

瑞利测风激光雷达接收机校准

胡冬冬¹, 孙东松², 舒志峰¹, 徐文静¹, 唐磊¹, 王国成¹, 董吉辉¹

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 介绍了直接探测瑞利测风激光雷达工作及风速反演的原理, 说明了激光雷达接收机的内部结构及工作情况。为修正雷达接收机中分光片分束比、单光子计数器探测率等参数与设计值的偏差所导致的风速测量误差, 提出了随光强变化比较两信号通道的计数值的接收机校准方案。实验测得了校准系数随信号通道信号强度的变化关系。在弱光下该系统两信号通道性能差异小于 25%。在当前系统的标准具透过率条件和对称的风场扫描合成方式下, 接收机校准只对系统透过率曲线和径向风速的测量有较大影响, 对合成风场没有影响。

关键词: 大气光学; 测风激光雷达; 接收机; 校准

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)02-0369-06

Calibration of Rayleigh Doppler wind lidar receiver

Hu Dongdong¹, Sun Dongsong², Shu Zhifeng¹, Xu Wenjing¹, Tang Lei¹, Wang Guocheng¹, Dong Jihui¹

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. School of Space and Earth Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The principle of direct detection of Rayleigh Doppler wind lidar and the wind retrieval was introduced, and the internal structure of the lidar receiver was described. Factors that would create a system deviation, like errors of splitting ratio of beam splitters and detection efficiency of the single-photon counter, were analyzed to show the importance of calibration. The calibration can be achieved by counting and comparing the count number from the two signal channels while regulating the intensity of incident laser. The relationship between the calibration coefficient and signal intensity of the signal channel was found. Difference of the performance between the two signal channels was less than 25% in dim light condition. It is indicated that the calibration has great influence on the detection of the transmission curves and radial velocity. However, with the etalon transmission and symmetrical scanning mode in this system, the calibration has no influence on the detection of wind field.

Key words: atmospheric optics; wind lidar; receiver; calibration

收稿日期: 2011-06-05; 修订日期: 2011-07-03

基金项目: 国家 863 项目; 安徽省国际科技合作项目 (09080703032)

作者简介: 胡冬冬(1987-), 男, 硕士生, 主要从事多普勒测风激光雷达系统的研究。Email: Bonn_Wiggin@hotmail.com

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事测风激光雷达的研究。Email: sds@ustc.edu.cn

0 引言

大气风场的测量在改进数值天气预报模型、提高天气预报的准确性、保障飞机和船只的安全、保障工农业生产安全、大气动力学与气候学的研究、空气质量预报等方面具有重要的意义。多普勒激光雷达测风作为典型的非接触式探测方式,因其能够快速、准确地测量大气三维风场,引起了人们的广泛关注。早在 20 世纪 90 年代,美国的密歇根大学(Michigan University)^[1]、美国国家航空航天局(NASA)的戈达德太空飞行中心(GSFC)、美国海洋大气管理局(NOAA)^[2]、欧洲航空航天局(ESA)^[3]以及日本的福井大学等单位都进行了广泛的研究。

文中讨论的基于三通道 Fabry-Perot(F-P)标准具^[4]的多普勒测风激光雷达,设计探测高度为 10~40 km 的对流层顶到平流层大气范围。这一区域是大气上下层相互作用和日地关系中太阳活动天气气候响应的关键区域,发生着能量和物质的重要交换,包括各种尺度的波动能和能量、动量通量交换,富含臭氧的平流层大气和富含地表影响的低层大气的交换、辐射传输、云的微物理以及均相和非均相化学反应过程。作为中高层大气波动的源,对流层波动的上传与激发也是中高层大气重力波作用的关键输入。因此这一区域大气活动的探测具有十分关键的意义。但是,这一区域却是目前探测最为薄弱的区域之一,探测手段、探测数据都都有限。该多普勒测风激光雷达的完成,为我国的中高层大气探测提供了先进可靠的技术设备,有效填补了国内大气探测研究的一项空白。

为保证激光雷达风场测量的准确性,根据理论分析和实验测量,对雷达接收机内部各通道的相对关系进行了校准,并对校准前后的结果进行了分析。

1 基本原理

对于高层大气的风场探测,由于高空气溶胶含量很低,只能利用分子后向散射信号。而由于分子的后向散射信号强度与发射激光波长的负四次方成正比,所以发射激光通常选取波长 355 nm 的紫外光^[5]。系统对回波信号采用双边缘技术提取其中的多普勒频移信息^[6]。由于分子热运动,分子后向散射谱很宽,双边缘分列于分子谱两侧,如图 1(a)所示。

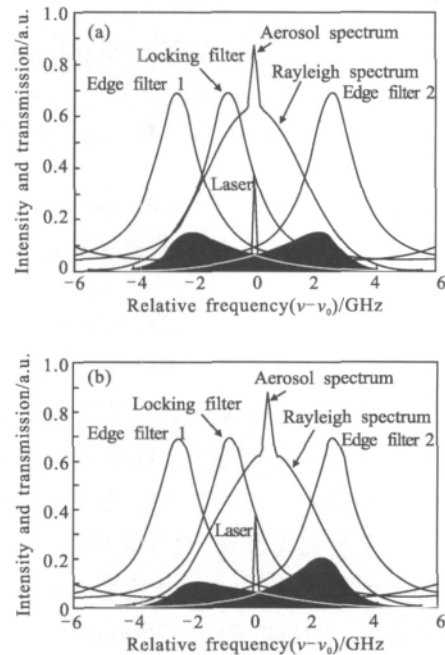


图 1 基于三通道 F-P 标准具的瑞利散射多普勒测风基本原理
Fig.1 Principle of Rayleigh Doppler detection with triple F-P etalon

假定两边缘滤波器的输入光强相同且发射激光频率严格位于透过率的交点处,若大气后向散射信号并没有发生多普勒频移,则边缘滤波器 1 和边缘滤波器 2 输出光强相同,如图 1(a)中阴影部分面积;若大气后向散射信号由于风场作用产生了多普勒频移,则边缘滤波器 1 和边缘滤波器 2 输出光强一个增大,另一个减小,如图 1(b)所示。通过测量两个边缘通道信号的相对差别就可以确定风速的大小和方向。系统出射激光分出一部分参考光进入锁定通道,用来锁定发射激光频率的相对位置以使标准具实时跟踪激光频率,保证其始终处在两个边缘滤波器的中间位置。

参考光与瑞利后向散射信号经过标准具的透过率分别为:

$$T_L = h(\nu) \otimes f_L(\nu) \quad (1)$$

$$T_R(\nu, T) = h(\nu) \otimes f_L(\nu) \otimes f_{\text{Ray}}(\nu, T) \quad (2)$$

式中: $f_L(\nu)$ 为激光发射谱线; $f_{\text{Ray}}(\nu, T)$ 为瑞利散射增宽谱线, T 为大气温度; $h(\nu)$ 为 F-P 标准具的透过率函数; \otimes 表示卷积。

假定望远镜接收到的瑞利散射光强为 I_R , 则两个边缘滤波器输出的光信号分别为:

$$I_1 = I_R T_{R1}(\nu_0 + \nu_d, T) \quad (3)$$

$$I_2 = I_R T_{R2}(\nu_0 + \nu_d, T) \quad (4)$$

式中: ν_0 为发射激光频率; ν_d 为多普勒频移。定义频率响应函数:

$$R = \frac{T_{R1} - T_{R2}}{T_{R1} + T_{R2}} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (5)$$

在风速的动态范围内 T_L 和 $R(\nu, T)$ 都是单值函数。

则径向风速为:

$$\nu_r = \frac{\lambda}{2} \nu_d = \frac{\lambda}{2} [R^{-1}(\nu_0 + \nu_d, T) - T_L^{-1}(\nu_0)] \quad (6)$$

式中: $R^{-1}(\nu, T)$ 和 T_L^{-1} 分别表示 $R(\nu, T)$ 与 $T_L(\nu)$ 的反函数。

在系统接收到的回波信号中, 也有可能包括气溶胶粒子回波的米散射信号。通过对标准具参数的设计选择, 可使得米散射回波信号的速度灵敏度和瑞利散射信号的速度灵敏度相同, 米散射信号也可作为有用信号。

系统采用如图 2 所示的四波束扫描, 激光发射

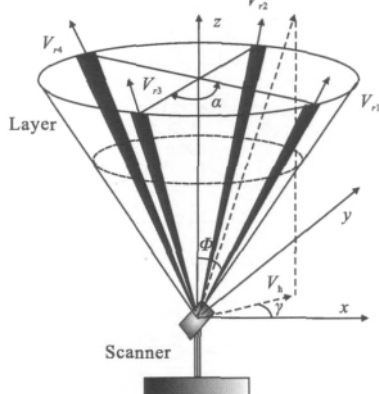


图 2 四波束扫描测量水平风场示意图

Fig.2 Schematic of the horizontal wind with four beams

天顶角为 ϕ , 依次测量方位角为 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 的径向风场^[7]。求得 4 个测量方向上的径向风速为:

$$\begin{cases} V_{rN} = V_y \sin\phi + V_z \cos\phi \\ V_{rE} = V_x \sin\phi + V_z \cos\phi \\ V_{rS} = -V_y \sin\phi + V_z \cos\phi \\ V_{rW} = -V_x \sin\phi + V_z \cos\phi \end{cases} \quad (7)$$

则 V_x, V_y, V_z 为:

$$\begin{cases} V_x = \frac{V_{rE} - V_{rW}}{2\sin\phi} \\ V_y = \frac{V_{rN} - V_{rS}}{2\sin\phi} \\ V_z = \frac{V_{rE} + V_{rW} + V_{rN} + V_{rS}}{4\sin\phi} \end{cases} \quad (8)$$

水平风速大小和方向分别为:

$$V_h = \frac{1}{2\sin\phi} [(V_{rE} - V_{rW})^2 + (V_{rN} - V_{rS})^2]^{1/2}$$

$$\gamma = \arctan(V_x/V_y) + \pi \{1 - \text{sign}[(V_y + |V_y|) \cdot V_x]\} \quad (9)$$

2 接收机结构及校准实验

接收机系统是整个测风雷达系统最关键的部分, 包括光纤出口处的准直装置、光路中的分束片、反射镜、F-P 标准具和探测器前的聚焦装置。图 3 为其具体结构示意图。

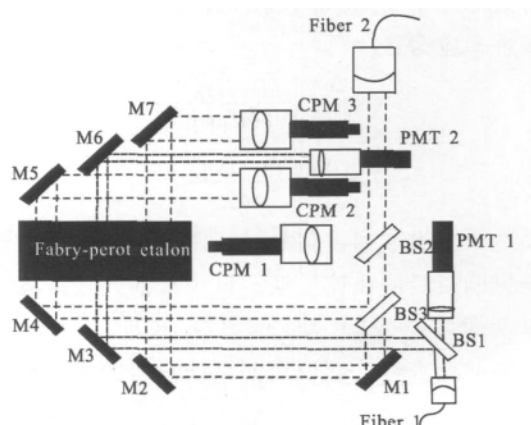


图 3 接收机结构示意图

Fig.3 Structure scheme of the receiver

锁定通道的光纤 1 将出射激光分出的少部分锁定用激光耦合进准直装置, 之后光束入射到分束片 BS1 上, BS1 的透射光经探测器前聚焦装置进入模拟探测器 PMT1, 反射光经反射镜 M3、F-P 标准具、M6 及聚焦装置进入模拟探测器 PMT 2, 实际测量时根据 BS1 的分束比和两模拟探测器的测量值即可得到锁定通道的透过率值。信号通道的光纤 2 将望远镜接收到的后向散射信号耦合进接收机, 经过分束片 BS2, BS2 分出反射光进入单光子计数器 CPM 1, 透射光入射到分束片 BS3 上。从 BS3 分出的反射光经反射镜 M4、F-P 标准具、M5 进入单光子计数器 CPM2, 为信号通道 1; 透射光经反射镜 M1、M2、F-P 标准具、M7 进入单光子计数器 CPM 3, 为信号通道 2。

由于锁定通道是用来使标准具实时跟踪发射激光频率, 保证发射激光始终处在两个边缘滤波器的中间位置的, 并不参与测量信号强度, 故不参加校准。

理论设计分束片 BS2 的透反比为 93/7, BS3 透反比为 50/50。令单光子计数器 CPM1、2、3 的测量值分别为 N_1, N_2, N_3 。

在理想情况下,可算得通道 1、2 的透过率分别为 $T_1 = \frac{14N_2}{93N_1}, T_2 = \frac{14N_3}{93N_1}$ 。实际情况下,考虑 BS2 实际透反比为 $a/1-a$, BS3 透反比为 $b/1-b$, 且令通道 1 光路的透光率(不考虑标准具)乘单光子计数器 CPM2 的探测率为系数 η_1 , 通道 2 光路的透光率(不考虑标准具)乘单光子计数器 CPM3 的探测率为系数 η_2 , 能量通道光路的透光率乘单光子计数器 CPM1 的探测率为系数 η_3 。在不同光强下单光子计数器的探测率不同, η_1 和 η_2 应为光强的函数。则实际透过率应为:

$$T_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{(1-a)\eta_3}{(1-b)a\eta_1} \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{N_3}{N_1} \cdot \frac{(1-a)\eta_3}{ba\eta_2} \quad (11)$$

在系统采集大气回波信号时,两信号通道的性能差异会影响最后的风速反演。设校准前的频率响应函数 R 为过零点、斜率为 x 的直线,校准后为过零点、斜率为 x' 的直线。则校准前系统测得的多普勒频移为 $\frac{N_2 - N_3}{N_2 + N_3} / x$, 即径向风速为 $\frac{\lambda}{2} \frac{N_2 - N_3}{N_2 + N_3} / x$; 校准后径向风速为 $\frac{\lambda}{2} \frac{KN_2 - N_3}{KN_2 + N_3} / x$ 。其中校准系数 K 是在校准中测得的通道 2 和通道 1 在同一时刻的信号值的比值。

校准的具体做法是在无标准具的情形下,测量不同入射光强下三个单光子计数器同一时刻的计数值 $N_1 = (1-a)\eta_3, N_2 = Ia(1-b)\eta_1, N_3 = Iab\eta_2$, 由此得出公式(10)、(11)中乘号后的系数以及校准系数 K 。

3 实验数据及分析

图 4 横坐标为能量通道单光子计数器 CPM1 的

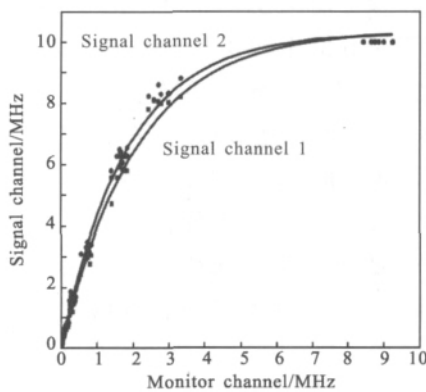


图 4 两信号通道相对能量通道的校准

Fig.4 Relationship of signal channels and monitor channel

计数率,纵坐标为两信号通道单光子计数器的计数率。这里以能量通道光子计数器为标准,校准两信号通道 η_1 和 η_2 相对能量通道 η_3 的差别。

由公式(10)、(11)可得校准后的透过率曲线,与校准前的透过率曲线比较如图 5 所示。

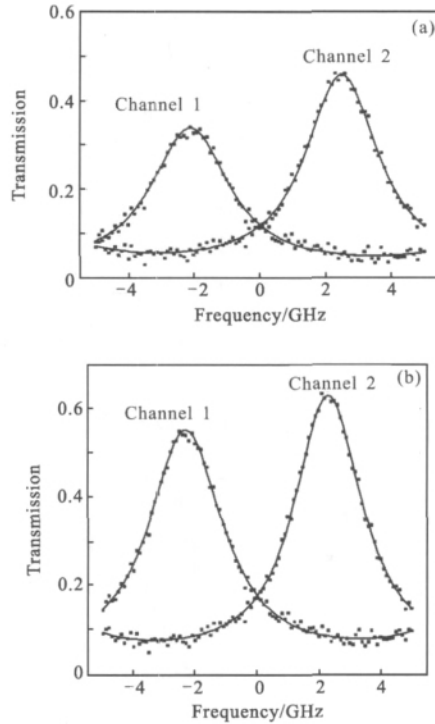


图 5 校准前后的透过率曲线

Fig.5 Transmission curves before and after calibration

在风速反演中,关注的只是两信号通道信号的相对变化量,即只需校准通道 1 和通道 2 的相对差别。

图 6 为信号通道 2 的计数率与信号通道 1 的计数率的比值 K 随信号通道 1 计数率增大的变化趋势。曲线方程为: $y = 1.11666 - 0.0618x + 0.002x^2$ 。

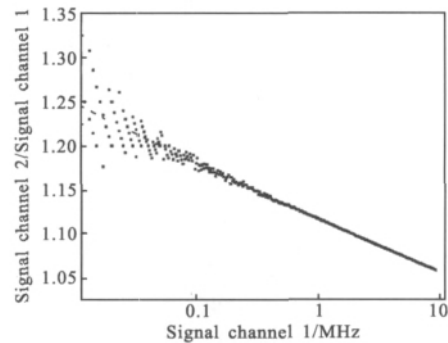


图 6 两信号通道校准图

Fig.6 Calibration of the two signal channels

即:

$$K=1.11666-0.0618 \lg C+0.002(\lg C)^2 \quad (12)$$

式中: C 为信号通道 1 的计数率。

由公式 (5), 频率响应函数 $R=\frac{I_1-I_2}{I_1+I_2}=\frac{N_2-N_3}{N_2+N_3}$, 在 $\pm 400 \text{ M}$ 频移范围内 (对应 $\pm 70 \text{ m/s}$ 的径向风速) 是过 $(0,0)$ 点和 $(\omega, \frac{N_{20}-N_{30}}{N_{20}+N_{30}})$ 的直线。其中 ω 是在 $\pm 400 \text{ M}$ 频移范围内的任一频移值, N_{20} 和 N_{30} 是对应该频移值的两信号通道的测量值。即校准前 R 的斜率为:

$$x=\frac{N_{20}-N_{30}}{N_{20}+N_{30}}/\omega \quad (13)$$

校准后 R 的斜率为:

$$x'=\left(\frac{KN_{20}-N_{30}}{KN_{20}+N_{30}}-\frac{K-1}{K+1}\right)/\omega \quad (14)$$

由透过率计算得 $\pm 400 \text{ M}$ 频移对应 R 的变化范围是 $-0.2\sim 0.2$ 。令实际测量时信号通道 1 的信号强度是信号通道 2 信号强度的 s 倍, 即 $N_{20}=sN_{30}$ 。可由公式(5)得 s 的变化范围是 $0.66\sim 1.5$, 则公式(13)、(14)可改写为:

$$x=\left(\frac{s-1}{s+1}\right)/\omega \quad (15)$$

$$x'=\left(\frac{Ks-1}{Ks+1}-\frac{K-1}{K+1}\right)/\omega \quad (16)$$

两斜率的相对差别

$$\frac{x'-x}{x}=\left(\frac{Ks-1}{Ks+1}-\frac{K-1}{K+1}-\frac{s-1}{s+1}\right)\left/\frac{s-1}{s+1}\right. \quad (17)$$

在 s 为 $0.66\sim 1.5$, K 为 $1\sim 1.25$ 范围内, $\frac{x'-x}{x}$ 随 s 的变化趋势如图 7 所示。

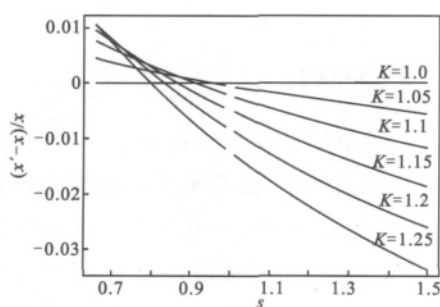


图 7 校准前后 R 斜率的相对差别随 s 的变化

Fig.7 Relative difference of slope of R before and after calibration changes with s

由图 7 可见, 在风速动态范围内, 两信号通道的差异导致的校准前后 R 的斜率的相对差异 $\frac{x'-x}{x}$ 在 $10^{-3}\sim 10^{-2}$ 量级, 可以忽略不计。因此可认为 $x\approx x'$ 。

校准前后的频率响应函数 R 在风速动态范围内为方程为 $y=-0.46071x$ 的线性函数。

由回波信号在不同距离的具体数值, 可通过公式(12)计算出在不同距离处两信号通道的校准关系。

由于 K 的存在, 导致校准前后系统测量的径向风速偏差为 $\frac{KN_{20}-N_{30}}{KN_{20}+N_{30}}-\frac{N_{20}-N_{30}}{N_{20}+N_{30}}=\frac{Ks-1}{Ks+1}-\frac{s-1}{s+1}$ 。由

公式(17)及图 7 可知 $\left(\frac{Ks-1}{Ks+1}-\frac{s-1}{s+1}\right)\approx\frac{K-1}{K+1}$, $\frac{K-1}{K+1}$ 为校准前后的系统零多普勒频移点的变化。

则校准前后测量的径向风速偏差为:

$$\Delta V=\frac{\left(\frac{K-1}{K+1}-0\right)}{x}\frac{\lambda}{2} \quad (18)$$

式中: K 为相应距离处两信号通道的校准关系; $x=-0.46071$ 为频率响应函数 R 的斜率; λ 为激光波长(此处为 355 nm)。

未经校准的径向风速, 加上相应距离处校准引入的风速偏差, 即可得实际的径向风速。因为在相同高度处回波信号强度基本一致, 则相应的校准系数 K 在同一高度处相同, 即四个方向径向风速在相同高度上的偏差相同。由四方向扫描合成风速的算法可知校准引起的径向速度测量差别对合成风场并无影响, 如图 8 所示。

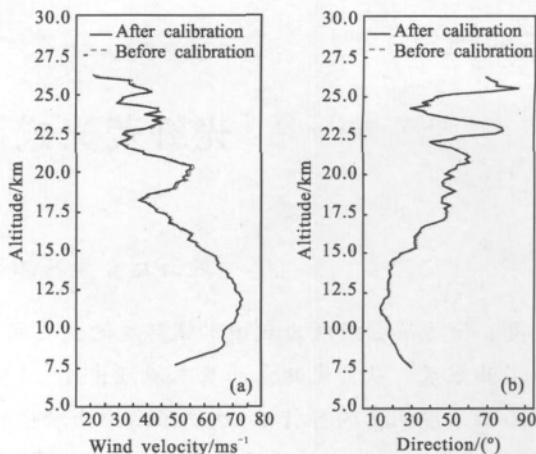


图 8 校准前后系统测量的风场

Fig.8 Wind field measured by the system before and after calibration

4 结 论

接收机作为多普勒测风雷达系统的核心部件, 其内部使用的分光片、单光子计数器等器件的性能

与设计值的差别会导致风速反演时的偏差。依据理论分析设计校准实验并得到校准系数,有效的修正了系统对透过率曲线和径向风速的测量误差。对于类似的激光雷达系统,由于两设计指标完全相同的信号通道性能差异通常不会太大,若在风速动态范围内,两信号通道透过率相对变化也较小,则使用对称的风场扫描合成方式(如本系统的四波束扫描)可消除径向风速的测量误差,即接收机校准对三维风场的测量无影响。

参考文献:

- [1] McGill M J, Skinner W R. Multiple Fabry-Perot interferometers in an incoherent Doppler lidar [J]. *Opt Eng*, 1997, 36(1): 139-145.
- [2] Hall F F, Huffaker R M, Hardesty R M, et al. Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar [J]. *Appl Opt*, 1984, 23: 2503-2506.
- [3] Souprayen C, Garnier A, Hertzog A, 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.
- [4] Shu Zhifeng, Tang Lei, Wang Guocheng, et al. Application of triple Fabry-Perot etalon for rayleigh wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1474-1480. (in Chinese)
舒志峰, 唐磊, 王国成, 等. 三通道 Fabry-Perot 标准具在瑞典测风激光雷达中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1474-1480.
- [5] Sun Dongsong, Li Yingying. Doppler lidar for both high and low altitude wind detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 237-242. (in Chinese)
孙东松, 李颖颖. 高低空一体化测风激光雷达[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 237-242.
- [6] Sun Dongsong, Liu Dong, Xia Haiyun, et al. Low tropospheric wind profile from a 1.06 μm Doppler lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 52-56. (in Chinese)
孙东松, 刘东, 夏海云, 等. 1.06 μm 多普勒激光雷达的低对流层风场测量[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 52-56.
- [7] Korb C L, Gentry B M, Li S X, et al. Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(24): 5976-5983.

下期预览

光纤荧光式测水中矿物油浓度

王书涛, 崔彦彦

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 油污染已经成为我国水域环境的主要问题之一,为掌握石油污染的动态变化趋势,需实时在线测量水中石油浓度。从荧光测量的基本原理出发,研究了水中矿物油荧光检测机理、用荧光法和全光纤传感技术实现石油浓度测量的可行性,建立了水中油浓度的测算模型,确定了其荧光检测的最佳激发波长和荧光波长范围,根据得到的荧光特性设计了荧光激发、吸收和传输的光学系统。选用氙灯作为激发光源,设计了相应的检测系统及放大电路,通过以单片机为控制核心的高速数据采集电路实现了信号的采集转换,最后将数据传输入计算机,处理得到了相应的石油荧光光谱。该方法可在水中油检测方面广泛应用。