$

式中: V_c 为控制电压。

2.2 增益调节

信号处理电路增益调节流程如图 4 所示。增益调节模块读取当前四组接收信号的电压幅值并记录为 V_1, V_2, V_3, V_4 ; 找出 V_1, V_2, V_3, V_4 中的最大值 V_{max} 和最小值 V_{min} ; 对 V_{max} 和 V_{min} 是否满足设定条件进行判断 (V_{max} 大于阈值 1 或 V_{max} 不大于设定值 1 且 V_{min} 小于阈值 2); 若满足条件,则增益调节模块对 DAC 输出电压 V_c 调节,进而改变主放大器当前增益,直至将当前检测电压调节至设定值 1 (或设定值 2),记录此时各组检测电压幅值 $V_{a1}, V_{a2}, V_{a3}, V_{a4}$; 根据式(6)计算并记录 X_{ji} (i 为对应 LED 信号序号, $i=1, 2, 3, 4$), j 为当前 DAC 调节次数,其初始值为 0 且随调节次数递增, X_{ji} 初始值为 1。

$$X_{ji} = \frac{V_i - u_i}{V_{ai} - u_i} \quad (6)$$

式中: u_i 为电路偏置电压。对调节后的 $V_{a1}, V_{a2}, V_{a3}, V_{a4}$ 执行式(7)计算并输出 V_i 。

$$V_i = (V_{ai} - u_i) \cdot X_{1i} \cdot X_{2i} \cdot \dots \cdot X_{ji} + u_i \quad (7)$$

对不满足设定条件的 V_i 则执行式(8)计算并输出 V_i :

$$V_i = (V_i - u_i) \cdot X_{1i} \cdot X_{2i} \cdot \dots \cdot X_{ji} + u_i \quad (8)$$

在调节增益过程中,为使检测电压更高效快速的调节至设定值, V_c 调节遵循比例-积分-微分控制器(proportion-integral-derivative, PID)算法,即:

$$V_c = \frac{p \cdot e + i \cdot E_e + d \cdot e_i}{1240} \quad (9)$$

式中: p 为比例系数, e 为当前检测电压与设定值1(或设定值2)的差值, i 为积分常数, E_e 为当前累计 e 的和, d 为微分常数, e_i 为当前的 e 与上次 e 的差值。系统使用的是12位ADC和DAC,测量和输出范围均为0~3.3V。实验系统中 V_c 的范围为0~1V,在ADC和DAC中数字量对应范围为0~1240,故模拟量 V_c 的表示需要再除以1240。

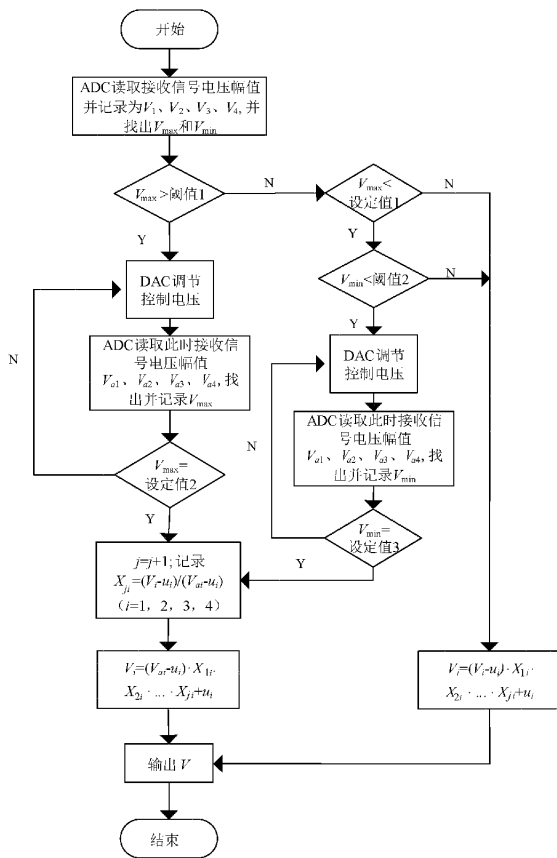


图4 信号处理电路增益调节流程

根据实际测量结果,将PID算法以及增益调节流程中相关参数按表1设置。

表1 PID算法以及增益调节流程中相关参数设置

变量	数值	变量	数值/V
p	0.1	阈值1	3.2
i	0.08	阈值2	1.0
d	0.001	设定值1	1.9
		设定值2	2.0
		设定值3	1.3

2.3 基于SO的三维定位算法

基于RSS的可见光三维定位与二维定位相比最大的不同在于待定位点的高度 z 是未知的。由式(3)可知,这种情况下LED到PD的直线距离 d 无法通过测量电压 U 得到,所以无法通过线性最小二乘法求解坐标。现阶段最常用的求解方法是将非线性问题转化为全局最优化问题进行处理^[20]。

基于SO的三维定位算法中,粒子的位置是否最优取决于粒子的适应度值的大小,室内定位过程中可以根据当前粒子所在位置的RSS值与测量值的差值大小判断当前粒子是否接近最优位置。因为RSS值越大信噪比越高^[17],所以在定位时选取当前测量RSS值最大的3个LED。构建适应度函数为:

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 (U_i - U'_i)^2 - (U_j - U'_j)^2 \quad (10)$$

其中, U_i 为粒子所在位置接收到第 i 个LED的理论RSS值,其计算公式参考式(3), U'_i 为在当前待定位点处测得第 i 个LED的RSS值, j 表示在待定位点测量时具有最小RSS值的LED的ID。按照SO算法流程计算待定位点位置^[18]。

3 定位系统硬件设计

3.1 LED驱动电路

发射端由现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)输出的方波信号作为驱动电路输入信号,其中LED1、LED2、LED3、LED4对应频率分别为9、22、57、89 kHz。驱动电路如图5所示,由运算放大器TL082和场效应管IRF540N构成压控电流源驱动LED发光。

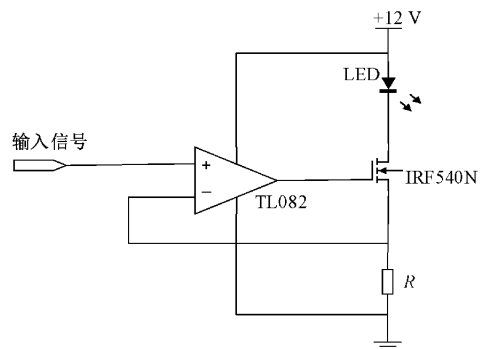


图5 LED驱动电路原理

3.2 信号处理电路

如图6所示,PD将接收到的光信号转化为电流信号,跨阻放大电路将电流信号转化为电压信号;自动增益放大电路对电压信号进行放大,其增益大小由控制电压决定;窄带滤波电路通过串联窄带滤波器提升滤波电路的阻带抑制能力和中心频率增益,选取对应的LED频率信号并进一步放大,滤除其他频率信号;均方根检波电路输出窄

带滤波电路放大后的信号的有效值;低通滤波电路使输出信号更加平稳,减少电路噪声对输出信号的影响。最终输

出信号通过 ADC 进行模数转换,转换结果传输至 PC 端采用基于 SO 的三维定位算法求出当前待定位点位置坐标。

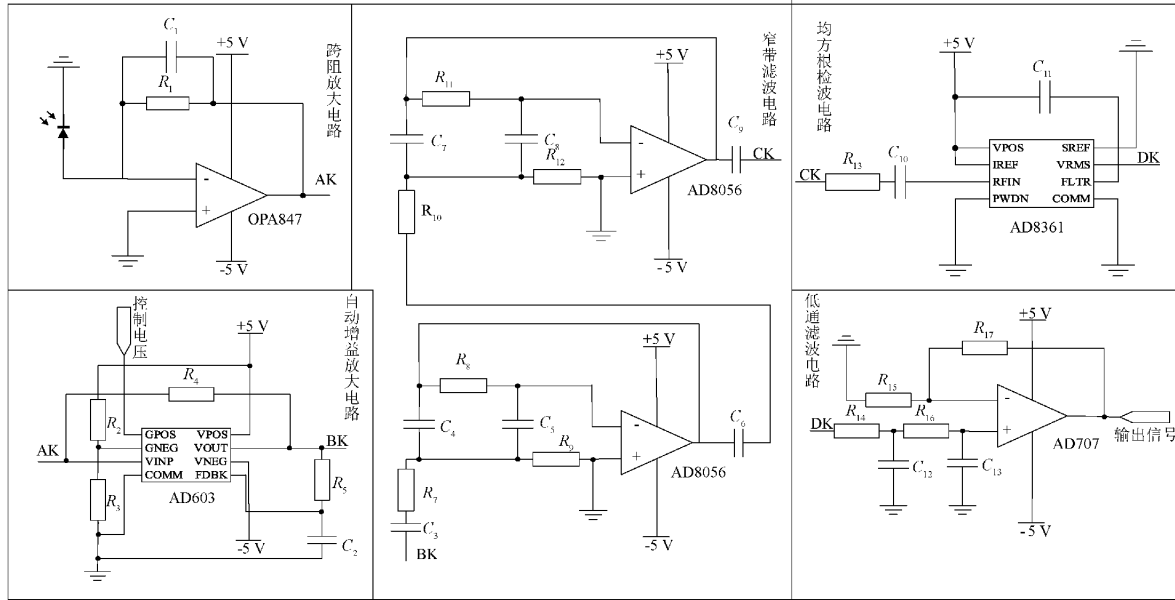


图 6 基于动态增益的 RSS 可见光定位系统接收电路原理

4 实验与结果分析

4.1 实验模型

构建了 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.89\text{ m}$ 的实验模型,如图 7 所示,其中 LED1~LED4 被安装在空间顶部。在图 1 所建立的坐标系中,4 只 LED 对应坐标分别为 $(1\text{ m}, 1\text{ m}, 1.89\text{ m})$, $(0\text{ m}, 1\text{ m}, 1.89\text{ m})$, $(1\text{ m}, 0\text{ m}, 1.89\text{ m})$, $(0\text{ m}, 0\text{ m}, 1.89\text{ m})$ 。将接收端放置在升降台上,通过升降台的升降调节接收端高度 z 。为了减少漫反射对定位的影响,实验环境周围采用低反射率黑布遮挡。

4.2 C_i 和 u_i 的确定

实验选用额定功率为 1 W 的通用型白光 LED,PD 型号为 PD333-3/H0/L2。通过查找相关数据技术手册确定 $m_i = 1, m_r = 2.60078$ 。由式(3)得:

$$U(t) = C_i \frac{2(h-z)^{3.60078}}{[l^2 + (h-z)^2]^{2.80039}} + u_i \quad (11)$$

其中, l 为接收器在高度为 z 时到对应 LED 的水平距离:

$$l = [(x - x_{LED_i})^2 + (y - y_{LED_i})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

其中, (x, y) 为当前测量点的坐标, (x_{LED_i}, y_{LED_i}) 为对应的 LED 坐标。主放大器增益固定为 30 dB ,在高度 $z = 0\text{ m}$ 的平面上,在 l 区间为 $0 \sim 1.4\text{ m}$ 的范围内以步长为 0.05 m 对各 LED 的 RSS 值进行测量,将测量数据按式(3)进行拟合,结果如图 8 所示。从图中可以看出,4 条曲线幅度基本接近,存在差别的原因是各 LED 的发光效率并非完全相同且接收端各支路焊接工艺影响和元件性能的差异。



图 7 RSS 可见光定位实验图

通过图 8 中的拟合曲线可得 C_i 和 u_i 值,如表 2 所示,可以看出 4 组拟合结果的偏置电压 u_i 有较大差别,但由于各支路的偏置电压是稳定不变的,所以其并不会对定位产生影响。4 组拟合数据的确定系数均大于 0.99 ,均方根误

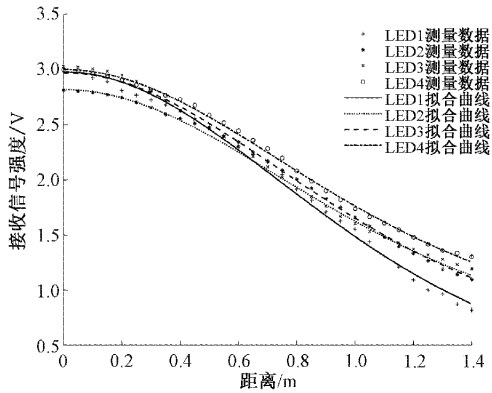


图8 $z=0$ m时,测量点到LED的水平距离与接收信号强度关系

差均小于 63.5 mV,所以拟合结果是可靠的,符合设计理论。

表2 拟合所得的 C_i 和 u_i 值

i	$C_i/$ ($V \cdot m^2$)	$u_i/$ V	确定 系数	均方根误 差/V
1	5.157	2.70×10^{-2}	0.995 3	4.8×10^{-2}
2	4.129	4.54×10^{-1}	0.993 8	6.3×10^{-2}
3	4.552	3.64×10^{-1}	0.996 1	5.4×10^{-2}
4	4.276	5.52×10^{-1}	0.999 4	2.0×10^{-2}

4.3 基于SO的三维定位算法收敛速度实验

为了验证基于SO的三维定位算法的快速高效,将基于SO的三维定位算法与基于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法的三维定位算法在定位时的收敛速度进行对比。在二者初始粒子数和最大迭代次数相同的情况下,基于SO的三维定位算法流程及参数设置参考文献[18]设置,基于PSO的三维定位算法参数参考文献[21]设置。实验选取(0.4 m, 0.4 m, 0.6 m)为测试点,在保证初始粒子分布相同的情况下,在该点进行100次收敛速度实验,并取适应度的平均值作为最终结果,得出两种算法的收敛曲线如图9所示。

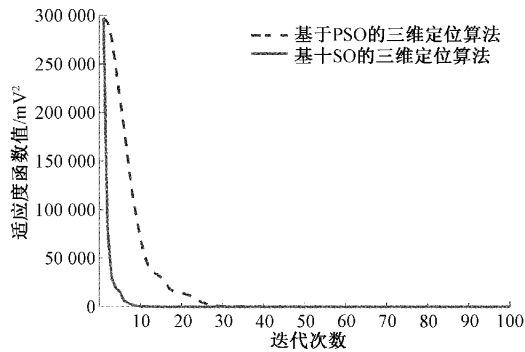


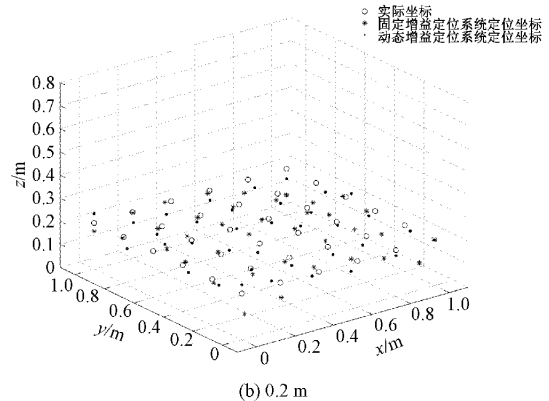
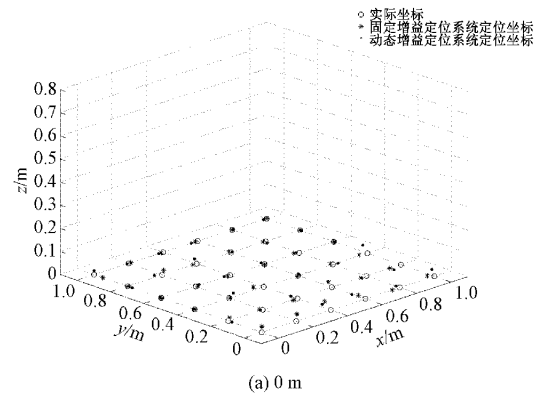
图9 基于SO和PSO的三维定位算法适应度函数收敛曲线

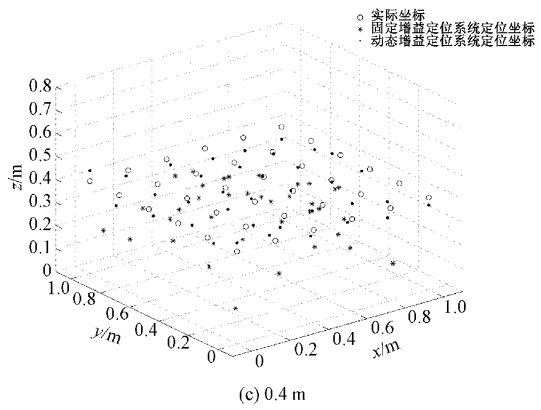
可以看出,基于PSO的三维定位算法需要约30次完成收敛,而基于SO的三维定位算法在10次以内就能完成收敛,其收敛速度是基于PSO的三维定位算法的3倍,明显优于基于PSO的三维定位算法,更适用于可见光定位。

4.4 三维定位实验

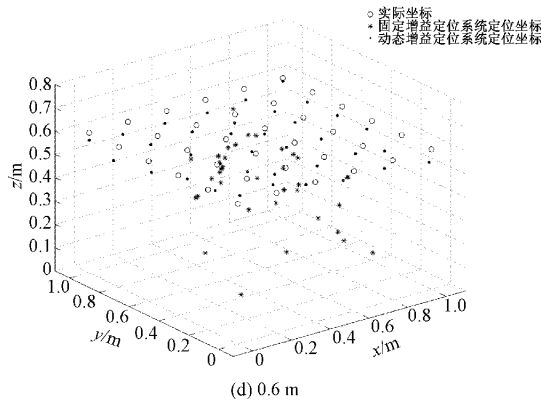
通过将均采用SO三维定位算法的动态增益定位系统与一固定增益系统(主放大器初始增益均为30 dB,其他部分均相同)在同一定位空间内分别进行三维定位实验,比较两组定位系统的定位精度以及有效定位空间。

将 C_i 和 u_i 代入式(11),再根据式(10)计算位置,设置算法粒子数量为100,最大迭代数为100。考虑到PD视场角的限制,定位实验分别在 z 为0、0.2、0.4、0.6 m的平面进行,在每个平面以(0 m, 0 m)为起始点,长宽均为1.0 m的方形区域以0.2 m为步长选取36个待定位点进行定位。如图10(a)~(d)所示,其分别对应 $z=0$ m、 $z=0.2$ m、 $z=0.4$ m、 $z=0.6$ m时的定位结果。可以看出在 $z=0$ m时,固定增益系统和自动增益系统的定位精度相差不大,但随着定位高度增加,固定增益系统定位精度明显低于动态增益系统,且在定位点高于0.2 m的空间内,固定增益系统的定位结果不仅在水平方向上误差较大,在垂直高度上同样出现了较大误差。这是因为固定增益系统设置的增益保证了在 $z=0$ m平面上所有定位区域的定位精度,对 $z > 0$ m的平面来说,该增益就会偏大,随着定位高度升高,PD离光源的距离减小,信号光强就会增大,放





(c) 0.4 m



(d) 0.6 m

图 10 固定增益系统与动态增益系统三维定位结果对比

大电路输出饱和, 就会造成信号测量不准确, 产生较大的定位误差, 导致误差随着高度的增加而增加, 定位有效范围缩小, 不利于定位系统的应用化。

图 11、12 为固定增益系统和动态增益系统对应三维定位误差分布直方图, 图 13 为固定增益系统和动态增益系统三维定位的误差累积分布 (cumulative distribution function, CDF) 曲线。

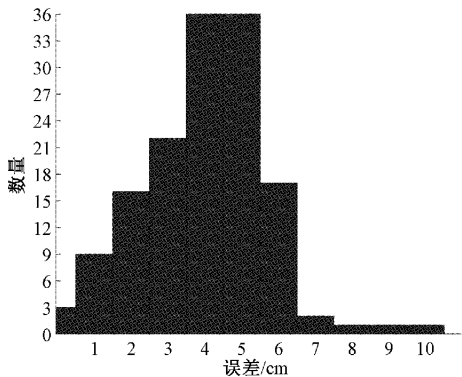


图 11 动态增益系统三维定位误差分布直方图

可以看出固定增益定位系统定位误差分布于 0~63 cm 区间, 误差超过 10 cm 的点占总测量点的比例超出了 40%, 其中最大定位误差为 62.42 cm, 最小定位误差为 0.11 cm, 总平均定位误差为 12.90 cm; 而动态增益定位系

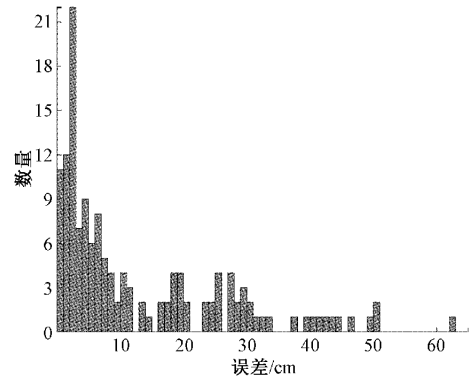


图 12 固定增益系统三维定位误差分布直方图

统的定位误差分布于 0~10 cm 区间, 且定位误差在 0~6 cm 的测量点占总测量点的比例高达 92.36%, 其中最大定位误差为 9.60 cm, 最小定位误差为 0.20 cm, 平均误差为 3.97 cm, 其平均误差较固定增益定位系统降低了 69.22%。

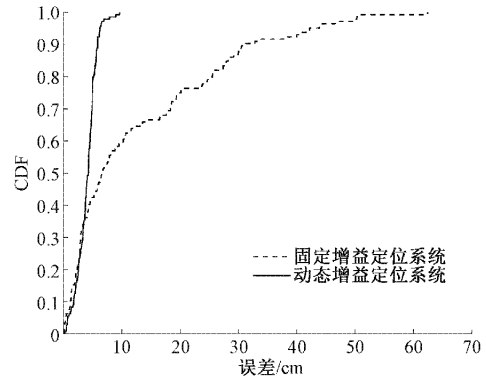


图 13 定位结果误差累积分布曲线

图 14、15 是动态增益定位系统和固定增益定位系统在 z 分别为 0 m, 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m 平面定位误差分布图, 通过对比可以发现, 固定增益定位系统随着定位高度的增加定位误差逐渐增大, 在高于 0.2 m 的定位空间区域, 定位精度急剧下降, 而动态定位系统却能在所有定位空间内保持良好的定位精度。通过计算可以得出在高于 0.2 m 的定位区域动态增益定位系统较固定增益定位系统平均定位误差降低了 79.41%。

目前基于 RSS 的可见光定位研究, 已经实现了 10 cm 以内的定位精度^[22], 那么将定位误差 10 cm 以上的定位点作为无效定位点, 可以看出, 固定增益定位系统的无效定位点比例高达 40.28%, 而动态增益定位系统没有无效定位点; 计算两个系统的有效定位点覆盖空间体积, 在空间大小为 1.0 m×1.0 m×0.6 m 的测试定位区域内, 固定增益定位系统有效定位空间约为 0.32 m³, 动态增益定位系统的有效定位空间则为 0.60 m³, 相比之下动态增益定位系统有效定位空间扩大了约 86.72%, 说明该系统在满足定位需求的前提下可以有效扩大定位空间范围。

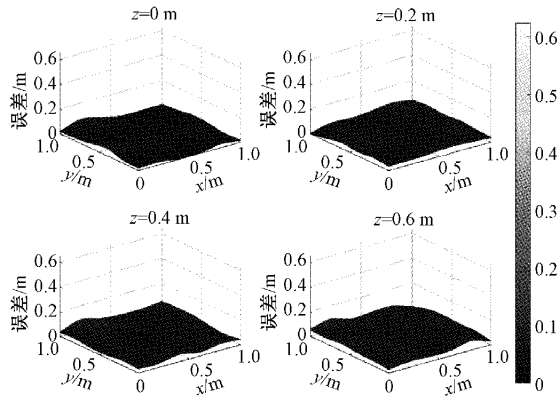


图14 动态增益系统在不同高度定位误差分布

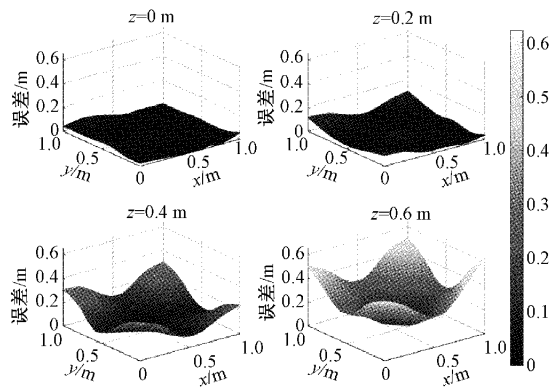


图15 固定增益系统在不同高度定位误差分布

以上结果表明,动态增益系统有效定位空间大,定位精度高,定位性能明显优于固定增益系统,更加适合于三维定位。

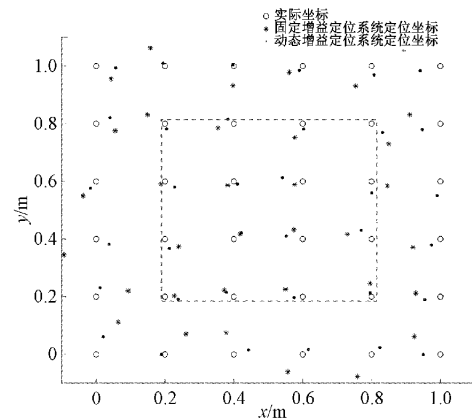
4.5 弱信号区域二维定位对比实验

对采用固定增益的定位系统,为了防止增益过大而导致的电路出现饱和,需要将增益设置较小一些。但减小增益的同时,就会增大光强较弱的区域的定位误差,进而减小有效定位区域面积。假设以 $z=0.6\text{ m}$ 的平面为基准设置增益,如果保证在此平面上高定位精度,那么从 $z=0.6\text{ m}$ 向 $z=0\text{ m}$ 的方向移动时,高定位精度区域就会向中心收缩,面积越来越小,而由于增益偏小而导致电路输出信号弱、进而定位精度低的区域则越来越大,我们将此电路输出信号弱的区域定义为弱信号区域。动态增益系统和固定增益系统在弱信号区域的定位性能可以通过下面的实验加以对比。

在图7的实验环境下进行二维定位实验,实验时将LED的实际功率降低为 0.6 W ,且将动态增益定位系统和固定增益定位系统的主放大器初始增益均设置为 24 dB ,定位方法采用最小二乘法,其他均保持不变。以 0.2 m 为步长对 $z=0\text{ m}$ 的平面采集36个测试点进行定位实验,定位结果如图16所示。测得固定增益定位系统最大定位误差为 12.91 cm ,最小定位误差为 1.44 cm ,动态增益定位系

统最大定位误差为 6.40 cm ,最小定位误差为 0.52 cm 。通过计算可知,固定增益定位系统平均定位误差为 6.61 cm ,动态增益定位系统的平均定位误差为 3.50 cm ,误差降低 47.05% 。

为了便于定量统计,在此对弱信号区域加以量化定义,即以固定增益定位系统定位结果为参考,将定位误差低于平均定位误差 6.61 cm 的区域定义为强信号区域,其余区域则为弱信号区域。根据图1中的实验模型,测量可知,强信号区域近似为集中于中心的方形区域(图16中矩形虚线框内区域),方形区域以外的区域则为弱信号区域。通过计算可得固定增益定位系统强信号区域平均定位误差为 4.41 cm ,弱信号区域平均定位误差为 8.37 cm ,误差增加 89.80% ;自动增益定位系统强信号区域平均定位误差为 3.21 cm ,弱信号区域平均定位误差为 3.72 cm ,误差增加 15.89% 。

图16 在 $z=0\text{ m}$ 的平面上二维定位实验结果

固定增益系统和动态增益系统的定位误差分布如图17和18所示。统计可得,在强信号区域,固定增益定位系统定位精度略低于自动增益定位系统定位精度,平均定位误差小于 5 cm ,可以满足室内定位需求;在弱信号区域,固定增益定位系统定位误差明显增大,定位精度远低于自动增益定位系统。图17中,固定增益定位系统在4个角落定位误差非常大,这是由于定位点虽然位于某一LED正下方,但是距离其他LED却很远,所以接收到的其他LED

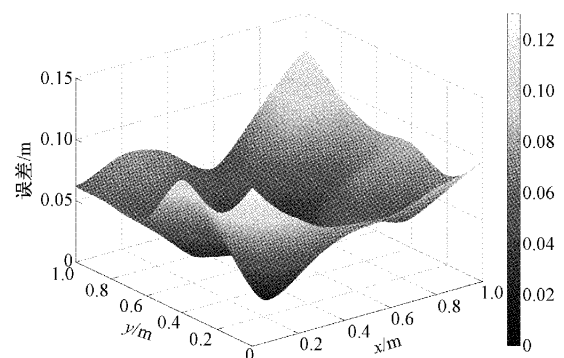


图17 固定增益系统定位误差分布

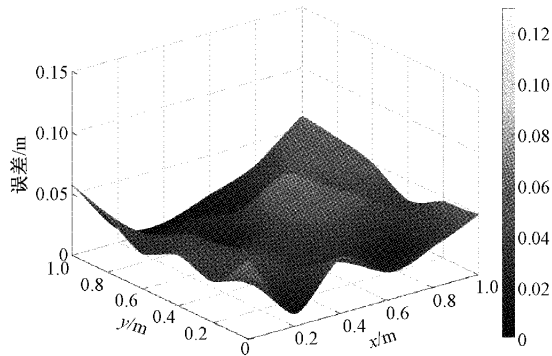


图 18 动态增益系统定位误差分布

信号很弱,导致定位误差很大,难以满足室内定位精度需求。可以看出,动态增益系统可以显著改善弱信号区域定位性能。

5 结 论

研究了一种基于动态增益的 RSS 可见光定位系统,以解决固定增益的 RSS 定位技术定位范围小、在弱信号区域定位精度低的问题。建立了 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.89\text{ m}$ 的定位空间模型,进行了三维定位实验,可以实现在 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 的空间内高精度定位,相比于固定增益定位系统有效定位空间扩大了约 86.72%。在弱信号区域二维定位对比实验中,该系统较固定增益的定位系统平均定位误差降低了 47.05%。采用动态增益的定位系统平均误差小于 5 cm,满足大部分室内定位对精度的要求。基于动态增益的 RSS 可见光定位系统可以在满足室内定位系统精度要求的同时,有效扩大定位范围,改善弱信号区域定位精度。但实验并未考虑实际定位环境中漫反射及障碍物的影响,接下来将考虑在实验环境中加入漫反射光,并通过改善系统性能、优化算法,进一步提高系统在实际定位环境中的适用性。

参考文献

- [1] AMSTERS R, HOLM D, JOLY J, et al. Visible light positioning using bayesian filters [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 5925-5936.
- [2] 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.
- [3] ZHUANG Y, YANG J, LI Y, et al. Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2016, 16(5):596.
- [4] LI B, TANG S Q, ZHANG Y M, et al. Occlusion-aware path planning to promote infrared positioning accuracy for autonomous driving in a warehouse[J]. *Electronics*, 2021, 10(24):3093.
- [5] 李倩,蒋正华,孙炎,等. 基于因子图的 INS/UWB 室内

行人紧组合定位技术[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(5): 32-45.

- [6] JING X, CAO Z, YU L. Research on ultrasonic location method of partial discharge in switchgear based on TOA algorithm [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2260(1): 012007.
- [7] 黄斌,熊书兴,卢雪松. 发光二极管倾斜度估计方法及定位精度影响分析[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(11):84-89.
- [8] LUO J H, FAN L Y, LI H S. Indoor positioning systems based on visible light communication; State of the art [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2017, 19(4): 2871-2893.
- [9] ERDAL G, SINAN G. Fundamental limits on RSS based range estimation in visible light positioning systems [J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(12):2138-2141.
- [10] WANG T Q, SEKERCIOGLU Y A, NEILD A, et al. Position accuracy of time-of-arrival based ranging using visible light with application in indoor localization systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(20): 3302-3308.
- [11] 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.
- [12] YANG S H, JEONG E M, KIM D R, et al. Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(1):54-56.
- [13] KESKIN M F, GEZICI S. Comparative theoretical analysis of distance estimation in visible light positioning systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(3):854-865.
- [14] BASTIAENS S, GOUDOS S K, JOSEPH W. Metaheuristic optimization of LED locations for visible light positioning network planning [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2021, 64(4):894-908.
- [15] 吴兴邦,文尚胜,华珺. 基于蚁群算法的室内可见光高精度三维定位系统 [J]. *光子学报*, 2017, 46(12): 181-194.
- [16] WU Y C, CHOW C W, LIU Y, et al. Received-signal-strength (RSS) based 3D visible-light-positioning (VLP) system using kernel ridge regression machine learning algorithm with sigmoid function data preprocessing method [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 214269-214281.
- [17] 刘健,蔡喜平,程贵东,等. 基于副载波调制的室内可见

- 光定位系统研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(1): 15-21.
- [18] HASHIM F A, HUSSEIN A G. Snake optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm [J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 242: 108320.
- [19] ZHANG Z, ZHU Y G, ZHU W T, et al. Iterative point-wise reinforcement learning for highly accurate indoor visible light positioning[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 22161-22172.
- [20] CHEN Y, REN Z M, HAN Z Z, et al. LED based high accuracy indoor visible light positioning algorithm [J]. Optik, 2021, 243: 166853.
- [21] PAU G, COLLOTTA M, MANISCALCO V, et al. A fuzzy-PSO system for indoor localization based on visible light communications[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2019, 23(14): 5547-5557.
- [22] 吴楠, 杨爱英, 冯立辉, 等. 可见光定位关键技术与展望[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(2): 159-167.

作者简介

程贵东, 硕士研究生, 主要研究方向为室内可见光定位技术。

E-mail: CGD19971223@163.com

蔡喜平, 博士, 教授, 主要研究方向为光电信息技术。

E-mail: 2005031@hlju.edu.cn