

文章编号: 0253-2239(2008)04-0787-05

角度调谐的多普勒激光雷达硬目标转速测量

宋宝安 赵卫疆 任德明 曲彦臣 白岩 莫霜 张殊 胡孝勇

(哈尔滨工业大学可调谐激光国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 利用角度调谐方法确定直接探测多普勒测风激光雷达的初始工作点, 角度调节精度可达 $10 \mu\text{rad}$ 。在此工作点处使用频率稳定性为 10^{-7} , 单纵模出现概率大于 98% 的 Nd:YAG 激光器, 通过偏振分光光路测得参考信号与回波信号。配合目标准确放置到准直镜的焦距上, 分别测量了配合目标静止, 正转和反转时的参考信号与回波信号。利用配合目标静止时测得参考信号与回波信号的关系可得参考信号的角度矫正因子为 1.1949, 使用该矫正因子测得硬目标在正转和反转时转速与真实转速之间的误差小于 0.5 m/s。

关键词 光学测量; 角度调谐; 直接探测; 多普勒激光雷达; 测速

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A

Velocity Measurement of Hard Target in Angle-Tuned Doppler Wind Lidar

Song Baoan Zhao Weijiang Ren Deming Qu Yanchen Bai Yan Mo Shuang
Zhang Shu Hu Xiaoyong

(State Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The initial operating position was set by means of tuning Fabry-Pérot etalon angle, and the accuracy of angle tuning was $10 \mu\text{rad}$. At this position the reference signal and echo signal were measured with monostatic polarization light splitting. The longitudinal-mode Nd:YAG laser with wavelength of $1.064 \mu\text{m}$ was used with the probability of single longitudinal mode greater than 98%, and long-time stability of laser frequency about 10^{-7} . The hard target was placed at the focal spot of the collimating mirror. The reference and echo signal were separately measured when the hard target was still, in positive rotation and negative rotation. The correction factor about the angle of reference signal is obtained as 1.1949, by the relation between reference and echo signal when the hard target is still. The measured results indicate the velocity error is less than 0.5 m/s between measured value and true value with this correction factor.

Key words optical measurement; angle tuning; direct detection; Doppler laser lidar; velocity measurement

1 引 言

直接探测多普勒测风激光雷达在 20 世纪 90 年代得到了迅速发展^[1~8]。国际上有密歇根大学、美国国家航空航天局(NASA)的戈达德太空飞行中心(GSFC)^[9~15]、欧洲航空航天局(ESA)^[16~20]等单位在研究,国内也有一些单位开展了相关研究^[21~23]。其中欧洲航空航天局于 1999 年在一系列地面实验

的基础上提出了星载直接探测多普勒测风的风神(Aeolus)计划,风神卫星上携带阿拉丁(ALADIN)系统。该系统同时利用米氏散射和瑞利散射,米氏散射通道使用菲佐频谱仪(Fizeau spectrometer)作为探测设备,利用多通道条纹成像技术,瑞利散射使用双边缘技术,利用法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)干涉仪与 CCD 探测器测量。由此可知双边缘技

收稿日期: 2007-07-11; 收到修改稿日期: 2007-10-23

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划(HITQNJS.2006.025)资助课题。

作者简介: 宋宝安(1980—),男,山西平遥人,博士研究生,主要从事激光探测和光电检测等方面的研究。

E-mail: laser11@hit.edu.cn

导师简介: 任德明(1968—),男,河北邯郸人,博士生导师,主要从事激光雷达等方面的研究。E-mail: co2@hit.edu.cn

术是直接探测激光雷达关键技术之一。目前无论是工作于双边缘方式还是条纹成像的方式,法布里-珀罗干涉仪都是通过压电陶瓷(PZT)调节长度来确定初始工作点。

针对厚度调节中双通道厚度差(纳米量级)不宜控制且成本昂贵的特点,本文提出了利用角度调节来实现边缘技术。首先测量了激光的单纵模特性和频率稳定性,然后采用角度调谐的方法确定了多普勒测风激光雷达的初始工作点,并在此工作点处分别测量了硬目标在静止、正转和反转时参考信号与回波信号,利用目标静止时的回波信号与参考信号的关系确定了参考信号的角度矫正因子。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,实验使用 Nd:YAG 单纵模激光器,输出激光为 $1.064 \mu\text{m}$ 的偏振光,脉冲宽度为 40 ns,激光发射后使用 5 倍扩束镜使激光的发散角减小为原来的 $1/5$,另外由偏振片与 $1/4$ 波长组成的偏振分光装置前加一个 2 mm 的小孔以减小光斑尺寸的影响。光束经过一个镀有金膜的 45° 全反射镜 M1 和一个焦距为 50 mm 的透镜,聚焦到 12 m 远处的被测目标上。全反射镜 M1 的角度要在 45° 附近,入射到被测目标的光点一定要处于透镜的焦距上,透镜起准直作用。另外有三路光要通过光电探测器接到示波器 TDS7254B(采样频率 20 GHz,带宽 2.5 GHz)上,其中一路使用光电二极管将偏振片输出的一部份光转换为电信号作为示波器的触发信号,同时也作为激光模式的监测信号。另外两路信号中有一路通过法布里-珀罗标准具入射到探测器光电倍增管(Photomultiplier tube, PMT2)表面,作为探测信号,另外一路通过分光镜 M2 直接入射到探测器光电倍增管 PMT1 表面,作

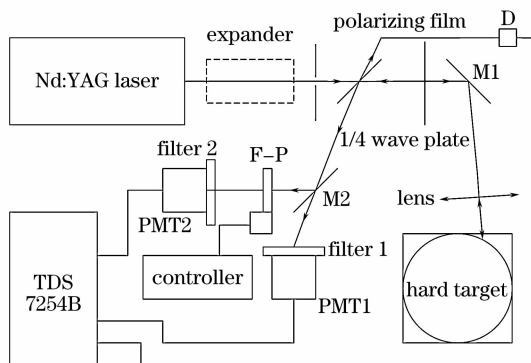


图 1 硬目标转速测量框图

Fig. 1 Sketch about velocity measurement of hard target

为能量监测信号。选择 12 m 远处的配合目标是为了把参考信号即 $1/4$ 波片的表面反射信号和目标的回波信号从时间上分开,这样 $1/4$ 波片的表面反射可以作为参考频率信号。法布里-珀罗标准具通过步进电机控制其转动,以便找到合适的工作点。

实验前分别对激光与控制法布里-珀罗标准具转动的步进电机的性能进行了测量,然后通过角度扫描找到正入射附近的工作点,选透射光强的一半且处于下降沿的一点作为工作点。

实验中关键器件是法布里-珀罗标准具,标准具参量见表 1。

表 1 法布里-珀罗标准具关键参量

Table 1 Key parameters for Fabry-Pérot etalon

FWHM /MHz	819.6
Spacing /cm	1
FSR /GHz	10
Effective finesse	12.2
Plate reflectivity	98%

角度调谐确定法布里-珀罗标准具的初始工作点,然后进行转速测量,实际上也等效于单边缘探测。探测速度的动态范围由标准具的半峰全宽(FWHM)和测量激光波长决定,在本文所选参量下获得速度的动态范围为 $\pm 200 \text{ m/s}$ 。

测风灵敏度是指单位风速引起透射光强改变的百分比。本文选择 1cm 厚的标准具,虽然增加了测速的动态范围,但是由于其自由光谱区(Free-spectral range, FSR)较大,所以法布里-珀罗标准具的半峰全宽也较宽,灵敏度较低。在初始工作点处,测风灵敏度为 0.228%,随着多普勒频移的增大,测风灵敏度略为减小。

3 实验结果及分析

3.1 激光性能测试

使用光电二极管测得激光脉冲波形如图 2(a)所示,脉冲波形光滑,图 2(b)是每一条干涉环的强度分布,图 2(c)为多光束干涉环。图 2(a)中脉冲波形光滑且图 2(c)中只有一套清晰的干涉环,表明激光处于单纵模工作状态。另外让激光器以 1 Hz 的重复频率工作,采集了 1200 幅图像,然后通过计算中心条纹直径的变化测量激光频率的长期稳定性为 10^{-7} 。另外对角度调谐精度也进行了实验研究,测量结果表明该角度调谐重复定位精度可以达到 $10 \mu\text{rad}$ 。

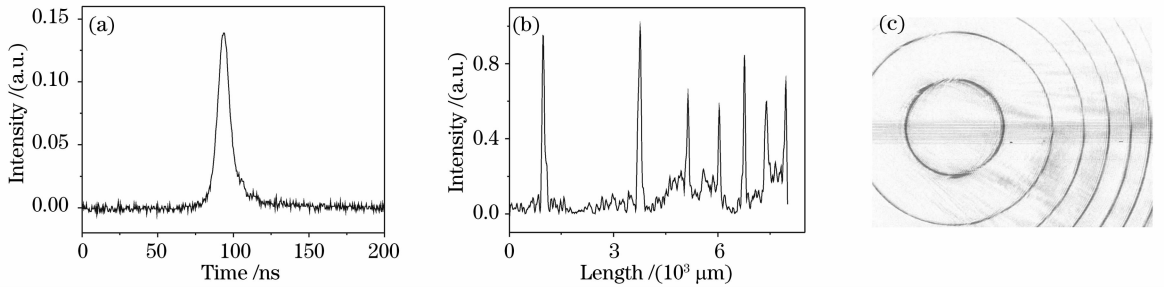


图 2 激光性能测试图。(a)脉冲激光波形, (b)每条干涉条纹的强度分布, (c)多光束干涉环

Fig. 2 Characteristics of laser. (a) pulse waveform, (b) intensity distribution of interference ring, (c) sharp interference fringe of multi-beam

3.2 硬目标回波信号测量

实验测得参考信号与回波信号如图 3 所示。图 3(a)为回波信号关于法布里-珀罗标准具的角度扫描透射率曲线,标准具每转动一步为 $6.5 \mu\text{rad}$,图 3(b)是法布里-珀罗标准具处于图 3(a)从左数第一个脉冲下降沿的一半处配合目标静止时测得参考信号与回波信号。图中正脉冲同时为示波器触发信号与激光器的模式监测信号,左边数第一个负脉冲为参考信号,第二个负脉冲为回波信号,图中实线为探

测器光电倍增管 PMT1 测得能量监测信号,虚线为探测器光电倍增管 PMT2 测得探测信号。理论上当配合目标静止时参考信号的测量值 $R_r (S_{\text{PMT2}}/S_{\text{PMT1}})$ 与回波信号的测量值 $R_s (S_{\text{PMT2}}/S_{\text{PMT1}})$ 应该相等,但是由于参考信号与回波信号入射到法布里-珀罗标准具表面有一定角度差,所以两测量值之间有差异。图 3(c)是配合目标正转时测得部分参考信号与回波信号,图 3(d)是配合目标反转时测得部分参考信号与回波信号。

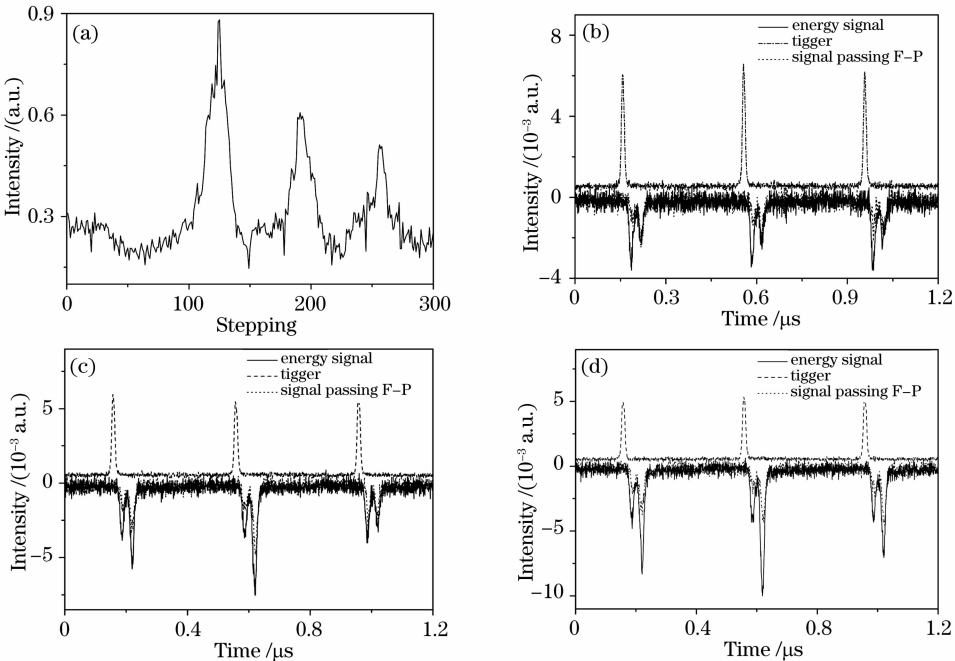


图 3 角度调谐与法布里-珀罗标准具透射光强关系图(a)以及配合目标静止(b),正转(c),反转(d)时参考信号与回波信号
Fig. 3 Relation about angle tuning and transmitted light intensity of Fabry-Pérot etalon (a), the reference signal and echo signal when hard target was still (b), in positive (c), negative (d) rotation

由图 3(b)~图 3(d)可知,配合目标静止、正转和反转时 R_s 明显发生改变,这反映配合目标正转和反转时回波信号发生频移。较长时间测量统计结果如图 4 所示。激光器以 1 Hz 重复频率工作 1 min。图 4(a)是为了矫正参考信号与回波信号入射到法

布里-珀罗标准具的角度差而在配合目标静止时测得一系列 R_r (带圆点的实线)和 R_s (带三角的虚线),图中幅值的上下起伏主要是由于探测器散弹噪声导致,故可统计平均减少其影响。

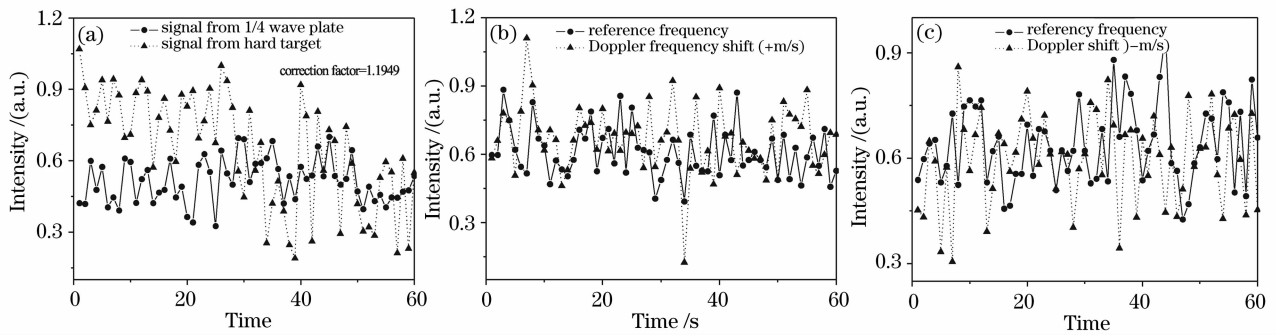


图 4 配合目标静止(a)、正转(b)和反转(c)时回波信号与参考信号的测量数据

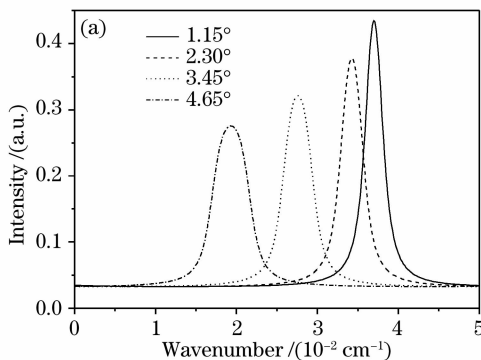
Fig. 4 Measurement data about echo signal from hard target and reference when the hard target is still (a), in positive (b), negative rotation (c)

统计测量结果如表 2。由表 2 可得参考信号与回波信号角度差的矫正因子 $F=0.6117/0.5119=1.1949$ 。故配合目标正转时 $R_r=0.5073F=0.6062$, 所以 $\Delta R=R_s-R_r=0.0492$, 利用图 3(a) 测得数据计算可得配合目标径向速度 $V_{\text{los}}=5.1 \text{ m/s}$; 配合目标反转时 $R_r=0.5335F=0.6375$, $\Delta R=R_s-R_r=-0.0381$, 同理计算可得 $V_{\text{los}}=-3.9 \text{ m/s}$ 。与利用转速计测得的数据相差小于 0.5 m/s 。

表 2 配合目标静止, 正转和反转统计测量结果

Table 2 Measurement results about hard target stationary, is positive rotation and inversion

	R_r (average)	R_s (average)
Stationary	0.5119	0.6117
Positive rotaton	0.5073	0.6554
Reverse rotation	0.5335	0.5994



3.3 误差分析

3.3.1 调谐角度对半峰全宽的影响

调谐角度对法布里-珀罗标准具半峰全宽的影响如图 5 所示。图 5(a) 是选取一些特定的调谐角度计算得到的法布里-珀罗标准具的透射谱, 可知随着调谐角度的增大标准具的透射谱变宽, 峰值下降; 图 5(b) 是标准具半峰全宽随着入射角 (即调谐角度) 连续变化的曲线图, 可以看出随着调谐角度的增大标准具的半峰全宽也连续变大。

由图 5(a) 可知随着调谐角度的变化标准具中心透射谱线也在移动。由表 1 选取的参量计算可得标准具射射谱中心频率随角度变化的斜率为 $0.8 \times 10^2 \text{ MHz/mrad}$, 由此可见 $10 \mu\text{rad}$ 的角度调谐精度会造成 0.8 MHz 的频移, 即造成的速度误差为 0.4 m/s 。



图 5 调谐角度对法布里-珀罗标准具半峰全宽的影响。(a) 不同入射角下的透射谱, (b) 透射谱半峰全宽与入射角的变化曲线

Fig. 5 Effect of tuning angle on the characteristics of Fabry-Pérot etalon. (a) Transmission spectrum at different incident angle, (b) dependence of the bandwidth of transmission spectrum on incident angle

3.3.2 随机误差

随机误差如探测信号的量子散弹噪声, 对于此类噪声采用多次测量平均的方法来消除, 结果表明 60 次平均时此类误差可以减小到 0.2 m/s 。系统误差如参考信号与回波信号入射到法布里-珀罗标准

具表面的角度差, 对此采取数值矫正方法, 矫正系数为 1.1949。另外背景噪声的影响, 采取将光电倍增管和激光器密封, 在光电倍增管前加一个中心透射波长为 $1.064 \mu\text{m}$, 带宽为 10 nm 的干涉滤光片作为输入窗口。这样极大地降低了背景噪声, 提高了信

噪比,减小了测量误差。

3.3.3 硬目标速度测量结果的标准方差

图 4(a)中目标回波比值变化特别大,而 1/4 波片回波比值起伏小主要是由于目标特性不同造成的。当激光作用于配合目标上时,由于目标表面没有镀膜,激光的持续作用会使得目标的表面反射率下降,所以当目标静止时,来自目标的信号起伏就大,但目标转动时由于激光在目标表面的作用点不同所以这种影响就减小,如图 4(b)、图 4(c)所示。消除目标特性不同对测量结果的影响比较简单的方法是不要让激光持续作用于一个点上,另外也可以在目标表面镀一层反射膜。另外准直镜表面反射的光对测量结果几乎没有影响,主要是由于准直镜表面是球面,由表面反射进入测量系统的光比较微弱。实验通过使用障碍物遮挡的方法证实了这一点。

由图 4(b)计算得光强比的标准方差为 0.019,可得在工作点附近光强比相对于多普勒频移的斜率为 0.026 MHz^{-1} , 所以将光强比换算成速度的方差为 0.37 m/s ,同理可得图 4(c)中目标转速的方差为 0.31 m/s 。

4 结 论

利用波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 的单纵模 Nd:YAG 激光器,使用收发同置的偏振分光方式对转动的硬目标回波信号进行了测量。首先对激光器的单纵模特性与角度调谐误差进行了测量。结果表明激光工作于单纵模模式,且单纵模出现概率大于 98%,频率稳定性可达到 10^{-7} ,角度调谐机制的稳定精度为 $10 \mu\text{rad}$ 。利用角度调谐的方式扫描确定单边缘技术的工作点,工作点选在透射法布里-珀罗标准具最大强度的一半处,且处于下降沿。调整 1/4 波片的角度,利用 1/4 波片后表面的反射光作为激光频率的参考信号消除激光频率抖动与漂移对测量结果的影响。实验对 12 m 远处的硬目标分别在静止、正转和反转时的回波信号进行了测量。使用配合目标静止时的回波信号作为对 1/4 波片表面反射参考信号的角度矫正,由测量数据计算得矫正因子为 1.194,用此方法在正转和反转时测得硬目标转速与真实转速之间的误差小于 0.5 m/s 。

参 考 文 献

- 1 David Rees, I. S. McDermid. Doppler lidar atmospheric wind sensor: reevaluation of a 355 nm incoherent Doppler lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(28): 4133~4144
- 2 Vincent J. Abreu, John E. Barnes, Paul B. Hays. Observations of winds with an incoherent lidar detector[J]. *Appl. Opt.*,

- 1992, **31**(22): 4509~4514
- 3 Barry J. Rye, R. Michael Hardesty. Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar I: spectral accumulation and the Cramer-Rao lower bound [C]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1993, **31**(1): 28~35
- 4 C. L. Korb, B. M. Gentry, S. Xingfu Li. Spaceborne lidar wind measurement with the edge technique[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2310**: 206~213
- 5 Bruce M. Gentry, C. L. Korb. Edge technique for high-accuracy Doppler velocimetry[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5770~5777
- 6 C. L. Korb, B. M. Gentry, S. Xingfu Li. Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 5976~5983
- 7 C. L. Korb, B. M. Gentry, S. Xingfu Li *et al.*. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(15): 3097~3104
- 8 Cristina Flesia, C. L. Korb. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(3): 432~440
- 9 B. M. Gentry, H. Chen, S. X. Li. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(17): 1231~1233
- 10 Cristina Flesia, C. L. Korb, Christian Hirt. Double-edge molecular measurement of lidar wind profiles at 355 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1466~1468
- 11 B. M. Gentry, Huailin Chen. Tropospheric wind measurements obtained with the Goddard Lidar observatory for winds (GLOW): validation and performance[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4484**: 74~81
- 12 Huailin Chen, Bruce Gentry. Preliminary results of wind measurements by glow system in field campaigns[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4893**: 295~298
- 13 Bruce M. Gentry, Huailin Chen. Performance validation and error analysis for a direct detection molecular Doppler lidar[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4893**: 287~292
- 14 J. T. Dobler, B. M. Gentry, J. A. Reagan. Dual frequency technique for Doppler wind lidar measurements [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4484**: 82~92
- 15 Bruce M. Gentry, Huailin Chen, Steven X. Li. Glow-the-goddard lidar observatory for winds[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4153**: 314~320
- 16 Claude Souprayen, Anne Garnier, Alber Hertzog *et al.*. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrumental setup, validation, and first climatological results[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2410~2421
- 17 Claude Souprayen, Anne Garnier, Alber Hertzog. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. II. Mie scattering effect, theory, and calibration[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2422~2431
- 18 Y. Durand, A. Culoma, R. Meynard *et al.*. Pre-development of a direct detection Doppler wind lidar for ADM/AEOLUS mission [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5234**: 354~363
- 19 Y. Durand, R. Meynard, A. Culoma *et al.*. Results of pre-development of ALADIN, the direct detection Doppler wind lidar for ADM/AEOLUS[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5570**: 93~104
- 20 Y. Durand, E. Chinal, M. Ecdemann *et al.*. Aladin airborne demonstrator: a Doppler wind lidar to prepare ESA's ADE-Aeolus explorer mission[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **62961D**-1~5
- 21 Liu Jiqiao, Bu Lingbing, Zhou Jun *et al.*. Optical frequency discriminator of a mobile direct-detection Doppler wind lidar[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1339~1344
- 刘继桥, 卜令兵, 周 军 等. 车载直接探测多普勒测风激光雷达光学鉴频器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1339~1344
- 22 Shen Fahua, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Error analysis of wind lidar based on Fizeau interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **26**(12): 1761~1765
- 沈法华, 孙东松, 钟志庆 等. 基于菲佐干涉仪测风激光雷达的误差分析[J]. *光学学报*, 2007, **26**(12): 1761~1765
- 23 Bu Lingbing, Liu Jiqiao, Chen Weibiao. Discrimination of Doppler frequency shift based on Fizeau interferometer an PMT array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 379~383
- 卜令兵, 刘继桥, 陈卫标. 基于菲佐干涉仪与多通道光电倍增管阵列的多普勒频移技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 379~383