

激光光斑质量对基于 PSD 的激光三角法长时间连续测量精度的影响

丁小昆¹ 刘铁根¹ 宋殿友^{1,2}

(¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072
²天津理工大学电信学院, 薄膜电子与通信器件天津市重点实验室, 天津 300384)

摘要 为了提高半导体激光器-位置敏感器件(LD-PSD)激光三角法测距、测厚系统的测量精度,对半导体激光器的光斑质量进行了研究。用不同功率的半导体激光器做静态测距实验,结果表明,在长时间连续测量中,激光光斑重心的漂移增大了系统的测量误差。光斑重心漂移主要是由光斑的高频噪声和光斑整体偏移造成的。针对这两方面因素设计了基于针孔滤波和棱镜分束的能够提高激光光斑质量的光学系统,并用 CODEV 软件进行了优化与仿真。将所设计的光学系统加入到测距仪中重新进行静态测距实验,结果表明,改善后的系统精确度由 25 μm 提高到 8 μm ,使得基于位置敏感器件的激光三角法测距、测厚系统在长时间连续工作时也能保持较高的测量精度。

关键词 测量;光斑重心漂移;针孔滤波;棱镜分束;位置敏感器件

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0208006

Impact of Accuracy of Laser Spot Quality in Laser Triangulation Long-Term Continuous Measuring Based on PSD

Ding Xiaokun¹ Liu Tiegeng¹ Song Dianyou^{1,2}

(¹College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
²School of Electronics Information Engineering, Tianjin Key Laboratory for Film Electronic and Communication Device, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract The quality of laser spot is studied in order to improve the precision of distance and thickness measurement system based on laser diode-position sensitive device (LD-PSD) laser triangulation. Static distance measuring experiments with different powers of laser diodes are conducted. The experimental results show that drift of the center of spot intensity increases measurement errors of the system in long-term continual work. The drift is mainly caused by high-frequency noise and spot displacement. For these two factors, an optical system based on the pinhole filter and beam splitter with prisms to improve the quality of laser spot is proposed, which is optimized and simulated by CODEV. Static distance measuring experiments are conducted again after adding the designed optical system to the rangefinder. The new experimental results prove that the precision of the system is improved from 25 μm to 8 μm . The design improves the practicability of laser triangulation measurement system for distance and thickness measuring in long-term continual work based on PSD.

Key words measurement; drift of the center of spot intensity; pinhole filter; beam splitting with prisms; position sensitive device

OCIS codes 120.4570; 120.4820; 140.3300; 350.4600

收稿日期: 2011-09-05; 收到修改稿日期: 2011-10-26

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(60627002, 30770597)、天津市科技支撑计划(09ZCKFGX01400)和天津市应用基础研究计划(06YFJZJC00400)资助课题。

作者简介: 丁小昆(1987—),男,硕士研究生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: dingxiaokun@yahoo.com.cn

导师简介: 刘铁根(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术、光电检测技术、嵌入式图像检测技术等方面的研究。E-mail: tgliu@tju.edu.cn(中国光学学会会员号:S040130032S)

1 引 言

激光三角法是一种经典的位移测量方法,通常使用电荷耦合器件(CCD)和位置敏感器件(PSD)作为微位移的探测器。基于 CCD 的激光三角法探测精度局限于 CCD 像素的大小,目前利用亚像素分析方法^[1]可以达到微米量级的精度。理论上,基于 PSD 的激光三角法的探测精度由 PSD 的探测精度决定。经过误差校正的 PSD 的探测精度可以达到微米量级甚至更小,因此在理论上基于 PSD 的激光三角测距法可以达到更高的精度。但是基于 PSD 的激光三角法测量系统受外界环境与测量时间的影响很大,所以目前这类测量系统一般只适合恒温、短时间测量,实际应用范围受到较大限制。本文研究发现,这类测量系统长时间工作的误差主要是由光斑质量不高导致光强重心漂移造成的。于是,在分析了光强重心漂移的原因后,设计了相应的光路系统来改善光斑质量,提高了系统精度。

2 基于 PSD 的激光三角法测距原理

激光三角法测距实际是测量相对位移,它的光路系统主要由激光光源、成像透镜和光电探测器组成,如图 1 所示。光源发光照到被测物上某一点,该目标点通过成像镜头成像在光电探测器上。当被测物在激光光轴方向有微小位移时,像点在光电探测器上相应地产生位移,光电探测器将此光信号转化为电信号,通过对应关系就能测量出被测物的位移。对应关系公式为

$$x = \frac{ax'}{b \sin \beta + x' \cos \beta} \quad (1)$$

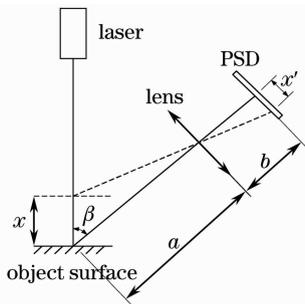


图 1 激光三角法测距原理图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring the distance based on laser triangulation

3 光斑质量对 PSD 探测精度的影响

PSD 是基于横向光电效应^[2]的光电探测器,它通过探测光强重心位置来测量光斑的位置与位移。

尚鸿雁等^[3,4]已经用不同的方法证明了 PSD 探测到的是光斑的能量重心位置,光斑的不对称性、不规则性对 PSD 的即时探测精度几乎没有影响。因此,对基于 PSD 的激光三角法探测精度的研究主要集中在被测物的表面粗糙度、颜色^[5]等因素。这些研究都假定激光器输出光束质量是不变的,然而实际的激光器光束会由于各种内部及外部因素的影响产生漂移与变形^[6],引入较大的重复测量误差,导致目前的半导体激光器(LD-PSD)系统精度一般都在几十微米^[7]。本文在基于 PSD 的激光三角测距仪静态测距实验中观察到了这种重复测量误差,如图 2 所示。

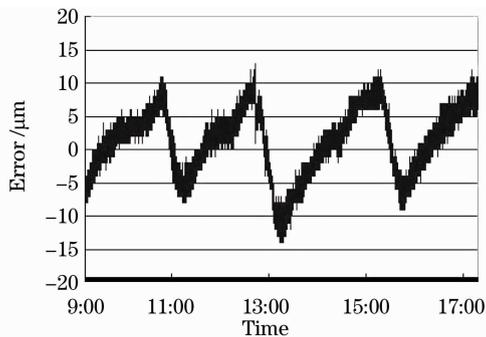


图 2 激光光斑漂移与变形造成的系统重复测量误差
Fig. 2 Repetitive measurement errors of system caused by the drift and deformation of laser spot

静态测距实验是保持被测物不动,长时间测量同一个距离来观察系统的重复测量误差的实验。本实验中对目标连续测量 8 h,每秒存储一个测量数据,图 2 所示的就是这些数据的误差曲线。该三角测距仪采用可调制半导体激光器作为光源,通过频率调制消除了背景光等因素的干扰^[8],但是仍然有 25 μm 的测量误差,无法达到 PSD 本身的分辨率精度。为了证明造成该误差的因素是激光的光斑质量,用不同功率的半导体激光器作为光源分别做了 8 h 静态测距实验,测量误差如表 1 所示。

表 1 不同功率激光器的测量误差

Table 1 Measurement errors of lasers with different power

Power /mW	5	10	20	50
Error /μm	25	35	50	85

实验中通过调节光阑使 PSD 接收到的光强相同,因此,实验中的变量只有激光器的稳定性和发热功率。半导体激光器的稳定性随功率的增大而变差,发热功率随功率的增大而增大。由表 1 可知,半导体激光器功率越大时,系统测量误差越大,所以激光器的稳定性和发热功率对测量影响较大。这两个因素对系统带来的直接影响是光斑质量的变化,包

括高频噪声和光斑整体偏移。下面分别分析光斑的这两方面因素对测量系统的影响。

3.1 光斑高频噪声

用于测量的半导体激光器工作在 TEM₀₀ 基模状态,满足 Helmholtz 方程

$$\nabla^2 U(x, y, z) + k^2 U(x, y, z) = 0. \quad (2)$$

其沿 z 方向传输的基模解为

$$U(x, y, z) = \frac{C}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left[-ikz - i\frac{k}{2R}(x^2 + y^2) - \arctan\left(\frac{z}{f}\right)\right], \quad (3)$$

其中 $\omega(z) = \omega_0[1 + (\lambda z/\pi\omega_0^2)^2]^{1/2}$ 。

理想情况下光斑振幅呈高斯分布 $A(x, y, z) = \frac{C}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right]$, 当激光器输出功率有微小变化时光斑重心不会改变。但实际的激光器由于光学镜面的缺陷、灰尘和大气扰动的影响,发生散斑效应^[9~11],使输出光斑的光强不是严格的高斯型分布,而是附加有高频噪声

$$dA(x, y, z) = -\frac{2Cx}{\omega^3(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] dx - \frac{2Cy}{\omega^3(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] dy. \quad (4)$$

高频噪声的具体表现为在高斯光斑的随机位置产生毛刺,这些毛刺随激光器温度的起伏而随机变化,改变了高斯光束的光强分布,使光强重心发生随机的漂移。这种高频噪声可以用空间低通滤波器^[12]来抑制,如图 3 所示。透镜 1 的后焦面上分别得到高斯光束和噪声的频谱分布,由于噪声频率很高,所以二者的频谱是分离的,高斯光束在低频段而噪声在高频段。在透镜 1 的后焦面放置适当大小的针孔,使高斯光束频谱通过而阻挡噪声频谱。这样,通过透镜 2 的逆傅里叶变换后,光束中只剩下高斯光束,从而有效地滤除了高频噪声。最后再通过聚焦镜 3 将光斑会聚用于测量。滤波器的作用有两个:

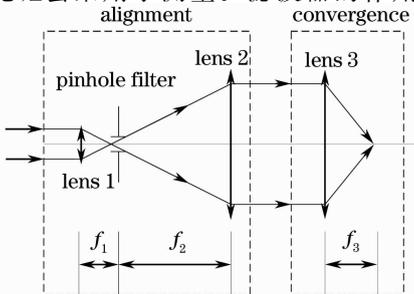


图 3 准直-滤波-聚焦系统

Fig. 3 System of alignment-filter-convergence

1) 针孔作为空间低通滤波器,能够滤除半导体激光器发热产生的高频噪声;2) 通过减小高斯光束传播过程中的散斑效应来得到更小的激光光束。点状半导体激光器的光斑轮廓类似于圆形,散斑效应产生的噪声始终位于光斑外圆内。因此更小的激光光束能够减小噪声的空间范围,从而在一定程度上也抑制了光强重心的漂移。

3.2 光斑整体偏移

激光测距仪是长时间实时测距的仪器,连续工作时间至少为几个小时。半导体激光器在连续工作时自身发热,导致作为谐振腔反射镜的解理面产生微变形,使激光光斑整体发生偏移。这个偏移是空间滤波器无法抑制的,但可根据刘兴占等^[13]提出的双光束补偿原理来抑制这种偏移。将双光束补偿系统和空间滤波系统融合后构成改进的 PSD 测距光学系统如图 4 所示。图中元件 6、7、8、9 共同构成了双光束补偿系统,元件 1、2、3、5 为 3.1 节所述的准直-滤波-聚焦系统,元件 4 为成像镜头。

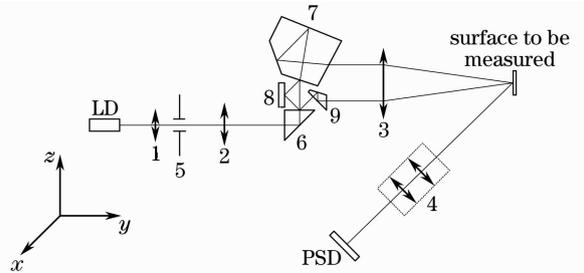


图 4 改进的 PSD 测距光学系统

Fig. 4 Improved optical system for distance measurement based on PSD

光束经过滤波后通过直角棱镜 6 的反射,一半的光束进入五角棱镜 7,出射后成为上光束;另一半光束被五角棱镜 7 的下表面反射(该表面镀半反半透膜)后又被反射镜 8 反射,再经过直角棱镜 6 上表面的反射,最后进入半五角棱镜 9,出射后成为下光束。由于上光束和下光束分别被进行了奇数次和偶数次的反射,所以这两束光是镜像的。当激光器出射光发生整体偏移时,该偏移可以正交分解为图 4 坐标的 x 方向和 z 方向的偏移。由于测距系统的 PSD 是一维的,它只对长度方向的位移敏感,因此 x 方向上的偏移分量对测量无影响,可以忽略。 z 方向的光斑偏移分量表现为上光束和下光束发生反向偏移,经过聚焦-漫反射-成像后,在 PSD 光敏面上上光束和下光束的光斑以未偏移前的光斑重心为中心,发生镜像位移。而根据 PSD 的测光强重心原理,这两个位移对 PSD 的感光影响恰好抵消,从而

抑制了光斑的整体偏移对测量的负面影响。

4 系统仿真设计

在第 3 节所述的光路系统中,反射系统参数固定,无需优化,因此设计的重点是空间滤波系统。图 3 中透镜 1 和透镜 2 实际上是用倒望远镜系统对激光进行准直,其像差因素对系统影响不大,需要针对系统设计透镜 3 和针孔大小。

系统对透镜 3 的要求为,焦距 $f'_3 = 50$ mm,物距 $L_3 = \infty$,像距 $L'_3 = 50$ mm。该镜头是小视场、大孔径的望远物镜,需要矫正球差和正弦差。用光学系统初始结构参数求解方法(PW)法^[14]设计双胶合透镜的参数,曲率半径 $r_1 = 29.829$ mm, $r_2 = -22.566$ mm,

$r_3 = -69.958$ mm;透镜中心厚度 $d_1 = 3.2$ mm, $d_2 = 1.2$ mm。用 CODEV 将透镜 1、2、3 添加到激光成像系统中并进行优化设计。优化后系统未加针孔时 ($D = \infty$)和加不同直径针孔时 ($D = 0.5$ mm、 $D = 0.1$ mm、 $D = 0.05$ mm)4 种情况下的成像点列图分别示于图 5 (a)~(d);径向能量分布图分别示于图 6(a)~(d)。从图 5 和图 6 可以看到,当针孔孔径由无穷大逐渐减小时,成像光斑大小逐渐减小,光斑能量集中性逐渐提高,即滤波效果变好。但是,针孔孔径的减小意味着透光能量的减少,导致 PSD 的探测精度、线性度变差甚至无响应。为了确定滤波与通光的最优平衡点,建立优化模型。

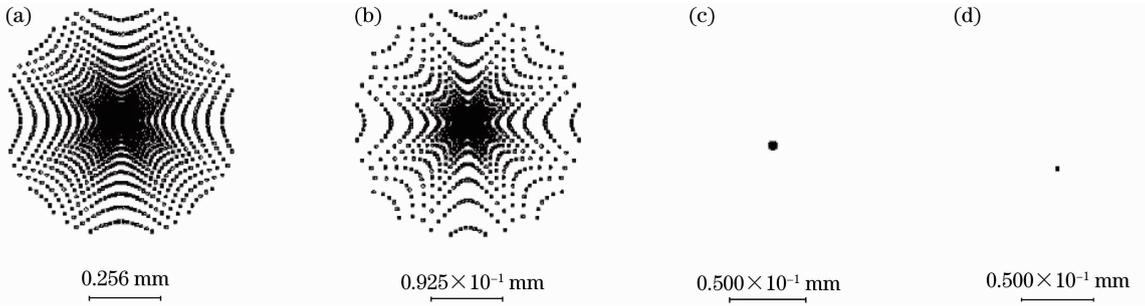


图 5 不同针孔大小下的系统点列图。(a) $D = \infty$; (b) $D = 0.5$ mm; (c) $D = 0.1$ mm; (d) $D = 0.05$ mm

Fig. 5 Spot diagrams of system in different diameters of pinhole. (a) $D = \infty$; (b) $D = 0.5$ mm; (c) $D = 0.1$ mm; (d) $D = 0.05$ mm

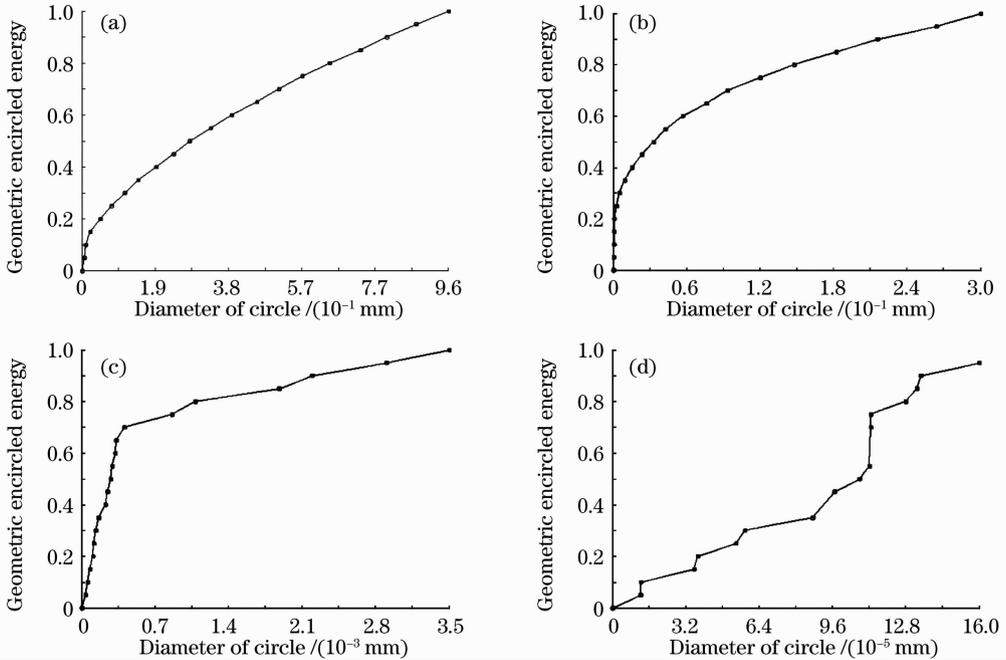


图 6 不同针孔大小下的系统径向能量分布图。(a) $D = \infty$; (b) $D = 0.5$ mm; (c) $D = 0.1$ mm; (d) $D = 0.05$ mm

Fig. 6 Diagrams of radial energy analysis in different diameters of pinhole. (a) $D = \infty$; (b) $D = 0.5$ mm; (c) $D = 0.1$ mm; (d) $D = 0.05$ mm

模型参数为激光器功率为 P ，经过通光率为 t 的针孔后辐通量为 Pt ，反射率为 R 的被测物反射的总辐通量 $\Phi = PtR$ ，被测物可以近似看为理想漫反射体，满足朗伯定律^[15]

$$I_e = I_0 \cos \theta, \quad (5)$$

式中 θ 为漫反射光与入射光点处面元法线的夹角， I_e 为漫反射光方向的辐射强度， I_0 为法线方向的辐射强度。辐射强度与辐通量的关系为

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}, \quad (6)$$

式中 Ω 为立体角。根据(6)式对辐通量在整个辐射半球内积分得

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} I_e \frac{2\pi r \sin \theta \cdot r d\theta}{r^2}, \quad (7)$$

式中 r 为被测物上的光点到成像镜头的距离。将(5)式代入(7)式得到 $I_0 = \Phi/\pi$ 。成像镜头表面接收到的辐通量近似看作均匀分布，其值为

$$\Phi_e = I_e \Omega = I_0 \cos \theta \frac{\pi(D/2)^2}{r^2}, \quad (8)$$

式中 D 为成像镜头的直径。于是 PSD 的光电流为

$$i = \Phi_e S = \frac{PtR}{\pi} \cos \theta \frac{\pi(D/2)^2}{r^2} S = \frac{PtRSD^2 \cos \theta}{4r^2}, \quad (9)$$

式中 S 为 PSD 的响应度。而系统对上式中的参数要求为，PSD 最小探测光电流 $i = 1 \mu\text{A}$ ，它对 650 nm 红光的响应度 $S = 0.42 \text{ A/W}$ ，成像镜头外径 $D = 20 \text{ mm}$ ，成像镜头与被测物距离 $r = 50 \text{ mm}$ ，接收角 $\theta = 45^\circ$ ，被测物反射率 $R \geq 0.1$ ，激光器功率 $P \geq$

5 mW。代入(9)式得针孔通光率 $t \geq 0.17$ 。不同孔径大小下的针孔通光率如图 7 所示。

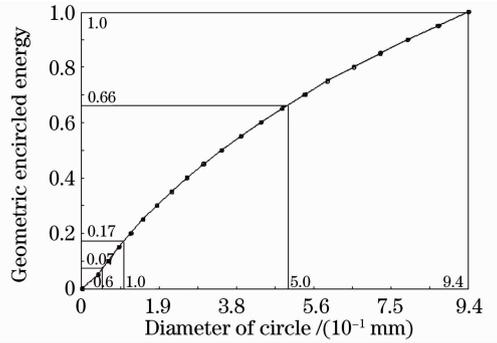


图 7 不同孔径下针孔的通光率

Fig. 7 Light transmittances of pinhole in different diameters

从图 7 可以看到针孔通光率为 0.17 时对应的针孔直径约为 0.1 mm，此时针孔在有效地进行高频噪声滤波和散斑消除的同时，保证了 PSD 的光强响应度，于是 $D = 0.1 \text{ mm}$ 即为滤波与通光的最优平衡点。以上仿真均基于几何光线，而本光路系统是应用于激光光学系统。因此除以上对几何光线的仿真设计外，还需要对高斯光束进行仿真，用 CODEV 进行高斯光束追迹，得到各光学表面的高斯光束参数如表 2 所示。在经过光路系统后，束腰半径 $\omega = 0.5 \text{ mm}$ 的理想高斯光束最终能整形为 $\omega' = 0.0045 \text{ mm}$ 的高斯光束。将几何像差与高斯光束综合考虑，该系统可以将高斯光束在像面上的光斑直径控制在 0.1 mm 以内，减小了高频噪声的空间范围。

表 2 高斯光束追迹参数

Table 2 Gaussian beam parameters

Surface	Propagation distance to next surface /mm	Beam of surface /mm		Beam orientation / (°)	Wavefront radius of curvature before refraction /mm		Waist radius before refraction /mm		Distance from waist to surface /mm	
		x	y		x	y	x	y	x	y
Object	10.0000	0.5000	0.5000	0.0	2333643.0	2333643.0	0.5000	0.5000	-0.6256	-0.6256
1	2.5000	0.5000	0.5000	0.0	-155753.2	-155753.2	0.5000	0.5000	9.3744	9.3744
2	9.9554	0.4176	0.4176	0.0	12.6688	12.6688	0.0041	0.0041	-12.6675	-12.6675
3	51.6770	0.0794	0.0794	0.0	-1.5933	-1.5933	0.0041	0.0041	1.5890	1.5890
4	2.6000	2.6586	2.6586	0.0	-53.2661	-53.2661	0.0041	0.0041	53.2660	53.2660
5	10.0000	2.6532	2.6532	0.0	1268.4687	1268.4687	0.0653	0.0653	-1267.7	-1267.7
6	3.2000	2.6215	2.6215	0.0	827.7795	827.7795	0.0653	0.0653	-827.2657	-827.2657
7	1.2000	2.5424	2.5424	0.0	102.7758	102.7758	0.0055	0.0055	-102.7753	-102.7753
8	55.3011	2.5383	2.5383	0.0	758.6405	758.6405	0.0371	0.0371	-758.4786	-758.4786
Image		0.0045	0.0045	0.0	1.1823	1.1823	0.0045	0.0045	-0.0082	-0.0082

5 实验结果与误差分析

根据 CODEV 优化后的光学参数进行光路系统

搭建，在传统的激光三角法光路的激光器后加入该准直-滤波-分束-聚焦光路系统。用 5 mW 激光器

重新进行静态测距实验得到如图 8 所示的测量结果。与图 2 对比可以看到,在对半导体激光器出射光进行改良后,光强重心的漂移明显被抑制,激光三角法中 PSD 重复测量误差从原来的 $25\ \mu\text{m}$ 减小到 $8\ \mu\text{m}$ 。并且,在外温变化不大的时间段内(11:00~17:00),重复测量误差可以减小到 $5\ \mu\text{m}$ 以内。而用其他功率激光器进行改进系统的误差测试,实验误差数据如表 3 所示。

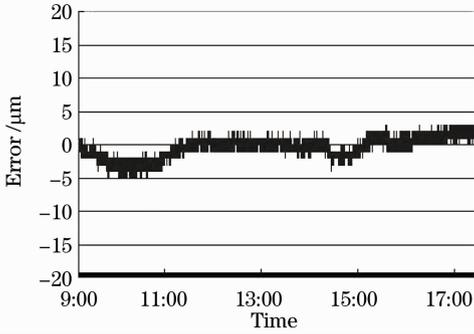


图 8 改进光路后系统的重复测量误差

Fig. 8 Repetitive measurement errors of system based on the improved optical system

表 3 改进系统在不同功率激光器下的测量误差

Table 3 Measurement errors of lasers with different power in the improved system

Power /mW	5	10	20	50
Error / μm	8	12	18	25

从图 8 和表 3 分析,误差的产生有三方面原因:

1)电路系统误差,PSD 接收到光强重心的位置信号后,发生横向光电效应,通过电路检测两极的电压信号时,受到电器温度变化的影响,会产生电信号检测误差;2)针孔滤波不能完全滤除高频噪声,只是在滤波和透光这二者间进行优化,找到平衡点,并且高斯光束在后续光路中又会发生散斑效应而引入一些高频噪声;3)双光束补偿系统中,由于上下光束分别通过不同的光路,它们产生的偏移不是完全镜像的,而是存在很小的偏差。激光器功率越大,光斑漂移现象越明显,入射光束偏移角越大,上下光束在进行非完全对称位移后光能重心的偏移越大,造成重复测量误差增大,因此功率越大的激光器在改进系统中的重复测量误差越大。

6 结 论

激光光斑质量对基于 PSD 的激光三角法长时间连续测量精度有很大影响,主要表现在高斯光束高频噪声和光斑整体偏移两方面。通过加入空间滤波器抑制了高频噪声,加入棱镜分束并利用 PSD 测

光强重心原理抑制了光斑整体偏移。用 CODEV 仿真光路系统并在透射光强和滤波效果之间进行优化,使激光光斑质量得到改善。实验结果表明,改良后的测量系统在长时间连续工作并采用功率为 $5\ \text{mW}$ 的激光时,可保持 $8\ \mu\text{m}$ 以内的测量误差,提高了测量精度和实用性,扩展了基于 PSD 的激光三角测距仪、测厚仪的使用范围。

参 考 文 献

- 1 A. J. Tabatabai, O. R. Mitchell. Edge location to subpixel values in digital imagery[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, **6**(2): 188~201
- 2 Lucovsky Gerald. Photoeffects in nonuniformly irradiated p-n junctions[J]. *J. Appl. Phys.*, 1960, **31**(6): 1088~1095
- 3 Shang Hongyan, Zhang Guangjun. Analysis of the response characteristics of position sensitive detector under different modes of light source[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(1): 93~96
- 4 尚鸿雁, 张广军. 不同光源模式下位置敏感探测器响应特性分析[J]. *光电工程*, 2005, **32**(1): 93~96
- 5 Fang Guanming, Cao Yiping, Zhou Liping. Analysis on the position sensitive detector positioning error caused by laser spot using new three-ray model[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 954~958
- 6 方光明, 曹益平, 周力萍. 采用三线位置敏感探测器定位模型分析光斑对定位精度的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 954~958
- 5 Xu Yuchun, Xie Zexiao, Feng Guoxin *et al.*. Study on influence of surface properties on characteristics of laser triangulation probe[J]. *Journal of Tianjin University*, 2001, **34**(6): 796~799
- 6 徐玉春, 解则晓, 冯国馨等. 被测表面特征对激光测头特性的影响[J]. *天津大学学报*, 2001, **34**(6): 796~799
- 6 Deli Yu, Fengting Sang, Yuqi Jin *et al.*. Output beam drift and deformation in high-power COIL [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2003, **35**(4): 245~249
- 7 Shuojen Lee, Daryuan Chang. A laser sensor with multiple detectors for freeform surface digitization [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, **31**(11-12): 1181~1190
- 8 C. Narayanan, A. Bruce Buckman, I. Busch-Vishniac *et al.*. Position dependence of the transient response of a position-sensitive detector under periodic pulsed light modulation [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1993, **40**(9): 1688~1694
- 9 Huang Zhanhua, Zhu Meng, Cai Huaiyu *et al.*. Speckle correlation used in measurement of elliptical Gaussian beam divergence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2918~2922
- 9 黄战华, 朱 猛, 蔡怀宇等. 散斑相关在椭圆高斯光束发散角测量中的应用[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2918~2922
- 10 Tang Guoxian, Shi Yunbo, Liu Jun *et al.*. Speckle reduction based on MOEMS-scanning mirror technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 062301
- 10 唐国先, 石云波, 刘 俊等. 基于微型光机电系统扫描镜技术的激光散斑抑制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 062301
- 11 Zhang Yancao, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. Application of apodization digital holography in phase measurement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1602~1606
- 11 张延曹, 赵建林, 范 琦等. 切趾数字全息术在相位测量中的应用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1602~1606
- 12 Chu Yenpin, Lu Chih sien, Chiang Chinwu *et al.*. The output of a spatial filter and its application in laser focus system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1980, **1**(3): 28~33

- 朱延彬, 陆志贤, 江庆五等. 空间滤波器的输出及其在激光聚焦系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 1980, **1**(3): 28~33
- 13 Liu Xingzhan, Liang Jinwen, Chen Boyi *et al.*. Double-beam compensation alignment system [J]. *Measurement Technique*, 1999, (1): 12~15
- 刘兴占, 梁晋文, 陈博一等. 双光束补偿准直系统[J]. 计量技术, 1999, (1): 12~15
- 14 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674~2679
- 陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2674~2679
- 15 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2536~2540
- 丁德强, 柯熙政. 一种通用白光 LED 数学发光模型研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2536~2540

栏目编辑:何卓铭