

原子廓线激光多普勒测速仪*

陈卫标 张亭禄 吴东 刘智深

(青岛海洋大学海洋遥感研究所, 青岛 266003)

摘 要 论述了用原子滤波器的透射率廓线测量激光多普勒频移的直接检测方法和理论。报道了基于这个方法的一个原理性实验。实验采用二极管泵浦的连续倍频 Nd:YAG 激光器作为发射器, 和一个温控的透射率翼宽为 380 MHz (相当于测速范围为 0~50 m/s) 的碘滤波器作为多普勒频移检测器件进行了转盘速度的测量。实验结果与已知转盘速度吻合得很好, 速度精度为 0.3 m/s 左右。实验同时, 利用另一碘滤波器及其电子学伺服系统把激光频率锁定在碘透射率中间, 频率稳定度在 ± 150 kHz 以内。

关键词 原子滤波器, 多普勒频移, 激光多普勒测速仪。

1 引 言

1964 年, Yeh 和 Cummins 首次证实了利用激光多普勒技术(LDV)可测定水流速度后^[1], 激光多普勒测速技术成为遥测运动靶速度和大气风速的重要手段。无论是相干测量^[2~4], 还是直接检测^[5~8], 这种技术既可测量靶的瞬时速度, 也可测量靶的时间平均速度。She 首次把原子吸收滤波器应用于大气温度剖面测量的激光雷达系统中^[9]。测量风速的非相干激光雷达系统目前大多采用法布里-珀罗干涉仪^[10~12]。在参考文献[13]中, 作者详细分析了利用碘滤波器测量大气风速的激光雷达系统的测量精度、范围, 并报道了一个以种子注入的脉冲 Nd:YAG 激光器和碘滤波器为主的系统雏形。该系统可以同时测量大气气溶胶和分子散射信号, 利用不同的碘透射率校正曲线, 可得到中低层的大气风剖面^[13]。

本文提出利用碘滤波器透射率廓线测量运动靶速度的方法, 具体采用可调谐的连续倍频 Nd:YAG 激光器, 把激光频率调在碘滤波器透射率曲线的中间, 通过检测碘透射率变化得到频率偏移信息。本文研究目的建立一套测量大气风剖面的非相干激光多普勒雷达系统, 利用原子滤波器的激光雷达系统进行速度靶或风速测量。

2 测量原理

图 1 是碘滤波器 1106 吸收线在 65°C 时测到的光谱曲线。可以看到在这温度下, 其透射率边缘的斜率很大, 小的频率变化(即多普勒频移)将引起大的透射率变化。若激光频率锁定

* 本文得到国家“八五”科技攻关和国家自然科学基金会的资助。

收稿日期: 1996 年 6 月 22 日; 收到修改稿日期: 1996 年 11 月 12 日

在碘滤波器光谱响应曲线的边缘中间，通过测量激光发射频 (ν_{out}) 和具有多普勒频移的靶散射光频率 ν_{ret} 对应的透射率，得到透射率变化 ΔT ，即可得到多普勒频移 $\Delta\nu$ 。图 2 简述了多普勒频移的测量方法，返回散射光被分成两部分，一路由探测器 1 直接测量，另一路通过碘滤波器后被探测器 2 接收，两路比值即可得到相对透射率。这种多普勒频移检测方法最初利用法布里-珀罗干涉仪来实现的，并已用在大气风速测量的激光雷达系统中^[11]。

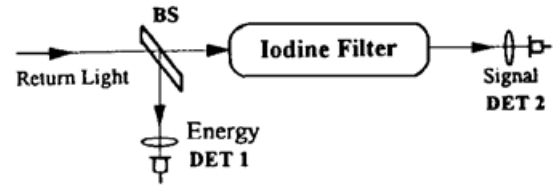
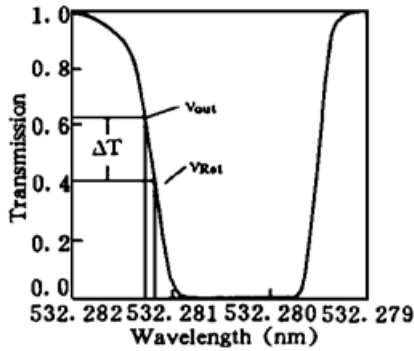


Fig. 1 The absorption line near 532 nm 1106 of iodine filter

Fig. 2 The diagram of Doppler frequency shift detection (detector 1 is used to monitor energy; detector 2 is used to detect the signal)

设 $h(\nu)$ 为激光能量(归一化)的频谱分布, $f(\nu)$ 为碘滤波器的频谱响应曲线, 则激光束通过碘滤波器后的频谱响应函数为:

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\nu - \nu')f(\nu') d\nu' \tag{1}$$

具有多普勒信息的返回散射光被探测器 2 接收到的信号与被探测器 1 接收到的信号之比, 可认为散射光频率上的相对透射率。即 $f(\nu_D) = I'(\nu_D) = I(\nu_D)/I_0$, $I(\nu_D)$ 和 I_0 分别为探测器 2 和探测器 1 接收到的信号强度, 则多普勒频移可写为:

$$\nu_D = 2V/\lambda = \Delta F/(\partial F/\partial \nu) \tag{2}$$

从上式可导出视线方向靶的速度为:

$$V = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta F}{\partial F/\partial \nu} = \frac{c}{2\nu} \frac{I'(\nu_D) - I'(\nu_{out})}{dI(\nu)/d\nu} \tag{3}$$

式中, $I'(\nu_{out})$ 和 $I'(\nu_D)$ 分别为激光发射频率和返回光频率上的归一化信号, c 为光速, ν 为激光发射频率。因此只要测出两个频率处归一化信号的相对变化和碘滤波器的透射率特性, 即可得到多普勒频移 $\Delta\nu$, 从而得到视线方向的风速分量。

定义速度测量灵敏度 Θ 为单位速度内测量信号的相对变化:

$$\Theta = (1/V) (\Delta I/I) \tag{4}$$

其中, ΔI 为激光发射频率和返回散射光频率对应的归一化信号差值。则速度误差为:

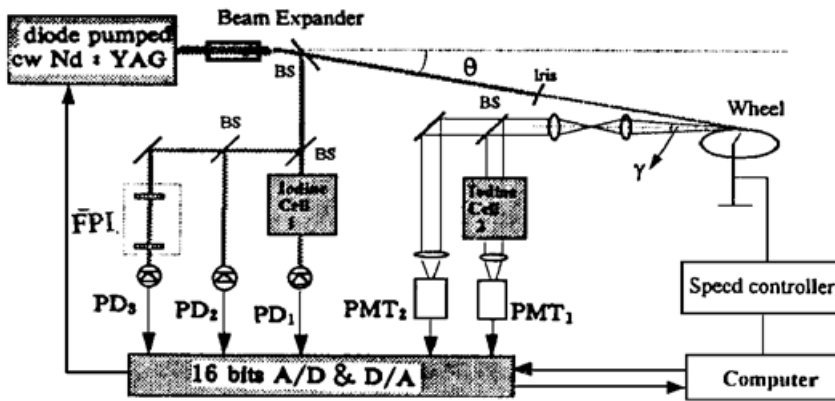
$$\epsilon_V = (\epsilon_{\Delta I})/\Theta \tag{5}$$

可看出速度误差主要决定于对 ΔI 的测量误差, 如果系统的测量灵敏度为 $5\% (m/s)^{-1}$, 测量 ΔI 的精度为 1%, 则速度测量精度为 0.2 m/s。因此采用高精度的数模转换, 提高 ΔI 的测量精度, 从而可提高速度的测量精度。

在实际测量时, 利用可调谐的连续倍频 Nd:YAG 激光器测量使用的碘透射谱线, 建立归一化透射率与频率的关系, 通过查表得到 ΔI , 求出 $\Delta\nu$ 。

3 实验系统

实验使用二极管泵浦的连续倍频 Nd:YAG 激光器, 双波长单模输出。532 nm 的输出功率为 85 mW, 线宽为 10 kHz, 频率漂移为 0.1 MHz/min。这种激光器采用非平面环形振荡腔^[14], 输出波长连续调谐范围为 10 GHz。激光频率被锁定在碘透射率廓线中间, 频率漂移引起的速度测量误差为 2.5 cm/s。实验使用的温控碘吸收池长 10.2 cm, 碘吸收池壁的温控在 70°C, $\pm 0.5^\circ$ 以内, 碘的温度在 65°C, 稳定在 0.01°。这对应的频率漂移小于 0.1 MHz, 对应的



的速度误差约 2.5 cm/s。图 3 为实验系统图。532 nm 输出激光通过扩束装置后分成两束, 一束用于激光频率的锁定, 另一束用于运动靶速度测量。激光束入射在转盘边缘, 由于转盘边缘的线速度是相等的, 这样可避免入射光斑的大小对速度精度测量的影响。转盘是由直径为 10 cm, 厚为 2 mm 的圆盘构成的, 由直流同步电机带动、计算机控制的速度调节电路控制转盘速度, 在 0 ~ 25 m/s 内连续可调, 实际转速

Fig. 3 The setup of the wheel experiment (The iodine cell 2, PMT₁ and PMT₂ are used to detect the velocity of the wheel; The iodine cell 1, PD₁ and PD₂ are used to lock the laser frequency)
由计算机实时记录, 便与测量结果相比较。

激光入射角 (θ) 为 12°, 在靶前加一个小孔用来减小入射光斑。在入射点的速度切线方向接收反向散射光, 一对接收透镜把反向散射光聚焦后变成平行光。分束后, 一路由光电倍增管 1 直接接收, 另一路通过碘吸收池 2 后由光电倍增管 2 接收, 两路信号被 8 路 16 位模数转换器同时采样, 每路采样速率为 10 kHz。两路增益由计算机设置, 以保证满量程量化。

激光频率的锁定是由碘吸收池 1 和光电二极管 PD₁ 和 PD₂ 组成。PD₁ 的输出信号与 PD₂ 的输出信号也同时被 16 位模数转换后, 根据其比值, 即碘的透射率来控制一个 16 位数模转换器, 数模输出直流电压给连续 Nd:YAG 激光器, 从而改变激光输出频率, 保证激光输出频率稳定在发射频率上, 即碘透射率曲线中间。这种激光频率锁定技术在 ALOMAR 的激光雷达中首次运用^[12], 该系统用法布里-珀罗干涉仪来测量大气风速的。在测量过程中, 为了监测激光输出频率的漂移, 激光输出频率点的透射率也被实时记录, 二小时实验过程内的透射率变化 < 0.2%, 对应的激光频率稳定在 $\omega \pm 150$ kHz 以内。图中的法布里-珀罗干涉仪用于碘透射率曲线的频率测量, 该干涉仪的自由光谱范围为 75 MHz, 当激光频率扫描时, 由 PIN 光电二极管 (PD₃) 接收干涉信号, 从而得到频率信息。

4 实验结果与分析

实验之前, 首先对碘的透射率曲线进行了测定。基本按图 3 的实验框图, 通过计算机控制的 16 位数模转换器, 连续输出直流电压给该可调谐激光器来改变其输出波长。该激光器的波长调谐速率为 1 GHz/2V, 0.1 V/min。利用图中的法布里-珀罗干涉仪来监测激光的输出

频率。同时接收法布里-珀罗干涉仪输出信号(PD₃)和光电二极管 PD₁ 和 PD₂ 的信号, 由 8 路 16 位模数转换后送入计算机。通过软件处理, 得到碘透射率与频率的关系曲线。图 4 为扫描得到的用于速度测量的碘透射率斜率光谱。但由于测量转盘速度时采用光电倍增管接收信号, 因此对光电二极管和光电倍增管的测量差异进行了校正, 最后建立归一化的碘透射率与频率的关系表, 作为测速时的标准。

在实验中, 首先在转盘停止时, 对两个光电倍增管 PMT₁ 和 PMT₂ 的电压多次平均后求其比值, 得到激光发射频率的透射率。然后, 对不同转速的硬靶进行了测量, 记录通过碘滤波器 2 和直接测量的两路 PMT 输出电压, 多次平均后得到两路的平均电压值。图 5(a) 是不同速度下 PMT₁ 和 PMT₂ 的平均电压变化, 虚线 (PMT₂) 表示在测量过程中激光能量的起伏, 大约在 7% 左右。图 5(b) 是从图 5(a) 的两路数据中得到不同速度下的透射率变化, 可以看出透射率与转盘速度的线性关系。从碘透射率与频率的关系表中找出转盘停止和运动时透射率所对应的频率, 即可得到多普勒频移。然后根据接收角和公式(3)推算转盘速度。

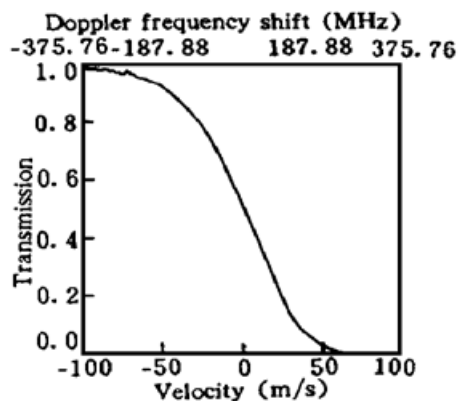


Fig. 4 The normalized transmission of iodine cell near 532 nm (line 1106)

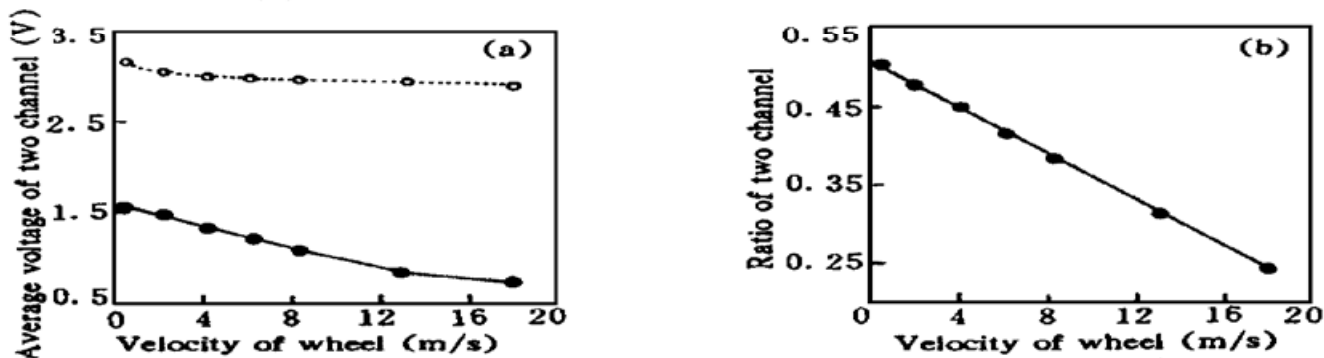


Fig. 5 The average voltages of PMT₁ and PMT₂ and the ratio of the two channels at different wheel velocities

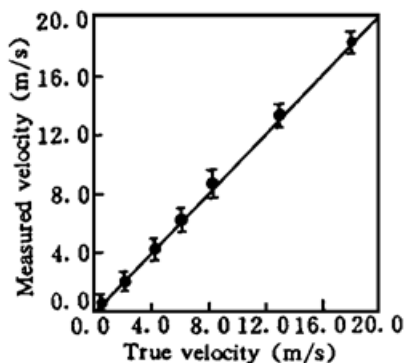


Fig. 6 The comparison of the measured velocity and true velocity

对测量信号进行分析, 实验测到的最大速度误差为 30 cm/s, 低速和高速的误差相对大一些。图 6 为实际速度和测量速度的比较。从图 6 来看, 测量结果与实际速度吻合的还是比较好的。其中的误差除了激光频率漂移和碘吸收池温度漂移引起的约 5 cm/s 误差外, 硬靶旋转时的不稳定造成激光入射点的反向散射的不均匀, 导致接收信号的起伏, 这在硬靶速度低时表现更为明显。另外硬靶边缘的不均匀也会造成信号的起伏。另外系统接收角(图 3 中的 γ)的不确定, 光电倍增管的光噪声和模数采集的量化误差等都会引起一定的误差。图 6 中的误差在 8~30 cm/s 内起伏, 主要是由于靶的不均匀

散射造成的。如果采用光子计数技术, 可以工作在散粒噪声限, 测量误差还可以减小。

结论 本文阐述了利用碘滤波器透射率廓线测量转盘速度的原理和方法。利用二极管泵浦的连续 Nd:YAG 激光器进行了速度靶测量实验, 使用温度控制的 380 MHz 透射率翼宽的碘滤波器进行多普勒频移检测, 测量结果与实际结果吻合得很好。激光频率锁定在透射率边缘中间, 利用伺服电子学系统和碘滤波器把激光频率稳定在 150 kHz 以内。同时对实验结果

进行了误差分析,得到了 30 cm/s 的速度标准偏差。本实验表明利用碘滤波器透射率廓线来测量运动靶速度能得到高的速度精度,可应用到大气风速测量的非相干激光多普勒雷达系统中。这种非相干的激光雷达系统使用的是固体激光器,体积小、功耗低,便于集成化,发展这种激光多普勒测风雷达系统,对气象和环境研究将起到积极作用。

参 考 文 献

- [1] Y. Yeh, H. Z. Cummins, Localized fluid flow measurements with a He-Ne laser spectrometer. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, **4**(10) : 176~ 178
- [2] R. J. Goldstein, W. F. Hagen, Turbulent flow measurements utilizing the doppler shift of scattered laser radiation. *Phys. Fluids*, 1967, **10**(6) : 1349~ 1352
- [3] M. C. Teich, Infrared heterodyne detection. *Proc. IEEE*, 1968, **56**(1) : 37~ 46
- [4] R. M. Huffaker, Laser doppler detection system for gas velocity measurements. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(5) : 1026~ 1039
- [5] D. M. Paul, D. A. Jackson, Rapid velocity sensor using a static confocal Fabry-Perot and a single frequency argon laser. *J. Phys. E*, 1971, **4**(3) : 170~ 177
- [6] L. M. Barker, R. E. Hollenback, Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(11) : 4669~ 4675
- [7] S. Gidon, G. Behar, Multiple line laser doppler velocimetry. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(11) : 2315~ 2319
- [8] S. H. Bloom, R. Kremer, P. A. Searcy *et al.*, Long-range, noncoherent laser doppler velocimeter. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(22) : 1794~ 1796
- [9] Shimizu, H., S. A. Lee, C. Y. She, High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(9) : 1373~ 1381
- [10] M. L. Chanin, A. Garnier, A. Hauchecorne *et al.*, A doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1989, **16**(11) : 1273~ 1276
- [11] W. R. Skinner, K. W. Fischer., V. J. Abreu *et al.*, Visible wavelength doppler lidar for measurement of wind and aerosol profiles during day and night. *Proc. SPIE*, (International Symposium on Optical Sensing for Environmental Monitor, Atlanta, Georgia, October), 1993, **2112** : 218~ 228
- [12] U. Von Zahn, E. V. Thrane, R. Skatteboe, The ALOMAR project: Status and outlook. *Proc. 12th ESA Symp. on European Rocket and Ballon Programmes and Related Research, Lillehammer, Norway*, 1995, Europe. Space Agency Publ. ESA SP-370 : 379~ 386
- [13] Zhi-Shen Liu, W. B. Chen, J. W. Hair *et al.*, Proposed ground-based incoherent doppler lidar with iodine filter discriminator for atmospheric wind profiling. *Proc. SPIE*, 1996, (Optical Science, Engineering, and Instrumentation, Denver, Colorado) 1996, **2833** : 21~ 28
- [14] T. J. Kane, R. L. Byer, Monolithic, unidirectional single mode Nd : YAG ring laser. 1985, *Opt. Lett.*, **10**(2) : 65~ 67

Atomic Outline for Laser Doppler Velocimetry

Chen Weibiao Zhang Tinglu Wu Dong Liu Zhishen

(Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

(Received 22 June 1996; revised 12 Norember 1996)

Abstract The theory and method of measuring moving target's velocity using atomic transmission are described. A diode pumped frequency-doubling CW Nd : YAG laser has been used to demonstrate the feasibility of the method. An iodine filter with wing width of 380 MHz is used in the experiment which represents a velocity range of 0~ 50 m/s. The laser frequency is locked on the center of the slope of transmission of another iodine filter. The experimental error as small as 30 cm/s is obtained. The result and experimental error are analyzed. This method can be applied to lidar for measuring the atmosphere wind.

Key words atomic filter, Doppler shift, laser Doppler velocimetry.