

文章编号 1004-924X(2011)10-02366-07

## 用激光外差技术高精度测量目标速度

刘立生<sup>1,2\*</sup>, 张合勇<sup>1,2</sup>, 郭 劲<sup>1</sup>, 刘洪波<sup>1</sup>, 赵 帅<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**搭建了外差探测实验平台, 分别选用漫反射目标及类简谐运动模型作匀转速运动及变速运动的测量目标, 应用激光外差探测技术实现了对匀转速运动及变速运动物体的速度测量。在匀转速测量过程中, 同时采用外差探测法和振幅调制法测量了漫反射目标正负两个方向转动的速度, 共得到 133 组不同的转速结果。通过调整实验系统, 亦实现了对类简谐运动目标的变速测量, 应用 Matlab 数学工具对拍摄频谱视频做后续处理, 得到了运动目标的实时速度。测试结果显示, 在 0.05~16 m/s 测量匀转速时, 正向转动平均相对误差为 0.51%, 负向转动平均相对误差为 0.42%; 另外, 变速测量的正负最大速度分别为 0.555 6 m/s 和 -0.659 m/s。结果证明了激光外差对速度测量的高精度性, 实验中频谱峰值清晰可见, 说明激光外差探测具有较高信噪比。

**关键词:**激光外差探测; 匀转速测量; 变速测量; 测量误差

中图分类号: TN249 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111910.2366

## High precise measurement of target velocity using laser heterodyne technology

LIU Li-sheng<sup>1,2\*</sup>, ZHANG He-yong<sup>1,2</sup>, GUO Jin<sup>1</sup>, LIU Hong-bo<sup>1</sup>, ZHAO Shuai<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: liulisheng0119@163.com

**Abstract:** A heterodyne detection experiment is established to measure the constant rotation velocity and the variable velocity of targets, in which the diffuse reflectance target and simple harmonic motion model are taken as research targets. For uniform rotation velocity measurement, the heterodyne method and amplitude modulation velocity measurement are conducted at the same time to measure the rotation velocity of a diffusion target in two directions and 133 sets of results are obtained. Moreover, the variable velocity is measured for a target with like-harmonic motion by the same optical system, and the spectrum video is processed by the Matlab software to get the velocity. Tested results show that, in the uniform rotation velocity range from 0.05 to 16 m/s, the average relative error for positive and

收稿日期: 2010-12-07; 修订日期: 2011-02-16.

基金项目: 中科院第三期创新工程资助项目 (No. O98Y32C100)

negative rotation analytical measurements are only 0.51% and 0.42%, respectively. In a variable velocity measurement for positive and negative rotations, the maximum speed are 0.555 6 and -0.659 m/s, respectively. The results indicate that the measurement has a higher accuracy and a higher Signal to Noise Ratio(SNR) for a clear mid-frequency spectrum can be seen.

**Key words:** laser heterodyne detection; uniform rotation velocity measurement; variable velocity measurement; relative error

## 1 引言

激光外差探测技术是将频率不同的本振光和信号光做相干叠加,用探测器来实现对两者差频频率的探测,其特点在于将高频的光波信号转换成中低频率的包络信号来实现频率测量。外差探测的灵敏度高,通过提高本振光的强度,可实现对微弱信号探测,灵敏度比直接探测高出好几个数量级<sup>[1-3]</sup>。该技术有着良好的噪声滤除能力、抗干扰能力强,基于其实时性、可溯源性和高分辨率等优点,已被广泛应用于纳米分辨力和大动态测量范围的精密定位和位移监测<sup>[4-6]</sup>。在速度测量应用方面,有着测速范围广,精度高的特点。Oliver T. Strand<sup>[8]</sup>采用 1 550 nm 激光外差测速系统,实现了对 3 000 m/s 高速的测量;P. Mercier<sup>[9]</sup>对 500 m/s 的子弹速度测量达到±4 m/s 的精度。1996 年国内的激光多普勒低速测量已达 19 nm/s<sup>[7]</sup>,2009 年北京理工大学应用 1.06 μm 脉冲相干激光雷达实现了误差为 3% 的转速测量<sup>[10]</sup>。本文用此技术对漫反射目标转动速度进行精密测量,得到仅为 0.51% 和 0.48% 的测量平均相对误差;并通过此技术,实现了对变速类简谐目标的实时准确的检测。

## 2 实验原理

运动物体对照射到其上的光波会产生多普勒效应,从而使光频率发生偏移。光波频率移动与光线发射方向、物体速度方向和探测方向有关。其关系式为<sup>[11]</sup>:

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}, \quad (1)$$

式中  $v$  为物体运动速度, $\lambda$  为发射激光波长, $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为如图(1)所示矢量夹角。

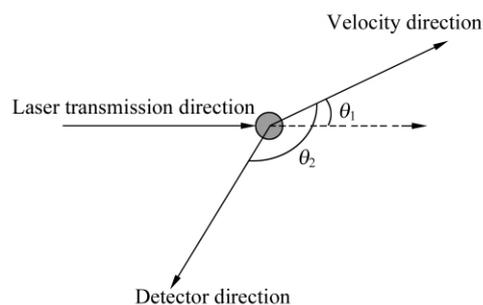


图 1 多普勒频移示意图

Fig. 1 Diagram of Doppler shift

由于光信号频率极高,通常在  $10^{14}$  Hz 以上,目前所使用的光电探测器无法对光波频率进行直接探测。光外差探测法是利用光相干叠加原理,将两个频率不同的相干光叠加,使得高频光波信号转换为中频包络信号,从而实现对多普勒频率移动的测量,进而测量物体的运动特征。具体实现方式为:将激光分为两束,一束经频率调制后作为本振光;另一束作为发射光照射目标。返回的反射光作为光和本振光在探测器表面做相干叠加。假定接收信号光为  $E_s \cos \omega_s t$ ,本振光  $E_1 \cos \omega_1 t$ ,则探测器输出光电流为:

$$I \propto \iint_s (E_s \cos \omega_s t + E_1 \cos \omega_1 t)^2 ds = \iint_s \left\{ \begin{aligned} &E_1^2 \cos^2 \omega_1 t + E_s^2 \cos^2 \omega_s t + E_1 E_s \cos (\omega_1 + \omega_s) t + \\ &E_1 E_s \cos (\omega_1 - \omega_s) t \end{aligned} \right\} ds \quad (2)$$

$s$  为探测器面积。公式(2)中倍频项  $E_1^2 \cos^2 \omega_1 t$ ,  $E_s^2 \cos^2 \omega_s t$  和频项  $E_1 E_s \cos (\omega_1 + \omega_s) t$  信号频率约为反射激光频率的 2 倍,探测器无法响应如此高的频率信息,就会将其作为直流信号处理,3 项时间积分值分别为 1/2, 1/2 和 0。在后续电路处理中,通过直流滤波器将其滤除,于是得差频交流信号为<sup>[1]</sup>:

$$i = \iint_s [E_1 E_s \cos(\omega_1 - \omega_s) t] ds, \quad (3)$$

这个探测光电流项包含接收光和本振光差频信息,有:

$$2\pi \times \Delta f = \omega_1 - \omega_s, \quad (4)$$

可见对公式(3)中交流电频率的探测,由公式(4)便可得差频信息  $\Delta f$ ,代入公式(1)可求得物体的运动速度。此为激光外差测速基本原理。

### 3 匀转速测量实验

基于上述基本理论,我们应用 Nd:YAG 532 nm 激光器,80 MHz 声光调制器,搭建了外差实验系统用于测量漫反射目标(如图(2)所示)的匀转速运动。

实验系统原理如图(3)所示。发射激光被分束器 1 分为两束,透射激光直接打在旋转目标上,目标表面贴一层白纸,作为漫反射体;其表面反射激光经正负透镜组成的接收系统接收后,聚焦于光电探测器。分束器 1 反射的激光经过声光调制器调制后作为本振光,经镜面转向,分束器 2 反射

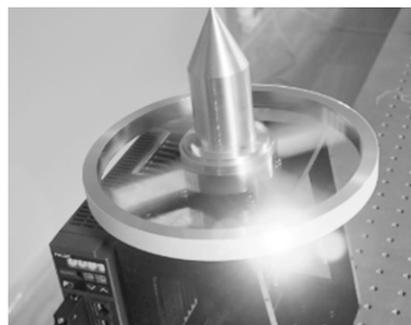


图 2 所探测漫反射目标

Fig. 2 Detected diffusion target

后,同样聚焦于探测器,与信号光相干叠加。本实验所用激光器发射功率为 107 mW,带宽 1 MHz;本振光由声光调制器进行频率调制,探测器探测带宽为 1 GHz,所测目标速度可调,所用频谱分析仪带宽 3.9 G,可实现对频谱密度的精确测量。实验系统中,格兰棱镜和 1/4 波片组成的光隔离器用来防止系统中反射光进入激光器所引起激光器的不稳定。小孔 1 用来选择分束器 1 前表面的反射光,由于声光调制器产生几级衍射光,小孔 2 用来选择 80 MHz 调制后的一级衍射激光。测量目标半径为 10 cm,它的转动对光产生多普勒效应。

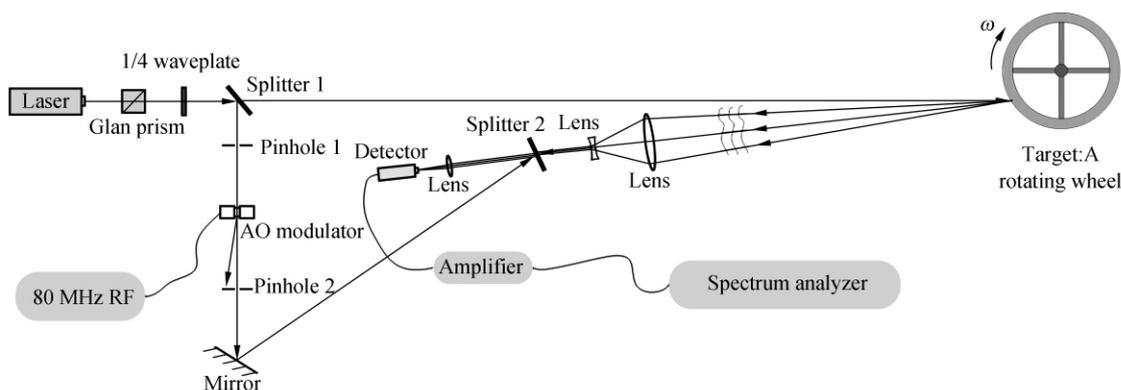
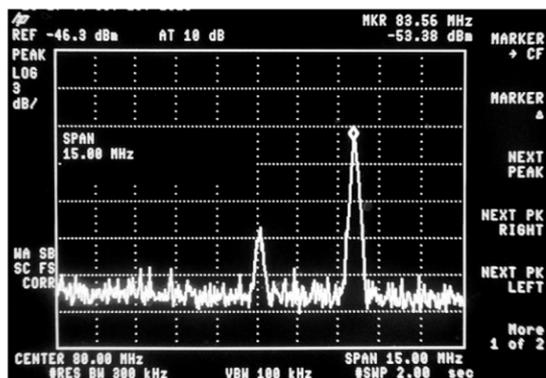


图 3 匀转速测量实验系统原理图

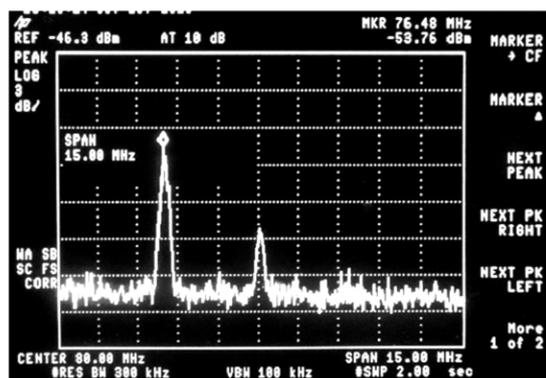
Fig. 3 Experimental optical system measuring variable motion

由于所测漫反射目标转动方向不同,将对激光产生正负不同的多普勒频移,规定顺时针方向为正,逆时针方向为负。如图(4)给出固定转速,不同方向转动时,频谱分析仪所测得的差频信号频谱。

图(4)所示中心频率为 80 MHz,中心频谱峰值作为声光调制器输出的一个 80 MHz 基准信号,为方便寻找其附近差频信号的峰值。菱形标记处为探测到的差频信号频谱密度峰值。对比(a)(b)两图,可见正负方向转动时,对光波产生正



(a) 正方向转动  
(a) Positive rotation



(b) 负方向转动  
(b) Negative rotation

图 4 光谱密度图

Fig. 4 Spectral density distribution.

负不同的多普勒频移,由于正负速度相同,使得差频信号频率关于中心 80 MHz 对称。

由于本振光和信号光相干叠加具有非常严格的限制条件,并且杂散噪声信号不具有一定的频率信息,使得激光外差探测具有较高的信噪比以及非常好的抗干扰能力。图(4)中清晰的外差信号频谱可以反映这一点。

为了定量分析外差测速的精度,采用振幅调制方法测量目标转速,并将这个精确测量值作为理论真值进行分析。如图(5)所示,所用的光为原理图(3)中分束器 2 透射激光。目标旋转 1 周对激光进行 4 次调制,通过测量 4 个周期的光强度信号便可得到目标精确转速。本实验一共测量了 133 组漫反射目标的不同匀速转动速度。光外差探测与振幅调制法同步进行,后者作为转速真值,以此分析了光外差探测的相对误差。如图(6)为目标正向转动的实验分析结果,图(7)为负向转动

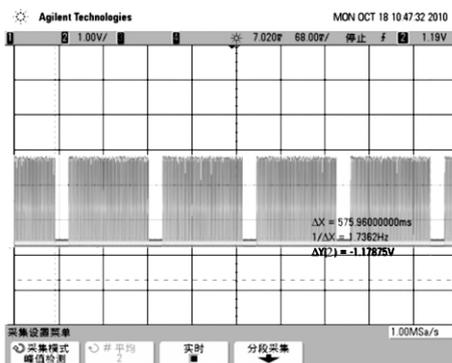
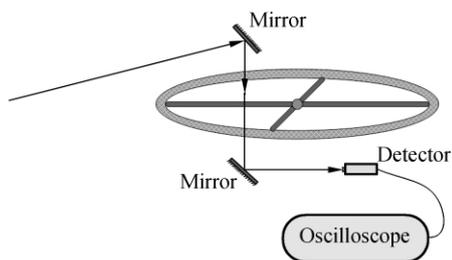
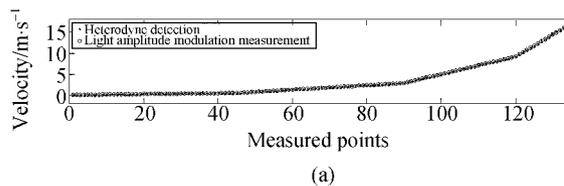


图 5 激光振幅调制法转速测量原理图

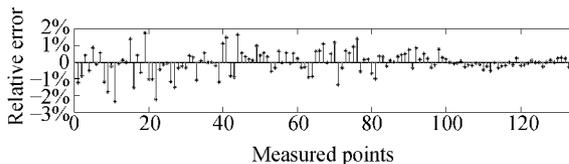
Fig. 5 Velocity measurement principle by amplitude modulation

分析结果。

从图(6)(a)、(7)(a)可见,外差方法测速和理论真值基本完全一致。实际计算可得,本次实验测速范围大致为 0.05 m/s 到 16 m/s。正向转动测量最大相对误差为 2.34%,平均相对误差为 0.51%;负向转动测量最大相对误差为 2.06%,平均相对误差为 0.42%,实现了对速度的高精度测量。从图(6)(b)、(7)(b)可见,目标速度越大,测量相对误差越小。



(a)



(b)

图 6 正向转动测量速度(a)及相对误差分析(b)

Fig. 6 Positive rotation velocity measurement (a) and relative error (b)

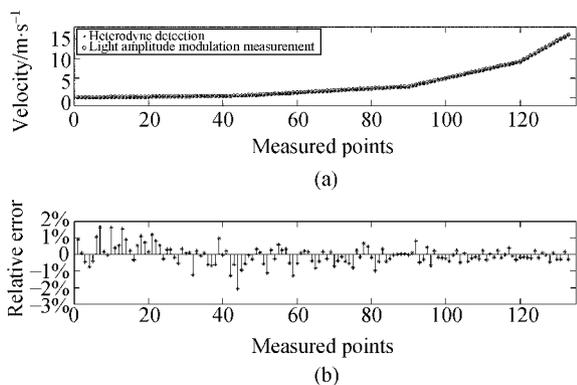


图 7 负向转动测量速度(a)及相对误差分析(b)  
Fig. 7 Negative rotation velocity measurement (a) and the relative error (b)

### 4 变速测量实验

对上述实验系统进行了简单调整,用于实现对如图(8)所示目标的变速测量。该目标通过人工前后推拉,实现目标的类简谐变速运动。由于目标处在变速运动状态,频谱分析所得频率峰值处在实时变化中,对实时速度分析造成一定困难。通过对频谱峰值进行录像,运用 Matlab 对记录视频并进行分析,得到了目标实时速度。

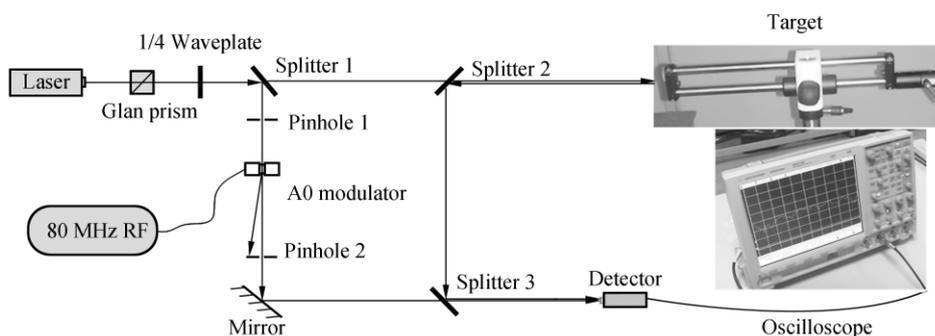


图 8 变速测量实验系统原理图

Fig. 8 Experimental optical system for measuring variable motion

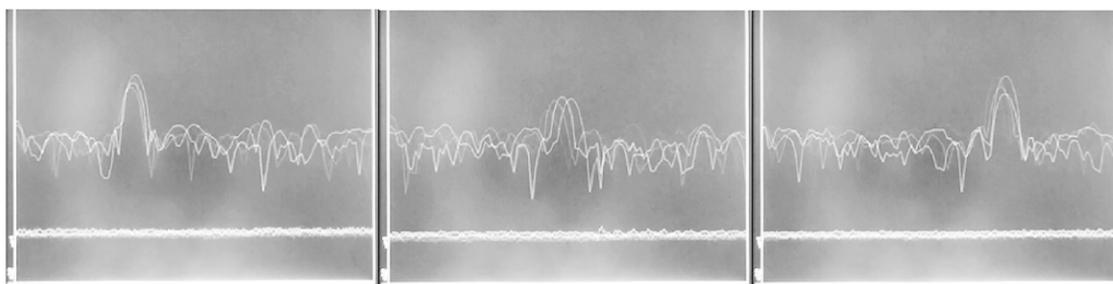


图 9 视频记录图像

Fig. 9 Pictures memorized by video

在本次实验中,对类简谐运动目标激光频谱进行了 52 s 的实时录像,为了清晰展现激光频谱峰值随时间的实时变化,每隔 0.2 s 给出一幅频谱峰值图,如图(9)。图示 0.6 s 内,频谱峰值处在 3 个不同的位置,反映了目标速度实时变化性。

所使用摄像机帧频为 25,在 52 s 的录像中,共  $25 \times 52 = 1\ 300$  帧。我们应用 Matlab 数学计算工具对 1 300 幅图片进行处理,分别求出不同

时刻频谱峰值所处的横坐标位置,得到实时差频频率,代入公式(1),进而计算出 52 s 内推拉目标的实时速度图,如图(10)所示。图中,正速度表示向前推动目标,对激光造成正多普勒频移;负速度表示拉动目标速度,对激光造成负的多普勒频移。由图(10)可见,52 s 内推拉移动 46 个周期;图中 93.48% 的正向最大速度低于 0.5 m/s,而 100% 负向最大速度低于 -0.5 m/s,可推出向前推动速

度要小于向后拉动速度。

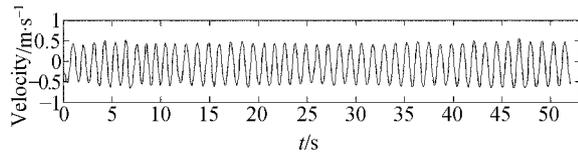


图 10 速度-时间曲线图

Fig. 10 Curve graph of velocity vs time

由实际计算得到,向前推动最大速度为 0.555 6 m/s,向后拉动的最大速度为-0.659 m/s。

前面匀转速测量实验已经证明了外差探测的高精度性,在本次变速测量中所用测量系统与前面实验相似,不考虑视频处理过程中引入的随机误差,可以认为本次变速测量是准确可信的。由于所使用激光波长为 532 nm,波长很短,对目标的微小速度变化将有较大的多普勒频移变化,使

得外差探测对变速测量有着非常高的灵敏性。

## 5 结 论

本文基于运动目标对光波的多普勒效应,通过光外差探测技术实现了对漫反射目标转动速度的测量,使用该探测方法及探测系统对正负方向转动测速平均相对误差仅为 0.51%和0.48%,实现了对目标匀转速运动的高精度测量。调整该探测系统后,实现了对目标变速运动的测量,并得到了类简谐运动目标的实时运动速度。所设计的实验证明了激光外差探测方法对目标运动速度探测的高精度性、高信噪比,以及对变速运动目标实时速度测量的高灵敏性。

## 参考文献:

- [1] GATT P, HENDERSON S W. Laser radar detection statistics: a comparison of coherent and direct detection receivers [J]. *SPIE*, 4377 (2001): 251-262.
- [2] 李醒飞,王驰,向红标,等. 光外差干涉法检验微弱超声振动[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1158-1162.  
LI X F, WANG CH, XIANG H B, *et al.*. Detection of weak ultrasonic signal using optical heterodyne interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1158-1162. (in Chinese)
- [3] JIANG L A, LUU J X. Heterodyne detection with a weak local oscillator[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1486-1503.
- [4] 陈洪芳,钟志,丁雪梅. 激光外差干涉的非线性误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1043-1047.  
CHEN H F, ZHONG ZH, DING X M. Compensation of nonlinear errors in laser heterodyne interferometers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1043-1047. (in Chinese)
- [5] BANKMAN I. Analytical model of doppler spectra of coherent light backscattered from rotating cones and cylinders [J]. *Optical Society of America*, 2000, 17(3): 465-475.
- [6] GONG Y J, WU ZH S, WU J J. Analytical model of doppler spectra of light backscattered from rotating convex bodies of revolution in the global cartesian coordinate system[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, 26(2): 024213.
- [7] 郭继华,徐正奇,殷纯永. 激光多普勒超低速测量[J]. *光学学报*, 1996, 16(2): 252-256.  
GUO J H, XU ZH Q, YIN CH Y. Ultralow speed measurement by laser doppler velocimetry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(2): 252-256. (in Chinese)
- [8] STRAND O T, BERZINS L V, GOOSMAN D R. Velocimetry using heterodyne techniques [J]. *SPIE*, 2005, 5580: 593-599.
- [9] MERCIER P, BENIER J, FRUGIER P A. Heterodyne velocimetry and detonics experiments [J]. *SPIE*, 2009, 7126: 71261 O-1-10.
- [10] 张海洋,赵长明,蒋奇军. 1.06 μm 相干激光雷达动目标多普勒信号探测[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 507-511.  
ZHANG H Y, ZHAO CH M, JIANG Q J. Detection of doppler signal of moving target using 1.06 μm coherent detection lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 507-511. (in Chinese)
- [11] 张合勇. 基于边缘技术多普勒测风雷达的精度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 42-44.  
ZHANG H Y. *The Accuracy Research of Doppler Wind Lidar Based on Edge Technique* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 42-44. (in Chinese)

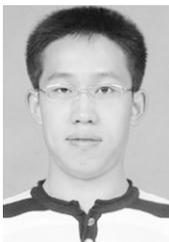
## 作者简介:



刘立生(1987-):男,山东聊城人,博士研究生,2009年于山东大学获得学士学位,主要从事激光探测方面的研究。E-mail:liulisheng0119@163.com



赵帅(1981-),男,吉林通化人,博士研究生,2000年、2004年于南开大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电探测及光电对抗方面的研究。E-mail:zs040148@yahoo.com.cn



张合勇(1982-):男,贵州福泉人,博士研究生,2009年于哈尔滨工业大学获硕士学位,主要从事光电探测及光电对抗方面的研究。E-mail:yonghezhang1116@126.com

## 导师简介:



郭劲(1964-):男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电对抗,激光与物质相互作用,激光探测方面的研究。E-mail:guojin@ciomp.ac.cn



刘洪波(1956-),男,吉林长春人,研究员,主要从事光学仪器研发与设计工作。E-mail:hbliu120@sina.com

## ●下期预告

## 基于反射镜表面粗糙度的极紫外望远镜分辨率计算

杨林<sup>1,2</sup>, 郑贤良<sup>1,2</sup>, 陈波<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

针对短波段成像系统中散射问题,在望远镜的反射镜表面粗糙度研究基础上,提出了一种极紫外太阳望远镜工作波段分辨率的计算方法。首先分析了两镜系统中散射光线的传播,讨论了反射镜表面粗糙度与波长对像面光强分布的关系。分频段测量了反射镜的表面粗糙度,利用  $k$ -相关模型拟合出全频段的一维 PSD。数值计算结果表明:在  $1/D$  到  $1/\lambda$  的空间频率范围内,主次镜的有效均方根表面粗糙度分别为 0.59 nm 和 0.77 nm。利用 Zemax 光学设计软件,建立了包含反射镜表面粗糙度测量数据的 EUV 望远镜非序列模型,该计算模型能够反映出反射镜表面散射对像面分辨率的影响。结果显示,在 30.4 nm 波段包含 80% 的能量半径从 3.9  $\mu\text{m}$  增大到 4.3  $\mu\text{m}$ ,望远镜在工作波段相应的分辨率为 0.25",满足设计要求。