

文章编号: 0253-2239(2007)03-0379-5

# 基于菲佐干涉仪与多通道光电倍增管阵列的多普勒频移检测技术\*

卜令兵<sup>1,2</sup> 刘继桥<sup>1</sup> 陈卫标<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所先进激光技术与应用系统实验室, 上海 201800)  
(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 提出了基于菲佐干涉仪和多通道光电倍增管(PMT)阵列探测器组合的多普勒频移检测的方案,适用于风速测量的直接探测多普勒激光雷达。首先介绍了工作原理,再根据菲佐干涉仪光谱特征对频移检测用干涉仪进行了优化设计,优化设计的菲佐干涉仪腔长 150mm、平板反射率 0.755。对提出的菲佐干涉仪和多通道光电倍增管阵列探测器组合的方案进行了数值模拟,以分子散射作为背景噪声,计算了该方法的风速测量误差。模拟结果表明,设计的基于菲佐干涉仪的直接探测多普勒测风激光雷达,在 30 s 的积分时间内、探测高度 5 km 以下,风速测量误差可以达到 0.56 m/s。

**关键词:** 雷达工程; 频移检测; 菲佐干涉仪; 多通道光电倍增管阵列探测器; 测风激光雷达; 风速误差  
中图分类号: TH765.4 文献标识码: A

## Discrimination of Doppler Frequency Shift Based on Fizeau Interferometer and PMT Array

Pu Lingbing<sup>1,2</sup> Liu Jiqiao<sup>1</sup> Chen Weibiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Novel Laser Technique and Application System Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800  
<sup>2</sup> Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

**Abstract:** A method of discriminating Doppler shift using Fizeau interferometer and linear PMT array for a direct-detection wind Doppler lidar is proposed. At first, its working principle is introduced. According to the spectral character of Fizeau interferometer, optimum design of frequency shift discrimination interferometer is presented, and the designed Fizeau interferometer has the cavity length of 150 mm and reflectivity of 0.755 from plate. The numerical simulation for wind speed measurement using the Fizeau interferometer and PMT array detector is also presented. The effect of molecular backscattering taken as background noise is analyzed. The error of wind speed measurement using system with Fizeau interferometer and linear PMT array is calculated. The results show that wind velocity error can be less than 0.56 m/s in the 5 km range under 30 s average time using the proposed system.

**Key words:** radar engineering; frequency shift discrimination; Fizeau interferometer; multichannel photomultiplier tube (PMT) array detector; wind lidar; wind velocity error

## 1 引言

大气风场测量在全球大气监测、数值天气预报以及军事弹道参数的修正等领域有重要的应用,通过检测风速引起的多普勒频移可以直接得到大气中

风场分布<sup>[1]</sup>。激光雷达测风是风场测量的一种新型手段,其中基于条纹技术的测风激光雷达在大气边界层以下的风场测量上优势明显<sup>[2~4]</sup>。条纹技术一般使用高分辨力的法布里-珀罗干涉仪<sup>[5]</sup>,但是传统

\* 中国科学院科研装备研制和改造项目(Y2004004)资助课题。

作者简介: 卜令兵(1976—),男,山东巨野人,博士研究生,主要从事直接探测多普勒激光雷达研究工作。

E-mail: lingbingpu\_36@hotmail.com

导师简介: 陈卫标(1969—),男,上海人,研究员,博士生导师,主要从事全固态激光技术、星载激光多普勒雷达技术、机载激光雷达技术以及地基大气污染检测激光雷达技术等方面的研究。E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2006-03-10; 收到修改稿日期: 2006-06-19

法布里-珀罗干涉仪所成的条纹是圆形,而当前商用的探测器都是阵列式的,因此,在散射信号的探测上存在一定的困难。为此,T. L. Killeen 等<sup>[6]</sup>研制了具有同心圆分布阴极的多通道探测器,而 T. D. Irgang 等<sup>[7]</sup>则使用复杂的光学转换系统将同心圆环转换为线性结构以匹配现有的阵列式探测器。为降低激光雷达研制成本从而提高系统稳定性,相关学者把目光转移到寻找更加适合的干涉仪来代替传统法布里-珀罗干涉仪,而非佐干涉仪由于其所成的条纹为等厚的线性条纹而倍受关注<sup>[8]</sup>。非佐干涉仪所成的条纹为线性条纹,可以与现有的线阵探测器相匹配,且所成条纹可以直接探测,使光学系统简单,因此,它在直接探测激光测风雷达中具有很好的应用前景。如,欧洲空间局预计 2008 年发射的星载多普勒激光雷达就计划使用非佐干涉仪进行全球风场测定。就探测器而言,可以有三种选择:CCD 探测器、雪崩光电二极管(APD)阵列探测器、多通道光电倍增管(PMT)阵列探测器。CCD 探测器量子效率高、像元数多可以准确地得到条纹重心移动,但 CCD 探测器是内部无增益探测器,为得到足够的电荷数,需要一定的光照时间,影响了激光雷达的空间分辨力,而且所用 CCD 造价较高。雪崩光电二极管阵列也是激光雷达中常用探测器,其特点是体积小、需要电压较小、响应速度快<sup>[9]</sup>。多通道光电倍增管阵列同样具有响应速度快的特点,随着多通道光电倍增管制造技术的发展,小体积的多通道光电倍增管阵列已经商用,多通道光电倍增管阵列的内部增益远高于现有的雪崩光电二极管阵列,更有利于微弱光信号的探测。因此,本文采用多通道光电倍增

管阵列探测器并配以高速同步数据采集系统,提出基于菲佐干涉仪的直接探测多普勒测风激光雷达。

## 2 原 理

菲佐干涉仪可以用于高分辨光谱分析仪,与法布里-珀罗干涉仪不同,多光束菲佐干涉仪包括两个互成  $\alpha$  角度的反射率很高的平板,当光束以  $\theta$  角入射时,厚度相同的点具有相同的干涉条纹。理想情况下多光束菲佐干涉仪透射率函数为

$$T = (1 - A - R)^2 \left| 1 + \sum_{n=1}^p R^n \exp(ik\delta_n) \right|^2, \quad (1)$$

其中  $A$  为标准具平板中吸收或散射引起的损失, $R$  为标准具工作面的反射率, $k$  为波数, $k = 2\pi/\lambda$ , $p$  为光在两平板之间的反射次数, $\delta_n$  为光通过干涉仪反射  $n$  次后的透射波与直接透射波的总相位差:

$$\delta_n = 2n\alpha x (\sin \theta - n\alpha \cos \theta) +$$

$$2nL [\cos \theta + n\alpha \sin \theta - (2n^2 + 1)\alpha^2 \cos \theta/3],$$

$L$  为干涉仪平板之间的间隔, $x$  为成像点与干涉仪后板的距离。

实际中的干涉仪平板存在光学平面不平整、平面弯曲等一系列的缺陷,会导致干涉仪光谱加宽。假定任何加宽服从高斯分布,则可以用一定的模型来表示加宽因素影响的概率分布。采用多通道探测器对菲佐光谱的一个干涉条纹进行成像,则接收的信号光谱可以表示为缺陷概率分布与干涉仪透射率函数作加权平均,并和信号光谱函数作卷积。令多普勒频移后激光频率  $\nu = \nu_0 + \Delta\nu$ , $\Delta\nu$  为风速引起的多普勒频移, $\nu_0$  为激光频率,则每个通道的透射率可以表示为<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} T(j, \Delta\nu) = & (1 - A - R)^2 \left\{ 1 + 2 \sum_{q=1}^p R^q \cos \left[ 2\pi P_q \left( \frac{\nu_0}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} + \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} + \frac{j-1/2}{N_{\text{FSR}}} \right) \right] \right\} \times \\ & \exp \left( \frac{4\pi^2 P_q^2 \Delta d_D^2}{\lambda_0^2} \right) \exp \left[ - \left( \frac{\pi P_q \Delta\nu_\epsilon}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} \right)^2 \right] \text{sinc} \left( \frac{P_q}{N_{\text{FSR}}} \right) + \\ & \sum_{q=1}^p \sum_{m=1}^p R^{q+m} \cos \left[ 2\pi (P_q - P_m) \left( \frac{\nu_0}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} + \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} + \frac{j-1/2}{N_{\text{FSR}}} \right) \right] \times \\ & \exp \left[ \frac{4\pi^2 (P_q^2 - P_m^2) \Delta d_D^2}{\lambda_0^2} \right] \exp \left[ - \left( \frac{\pi (P_q^2 - P_m^2) \Delta\nu_\epsilon}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} \right)^2 \right] \text{sinc} \left( \frac{P_q^2 - P_m^2}{N_{\text{FSR}}} \right) \left. \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

式中  $P_q$ 、 $P_m$ 、 $m$ 、 $q$  均为求和符号的过程量,没有实际意义,只是使公式简炼:

$P_q = n \cos \theta + n^2 \alpha \sin \theta - (2n^3 + n)\alpha^2 \cos \theta/3$ ,  
 $j$  为多通道光电倍增管探测器的第  $j$  个通道, $\Delta d_D$  为标准具平板缺陷参量, $\lambda_0$  为激光波长, $N_{\text{FSR}}$  为每个

自由光谱范围占有光电倍增管探测器的通道数,自由光谱范围  $\Delta\nu_{\text{FSR}} = c/(2L)$ , $c$  为光速; $\Delta\nu_\epsilon$  为激光频率谱线的  $1/e$  全宽度。典型的菲佐干涉仪在各个通道的透射率光谱如图 1 所示。

由(2)式可知,多通道探测器上各个探测器上的

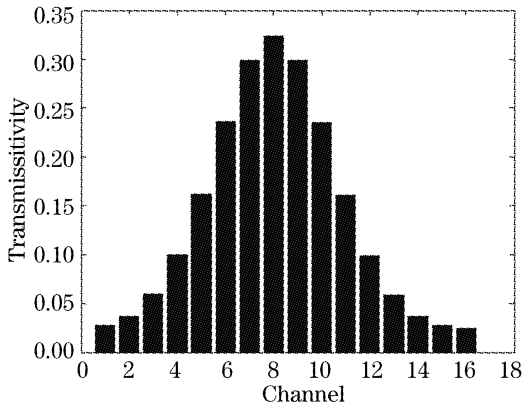


图 1 菲佐干涉仪透射率光谱

Fig. 1 Transmissivity spectrum of Fizeau interferometer  
 能量分布是频率的函数，多普勒频移的存在使激光频率发生改变，透射率光谱发生改变。若定义单位风速引起的能量相对变化为各个通道的探测灵敏度，如图 1 的各个通道的探测灵敏度如图 2 所示，其中灵敏度的正负表示单位风速引起的光子数增加或者减小。

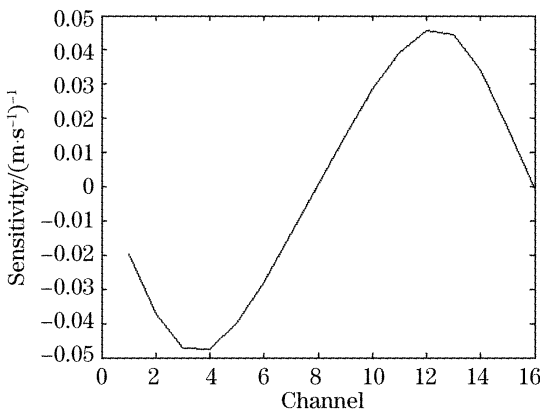


图 2 各通道的探测灵敏度

Fig2 Sensitivity of each channel

多通道光电倍增管阵列探测器的第  $j$  通道所接收到的光子个数为大气后向散射总光子个数除以通道数然后再乘  $j$  通道的透射率  $T(j, \Delta\nu)$ 。由于大气后向散射的总光子个数不受风速影响，因此各通道的探测灵敏度不同意味着各通道的透射率随  $\Delta\nu$  的变化速率不同。所以，风速的存在必然引起条纹重心发生偏移，条纹技术就是根据条纹中重心偏移来反演大气风速。在风速测量时，首先将激光垂直发射，由于风速的垂直分量一般每秒只有几个厘米，因此可以忽略，这样就测得零风速对应的大气后向散射光在各个通道上的能量分布；然后将激光向一定的方位角发射，多普勒频移的存在影响各个通道的能量分布，根据多普勒频移前后条纹重心的变化可以反演视线风速。

### 3 风速测量系统

基于菲佐干涉仪的直接探测多普勒测风激光雷达的接收光路如图 3 所示。考虑到人眼安全，该系统采用 Nd:YAG 的三倍频作为发射激光，其主要参量为：重复频率 100 Hz、单脉冲能量 20 mJ，线宽 200 MHz。后向散射信号由光纤从口径为 300 mm 的望远镜导向接收系统，并由分束镜分为两部分，一部分用来作为能量检测，另一部分先准直后进入扩束镜得到和菲佐干涉仪口径相同的光束。由于所使用的多通道光电倍增管阵列的长度为 16 mm，而菲佐干涉仪的口径为 60 mm，因此必须使用缩束镜将信号光束进行缩束，并使用柱面镜将条纹在一个方向上压缩。缩束和压缩后的条纹成像在多通道光电倍增管阵列平面上进行探测。

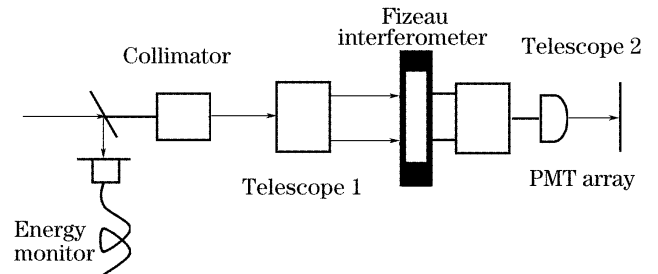


图 3 雷达接收光路图

Fig. 3 Diagram of receiving optics of the lidar

菲佐干涉仪是激光雷达系统中的核心部件，决定多普勒频移光谱分辨特性的主要参量是<sup>[8]</sup>：平板反射率，平板间隔入射光照射角，平板表面缺陷因子。在一定风速测量动态范围内，用多通道光电探测器阵列对干涉仪光谱成像，为了增强风速测量灵敏度和减小测量误差，需对干涉仪的腔长和反射率进行优化设计。图 4 为 3 km 高度风速误差与平板

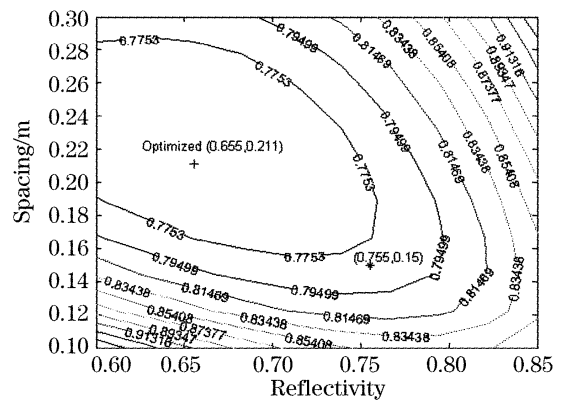


图 4 3 km 高度水平风速误差随菲佐干涉仪反射率和腔长变化(500 个脉冲平均)

Fig. 4 Errors of wind speed with the change of reflectivity and cavity length of Fizeau interferometer using 500 pulses averaged at 3 km

间隔和反射率的关系,得到优化的腔长为 0.211 m,反射率为 0.655,对应风速误差 0.756 m/s。实际设计时考虑到长腔长稳定性控制要求很高,选择了反射率 0.755,腔长 0.15 m,对应风速误差为 0.78 m/s,以满足边界层测量要求。

菲佐干涉仪两平板的夹角  $\alpha$  可以由三个压电陶瓷(PZT)进行控制。楔角的存在使得光程在平板直径方向上有微小的差别  $l(y) = l_0 + y \times \tan \alpha$ ,其中  $l_0$  为腔长最短点的长度, $l(y)$  为距离最短点为  $y$  的腔长。当  $l(y) = m_0 \lambda / 2$  时,在菲佐干涉仪的后板形成干涉极大,其中  $m_0$  为干涉级次,且干涉极大的空间周期为  $\lambda / 2\alpha$ 。由于激光雷达系统对一个自由光谱范围进行成像,且考虑其直径应等同于菲佐干涉仪的一个空间周期,因此根据上式的关系可以计算出,两平板所成的夹角约为  $3 \mu\text{rad}$ 。

多光束菲佐干涉仪的光谱形状参量为<sup>[8]</sup>

$$s = (m_0 \alpha^2)^{1/3} F_R, \quad (3)$$

其中  $F_R$  为有效精细度。当  $s < 0.6$  时菲佐干涉仪光谱与法布里-珀罗标准具相似,且  $s$  越小,光谱形状越与艾里光谱接近。将所用菲佐干涉仪的参量带入(3)式可知, $s$  远小于菲佐干涉仪产生次级极大的阈值,再考虑干涉仪其他因素引起的光谱加宽,因此本激光雷达系统的菲佐干涉仪光谱可以看作艾里光谱,信号光可以采取正入射方式。

## 4 系统误差分析

系统探测器最好是选用阴极间隔很小的探测器进行探测,但是考虑到造价及其他因素,多通道的光电倍增管阵列不失为较实际的选择。目前选用的器件是滨松(Hamamatsu)的多通道光电倍增管阵列——R5900-L16,其通道数为 16,在 355 nm 处的量子效率为 24%。相邻两阴极的间隔为 1 mm,而每一阴极的宽度为 0.8 mm,因此,相邻两个阴极之间有 0.2 mm 的不敏感区。由于设计的菲佐干涉仪的自由光谱范围较小(1 GHz),再考虑到利用 16 个通道对一个自由光谱范围进行探测,可以近似认为光谱通过率在一个通道探测范围内是恒定不变的,而(2)式也是给出了平均的透射率。不敏感区的存在使后向散射光信号损失了约 20%,影响到系统的信噪比增大了风速测量误差,为定量的估计,采用 H5900-L16 进行探测的可行性,对具体系统的风速测量误差进行了模拟计算。

直接探测多普勒激光雷达接收的后向散射信号光子数可表示为

$$N_s(r) = \epsilon \Delta t \frac{E_0}{h\nu} \frac{A_0}{(r \sec \phi)^2} \eta_0 [\beta_a(r) + \beta_m(r)] \times \Delta r \sec \phi \exp \left[ -2 \int_0^r a(r) dr \sec \phi \right], \quad (4)$$

式中  $A_0$  为接收望远系统的面积, $r$  为垂直高度, $\Delta r$  为垂直方向上探测高度分辨力, $\beta_a(r)$  为  $r$  高度气溶胶后向散射系数, $\eta$  为探测器量子效率, $\eta_0$  为光学效率(不包括干涉仪透射率), $E_0$  为发射激光单脉冲能量, $\epsilon$  为脉冲重复频率, $\Delta t$  为积分时间, $\phi$  为发射激光仰角, $\beta_m(r)$  为大气分子后向散射系数, $a(r)$  为大气总的消光系数,它可以表示为

$$a(r) = s_1 \beta_a(r) + \frac{8\pi}{3} \beta_m(r),$$

其中  $s_1$  为气溶胶消光散射比,本文中选择为 20 sr。气溶胶后向散射截面采用增强型模型,大气分子散射为标准大气,大气参量的选择参考美国国家航空航天局 1976 拟定的目标大气标准,具有一定的代表性。由激光雷达方程计算的单脉冲发射时的气溶胶和分子的散射光子数如图 5 所示。点线和实线给出了不同高度处的气溶胶散射和分子散射信号的总光子个数,但是实际上分子散射光谱和气溶胶散射光谱有很大区别,虚线为考虑光谱宽度和透射率后的分子散射的有效光子个数。

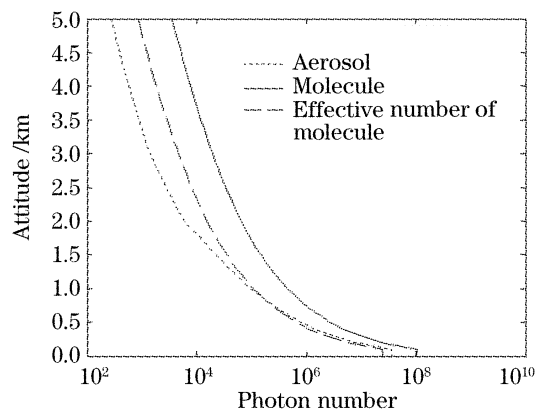


图 5 气溶胶和大气分子散射光子数

Fig. 5 Photon counter reflected from atmospheric molecule and aerosol

图 6 中给出了米氏散射、瑞利散射以及法布里-珀罗光谱之间的相对关系,分子散射是一个包含瑞利散射和布里渊频移的复杂的散射过程,光谱范围很宽可以达到 3.8 GHz。而作为信号光子的气溶胶散射,其散射过程为米氏散射,其光谱可以认为等同于激光线宽(200 MHz)。由于激光雷达系统只对一个自由光谱成像(1 GHz),因此对系统有实际影响的分子散射光子数,是一个自由光谱范围内的光子数,即图 6 中虚线代表的光子数。且由于分子光谱

很宽,可以近似地认为在干涉仪工作谱宽内其光谱是平坦的,在利用气溶胶散射测量风速的激光雷达中可以把分子散射作为背景处理,即分子散射光子数在各个通道上的数目相等。所以,实际分子散射噪声光子数可以根据菲佐干涉仪的自由光谱宽度、瑞利散射光谱、以及大气分子后向散射剖面给出。数值计算接收带宽内的分子散射噪声光子数仅占总分子散射噪声光子总数的 0.2384,每个探测器通道内的分子散射噪声光子数为接收带宽范围内的分子散射噪声光子数除以通道数。

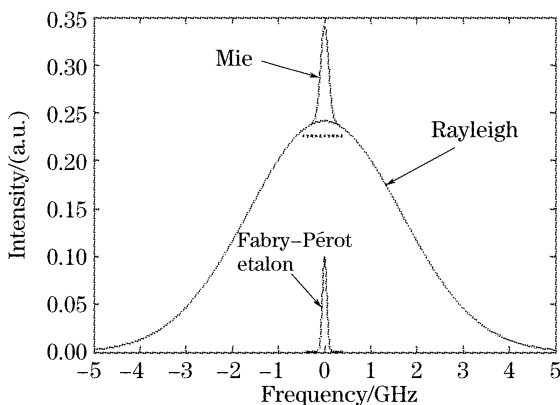


图 6 后向散射及菲佐光谱

Fig. 6 Backscattering and Fizeau spectrum

基于菲佐干涉仪的测风激光雷达的多普勒频率误差可以表示为

$$\delta(\nu - \nu_0) = \frac{c}{\lambda^2} \left[ \sum_{j=1}^K S_j^2 \left( \frac{1}{N} \frac{dN}{d\lambda} \right)_j \right]^{-1/2}, \quad (5)$$

其中  $\lambda$  为波长,  $S_j$  为第  $j$  个通道的信噪比,  $\left( \frac{1}{N} \frac{dN}{d\lambda} \right)_j$  为第  $j$  个通道相对波长变化的测量灵敏度,根据多普勒频率误差可以直接导出系统的风速误差。采用上述的系统参量,模拟计算的使用多通道光电倍增管阵列探测得到的雷达在 30 s 积分时间内风速测量误差如图 7 所示,在 5 km 处风速误差达到最大

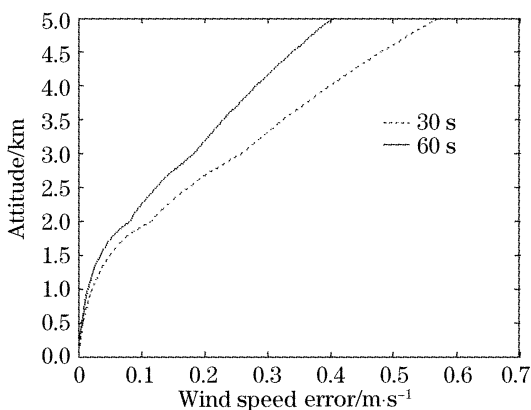


图 7 不同积分时间的风速测量误差

Fig. 7 Wind speed error for different integral time

值,小于 0.56 m/s。

## 5 结 论

介绍了基于菲佐干涉仪的多普勒测风激光雷达的基本原理,并对干涉仪的主要参量进行了优化设计。文中采用多通道光电倍增管阵列代替 CCD 阵列探测器,在实际系统的研制中更为可行。在激光雷达系统分析方面,将分子后向散射当作背景噪声,并考虑了实际多通道光电倍增管阵列的阴极分布。分析结果表明,基于菲佐干涉仪的多普勒测风激光雷达系统在 5 km 以下范围内,30 s 的积分实际时间内风速测量误差可以达到 0.56 m/s,满足边界层风场探测精度的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Weibiao, Zhang Tinglu, Wu Dong *et al.*. Atomic outline for laser Doppler velocimetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(3): 346~350 (in Chinese)  
陈卫标,张亭禄,吴东等. 原子廓线激光多普勒测速仪[J]. *光学学报*, 1997, **17**(3): 346~350
- 2 Jack A. McKay. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. II. The fringe imaging technique [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6487~6493
- 3 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
- 4 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)  
孙东松,杨昭,方建兴. 基于 Fizeau 干涉仪的激光风速测量技术 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 943~946
- 5 Xia Haiyun, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Analysis and performance of the Fabry-Perot etalon for a Doppler direct detection wind lidar [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(1): 29~31 (in Chinese)  
夏海云,孙东松,钟志庆等. 测风激光雷达钟 F-P 标准具的分析及性能检测 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(1): 29~31
- 6 T. L. Killeen, B. C. Kennedy, P. B. Hays *et al.*. Image plane detector for dynamics explorer Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(22): 3503~3513
- 7 T. D. Irgang, P. B. Hays, W. R. Skinner. Two-channel direct-detection Doppler lidar employing a charge-coupled device as a detector [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6): 1145~1155
- 8 Jack A. McKay. Assessment of a multibeam Fizeau wedge interferometer for Doppler wind lidar [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(9): 1760~1767
- 9 T. Eriksen, U. P. Hoppe, E. V. Thrane *et al.*. Rocketborne Rayleigh lidar for in situ measurements of neutral atmospheric density [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(2): 2605~2613
- 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)  
刘继桥,陈卫标,周军等. 基于菲佐干涉仪的边界层测风激光雷达研究 [J]. *激光与红外*, 2005, **35**(2): 74~77