

文章编号: 0253-2239(2006)12-1761-5

# 基于菲佐干涉仪测风激光雷达的误差分析\*

沈法华<sup>1,2</sup> 孙东松<sup>2</sup> 钟志庆<sup>2</sup> 陈 敏<sup>1</sup> 夏海云<sup>1</sup> 王邦新<sup>2</sup> 董晶晶<sup>2</sup> 周小林<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 苏州大学物理科学与技术学院, 苏州 215006  
<sup>2</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 详细分析了基于菲佐(Fizeau)干涉仪测风激光雷达利用条纹重心法反演风速时的方法误差和系统噪声引起的测量误差。提出了方法误差的修正方法, 推导出了测量误差理论公式。并用蒙特卡罗方法模拟了低对流层的回波信号, 并对其进行条纹重心法风速反演。结果表明: 方法误差和气溶胶与分子后向散射比有关, 噪声引起的测量误差与信号强度和气溶胶与分子后向散射比有关。在 0~5 km, 高度采用条纹技术测量的风速误差小于 1 m/s。

**关键词:** 激光遥感; 风速误差; 重心法; 激光雷达; 菲佐干涉仪

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

## Error Analysis of Wind Lidar Based on Fizeau Interferometer

Shen Fahua<sup>1,2</sup> Sun Dongsong<sup>2</sup> Zhong Zhiqing<sup>2</sup> Chen Min<sup>1</sup> Xia Haiyun<sup>1</sup>

Wang Bangxin<sup>2</sup> Dong Jingjing<sup>2</sup> Zhou Xiaolin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006  
<sup>2</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** The method error of gravity method and the measurement error due to system shot noise in wind lidar based on Fizeau interferometer are analyzed in detail. The correction technique of the method error is given, the formula of measurement error is derived. The low troposphere signal simulated by Monte-Carlo technique is used to retrieve the wind velocity. The results show that the method error is related to aerosol-molecule backscattering ratio and the measurement error is related to signal intensity and aerosol-molecule backscattering ratio. At altitude of 0 to 5 km, wind velocity error measured by using fringe technique is below 1m/s.

**Key words:** laser remote sensing; wind velocity error; gravity method; lidar; Fizeau interferometer

## 1 引 言

对大气风场的测量以获得全天候、全高度的风场数据对于改进大气模型、提高大气分析能力、提高数值天气预报的准确性、避免机场附近切变风可能造成的飞行事故等方面具有重要的意义。采用直接探测多普勒激光雷达是目前精确测量风速的主要手段之一。其频率检测主要有边缘技术<sup>[1~2]</sup>和条纹成像<sup>[3~8]</sup>两种技术。边缘技术是利用窄带滤波器(如法布里-珀罗标准具)将频率的变化转换为信号强度的变化来测量多普勒频移;条纹技术是利用干涉条纹的重心位置变化来探测频率的变化。传统的条纹

技术是利用法布里-珀罗标准具来产生环状条纹,利用复杂的接收光路将环状条纹转变为线条纹会聚在 CCD 上<sup>[7,8]</sup>或者直接将环状条纹成像到专门匹配的环状成像探测器,但探测器的量子效率不高<sup>[3~6]</sup>。菲佐(Fizeau)干涉仪产生的是线条纹,可以直接成像在 CCD 或线列探测器上,其信号处理简单,对系统要求也不高,优于法布里-珀罗标准具<sup>[9]</sup>。

条纹技术是将总的条纹信号分列成多个通道的离散信号,然后通过求离散信号重心位置的变化来确定风速。该方法会带来两种风速误差:1)由于条纹被截断而使其重心位置与中心位置发生偏离产生

\* 中国科学院百人计划和中国科学院知识创新工程(CX0201)资助课题。

作者简介: 沈法华(1981~),男,江苏盐城人,苏州大学物理科学与技术学院硕士研究生,主要从事多普勒测风激光雷达的研究。E-mail: sfh81914@tom.com

导师简介: 孙东松(1962~),男,江苏人,中国科学院安徽光学精密机械研究所研究员,博士,主要从事激光遥感方面的研究。E-mail: dssun@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2005-12-01; 收到修改稿日期: 2006-06-01

的方法误差;2)由于噪声引起的在条纹重心位置确定上的偏差。本文对这两种误差进行了详细的分析和讨论,并得出条纹重心法测量风速所能达到的测量精度。

## 2 测量风速基本理论

### 2.1 单通道接收的回波信号光电子数

单色平行光入射到菲佐干涉仪时,贴近干涉仪平板后表面的透过率函数为:

$$T = (1 - \mathcal{A} - \mathcal{R})^2 \left| \sum_{n=0}^N \mathcal{R}^n \exp\left(i \frac{2\pi}{c} \cdot 2\nu L P_n\right) \right|^2, \quad (1)$$

$\mathcal{A}$  为光束在通过干涉仪的光损耗; $\mathcal{R}$  为干涉仪对应波长的反射率; $N$  为光在两平板之间的反射次数; $\alpha$  为两干涉平板的夹角; $\theta$  为入射光在后一块平板上照射角; $L = L_0 + \Delta L$  为干涉仪平板之间的间隔, $L_0$  为干涉仪中心腔长。其中  $P_n = \frac{\sin \theta - \sin(\theta - 2n\alpha)}{2 \tan \alpha}$ 。

实际的干涉仪存在缺陷,假定缺陷为缺陷因子  $\Delta d_D$  的高斯分布;大气气溶胶后向散射信号的频谱与发射激光的频谱相近似,也是高斯分布。通过对(1)式缺陷平均、高斯卷积及对 CCD 第  $j$  个通道对应的腔长变化范围积分,得到 CCD 第  $j$  个通道的气溶胶信号透射率:

$$T_a(j) = (1 - \mathcal{A} - \mathcal{R})^2 \left\{ \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N \mathcal{R}^{n+m} \cos \left[ 2\pi(P_n - P_m) \left( \frac{\nu_0}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} + \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} + \frac{j - 1/2 - n_z/2}{n_z} \cdot \frac{\Delta\nu_z}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} \right) \right] \cdot \exp \left[ - \frac{4\pi^2 (P_n - P_m)^2 \Delta d_D^2}{\lambda_0^2} \right] \cdot \exp \left\{ - \left[ \frac{\pi(P_n - P_m) \Delta\nu_1}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} \right]^2 \right\} \cdot \text{sinc} \left( \frac{P_n - P_m}{n_z} \cdot \frac{\Delta\nu_z}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} \right) \right\}, \quad (2)$$

式中  $\Delta\nu_{\text{FSR}} = c/2L_0$  为自由谱范围, $L_0$  对应的频率为  $\nu_0$ ;  $\Delta\nu$  为频移量; $n_z$  为 CCD 的通道数; $\Delta\nu_z$  为条纹成像在 CCD 上总的频率范围; $\Delta\nu_1 = \delta\nu / \sqrt{4 \ln 2}$ ,  $\delta\nu$  为激光发射谱宽。只要将  $T_a(j)$  中的  $\Delta\nu_1$  换成  $(\Delta\nu_1^2 + \Delta\nu_m^2)^{1/2}$  ( $\Delta\nu_m$  在高度 5 km 处约为 0.72 GHz) 即得第  $j$  个通道分子信号透射率  $T_m(j)$ 。此式与参考文献[10]中提到的表达式相比较为简洁,且上式没有将探测范围限制为一个自由谱范围,更具一般性。

则 CCD 第  $j$  个通道接收的气溶胶和分子回波信号光电子数分别为

$$N_a(j) = \frac{T_a(j)}{n_z} \cdot \epsilon \Delta t \frac{E_0}{h\nu} \frac{A}{r^2} \eta_0 \eta \beta_a(r) \Delta r \cos \phi \exp \left( - 2 \sec \phi \int_0^r \alpha(r) dr \right), \quad (3)$$

$$N_m(j) = \frac{T_m(j)}{n_z} \cdot \epsilon \Delta t \frac{E_0}{h\nu} \frac{A}{r^2} \eta_0 \eta \beta_m(r) \Delta r \cos \phi \exp \left( - 2 \sec \phi \int_0^r \alpha(r) dr \right), \quad (4)$$

式中  $\epsilon$  为激光脉冲重复频率; $\Delta t$  为积分时间; $E_0$  为激光脉冲能量; $A$  为接收望远系统的面积; $\eta_0$  为系统光学效率; $\eta$  为 CCD 量子效率; $\Delta r$  为垂直距离分辨率; $\beta_a(r)$  和  $\beta_m(r)$  分别为  $r$  高度气溶胶及大气分子后向散射系数; $\phi$  为系统扫描天顶角; $\alpha(r)$  为大气总的消光系数。每个通道接收的总的光电子数  $N(j) = N_a(j) + N_m(j)$ , 各通道背景光电子数和探测器暗计数很小忽略不计。

### 2.2 重心法反演风速

采用文献[11]的大气模型,大气气溶胶粒子和大气分子的消光后向散射比分别取为 50 和  $8\pi/3$ 。气溶胶和大气分子的后向散射比  $R = 1 + \beta_a/\beta_m$ 。系统模拟参量见表 1。

图 1 是模拟的探测器每个通道接收到的回波信号光电子数。多普勒频移前后条纹中心发生移动,如果频移前后条纹完全被 CCD 接收,则条纹的重心

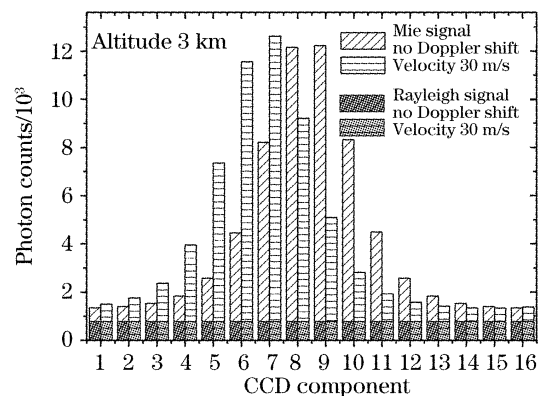


图 1 模拟的中心位置在 8.5 通道的参考谱每个通道光电子数分布与模拟的 30 m/s 风速时的信号谱每个通道光电子数分布

Fig. 1 Modeled reference spectra centered in channel 8.5 with Modeled signal spectra shifted +30 m/s

和中心重合。通过图 1 的离散信号来确定多普勒频移及径向风速,计算公式为

$$V_r = (j_0 - j_{V_r}) \times V_c = \left\{ \sum_{j=1}^{n_z} j \cdot N_j(0) / \left[ \sum_{j=1}^{n_z} N_j(0) \right] - \sum_{j=1}^{n_z} j \cdot N_j(V_r) / \left[ \sum_{j=1}^{n_z} N_j(V_r) \right] \right\} \times V_c, \quad (5)$$

式中  $j_0$  为参考谱重心位置,  $j_{V_r}$  为径向风速  $V_r$  时的重心位置; CCD 一个通道对应的风速  $V_c$  为 16.625 m/s。

表 1 直接接收激光雷达系统参量

Table 1 Parameter for direct detection lidar system

	Parameter	Value	
System	Velocity dynamic range /ms <sup>-1</sup> (Los)	±30	
	Vertical resolution $\Delta r$ /m	30	
	Integration time $\Delta t$ /s	5	
	Zenith angle $\Phi$ / (°)	45	
	Transmitter	Wavelength /nm	1064
Transmitter	Linewidth /MHz	80	
	PRF $\epsilon$ /Hz	50	
	Energy $E_0$ / (mJ/pulse)	170	
	Receiver	Telescope diameter /mm	300
	Receiver	Field of view /mrad	0.15
Optical efficiency $\eta_0$ /%		80	
Detector efficiency $\eta$ /%		5	
Number of channels		16	
Range imaging on detector $\Delta \nu_z$		1 FSR	
Fizeau interferometer	FSR /MHz	500	
	Reflective finesse	9.94	
	Etalon defect $\Delta d_D$ /nm	6	
	Fizeau diameter $\Delta y$ /mm	60	
	Wedge angle $\alpha$ / $\mu$ rad	8.87	

### 3 风速误差分析

#### 3.1 方法误差

无多普勒频移时,测量的条纹中心和重心重合,都为  $j_0$  (因设定了条纹开始在探测器中心位置)。当有径向风速  $V_r$  时,条纹移动,中心和重心不再重合,计算公式分别为

$$j'_{V_r} = j_0 - V_r/V_c,$$

$$j_{V_r} = \frac{\sum_{j=1}^{n_z} j \cdot [T_a(j) \cdot (R-1) + T_m(j)]}{\sum_{j=1}^{n_z} [T_a(j) \cdot (R-1) + T_m(j)]} \quad (6)$$

图 2 给出了条纹中心和重心的偏差随风速的变化。由图可知:对于相同的  $R$ ,多普勒频移越大即风速越大偏差越大;对于相同的风速,  $R$  越小偏差越大。还可以看出,不管  $R$  为何值,在风速不太大的范围内 ( $\pm 50$  m/s),风速误差和风速大小呈近似线性关系。

如图 3 所示,设  $N'$  为频移后图中标注  $2\Delta j$  区域所接收到的光电子数,其重心在  $\Delta j + 1/2$  处; ( $N_T - N'$ ) 为其余的区域接收到的光电子数,重心在  $j'_{V_r}$  处,

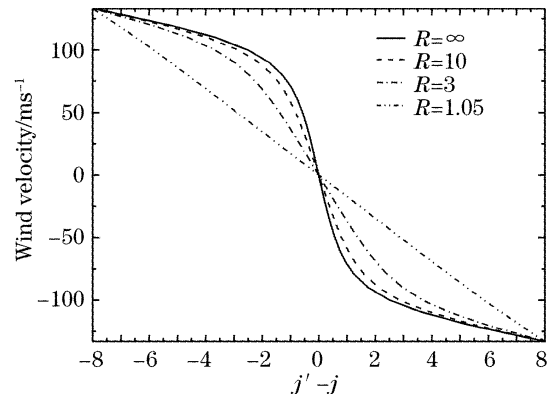


图 2 对于不同的  $R$ ,条纹中心和重心的偏离和风速大小的关系

Fig. 2 Deviation of center and barycenter of the fringe versus wind velocity with different  $R$

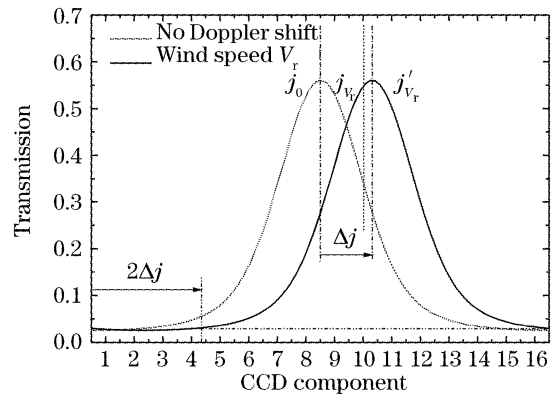


图 3 重心计算方法修正原理图

Fig. 3 Principle of correction of gravity method

所以总的信号的重心为

$$j_{V_r} = \frac{N' \cdot (\Delta j + 1/2) + (N_T - N') \cdot j'_{V_r}}{N_T} = -\frac{N' \cdot (j_0 - 1/2)}{N_T} + j'_{V_r},$$

即

$$j_{V_r} \approx -\frac{\Delta j \cdot N_{\min} n_z}{N_T} + j'_{V_r} = -\frac{N_{\min} \cdot n_z \Delta j}{N_T} + j'_{V_r}$$

所以

$$j_{V_r} = j'_{V_r} - C \cdot \Delta j, \quad (7)$$

式中  $C \approx N_{\min} \cdot n_z / N_T$ ,  $N_{\min}$  为各通道接收光电子数的最小值,  $N_T = \sum_{j=1}^{n_z} N(j)$  为 CCD 接收到的总的光电子数。则修正后风速为  $V_{CRT}$ :

$$V_{CRT} = V_r / (1 - C), \quad (8)$$

式中  $V_r$  为(5)式计算值。图 4 实线和虚线分别表示利用(5)式和(8)式计算后风速误差。可以看出,在

±30 m/s 的风速范围内,修正后方法误差很小,可以忽略。

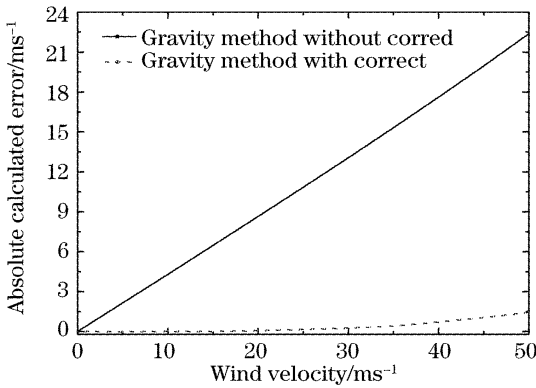


图 4 未修正和修正后的重心法计算风速的方法误差与风速大小的关系

Fig. 4 Calculated wind velocity error of gravity method before and after correction versus wind velocity

### 3.2 测量误差

假定参考条纹重心位置的确定无偏差,且光电子数服从泊松分布,只考虑频移后条纹重心位置确定产生的误差。由于系统噪声的影响产生的条纹重心确定的误差为

$$(\delta j_{V_r})^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_z} j^2 \cdot N_j}{\left(\sum_{j=1}^{n_z} N_j\right)^2} - \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_z} j \cdot N_j\right)^2}{\left(\sum_{j=1}^{n_z} N_j\right)^3}, \quad (9)$$

则风速测量误差为

$$(\delta V_{\text{CRT}})^2 = \left(\frac{1}{1-C}\right)^2 (\delta j_{V_r} \cdot V_c)^2 + \frac{V_r^2 \cdot C^2}{(1-C)^4} \left(\frac{1}{N_{\min}} + \frac{1}{N_T}\right), \quad (10)$$

一般情况下上式中的第二项远小于第一项,有

$$\delta V_{\text{CRT}} = \delta V_r / (1 - C). \quad (11)$$

由图 3 知,每个通道的分子信号成分几乎相等。则  $N_{\min} = N_{\text{amin}} + N_m(j)$ , 其中  $N_{\text{amin}}$  为所有通道中接收到的气溶胶信号的最小值,则有

$$\delta V_{\text{CRT}} = \left[ \frac{\sum_{j=1}^{n_z} j^2 \cdot N_j}{\left(\sum_{j=1}^{n_z} N_j\right)^2} - \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_z} j \cdot N_j\right)^2}{\left(\sum_{j=1}^{n_z} N_j\right)^3} \right]^{1/2} V_c \cdot \frac{\sum_{j=1}^{n_z} N_j}{\sum_{j=1}^{n_z} [N_a(j) - N_{\text{amin}}]} = \frac{1}{\theta_V \cdot R_{\text{SN}}}, \quad (12)$$

式中速度灵敏度

$$\theta_V = (1 / \sum_{j=1}^{n_z} N_j) [\partial (\sum_{j=1}^{n_z} N_j) / \partial j] / V_c,$$

系统信噪比

$$R_{\text{SN}} = \frac{\sum_{j=1}^{n_z} [N_a(j) - N_{\text{amin}}]}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n_z} [N_a(j) + N_m(j)]}}$$

容易看出  $R \gg 1$  当时,  $\theta_V$  等于气溶胶的速度灵敏度; 当  $R$  接近 1 时,  $\theta_V$  等于分子的速度灵敏度。气溶胶的速度灵敏度远大于分子的速度灵敏度, 故  $R$  越大风速测量误差就越小。由于系统误差与信噪比成反比, 所以气溶胶信号越强, 信噪比越高, 风速测量误差越小。图 5 直观地表示了系统风速测量误差与气溶胶信号强度和  $R$  的关系。可以看出在  $R$  较大的情况下, 一般在低对流层附近, 激光雷达接收的信号不太弱的情况下, 利用条纹技术测量风速完全能够满足精度要求。

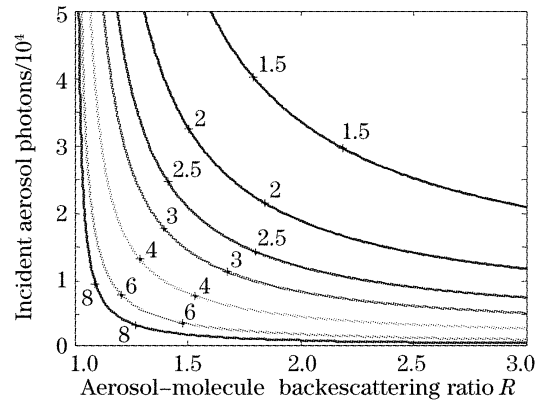


图 5 随入射到干涉仪的气溶胶信号和气溶胶分子后向散射比变化的风速误差等高图

Fig. 5 Contours of wind velocity error as a function of incident aerosol signal and  $R$  for aerosol Doppler systems at 1064 nm

### 4 误差模拟及风速反演结果

先设定风速廓线, 采用蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 方法模拟探测器各个通道接收到的回波信号光电子数, 然后采用重心法反演风速, 来验证激光雷达采用条纹重心法测量风速的系统可靠性。图 6 表示了风速测量的标准偏差和接收信号的信噪比的关系。可以看出: 当  $R=1.05$  和  $R=5$  时, 要使风速误差小于 1 m/s, 信噪比必须分别大于 60 和 35。  $R$  越小即气溶胶信号越小, 需要大的信噪比以满足测量精度。图 7 是对于设定的风速廓线, 在模拟系统参量下得出的理论风速误差。图 8 是采用蒙特卡罗模拟的信号反演出的风速结果。这两幅图表明: 在本文的模拟系统参量和大气模型下, 在 0~5 km 的低对流层范围内, 测量的风速误差小于 1 m/s。

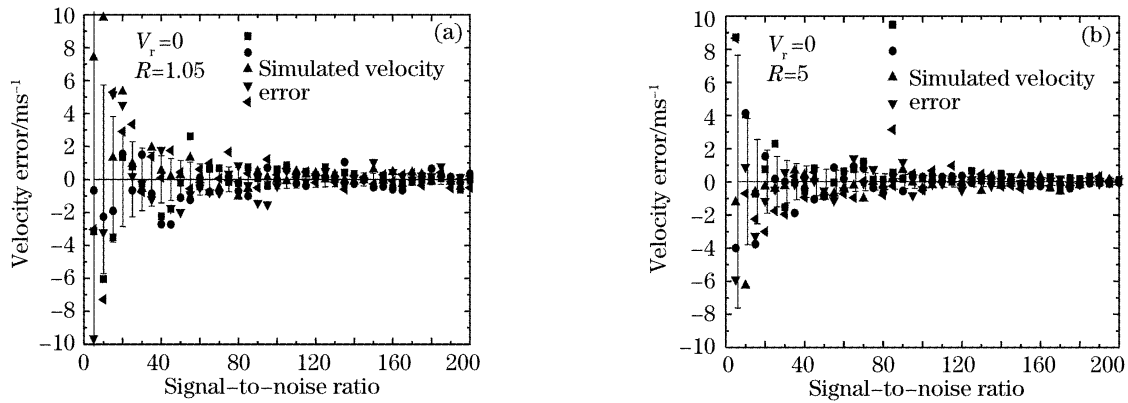
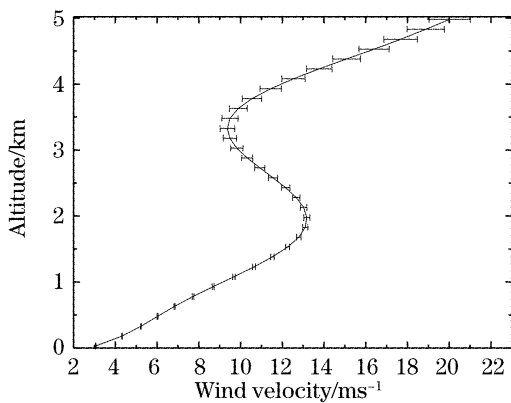
图 6 对于不同的  $R$ , 风速测量精度与信噪比的关系Fig. 6 Velocity accuracy versus signal-to-noise ratio for different  $R$ 

图 7 模拟的风速廓线的风速测量误差

Fig. 7 Wind error of simulated figure of wind

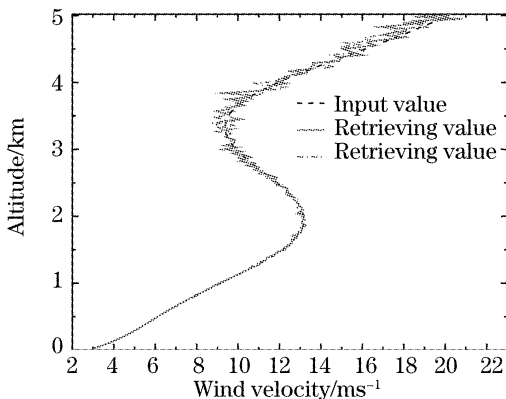


图 8 用模拟信号反演出的风速

Fig. 8 Retrieved wind velocity by simulated signal

## 5 结 论

条纹重心法反演风速的方法误差随着测量风速的增加而递增,在 $\pm 50$  m/s风速范围内,反演风速的方法误差与风速大小近似呈线性关系。通过修正可大大降低误差。同时方法误差还与气溶胶与分子后向散射比  $R$  有关。散射信号强度和气溶胶与分子后向散射比越大噪声引起的风速测量误差越小;反之越大。用蒙特卡罗方法模拟的信号进行风速反

演的结果表明在低对流层即  $R$  比较大的情况下,利用条纹技术测量风速是可行的。在  $R$  比较小的情况下,必须通过增大激光能量或增加累积脉冲数从而降低测量的时间分辨率来保证风速测量精度。这些分析为研制相关的条纹技术多普勒激光雷达提供了参考依据。

## 参 考 文 献

- 1 Bruce M. Gentry, C. L. Korb. Edge technique for high-accuracy Doppler velocimetry[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5770~5777
- 2 Dongsong Sun, Zhiqing Zhong, Jun Zhou *et al.*. Accuracy analysis of the Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar[J]. *Opt. Rev.*, 2005, **12**(5): 409~414
- 3 T. L. Killeen, B. C. Kennedy, P. B. Hays *et al.*. Image plane detector for the dynamics explorer Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(22): 3503~3513
- 4 V. J. Abreu, J. E. Barnes, P. B. Hays. Observations of winds with an incoherent lidar detector [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22): 4509~4514
- 5 K. W. Fischer, V. J. Abreu, W. R. Skinner *et al.*. Visible wavelength Doppler lidar for measurement of wind and aerosol profiles during day and night[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(2): 499~511
- 6 M. J. McGill, W. R. Skinner, T. D. Irgang. Analysis techniques for the recovery of winds and backscatter coefficients from a multiple-channel incoherent Doppler lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(6): 1253~1268
- 7 Wilbert R. Skinner, Paul B. Hays. Incoherent Doppler lidar for measurement of atmospheric winds [C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2266**: 383~394
- 8 Todd D. Irgang, Paul B. Hays, W. R. Skinner. Two-channel direction-detection Doppler lidar employing a charge-coupled device as a detector[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6): 1145~1155
- 9 Sun Dongsong, Yang Zhao, Fang Jianxing. Technique of wind velocity measurement with a Fizeau interferometer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(10): 943~946 (in Chinese)
- 10 Liu Jiqiao, Chen Weibiao, Zhou Jun *et al.*. Study of boundary layer Doppler wind lidar based on multi-beam Fizeau interferometer[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(2): 74~77 (in Chinese)
- 11 刘继桥,陈卫标,周军等.基于斐索干涉仪的边界层测风激光雷达[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(2): 74~77
- 11 Y. Sasano, T. Kobayashi *et al.*. Feasibility study on space lidars for measuring global atmospheric environment[J], No. 4 Final Report, F-82, 1995/NIES 1995