

基于双 PSD 的三维测角传感器精度分析

赵文赫^{1,2}, 白杨杨^{1,2}, 王劲凯^{1,2}, 张立中^{1,2*}

(1. 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要: 在机载光电转台、多自由度摇摆台等系统中, 对于一些运动体与基座间没有确定的回转轴的柔性支撑、并联支撑平台, 需要考虑非接触三轴角度测量方法, 目前大部分的光电非接触三轴角度测量方案系统复杂, 占用空间大, 无法适用于如机载、星载等载荷对体积、质量敏感的场景。为此, 文中提出了基于双位置敏感探测器 (PSD) 的非接触三轴角度测量方案, 使用准直镜头汇聚、双面反射光楔反射, 将光源在两片 PSD 上汇聚成像, 利用 PSD 上的光斑位置坐标反解出三轴角度。描述了其工作原理以及传感器构成, 分析了因两片 PSD 的相对位置偏移产生的误差, 提出了对应补偿方法以减少焊装产生的 PSD 位置偏移对测量精度的影响。主要对采集的 PSD 模拟信号值的抖动噪声进行 FIR 滤波处理, 分析了滤波器的相频响应特性, 并在 MCU 中测量相位滞后时间以及滤波器的响应带宽, 验证了该数字滤波器在系统内拥有较好的实时传输特性。自准直测量单元总质量为 230 g, 尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm。实验结果表明, 34 阶 FIR 滤波器将角度测量的误差减小至 60%, 在±2°测量范围内单轴测量时, 方位角、俯仰角、横滚角的误差均方根分别为 0.003°、0.007°、0.017°, 组合测量时分别为 0.006°、0.009°、0.021°, 文中所提出的三维测角传感器精度较高, 满足机载等场景的使用要求。

关键词: 三轴姿态角度测量; 非接触测量; 位置敏感探测器; 滤波带宽; 响应频率

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230543

0 引言

新型的机载吊舱已经开始使用柔性枢轴取代传统机械轴系, 使用音圈执行器驱动, 系统带宽明显提升^[1]。柔性枢轴元件无法安装常规编码器测角组件, 因此需要研究载荷相对于基座的空间角度测量方法。

孙国燕^[2]等利用两个相同的二维自准直仪成一定角度放置和一个反射部件组成三维姿态角测量传感器, 两自准直仪相对空间布置精度较难保证, 占用空间大, 较难分离轴向平移对测量的影响, 且测量范围有限。Li R^[3]等提出了一种改进的立方体角反射器 (MCCR) 的大测量范围三自由度测角方法, 选用 COMS 来接收反射光斑, 测量范围虽大, 但精度不高, COMS 数据处理需花费大量时间, 带宽较低, 且受光

斑质量影响较大。Wenran Ren^[4]等提出了一种基于透射光栅和组合反射镜的激光自准直仪测角方法, 使用三片位置敏感探测器 (PSD) 来读取由投射光栅产生的三束测量光束位置信息计算三轴角度值, 该设计在较小的范围内拥有很高的精度, 但测量范围小, 难以集成, 很多实际应用场景较难实现。上述每种测试方法的性能指标如表 1 所示。

文中提出一种新型基于双 PSD 的三维角度测量传感器, 该三维测角方法拥有非接触、连续测量、高带宽、体积小、相对安装精度要求简单等优势, 对轴向方向平移不敏感。对两片 PSD 的相对位置进行了标定, 对采集的模拟信号抖动数据进行滤波处理, 并进行了实验验证, 实现了高精度、高稳定性的高速实时测量, 该方法可广泛应用于工程实践中。

收稿日期: 2023-09-22; 修订日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2141231)

作者简介: 赵文赫, 男, 硕士生, 主要从事在线检测技术、伺服控制、激光通信方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 张立中, 男, 教授, 博士, 主要从事激光通信、精密机械设计、在线检测技术方面的研究。

表 1 各三轴测角方法性能指标

Tab.1 Performance indicators of each three-axis angle measurement methods

Specifications	Dual autocollimation instrument type	MCCR instrument type	Three PSD grating type
Angle measurement range	±2'	±10°	±360"
Yaw angle measurement error	2.2"	394.16"	0.013"
Pitch angle measurement error	2.5"	455.36"	0.012"
Roll angle measurement error	8.7"	319.57"	0.009"

1 基于双 PSD 的三维测角传感器

1.1 二维 PSD 工作原理

二维 PSD 分为二面型、四边形、枕型等结构, 而根据 Gear 定理为基础设计的枕型 PSD^[5-6] 具有暗电流小、线性度高、各电极间相互影响小等优点。当光源照在 PSD 光敏面时, 有效区域上的光斑位置会发生横向光电效应 (Transverse Photoelectric Effect)^[7], 形成电势差从而产生光电流。如图 1 所示, 当点光源照射到点 O 时, 可将靶面分看为四份, 面积分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 mm², 电极输出电流 I_{Y1} 、 I_{X1} 、 I_{Y2} 、 I_{X2} 分别为:

$$I_{Y1} = \frac{U_{\alpha}}{S1 \times \rho} \quad (1)$$

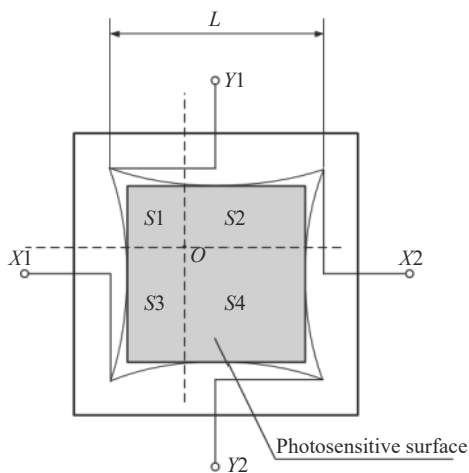


图 1 二维 PSD 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of 2D PSD structure

$$I_{X1} = \frac{U_{\alpha}}{S3 \times \rho} \quad (2)$$

$$I_{Y2} = \frac{U_{\alpha}}{S4 \times \rho} \quad (3)$$

$$I_{X2} = \frac{U_{\alpha}}{S2 \times \rho} \quad (4)$$

式中: U_{α} 为 O 点产生的光电势; PSD 光敏靶面电阻呈均匀分布, 密度为 ρ (单位: Ω/mm^2)。

L 为 PSD 相邻两电极间的长度, 通过对四路电流信号的采集, 可以计算出入射光照射到 O 点时的二维坐标位置。入射光点的位置坐标计算公式为:

$$X = \frac{L}{2} \times \frac{(I_{X2} + I_{Y1}) - (I_{X1} + I_{Y2})}{I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2}} \quad (5)$$

$$Y = \frac{L}{2} \times \frac{(I_{X2} + I_{Y2}) - (I_{X1} + I_{Y1})}{I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2}} \quad (6)$$

1.2 双 PSD 三维测角传感器

三维角度测量传感器主要由自准直测量单元和双面反射光楔两部分构成。如图 2 所示, 自准直测量单元包括光源、PSD1、PSD2、自准直镜头以及后续处理电路。双面反射光楔前表面为半反半透面, 后表面为全反射面。

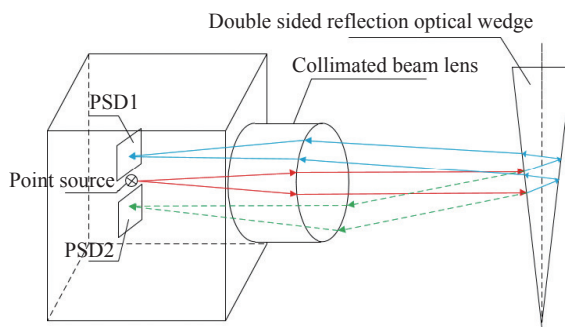


图 2 双 PSD 三维测角原理图

Fig.2 Schematic diagram of dual PSD 3D angle measurement

将两片 PSD 布置在自准直镜头的焦面上, 光源放置在两 PSD 中间, 发射出的光束经自准直镜头后变成平行光照射到光楔上, 一部分平行光束经光楔前表面直接反射后通过自准直镜头聚焦在 PSD2 上, 另一部分经光楔前表面折射、后表面反射、前表面折射后通过自准直镜头聚焦在 PSD1 上。将 PSD 输出的微小电流信号通过处理电路转化成模拟电压信号, 使用 ADC 转化成数字量, 在 MCU 内计算位置坐标值信息。将两片 PSD 上的光斑位置, 结合自准直透镜焦

点距离以及两 PSD 相对位置关系,通过反射矩阵、折射矩阵以及斯涅耳定律进行解算,获得双面反射光楔的三轴角度信息。

根据实际工程需要,设定光楔前表面的中心到镜头前表面中心距离 10 mm,三轴测量范围为 $\pm 2^\circ$,传感器外壳尺寸为 50 mm \times 50 mm \times 50 mm。文中使用日本滨松公司 S5991 型号 9 mm \times 9 mm 靶面的二维 PSD,将 PSD 输出的微小电流信号通过运算放大电路、信号跟随电路和加减运算电路进行信号放大与初步的计算,PSD 信号处理电路如图 3 所示。

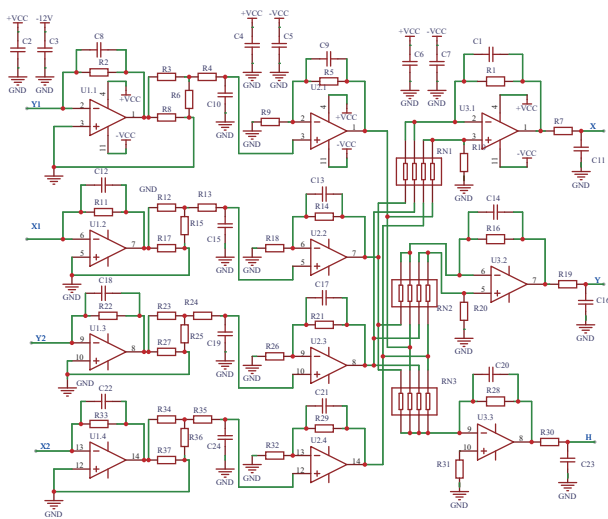


图 3 PSD 信号处理电路图

Fig.3 PSD signal processing circuit diagram

选用放大器为 ADA4522-4ARUZ 四通道精密运算放大器,拥有零漂移、低噪声、低功耗等优点。使用模拟加减法器计算公式 (5) 和公式 (6) 中的加减运算部分,提高信号运算的同步性,将其简化为:

$$X = \frac{L}{2} \times \frac{U_X}{U_H} \quad (7)$$

$$Y = \frac{L}{2} \times \frac{U_Y}{U_H} \quad (8)$$

将两 PSD 共八路信号变为六路,将经历过加减运算的信号 U_X 、 U_Y 、 U_H 、 U_{X2} 、 U_{Y2} 、 U_{H2} (U_{X2} 、 U_{Y2} 、 U_{H2} 为第二片 PSD 的处理后电压信号),接入 AD 采集电路中,在 MCU 内计算出两 PSD 上光斑位置坐标 PSD1(x_1, y_1)、PSD2(x_2, y_2)。

在传感器测量原理的基础上针对两 PSD 及光源的位置信息做了约束,并将两片 PSD 与光源焊装在

同一片 PCB 板上。光源选用贴片式端面发射垂直腔激光器,波长为 940 nm。传感器的入射光源与镜头相对位置固定的小孔光栏做光源定位,可忽略激光器的焊装误差。

两 PSD 中心距离为 L_m (mm),光源位于两 PSD 中间位置 $L_m/2$ 处。但 PSD 在焊装过程中无法保证较高精度的定位,会造成两 PSD 的坐标系相对不平行,需在加工后对两 PSD 进行相对位置标定。

2 两 PSD 相对位置误差标定及补偿

两 PSD 元器件在同一 PCB 板紧贴板上焊装,只存在沿垂直靶面中心轴上旋转产生的旋转偏差与平移产生的位置偏差,如图 4 所示,所以需要将两 PSD 的靶面坐标系补偿回平行状态^[8]。

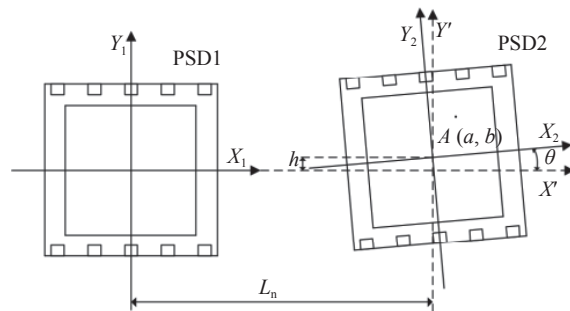


图 4 两 PSD 相对位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the relative positions of two PSD

图 4 中, θ 为 PSD2 坐标系相对于 PSD1 坐标系的角偏差, h (mm) 为两坐标系原点在 Y_1 方向上的距离, L_n (mm) 为两坐标系原点在 X_1 方向上的距离。设光斑照射点 A 在 PSD2 坐标系 $O_2X_2Y_2$ 下的坐标值为 (a, b) ,发生旋转后的旋转矩阵 R_1 为:

$$R_1 = \begin{pmatrix} \cos(-\theta) & \sin(\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{pmatrix} \quad (9)$$

平移矩阵为 R_2 :

$$R_2 = (L_m - L_n - h) \quad (10)$$

点 A 在坐标系 $O'X'Y'$ 内的投影 A' 坐标为 (a', b') :

$$A(a', b') = (a, b) \times R_1 + R_2 \quad (11)$$

为了得到两片 PSD 坐标系的角偏差 θ , 需要为焊装好的系统进行标定。

设计如图 5 所示的标定平台,将焊装完成的传感器 PCB 板组装后安装在无光学镜头的底座上,将底

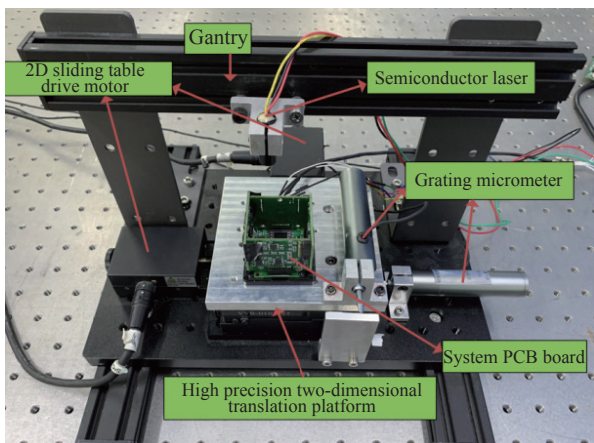


图 5 两 PSD 标定实验

Fig.5 Two PSD calibration experiments

座安装在高精度二维滑台上。为了保证安装 PCB 板的底座与滑台位移方向平行,使用光栅千分尺测量接触头抵住安装 PCB 板的底座侧边沿,移动滑台至最大行程观察光栅千分尺读数,读数不变即可视为 PCB

板与滑台位移方向平行。将标定激光头固定在龙门架上垂直向下照射,保证竖直方向不动,水平移动滑台每 0.5 mm 取一个点,共取五组,得到如图 6 所示的点位置图。

将采集得到的 10 组实验数据进行线性拟合,得到图 6 中方程。可见 PSD1、PSD2 上斜率均值分别为 $\bar{k}_1=-0.00606$ 、 $\bar{k}_2=-0.01806$,即 $\angle\theta=\arctan\bar{k}_2-\arctan\bar{k}_1=-0.012$ rad,可得旋转矩阵 $R_1=\begin{pmatrix} 1 & -2.0944 \\ 2.0944 & 1 \end{pmatrix}$,将 PSD2 内点坐标与旋转矩阵相乘,各点坐标对应做差取平均得 $\Delta x=0.009$ mm, $\Delta y=-0.011$ mm,平移矩阵 $R_2=(0.009-0.011)$ 。将补偿矩阵代入 PSD2 的坐标数据,与 PSD1 点坐标对应做差得到误差均方根为 $\overline{\Delta x'}=0.0005$ mm, $\overline{\Delta y'}=0.001$ mm。

通过对两 PSD 的标定补偿,大大减小了焊装误差对传感器的影响,为后续的角度结算进行了数据的预处理,提高了坐标值的可信度。

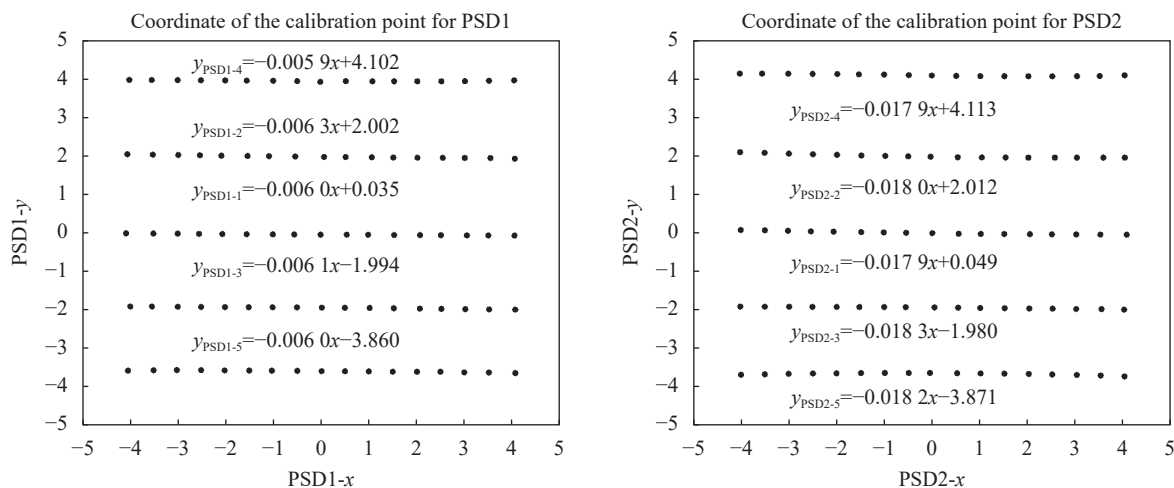


图 6 两 PSD 标定点位置图

Fig.6 Two PSD calibration point positions

3 PSD 输出信号噪声分析及滤波

传感器用两片 PSD 输出的二维位置坐标信息来解算三轴角度信息,PSD 的输出位置坐标值因信号处理电路以及 PSD 自身的噪声原因影响,输出的模拟量经过 AD 采集后输入到 MCU 时是不稳定的持续抖动值,如图 7 所示,这时解算的三轴角度信息会成倍地放大该噪声,导致角度的测量值会大范围地进行跳变,因此需对 PSD 输出值进行滤波处理。测角传感

器内部空间较为紧张,模拟滤波器占用较大的硬件空间,所以选用数字滤波器进行数据的处理。常用于处理抖动信号的数字滤波器有卡尔曼滤波器 (Kalman Filter, KF)、有限脉冲响应滤波器 (Finite Impulse Response, FIR) 和无限长脉冲响应滤波器 (Infinite Impulse Response, IIR)。

卡尔曼滤波器的本质是最优估计线性滤波器,它利用数学模型中的输入测量值,通过时间递归系统估计当前状态,主要针对拥有一定惯性保持的线性系

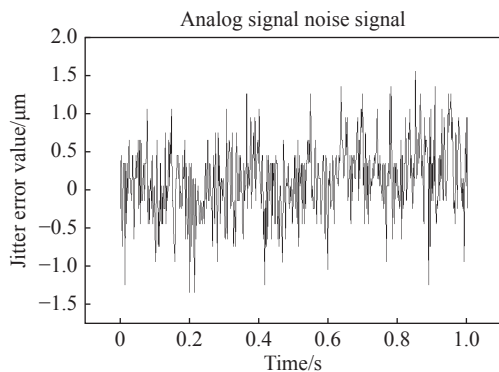


图 7 提取的模拟信号噪声信号

Fig.7 Extracted analog signal noise signal

统^[9]。在三维角度测量传感器中,实时更新的测量值处于非线性的持续改变量,测量的数据有很多不可预测的变化与干扰,很难使用预测性滤波抑制噪声,因此卡尔曼滤波器并不适用于该系统。

IIR 滤波器也称为递归滤波器,输出既依赖于输入,也依赖于之前的输出,具有非线性的相位响应,可能表现为不稳定状态,对于测量传感器而言存在不稳定因素会直接影响测量的可靠性与准确性。

FIR 滤波器也称为非递归滤波器,输出仅依赖于输入,FIR 滤波器拥有更高的鲁棒性,在语音分析、信号跟踪、空间波束形成(空间滤波)等领域广泛应用^[10-12]。但在使用 FIR 滤波器的情况下,时域上的线性相位偏差必须要考虑,也就是滤波器的时滞。

FIR 滤波器是一个离散时间系统,其传递函数可表示为:

$$H(z) = \sum_{i=0}^M a_i z^{-i} \left/ \left(1 + \sum_{i=1}^M b_i z^{-i} \right) \right. \quad (12)$$

式中: M 为 FIR 滤波器的阶数。数字滤波器的函数是无极点的,当 b_i 均为零时,单位脉冲相应时间是有限长度的,这便是有限脉冲响应滤波器的数字表达式。某一时间点的响应为每一个输入在这一刻上的响应的叠加,即为离散时间系统的卷积和:

$$y(n) = \sum_{i=0}^M a_i \times h(n-i) \quad (13)$$

在采集数据通过 FIR 滤波器后,输出的数据 Q_{out} 的表达式为:

$$Q_{out} = \sum_{n=1}^{M+1} Q(n) \times H(n) \quad (14)$$

式中: $Q(n)$ 为采集数据。滤波器的相位时延 t_m :

$$t_m = -(M-1)/2F_s \quad (15)$$

式中: F_s 为采样频率。

设计进行仿真实验,建立频率为 1 kHz 的正弦波信号 $P(t)$ 。将实际光斑稳定不动打在 PSD 靶面上时,采集的坐标位置信号减去均值,提取出真实的在 X 轴附近跳动的噪声信号 $f(t)$ 。将两信号叠加生成模拟测量时的输出信号曲线 $S(t)$,通过 FIR 滤波函数进行滤波生成信号曲线 $S'(t)$,而为了获得较高的精度,FIR 滤波器的阶数取 34,为更好地观察噪声,将正弦信号的幅值定为 0.010,如图 8 所示。

由图 8(b)可以看出,在滤除噪声的同时出现了相

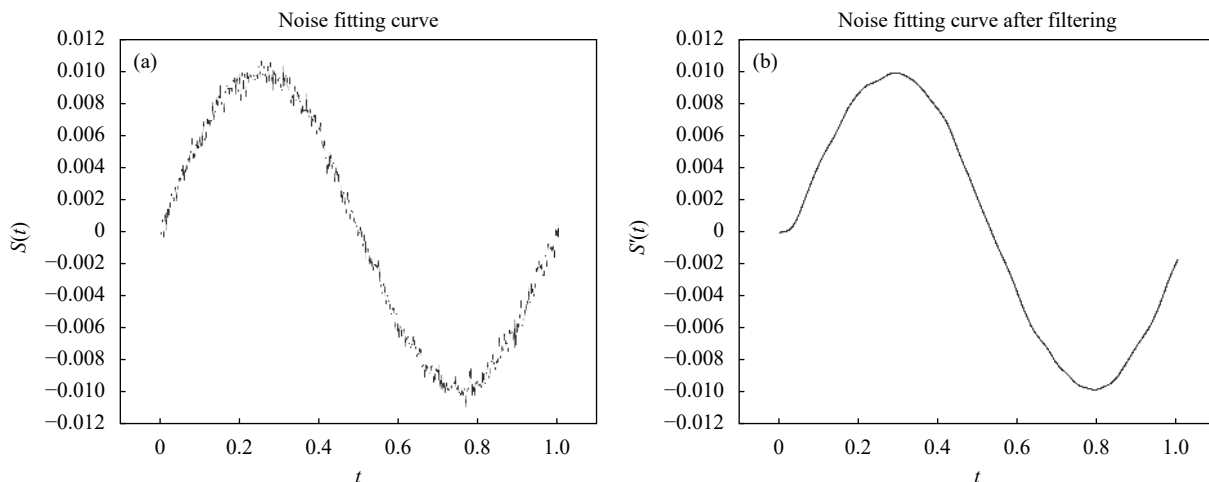


图 8 (a) 噪声拟合曲线; (b) 经 34 阶 FIR 滤波器滤波后曲线

Fig.8 (a) Noise fitting curve; (b) Curve after filtering with a 34th order FIR filter

位滞后。34 阶 FIR 滤波效果显著,在实际工程应用上,MCU 的运算时间也会影响传感器的带通,不同的处理芯片的运算主频不同,而为了实现三轴信息的高速测量,需要对实际运算 MCU 及处理电路进行量化的实验验证。

实验分为两个部分依次进行:

- 1) 测试 FIR 滤波器在使用系统中频率响应特性;
- 2) 测试 FIR 滤波器在传感器上的应用。

使用单片机 DAC 功能输出频率分别为 1.00 Hz、10.00 Hz、100.00 Hz、1.00 kHz 的正弦波,将正弦波接入到 AD7606 的通道内进行采集,将采集后的信号输入到设计好的 34 阶 FIR 滤波器中处理,将处理后的信号通过 DAC 通道 2 进行输出。将示波器的两个表笔同时连接 DAC1 和 DAC2,查看输入与滤波后输出的波形,如图 9 所示,蓝色曲线为生成正弦波信号产生的波形,黄色曲线为经过 FIR 滤波器后生成的信号波形。

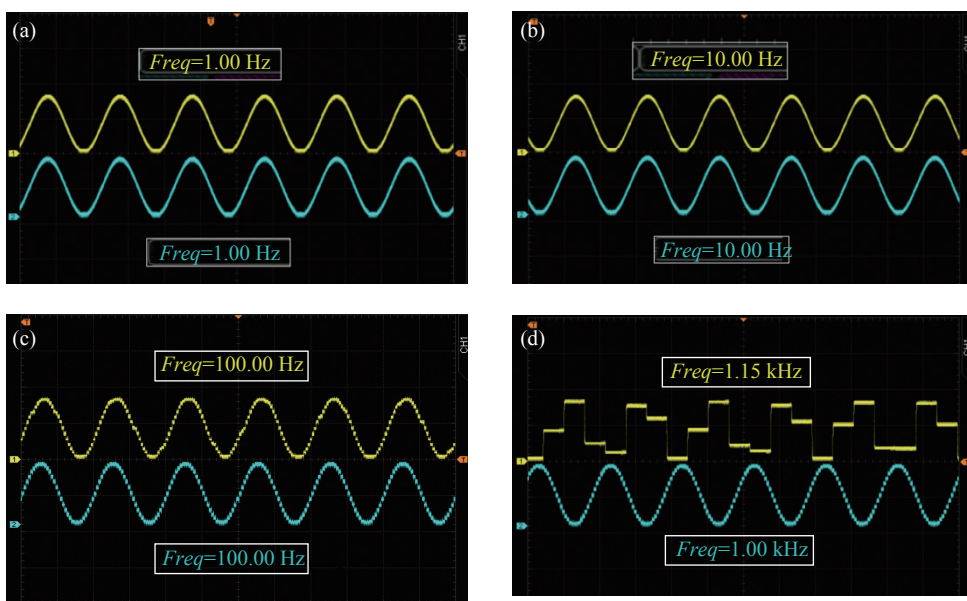


图 9 输入信号频率为 (a) 1.00 Hz、(b) 10.00 Hz、(c) 100.00 Hz、(d) 1.00 kHz 的曲线图

Fig.9 Curve plot of input signal frequency at (a) 1.00 Hz, (b) 10.00 Hz, (c) 100.00 Hz and (d) 1.00 kHz

大周期的信号滤波后的数据在时域上的相位延迟约为 525 μ s,但输出幅值与频率并无变化,实测 FIR 滤波器在单片机内运行的时间为 5 μ s,包含在产生的相位延迟内。在实际工程应用上,光电伺服转台的伺服周期都在 0.1~0.01 s 范围内,5% 以下的延迟在可接受的范围内。输入信号频率在 1.00 kHz 时产生极大的失真,已看不出原有的正弦波,说明滤波器已经对该频率响应了。为了找到滤波器在该程序中的带宽特性^[13-15],寻找滤波器的频率响应极限,如图 10 所示。

由图 10 可知,在输入信号频率为 184 Hz 时,波形产生较为明显的失真,滤波器开始响应该频率以上的信号。在输入信号频率为 1.31 kHz 时,幅值降低为原幅值 (-3 dB),滤波器的响应带宽为 1.31 kHz,对于所有超出带宽频率的信号会被很大程度地衰减,对于电

压模拟信号造成的高频信号进行了有效的消除。

将滤波器写入 MCU 程序内,使用传感器测试静态时单通道的采集数据与滤波后的数据,如图 11 所示,数据的标准差从 0.000354°变为 0.000071°,降低了 20%,大大提高了测量的稳定性,为后续计算三轴角度信息提供了稳定输入信号。

将六路信号输入到 FIR 滤波器中,并同时使用滤波前后的两组数据分别进行角度解算,采集滤波前与滤波后的角度数据,如图 12 所示。

测量单片机程序运行周期为 870 μ s,即测角传感器的带宽为 1.15 kHz,实现高速测量。方位角度数据的标准差从 0.000251°变为 0.000127°,俯仰角度数据的标准差从 0.000367°变为 0.000211°,横滚角度数据的标准差从 0.00216°变为 0.0013°。由此可见,角度测量的稳定性均提高了一倍,滤除了不稳定噪声对传

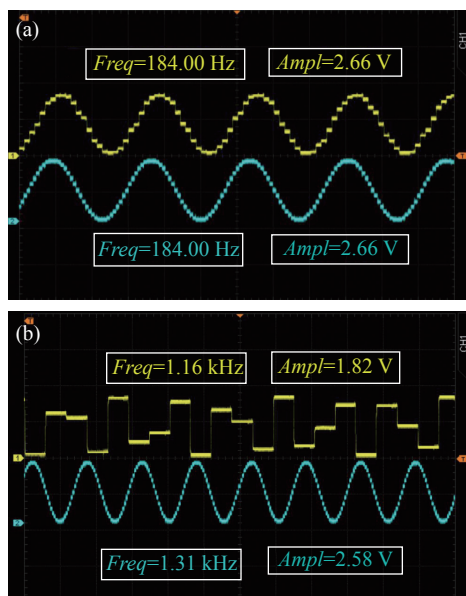


图 10 输入信号频率为 (a) 184 Hz 和 (b) 1.31 kHz 的曲线图
Fig.10 Curve plot of input signal frequency at (a) 184 Hz and (b) 1.31 kHz

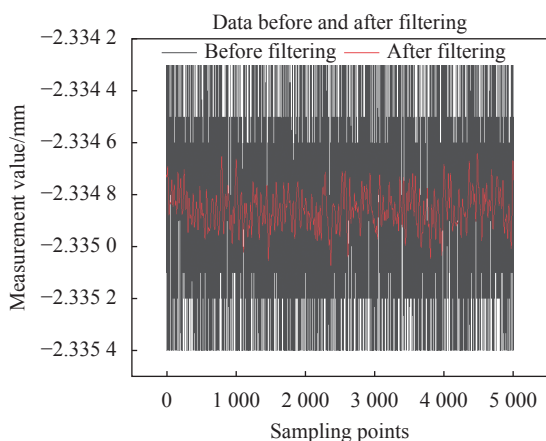


图 11 采集数据与滤波后的数据对比图
Fig.11 Comparison diagram between collected data and filtered data

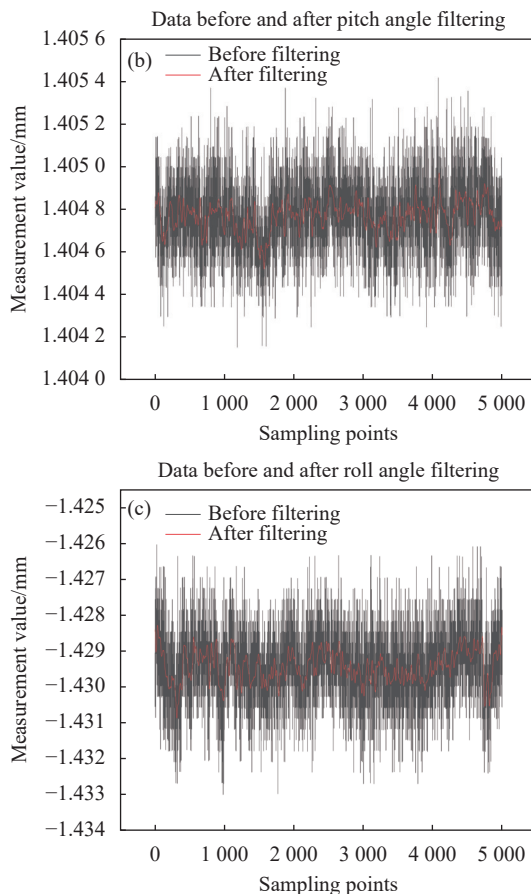
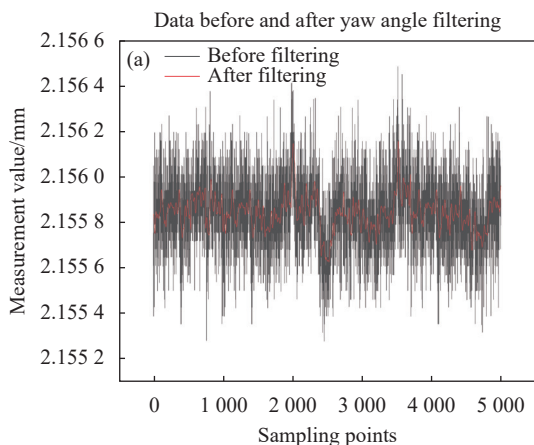


图 12 (a) 方位轴角度测量值、(b) 俯仰轴角度测量值、(c) 横滚轴角度测量值滤波前后对比图
Fig.12 Comparison diagrams of (a) yaw angle measurement values, (b) pitch angle measurement values, (c) roll angle measurement values before and after filtering

传感器测角的影响。

4 测角误差评价

为了验证三轴测角传感器的精度, 利用 H850-pi 六轴六足纳米位移台实现精准角度发生, 性能如表 2 所示。搭建角度标定平台, 使用自准直仪及工装加工手段将位移台的坐标系与三轴角度传感器坐标轴平行, 通过微调升降台对正坐标原点, 角度测量实验系统如图 13 所示。

分别调整纳米位移台转动角度, 记录当前转动角度值, 同时读取传感器解算角度数据, 在 $\pm 2^\circ$ 的范围内间隔 0.5° 进行测量。分别在没有添加 FIR 滤波器与添加 FIR 滤波器的情况下分组实验。测量实验分两步进行:

表 2 六轴六足纳米位移台性能指标

Tab.2 Performance indicators of six axis hexapod nano displacement table

Performance	Typical value/ μm	Performance	Typical value/ μrad
X, Y accuracy	± 0.6	$\theta X, \theta Y$ accuracy	± 3
Z accuracy	± 0.2	θZ accuracy	± 9
X, Y resolution ratio	0.3	$\theta X, \theta Y$ resolution ratio	3
Z resolution ratio	0.2	θZ resolution ratio	5

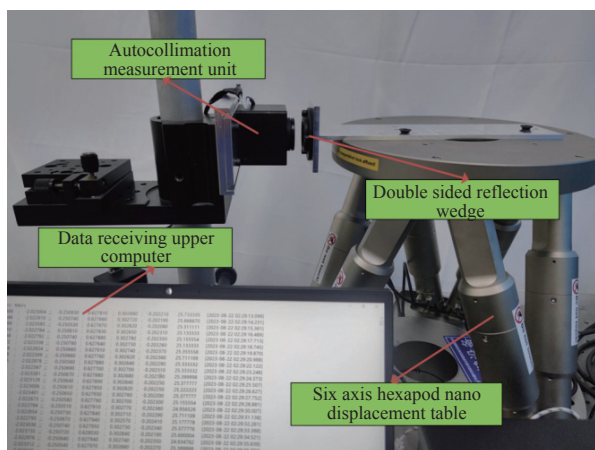


图 13 角度测量实验系统

Fig.13 Angle measurement experimental system

1) 在其他两轴固定不动时, 改变当前测量轴系的旋转角度进行测量, 共 27 组数据;

2) 进行三轴组合测量, 在测量范围内选取典型测量点 (方位角=俯仰角=横滚角) 进行测量, 共 18 组数据。

传感器解算角度与位移台发生角度对比得到的测角误差如表 3 所示, 误差值为各测量角度误差的均方根。后续均进行三次实验后取均值, 以保证实验结果的的普遍性。

由此可见, 在 FIR 滤波器的效果下将误差减少到原来的 50% 左右, 滤波器效果显著, 大大提高了传感器的精度。在 FIR 滤波器的作用下, 所设计传感器的方位角测量误差为 0.006° , 俯仰角测量误差为 0.009° , 横滚角测量误差为 0.021° , 且三轴同时测量的串扰现象较小。

在实际工程应用条件下, 三轴角度测量应对平移不敏感。设光楔中心与准直镜头中心对准时为零点, 此时测量的角度值为零点数据, 测量 (方位角/ $^\circ$), 俯仰角/ $^\circ$), 横滚角/ $^\circ$) 分别等于 (0, 0, 0)、(1, 1, 1)、(2, 2,

表 3 测角误差

Tab.3 Angle measurement error

	Yaw angle measurement error $\sigma_x/^\circ$	Pitch angle measurement error $\sigma_y/^\circ$	Roll angle measurement error $\sigma_z/^\circ$
No filtering: Yaw angle	0.005	0.012	0.021
No filtering: Pitch angle	0.005	0.011	0.020
No filtering: Roll angle	0.007	0.015	0.026
No filtering: Combined measurement	0.013	0.020	0.039
Filtering: Yaw angle	0.003	0.007	0.013
Filtering: Pitch angle	0.002	0.007	0.015
Filtering: Roll angle	0.004	0.007	0.017
Filtering: Combined measurement	0.006	0.009	0.021

2)、(-1, -1, -1)、(-2, -2, -2) 时, 控制纳米位移台相对自准直测量单元在上下、左右、前后六个方向分别平移 2 mm, 比较测量值与零点数据, 得到如表 4 所示的误差数据。

表 4 平移对角度测量影响实验结果

Tab.4 Experimental results of the effect of translation on angle measurement

	Yaw angle translation influence $\sigma'_x/^\circ$	Pitch angle translation influence $\sigma'_y/^\circ$	Roll angle translation influence $\sigma'_z/^\circ$
Move forward 2 mm	0.001	0.001	0.007
Move back 2 mm	0.004	0.001	0.003
Move up 2 mm	0.003	0.001	0.004
Move down 2 mm	0.002	0.001	0.005
Move left 2 mm	0.002	0.001	0.004
Move right 2 mm	0.001	0.002	0.005

由表 4 可以看出, 所设计传感器中平移对角度测量影响很小, 平移对方位角的影响的平均值 $\overline{\sigma'_x}=0.002^\circ$, 俯仰角的影响的平均值 $\overline{\sigma'_y}=0.001^\circ$, 横滚角的影响的平

均值 $\bar{\sigma}_y=0.005^\circ$ 。

5 结 论

文中提出一种基于双 PSD 的三轴角度测量传感器,并对其测量过程中产生影响的误差源进行了分析以及补偿。对两片 PSD 的相对位置进行了标定,利用旋转矩阵和平移矩阵消除了因焊装引起的误差。选定使用 FIR 滤波器进行数据处理,分析了选用 34 阶 FIR 滤波器的相频响应特性,测量出实际运用时的带宽。依据项目实际要求设计处理电路及器件选型,在选用器件的基础上进行实验验证。结果表明, FIR 滤波器将角度测量误差减小了 40%,基于双 PSD 的三维测角传感器在 $\pm 2^\circ$ 的测量范围内,方位角的测量精度达到 0.006° ,俯仰角的测量精度达到 0.009° ,横滚角的测量精度达到 0.021° ,传感器响应频率可以达到 1.15 kHz。相对其他常规三轴测角传感器而言,该装置拥有体积小、精度高、测量范围大、带宽高、非接触、轴向方向平移不敏感等优势,为机载跟瞄转台上光电载荷与外框架基座间的角度检测提供了一种可靠的三轴测角方法。

参考文献:

- [1] Li Quanchao. Research on mechanism of aerial high-precision optoelectronic platform based on universal joint[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2022. (in Chinese)
- [2] Sun Guoyan, Gao Limin, Bai Jianming, et al. High accuracy three-dimensional attitude angle measuring device [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 963-970. (in Chinese)
- [3] Li R, Zhen Y, Di K, et al. Three-degree-of-freedom autocollimator with large angle-measurement range [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(11): 115005.
- [4] Ren W, Cui J, Tan J. A three-dimensional small angle measurement system based on autocollimation method [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(5): 055102.
- [5] Tang Jiuyao, Li Jinjun, Sun Xiaobin. Preparation of a pin-cushion two-dimensional position sensitive detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2): 233-236. (in Chinese)
- [6] Sang Hongyan. Research on dynamic response characteristic of PSD with pin-cushion type [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007(181): 34-36. (in Chinese)
- [7] Huang Meizhen, Tang Jiuyao, Chen Yuqing. Position sensitive detector based on the lateral photoelectric effect [J]. *Electronics Optics & Control*, 2000(2): 34-38. (in Chinese)
- [8] Zheng Jun, Li Wenqing. Calibration of 3-D measurement system based on a double position sensitive detectors [J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Technol)*, 2018, 58(4): 411-416. (in Chinese)
- [9] Khodarahmi M, Maihami V. A review on Kalman filter models [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, 30(1): 727-747.
- [10] de Cacqueray-Valmenier M, Coskun A, Kale I. The use of almost linear phase IIR filters in DFT modulated filter banks for communication systems [C]//2016 IEEE 17th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2016: 1-4.
- [11] Stavrou V N, Tsoulos I G, Mastorakis N E. Transformations for FIR and IIR filters' design [J]. *Symmetry*, 2021, 13(4): 533.
- [12] Pak J M. Gaussian sum FIR filtering for 2D target tracking [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, 18: 643-649.
- [13] Lowenborg P, Johansson H. Minimax design of adjustable-bandwidth linear-phase FIR filters [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2006, 53(2): 431-439.
- [14] Haridas N, Elias E. Low-complexity technique to get arbitrary variation in the bandwidth of a digital FIR filter [J]. *IET Signal Processing*, 2017, 11(4): 372-377.
- [15] Wang Yufei, Zheng Jiaying, Dai Dongkai, et al. A non-delay measurement method for RLG based on the combination of FIR filtering and dither stripping[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(11): 20230171. (in Chinese)

Accuracy analysis of a three-dimensional angle measurement sensor based on dual PSDs

Zhao Wenhe^{1,2}, Bai Yangyang^{1,2}, Wang Jinkai^{1,2}, Zhang Lizhong^{1,2*}

- (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. National and Local Joint Engineering Research Center of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract:

Objective In systems such as airborne photoelectric turntables and multi degree of freedom swing tables, three-dimensional angle measurement is often required. The methods of angle measurement are divided into contact measurement and non-contact measurement, and different measurement methods need to be selected based on actual application scenarios. For some flexible supports, parallel support platforms, and uncertain rotation axes between the moving object and the base, non-contact measurement methods need to be considered. At present, the common non-contact three-axis angle measurement schemes are complex and occupy a large space, which cannot meet the volume and weight requirements of airborne and spaceborne payload. Therefore, it is necessary to develop a non-contact three-axis angle measurement method with a simple structure and small footprint to meet the needs of different usage environments. Therefore, a non-contact three-dimensional angle measurement system based on two position sensitive detectors (PSD) has been proposed.

Methods A three-axis angle measurement system based on dual PSD has been established. The system mainly consists of two parts of an autocollimation measurement unit and a double-sided reflection wedge (Fig.2). The autocollimation measurement unit includes a light source, PSD1, PSD2, autocollimation lens, and subsequent processing circuits. The light beam emitted by the light source converges into parallel light through a collimating lens. And PSD1 and PSD2 receive the light spot converged by the reflected beam and perform signal processing calculations through a processing circuit. The double-sided reflective wedge is designed with a semi-reflective and semi-transparent front surface and a fully reflective rear surface. Its function is to disperse the incident collimated parallel light into two beams and reflect them back into the self-collimating lens, which converges onto the target surfaces of two PSDs to form a light spot. According to the principle of angle measurement, the calibration method of two PSDs is designed to compensate for welding errors, and the FIR filtering algorithm is used to filter the simulated collected signal to improve accuracy.

Results and Discussions A three-axis angle measurement system based on dual PSD has been designed, and a calibration experimental system (Fig.5) has been established to calibrate the relative position relationship between two PSDs. The welding error of the relative positions of the two PSDs is compensated through the rotation matrix and translation matrix, and the compensation result is great. A 34th-order FIR filter was designed and simulated, and the experimental results show that the designed filter has a good filtering effect on the actual collected noise signals. The filter is applied to the actual processing MCU for experiments, and the phase frequency response characteristics of the selected filter are analyzed. The test results show that the response bandwidth of the filter is 1.31 kHz, which can effectively filter out high-frequency noise signals in the analog voltage signal. The angle measurement experimental system (Fig.13) has been established, and the three-axis angle measurement function

of the system has been verified. The system also has high accuracy.

Conclusions A non-contact three-axis angle measurement system based on dual PSD is designed. This system has advantages such as simple structure, small size, high accuracy, large measurement range, high bandwidth, non-contact, and insensitivity to axial translation. The rotation matrix, translation matrix, and the designed 34th-order FIR filter obtained from calibrating two PSDs are coded and written into the STM32F4 series microcontroller, and the filter delay is approximately 525 μs , which is within an acceptable range. The processing circuit and selected devices designed according to the actual requirements of the project have been experimentally verified. Within a measurement range of $\pm 2^\circ$, the accuracy of yaw angle measurement reaches 0.006° , pitch angle measurement accuracy reaches 0.009° , and roll angle measurement accuracy reaches 0.021° . The overall autocollimation measurement unit weighs 230 g and has a size of 50 mm \times 50 mm \times 50 mm square box. The response frequency of the measurement system can reach 1.15 kHz. This system can measure the three-axis angle in real-time at high speed with high accuracy and small volume, and is suitable for various engineering applications, providing stable and high-speed three-axis angle measurement solutions for airborne, spaceborne, and other conditions.

Key words: three-axis attitude angle measurement; non-contact measurement; position sensitive detector; filter bandwidth; response frequency

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (U2141231)