

基于位置敏感器件的高精度激光位置检测系统

程智 董登峰 周维虎 刘鑫

中国科学院光电研究院光电工程部, 北京 100094

摘要 光电非接触式测量方法对实现微位移测量具有重要意义, 位置敏感器件(PSD)是实现光斑位置探测的传感器件, 其探测精度以及基于该器件的数据处理方法直接影响位置测量精度。依据 PSD 各电极输出的光电流大小反比于入射光位置到各电极之间距离的工作原理, 设计了二维激光位置检测系统方案。为了提高 PSD 输出微弱电流信号的稳定性和位置探测精度, 重点研究了信号调理电路设计、参数匹配、滤波方法与实时并行计算方法。实验结果表明: 在 $\pm 2\text{ mm}$ 方形区域内, 基于 PSD 所设计的探测系统单点稳定性精度优于 $2\text{ }\mu\text{m}$, 能够满足依托项目中激光跟踪仪对空间目标确定定位的要求以及基于激光位置检测的高精度实时微位移测量相关应用的需求。

关键词 测量; 激光位置检测; 信号处理; 位置敏感器件; 位置精度

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.081202

High Precision Laser Position Detecting System Based on Position Sensitive Device

Cheng Zhi Dong Dengfeng Zhou Weihu Liu Xin

*Department of Opto-Electronic Engineering, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100094, China*

Abstract Non-contact photoelectric measuring method is important to realize micro-displacement measurement. Position sensitive device (PSD) is a kind of light spot position detecting sensor. Its detection accuracy and data processing method based on PSD can directly affect the location measurement accuracy. The working principle of PSD is that photocurrent intensity output from each electrode is inversely proportional to the distance between the position of the incident light and each electrode. According to this principle, the scheme of the two-dimensional laser position detecting system has been designed. In order to improve the stability of the output weak current signals from PSD and the location detection accuracy, signal conditioning circuit design, parameters matching, filtering method and real-time parallel algorithm are mainly studied. The experiment results indicate that, within $\pm 2\text{ mm}$ square area, the stability accuracy of the single point of this detecting system based on PSD is better than $2\text{ }\mu\text{m}$. Therefore, this system can satisfy the requirements of space target accurate positioning of the laser tracker in funded project and application requirements like real-time high accuracy micro-displacement measurement based on laser position detecting.

Key words measurement; laser position detection; signal processing; position sensitive device; location accuracy

OCIS codes 120.1880;350.4600; 040.5160; 250.0040

1 引言

近年来, 随着激光器单色性、方向性等性能的提高, 通过激光进行定位、测量位移的光学非接触测量技术

收稿日期: 2016-02-29; 收到修改稿日期: 2016-04-06; 网络出版日期: 2016-07-20

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120022)

作者简介: 程智(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电测量与控制方面的研究。

E-mail: chengzhi13@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 周维虎(1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电精密仪器及几何量计量方面的研究。

E-mail: zhouweihu@aoe.ac.cn(通信联系人)

在空间光通信、工业测量、激光制导、激光准直、太阳跟踪等领域得到了广泛应用。基于激光的微位移测量系统以光电器件为桥梁,将像光转换成电信号,通过对电信号的采集、处理、分析得到像光位移量,依据像光与被测对象确定数学关系,可进一步实现对被测对象的位移、距离、角度等几何量的测量^[1]。

常用的光电转换器件主要有位置敏感器件(PSD)^[2-3]、电荷耦合器件(CCD)图像传感器^[4-6]及四象限光电探测器(F-QD)^[3,5]。其中,PSD因其测量连续特性、高灵敏度、高位置分辨率、极好的瞬态响应特性,以及对光束外形质量要求相对较低等特点,在非接触位移测量等领域具有一定优势^[7]。但 PSD 本身为模拟器件,受环境和处理电路等因素影响较大,因此,本文着重考虑了其处理电路设计,抗环境光干扰设计及坐标运算算法的优化,搭建了以 PSD 单元为核心,通过控制器采集带有目标位置信息的 PSD 输出信号,并对其进行滤波、运算处理,再发送给上位机的高稳定性、高精度的激光位置检测系统。

2 PSD 工作原理

PSD 作为连续型模拟器件,避免了阵列型器件分辨率受像元尺寸限制的缺陷。PSD 一般为 P-I-N 结构,机理与光电二极管类似,基于半导体 PN 结横向光电效应,入射光照射在光敏面某一点,在光斑位置处产生正比于光能量的光电流,被 4 个电极收集,输出 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 ^[8]。如图 1 所示,以 X 轴为例,由于 P 层电阻均匀,入射点到相邻电极 R_1 和 R_2 的阻值取决于入射光光斑的位置,且由于 R_1 和 R_2 阻值远大于负载 R_L 值,则电极输出的光电流 I_1 、 I_2 反比于入射光光点到各自电极间的距离。

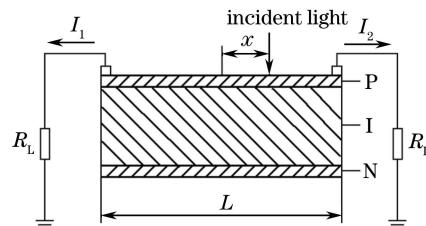


图 1 PSD 横截面示意图

Fig. 1 Cross section diagram of PSD

采用具有相互垂直两对电极的二维方形 PSD,其在两轴方向上的感光层独立,分别反映 X,Y 方向光点位置信息^[8]。取坐标原点选在 PSD 几何中心,则有:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2 + R_L}{R_1 + R_L} = \frac{L/2 - x}{L/2 + x}, \quad (1)$$

式中,L 是 PSD 光敏面的几何长度,x 是入射光斑到 PSD 几何中心的位移。当入射光强固定不变时,令 $I_0 = I_1 + I_2$,代入(1)式,得

$$I_1 = I_0 \frac{L - 2x}{2L}, \quad I_2 = I_0 \frac{L + 2x}{2L}. \quad (2)$$

对(2)式进行变换,得坐标计算公式

$$x = \frac{L}{2} \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}, \quad (3)$$

同理

$$y = \frac{L}{2} \frac{I_4 - I_3}{I_4 + I_3}. \quad (4)$$

3 系统总体方案设计

针对依托项目飞秒激光跟踪仪对空间目标定位误差在 $\pm 3 \mu\text{m}$ 内的要求,设计了基于 PSD 的激光位置检测系统,主要包括激光发射模块、应用光路、位置敏感探测器单元、数据采集及处理单元以及上位机。激光器发射出的光信号经衰减等光路后,到达位置敏感探测单元,入射在二维 PSD 光敏面上,输出的 4 路电流信号经电流/电压(I/V)转换、电平移位、放大、滤波等处理后送至以现场可编程门阵列(FPGA)为核心的数据

采集处理单元,经同步采样、模数转换、数值运算、软件滤波等处理,最终经由串口送至上位机显示。系统总体框架图如图 2 所示。



图 2 系统总体框架图

Fig. 2 Overall frame of the system

4 硬件设计

4.1 激光发射单元

设计采用西安华科光电的半导体红光高准直圆光斑激光器 DB650-2.5-3-FA 作为检测光源,其波长 650 nm,输出功率 2.5 mW,出瞳孔径 $\Phi 5$ mm。出射光经过衰减等处理,经由一定光路入射至接收器单元。

4.2 位置敏感探测器单元

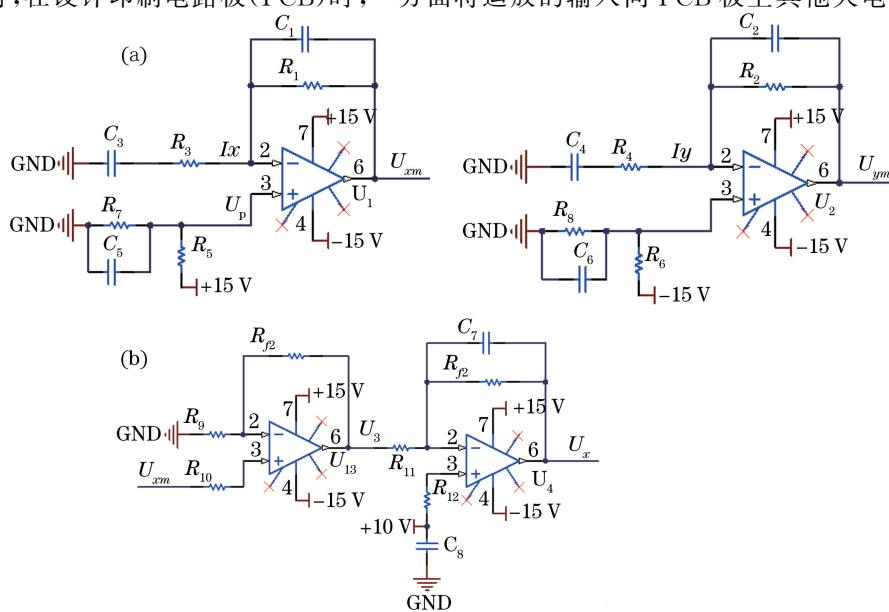
PSD 选用瑞士 SITEK 提供的高线性度二维位置传感器 2L10_SU7,其主要参数如表 1 所示。

表 1 2L10_SU7 型 PSD 主要参数

Table 1 Main parameters of 2L10_SU7 PSD

Parameter	Minimum	Typical	Maximum
Active area / (mm \times mm)		10×10	
Position non-linearity / %		± 0.3	± 0.8
Dark current / nA		100	500
Noise current / (pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$)		1.3	2.5
Responsivity / (A/W)		0.63	
Reverse voltage (bias) / V	5	15	20
Operating temperature / °C			70

PSD 输出信号为 μA 级别微弱电流信号,不适于直接检测,故对 PSD 输出后接 I/V 转换、放大电路,并将所选 PSD 的 4 路信号同时提高 7.5 V,以施加反偏电压,此时 4 路信号输出电压范围 $\pm 7.5 \sim \pm 10$ V,如图 3(a)所示。同时,在设计印刷电路板(PCB)时,一方面将运放的输入同 PCB 板上其他大电压梯度隔离,并确

图 3 PSD 信号调理电路。(a) I/V 转换电路- X/Y 轴;Fig. 3 Signal conditioning circuit for PSD. (a) Current to voltage converting circuit- X/Y axis;
(b) differential scaling operational circuit- X axis

保连线尽可能短,即对 PSD 输出到运放间的线路实施低阻抗连接,以减小 PCB 上电流的泄露;另一方面,在电源输入端加不同量级的旁路滤波电容和磁珠,并尽量靠近芯片引脚,以抑制电源纹波的影响。

此时如图 3(b)所示,考虑所选 16 位模数转换器(AD)电压输入范围 ± 10 V,仅利用 AD16 位分辨率的 1/4,故采用高输入阻抗的差分比例运算电路将此时 PSD 4 路信号电平移位并放大,以 X 轴为例,基于 $R_{f1} = R_{11}, R_{f2} = R_9$ 条件下,电路输入-输出(I/O)关系为

$$U_x = \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_{11}}\right) \times (10 - U_{xm}) \quad 7.5 \text{ V} \leqslant U_{xm} \leqslant 10 \text{ V}, \quad (5)$$

式中, U_{xm} 为图 3(a)所示 X 轴某路经 I/V 转换的电路输出信号, U_x 为 PSD 信号调理电路相应的最终输出信号。针对图 3(b),作差使输出电压为 0~2.5 V,而 AD 输入范围 ± 10 V,故电路增益 G 不大于 4 倍,又因电路所选运放供电电压为 ± 15 V,故有

$$U_n = \left(1 + \frac{R_{f1}}{R_9}\right) \times U_{xm} \leqslant 15 \text{ V}, \quad G = 1 + \frac{R_{f2}}{R_{11}} \leqslant 4, \quad (6)$$

式中, U_n 为差分比例运算电路前级电路输出信号。则差分比例运算电路总的增益 G 有

$$3 \leqslant G \leqslant 4. \quad (7)$$

综合考虑此处选择放大 3 倍。

Y 轴同理,则位置敏感探测单元输出电压范围为 0~ ± 7.5 V,经实验对比验证,电平移位后的位置探测稳定性精度得到提高。

4.3 数据采集及处理单元

设计选用 6 通道 16 位逐次逼近型模数转换器 ADS8556,每通道均包含一个采样保持电路以实现同步采样,并在前端添加输入驱动,提供 AD 工作在最大速率的带宽。电路连接形式如图 4 和图 5 所示。

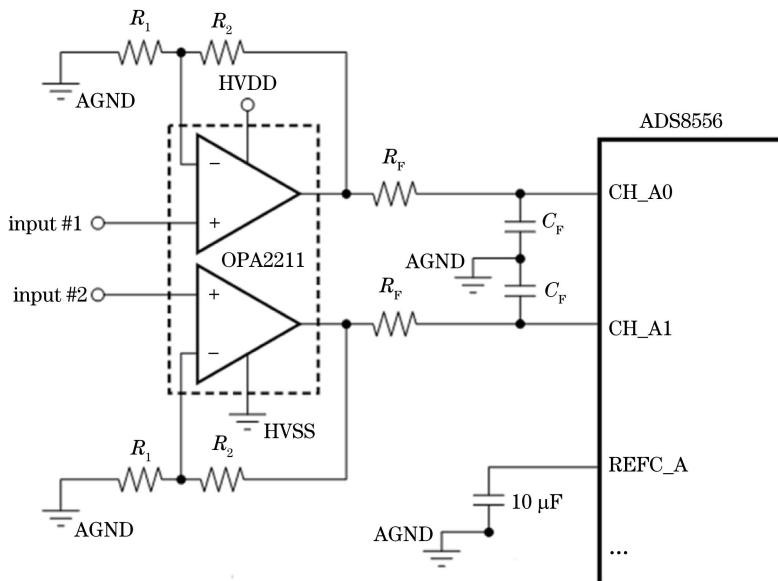


图 4 ADS8556 前端信号调理电路

Fig. 4 Front-end signal conditioning circuit of ADS8556

设计选用 Xilinx 公司生产的 Spartan-3E 系列中一款 FPGA,该芯片利用 90 nm 技术,支持多种 I/O 电平标准,并且拥有丰富的逻辑资源,如多个专用片上数字时钟管理(DCM)模块,性价比相对较高。

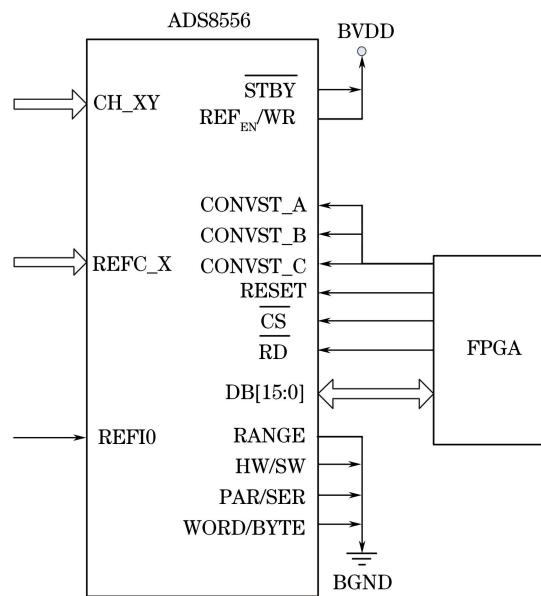


图 5 ADS8556 接口电路设计

Fig. 5 Interface circuit design of ADS8556

5 系统软件设计

系统软件设计按照模块化程序设计的原则以及自顶向下的设计思想,着重设计并验证了串口程序、AD 转换程序以及针对光斑中心坐标定位的数据处理程序。

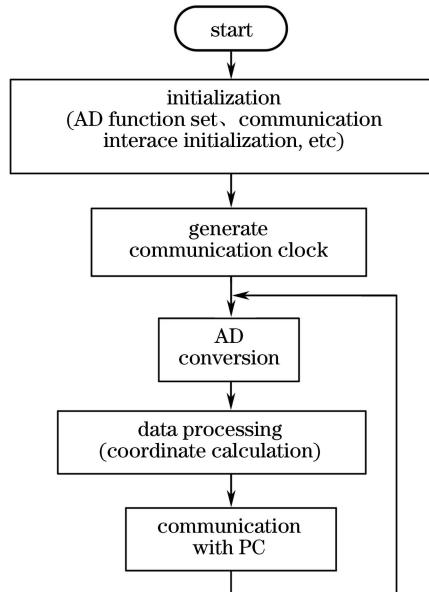


图 6 系统流程图

Fig. 6 Flow chart of the system

5.1 模数转换

对(3)、(4)式简单变形得到位置敏感探测单元输出端坐标公式

$$\begin{aligned}
 x &= K_1 \times \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}, \\
 y &= K_2 \times \frac{V_4 - V_3}{V_4 + V_3},
 \end{aligned} \tag{8}$$

式中, $V_1 \sim V_4$ 为位置敏感探测单元输出端 4 路电压, 信号范围 $0 \sim \pm 7.5$ V, K_1, K_2 为常系数。

经模数转换后的信号形式如图 7 所示, 从两轴对称性及 FPGA 除法器的使用考虑对 AD 的输出作线性调整。下面仅以 X 轴为例, X_1, X_2 表示 X 轴两路信号 V_1, V_2 经模数转换后送入 FPGA 的数字量。

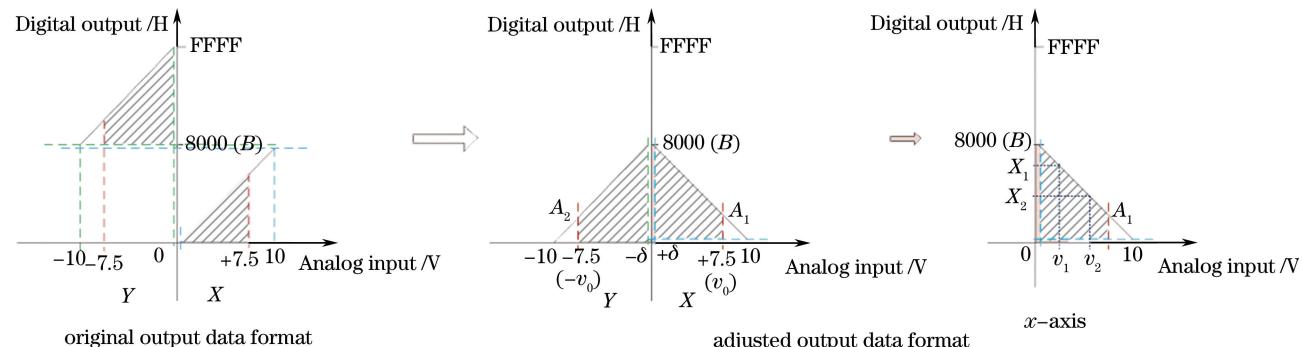


图 7 ADS8556 输出数据格式线性调整

Fig. 7 Linear adjustment of output data format of ADS8556

具体而言, 图 7 中 8000H 记作 B , 7.5 V 记作 v_0 , ± 7.5 V 对应数字量分别记作 A_1, A_2 。 $\delta = \frac{V_{\text{REF}}}{2 \times R} = \frac{2.5}{2 \times 16} = 0.078125$, 相对较小, 视作 0。 $A_1 - A_2 = 0.75 < 1$ bit, 相差较小可视作 $A_1 = A_2 = A = 2000$ H, 又考虑在光斑能量一定的情况下, 同轴两路光能总和一定, 输出电压和一定, 即

$$V_1 + V_2 = v_0, \quad (9)$$

式中, $V_1, V_2 \in [0, v_0]$ 。

则 X_1, X_2 对应输出曲线分别为

$$\begin{aligned} X_1 &= V_1 \times \frac{A - B}{v_0} + B, \\ X_2 &= (v_0 - V_1) \times \frac{A - B}{v_0} + B. \end{aligned} \quad (10)$$

由(10)式得

$$\begin{aligned} X_1 + X_2 &= A + B = 8192 + 32768 = 40960, \\ X_2 - X_1 &= 2V_1 \times \frac{B - A}{v_0} + A - B. \end{aligned} \quad (11)$$

由(11)式可看出, $X_2 - X_1$ 的值随 V_1 增大而线性增大, 得值域 $[A - B, B - A] = [-24576, 24576]$ 。由(8)~(10)式得模数转换后坐标计算公式为

$$x = K_1 \times \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} = K_1 \times \frac{\frac{(X_2 - B) \times v_0}{A - B} - \frac{(X_1 - B) \times v_0}{A - B}}{\frac{(X_2 - B) \times v_0}{A - B} + \frac{(X_1 - B) \times v_0}{A - B}} = K_1 \times \frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1 - 2B}. \quad (12)$$

5.2 滤波算法

为了提高滤波效果, 尽量减少环境、光路、电路噪声等对结果的影响, 采用防脉冲干扰平均值法将算术平均滤波和中位值滤波结合起来, 将连续测量的 N 个采样值按照大小顺序排列, 去掉最大值和最小值以初步剔除明显的噪声数据(尖峰脉冲), 再对剩下的 $N - 2$ 个采样值求平均, 即

$$X = \frac{1}{N - 2} \times \sum_{n=2}^{N-1} X(n), \quad (13)$$

式中, $X(1) \leq X(2) \leq \dots \leq X(N)$, $N \geq 3$ 。代入(12)式得

$$x = K_1 \times \frac{\sum_{n=2}^{N-1} [X_2(n) - X_1(n)]}{\sum_{n=2}^{N-1} [X_2(n) + X_1(n)] - 2B \times (N-2)} \quad (14)$$

5.3 并行计算

结合(11)、(14)式,实验获得 $0.2 \mu\text{m}$ 分辨率下系数 K_1 约在 $4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ 之间,则 N 取 10 时, x 运算过程中分子绝对值最大约为 $5 \times 10^4 \times 8 \times 24576 = 9.83 \times 10^9 > 2^{32}$,超过 FPGA 除法器位数上限,故采用一种方便的并行计算方法以实现除法器的扩用。

因坐标计算式正负理论对称,故设符号单独提取后的坐标计算式为

$$|x| = \frac{D_r}{D} = \frac{I \times 2^8 + R_{em}}{D} = \frac{I \times 2^8}{D} + \frac{R_{em}}{D}, \quad (15)$$

式中, $0 \leq R_{em} \leq 255$ 。 D_r, D 分别表示取绝对值后 x 计算式的分子、分母; I, R_{em} 分别为分子 D_r 对 2^8 整除的整数商和余数。据上可知, N 取 10 时, $D = |\sum_{n=2}^{N-1} [X_2(n) + X_1(n)] - 2B \times (N-2)| \approx |8 \times (X_1 + X_2) - 2B \times 8| = 196608$, 则 $\frac{R_{em}}{D}$ 最大值为 $\frac{255}{196608} \times 0.2 \approx 0.00026 \mu\text{m}$, 可忽略, 则(15)式可约简为

$$|x| \approx \frac{I \times 2^8}{D}. \quad (16)$$

对此使用两步除法器提高精度:

$$1) \frac{D_{r1}}{D_1} = \frac{I}{D} = Q_1 \text{ (quotient)} \cdots R_{em1} \text{ (remainder)};$$

$$2) \frac{D_{r2}}{D_2} = \frac{R_{em1} \times 2^8}{D} = Q_2 \text{ (quotient)} \cdots R_{em2} \text{ (remainder)}, R_{em2} \text{ 对应商的大小可忽略}; \text{其中 } D_{r1}, D_1, D_{r2},$$

D_2 分别表示某步使用除法器的分子和分母; $Q_1, R_{em1}, Q_2, R_{em2}$ 分别表示某步使用除法器的商和余数。

综上可得

$$|x| \approx \frac{I \times 2^8}{D} = Q_1 \times 2^8 + Q_2. \quad (17)$$

通过省略最初运算式分母低 8 位实现除法器的扩用,再通过两步除法器运算,提取有效小数位实现了测量精度的提高。

6 实验结果

根据前述硬件方案以及所提出的滤波算法和并行计算方法, 使用 THORLABS 公司 TravelMax™ 系列, 配置 LNR50DD 差分驱动器, 量程 50 mm, 分辨率 $1 \mu\text{m}$ 的位移台, 在光斑光强 $236 \mu\text{W}$, 测量范围 $x, y \in [-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm}]$, 且屏蔽环境光情况下, 单点稳定性精度优于 $2 \mu\text{m}$ 。不同点位置的测量数据见图 8~12。

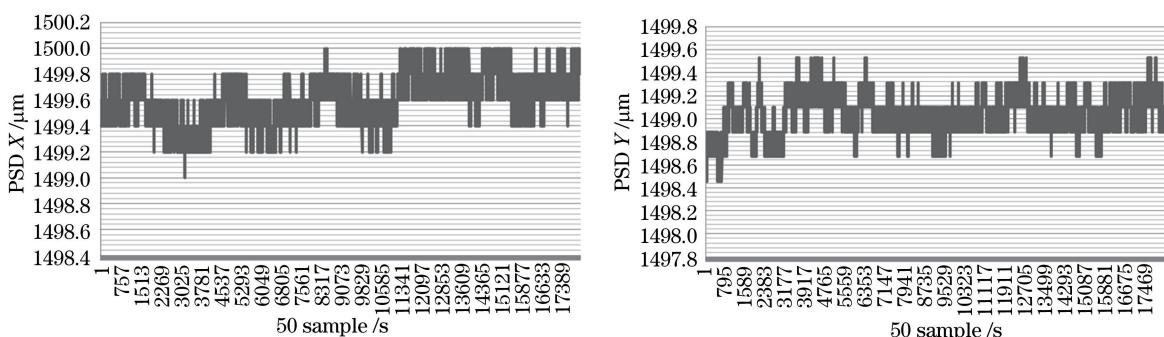


图 8 ($1500 \mu\text{m}, 1500 \mu\text{m}$) 位置测量数据

Fig. 8 Measured data of position ($1500 \mu\text{m}, 1500 \mu\text{m}$)

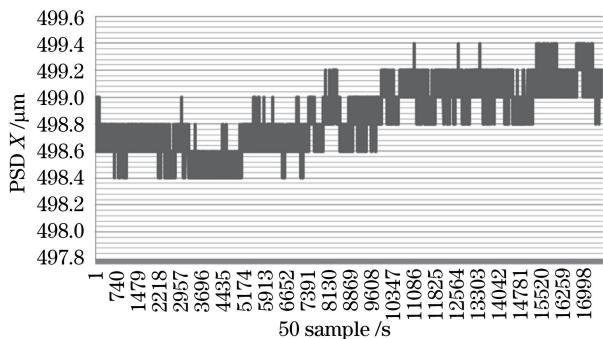


图 9 (500 μm, 500 μm)位置测量数据

Fig. 9 Measured data of position (500 μm, 500 μm)

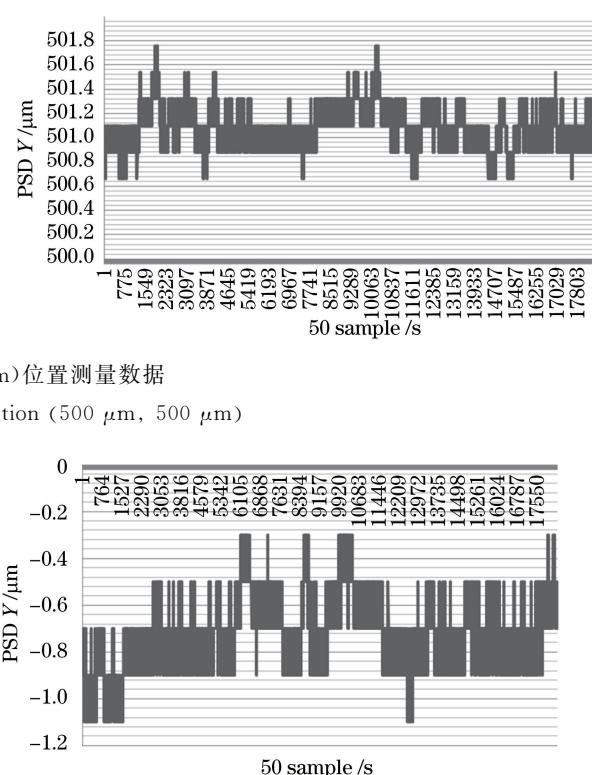


图 9 (500 μm, 500 μm)位置测量数据

Fig. 9 Measured data of position (500 μm, 500 μm)

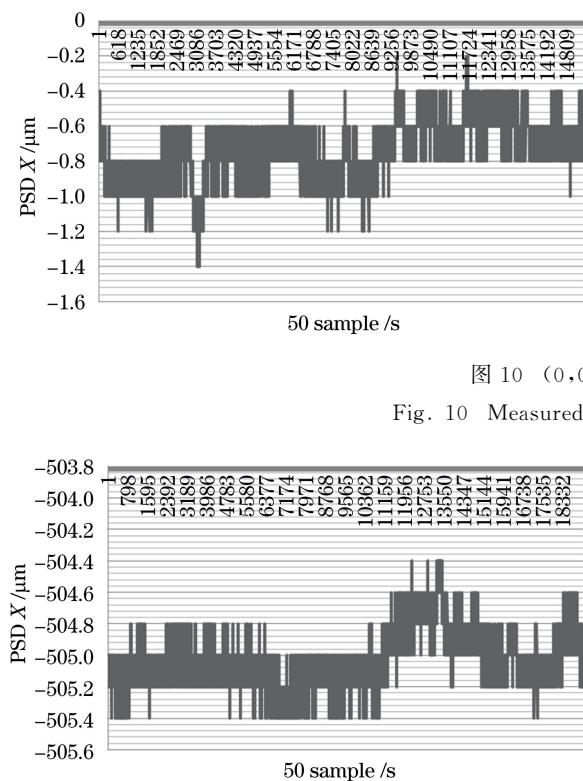


图 10 (0,0)位置测量数据

Fig. 10 Measured data of position (0, 0)

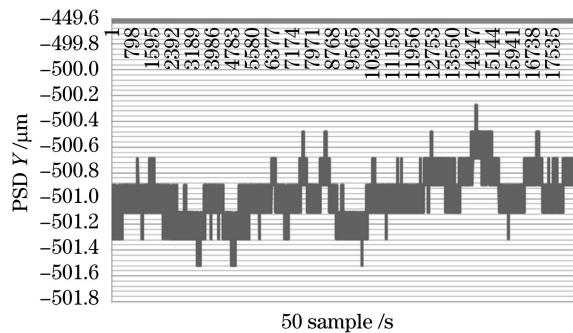


图 10 (0,0)位置测量数据

Fig. 10 Measured data of position (0, 0)

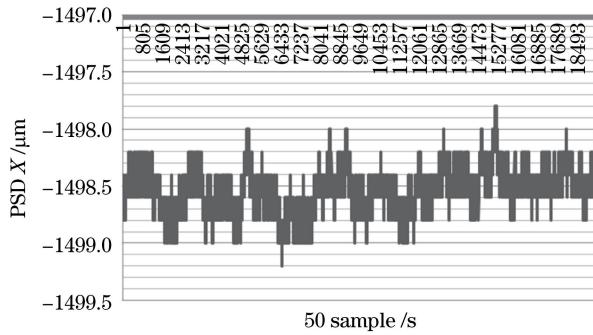


图 11 (-500 μm, -500 μm)位置测量数据

Fig. 11 Measured data of position (-500 μm, -500 μm)

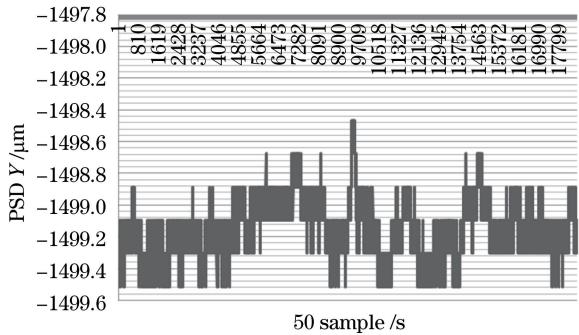


图 11 (-500 μm, -500 μm)位置测量数据

Fig. 11 Measured data of position (-500 μm, -500 μm)

7 结 论

分析了 PSD 位置探测器的工作原理,设计了基于 PSD 激光位置检测系统方案。针对 PSD 输出电流信号微弱的问题,着重介绍了硬件处理电路。采用防脉冲干扰平均值法数字滤波算法降低噪声干扰,并使用一种基于除法器扩展的并行计算方式,通过省略坐标位置计算式分母低 8 位数据实现除法器的扩用,再通过两步除法器运算,提取有效小数位以提高测量精度。对所设计系统进行了测试,得出方形测量区域 $x, y \in [-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm}]$,且屏蔽环境光情况下,单点稳定性精度优于 $2 \mu\text{m}$,满足依托项目中飞秒激光跟踪仪对空间目标准确定位的要求,并可为其他高精度微位移测量相关应用提供有利条件。

参 考 文 献

- 1 Hou Jinlong. Research on laser triangulation measurement system based on PSD[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 1-14.
侯金龙. PSD 激光三角测量系统的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 1-14.
- 2 Wang Xiaofeng, Shen Hua, Li Jianxin, et al. Method for calibrating the spatial coordinate coherence of shadowgraph-taking camera stations at long distance with PSD[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 041201.
王小锋, 沈华, 李建欣, 等. 基于 PSD 的长距离多阴影照相站的空间坐标一致性标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 041201.
- 3 Zhai Yusheng, Zhang Zhifeng, Su Yuling, et al. A multi-degree-of-freedom geometric errors measurement method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 081203.
翟玉生, 张志峰, 苏玉玲, 等. 一种多自由度误差同时测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 081203.
- 4 Qian Hang, Wang Dahui, Ma Lianying, et al. Research on 3-ray automatic alignment in high power excimer laser MOPA system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 101403.
钱航, 王大辉, 马连英, 等. 高功率准分子激光 MOPA 系统中的三路激光准直技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 101403.
- 5 Zhai Yusheng, Zhang Zhifeng, Su Yuling, et al. Survey of rolling angle measurement methods [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040002.
翟玉生, 张志峰, 苏玉玲, 等. 滚转角测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040002.
- 6 Zhou Xingmin, Liu Hengbiao, Ge Jianmin. Reflected spot center offset correction in laser triangulation measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0512001.
周兴敏, 刘恒彪, 葛剑敏. 激光三角测量中物面反射光斑重心偏移的修正[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0512001.
- 7 Jia Tianxiang, Xu Xiping, Dong Wenbo. Design of automatic testing system for 2D position sensitive detector (PSD)[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012, 10: 67-69.
贾天祥, 徐熙平, 董文博. 二维位置敏感探测器(PSD)自动测试系统[J]. 仪表技术与传感器, 2012, 10: 67-69.
- 8 Zeng Chao. Research and application of 2D position sensitive detector (PSD)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003: 5-12.
曾超. 基于二维位置敏感探测器 PSD 的研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2003: 5-12.
- 9 Zhang Min, Liang Yanbing. Experiment on two dimensional quadrilateral position sensing detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 459-464.
张敏, 梁雁冰. 二维四边形位置敏感探测器实验研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 459-464.
- 10 Duan Jie, Sun Xiangyang, Cai Jinghai, et al. Applications research to PSD in the laser displacement detecting system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1): 281-284.
段洁, 孙向阳, 蔡敬海, 等. PSD 在激光位移检测系统中的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(s1): 281-284.
- 11 Zhu Mingzhu, Chen Peifeng, Zhou Baoyu, et al. The error analysis and experimental study on PSD used in laser position detection[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2006, 19(3): 10-14.
朱明珠, 陈培峰, 周保玉, 等. 激光位置检测中 PSD 的误差分析与实验研究[J]. 光电子技术与信息, 2006, 19(3): 10-14.
- 12 Wang Shuaishuai, Zhu Lianqing, Zhou Weihu, et al. Research on micro-displacement measurement system based on PSD[J]. Electronic Sci & Tech, 2014, 27(6): 180-183.
王帅帅, 祝连庆, 周维虎, 等. 基于 PSD 的微位移测量系统研究[J]. 电子科技, 2014, 27(6): 180-183.
- 13 Cheng Yi, Dong Dengfeng, Zhou Weihu, et al. Research of micro-displacement measurement system based on PSD[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(7): 7-11.
程意, 董登峰, 周维虎, 等. 基于 PSD 的微位移测量系统研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(7): 7-11.