

基于 Fizeau 干涉仪的大气多普勒频移检测技术

王亚慧^{1,2} 刘继桥¹ 陈卫标¹ 毕德仓^{1*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 研究了基于激光条纹成像的风速测量技术,根据 Fizeau 干涉仪透射率函数和大气中的分子散射光谱特征对其优化设计,得到了一套基于任意光束入射的 Fizeau 干涉仪的系统参数。优化设计结果为 Fizeau 干涉仪腔长 12 mm, 平板反射率 0.65。最后模拟了该 Fizeau 干涉仪对分子和气溶胶的联合测量能力。模拟仿真结果表明,在 20 mJ、100 Hz 重复频率和接收口径 200 mm 条件下,风速测量误差为 1 m/s,探测高度为 17.8 km。

关键词 遥感; Fizeau 干涉仪; 分子多普勒频移; 风速

中图分类号 TN24 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0308005

Detection Technology of Atmospheric Doppler Frequency Shift Based on Fizeau Interferometer

Wang Yahui^{1,2} Liu Jiqiao¹ Chen Weibiao¹ Bi Decang¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The wind speed measurement technology based on laser stripe image is studied. According to the Fizeau interferometer transmittance function and atmospheric scattering spectrum function of molecular scattering spectral characteristics for its optimization design, We obtain a set of Fizeau interferometer system parameters based on any incident light beam. The cavity length is 12 mm, the reflectivity is 0.65 from plate and the apex is 10 μ rad. At last, under the condition of 20 mJ, repetition frequency of 100 Hz and receiving diameter of 200 mm, the simulating results indicate that when wind velocity error is 1 m/s, the detection ability is 17.8 km above ground.

Key words remote sensing; Fizeau interferometer; molecular Doppler frequency shift; wind velocity

OCIS codes 280.3640; 280.4750; 280.3340

1 引 言

大气风场在全球大气动力学研究、数值天气预报以及飞行器飞行安全等领域有重要的应用^[1-2]。基于边缘检测的多普勒频率鉴别^[3-5]和基于条纹图像检测的多普勒频率鉴别^[6]是目前直接探测多普勒激光雷达中频率鉴别的两种主要实现方式。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^[7-9],原因是条纹技术能够有效利用气溶胶的散射信号,提高了信号强度和信噪比。条纹技术一般使用高分辨率的法布里-珀罗干涉仪,但是法布里-珀罗干涉仪所成的条纹是圆形,圆形条纹将能量分布在面阵探测器上,其面积大,平均到单个像素上获取的能量小,造成信噪比低,探测能力弱;为此 M J Mc Gill 等^[10]设计了全息方法将圆形条纹变成线状条纹,优点是易于探测,缺点是加入光学元件,设计复杂同时降低了光学效率。法布里-珀罗干涉仪用于边缘检测获取多普勒频移过程中由于分子和气溶胶因光谱线宽不同导致测量灵敏度不同,引入了探测误差,因此需要校正,存在校正残差。Fizeau 干涉仪由于其所成的条纹为等厚的线状条纹,其位置决定多普

收稿日期: 2015-10-08; 收到修改稿日期: 2015-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(61308108)

作者简介: 王亚慧(1990—),女,硕士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: 810797308@qq.com

导师简介: 刘继桥(1978—),男,博士,研究员,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: x_qiao@siom.ac.cn

*通信联系人。E-mail: bidecang@aliyun.com

勒频移,因此气溶胶和分子可以同时作为有用信号进行同步探测,分子所成的条纹较宽,气溶胶所成的条纹较窄,叠加在分子所成的条纹中央附近。气溶胶不会引入误差反而作为有用信号,因此备受关注。Fizeau^[11-13]干涉仪所形成的直线条纹可以与现有的线阵探测器相匹配,因此它在直接探测激光测风雷达中可直接应用线阵探测器,且在探测器面元上获取的能量集中,可探测的距离远,而且光学系统简单。

2014年,WA Ramadan^[14]运用几何光学方法研究了多光束入射光线垂直入射条件下,推导出Fizeau干涉仪的透射率强度分布公式^[9],得到透射率强度分布,但WA Ramadan只考虑在入射光线垂直入射的情况,没有考虑倾斜的情况。

本文研究了基于Fizeau干涉仪的激光条纹成像的多普勒风速测量技术,依据大气中分子回波光谱透射率、条纹对比度和测量灵敏度三个基本条件所形成的评价函数,优化设计了一套基于任意光束入射的Fizeau干涉仪参数;模拟了在该优化参数下的Fizeau干涉仪在多普勒激光雷达系统参数20 mJ单脉冲能量、100 Hz重复频率、200 mm望远镜条件下的探测能力,在1 m/s风速测量精度条件下,测量距离3 km。

2 理 论

Fizeau干涉仪的透射率函数主要考虑反射率和自由光谱范围。至于平面度、粗糙度的影响在于有效反射精细度上,暂不作分析。Fizeau干涉仪由两块成一定楔角的plane-I和plane-II组成,其坐标如图1所示。Plane-II为沿竖直方向,设定为y轴;x轴与plane-II垂直。Plane-I和plane-II的延长线相交点为原点O。Fizeau干涉仪的楔角为 α ,入射光与x轴的夹角 θ ,两平板的平均间距为 L_0 。设任意入射光线以任意角度 θ 入射(与x轴夹角),它在两个反射平面plane-I和plane-II的内表面多次反射,不同反射次数的光线透过Fizeau干涉仪plane-I后会相交于同一点P。

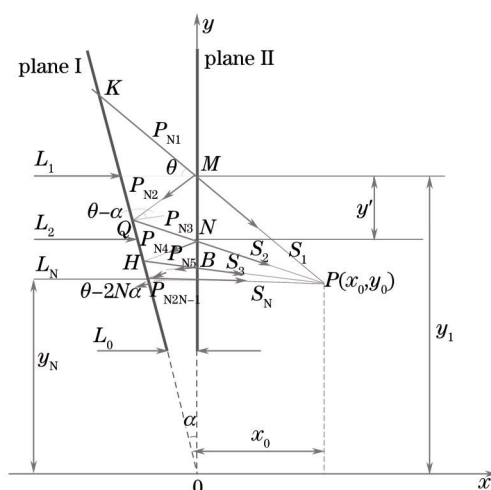


图1 任意光线入射的Fizeau干涉仪多光束干涉原理

Fig.1 Any incident light Fizeau into interferometer multi-beam interference principle

第1条光线透过平板plane-I,在plane-II的M点穿过,经过P点。点P的坐标设为 (x_0, y_0) 。在plane-II上的点M时,两平板的间距设为 L_1 ,M点的纵坐标为 y_1 。第2条光线是透过plane-I并于plane-II的M点反射,然后与plane-I相交于Q点并反射,最后在plane-II的N点透射后,与第1条光线相交点P。在透过plane-II的点N时,两平板间的间距为 L_2 。根据几何关系可以递推出 y_0 与 x_0 的关系。

由图1可知:

$$y_1 = y_0 + x_0 \tan \theta, \tag{1}$$

$$y_2 = y_0 + x_0 \tan(\theta - 2\alpha), \tag{2}$$

$$y' = y_1 - y_2. \tag{3}$$

在三角形 ΔQMN 中,根据余弦定理,有

$$\frac{\overline{MN}}{\sin(2\theta - 2\alpha)} = \frac{\overline{QN}}{\sin[(\pi/2) - \theta]} = \frac{\overline{QN}}{\cos \theta}, \tag{4}$$

$$\overline{MN} = y', \quad (5)$$

$$L_2 = L_0 + [x_0 \tan(\theta - 2\alpha) + y_0] \tan \alpha. \quad (6)$$

根据(1)~(6)式求出 x_0 坐标:

$$x_0 = \frac{L_0 \cos \alpha \sin(2\theta - 2\alpha) + y_0 \tan \alpha \cos \alpha \sin(2\theta - 2\alpha)}{\cos \theta \cos(\theta - \alpha) \tan \theta - \tan(\theta - 2\alpha) \cos \theta \cos(\theta - \alpha) - \tan(\theta - 2\alpha) \tan \alpha \cos \alpha \sin(2\theta - 2\alpha)}. \quad (7)$$

如图 1 所示, 第一条光线即 $N=1$ 时, 其 $\overline{KM} + \overline{MP}$ 光程 P_1 为

$$P_1 = P_{11} + s_1 = \frac{L_1 \cos \alpha}{\cos(\alpha + \theta)} + \frac{x_0}{\cos \theta}, \quad (8)$$

其中 P_{11} 为第一条光线在楔形中的传播路径 \overline{KM} , s_1 为第一条光线在楔形外面到达 P 点的光程 \overline{MP} 。 M 点纵坐标为 y_1 , 此点处两板间隔为 L_1 。由图 1 可以得到以下光学几何坐标关系公式:

$$y_1 = x_0 \tan \theta + y_0, \quad (9)$$

$$L_1 = L_0 + y_1 \tan \alpha. \quad (10)$$

第二条光线即 $N=2$ 时, $\overline{KM} + \overline{MQ} + \overline{QN} + \overline{NP}$ 光程 P_2 为

$$P_2 = P_{21} + P_{22} + P_{23} + s_2 = \frac{L_1 \cos \alpha}{\cos(\alpha + \theta)} + \frac{L_1 \cos \alpha}{\cos(\theta - \alpha)} + \frac{L_1 \cos \alpha}{\cos(\theta - \alpha)} + \frac{x_0}{\cos(\theta - 2\alpha)}, \quad (11)$$

其中 P_{21} , P_{22} , P_{23} 为第二条光线在楔形中的传播路径, s_2 为第二条光线在楔形外面到达 P 点的几何路径 \overline{NP} 。 N 点纵坐标为 y_2 , 且在透射点 N 两板间隔为 L_2 。

由图 1 可以得到以下光学几何路径公式关系:

$$y_2 = x_0 \tan(\theta - 2\alpha) + y_0, \quad (12)$$

$$L_2 = L_0 + y_2 \tan \alpha. \quad (13)$$

第三条光线即 $N=3$, 第三条光线中 $\overline{KM} + \overline{MQ} + \overline{QN} + \overline{NH} + \overline{HB} + \overline{BP}$ 的光程 P_3 为

$$P_3 = P_{31} + P_{32} + P_{33} + P_{34} + P_{35} + s_3 = \frac{L_1 \cos \alpha}{\cos(\alpha + \theta)} + \frac{L_1 \cos \alpha}{\cos(\theta - \alpha)} + \frac{L_1 \cos \alpha}{\cos(\theta - \alpha)} + \frac{L_2 \cos \alpha}{\cos(\theta - 3\alpha)} + \frac{L_3 \cos \alpha}{\cos(\theta - 3\alpha)} + \frac{x_0}{\cos(\theta - 4\alpha)}, \quad (14)$$

其中 P_{31} , P_{32} , P_{33} , P_{34} , P_{35} 为第三条光线在楔形中的传播路径, s_3 为第三条光线在楔形外面到达 P 点的几何路径 \overline{BP} 。透射过的第三条光线与 x 轴间距为 y_3 , 且在透射点两板间隔为 L_3 。

由图 1 可以得到以下光学几何路径公式关系:

$$y_3 = x_0 \tan(\theta - 4\alpha) + y_0, \quad (15)$$

$$L_3 = L_0 + y_3 \tan \alpha. \quad (16)$$

由三条光线的光程可以得到第 N 条光线的光程。几何关系如下:

$$y_N = x_0 \tan[\theta - 2(N-1)\alpha] + y_0, \quad (17)$$

$$L_N = L_0 + y_N \tan \alpha, \quad (18)$$

$$P_N = \sum_{k=1}^{2N-1} P_{Nk} + s_N, \quad (19)$$

$$P_{Nk} = \begin{cases} \frac{L_{K+1/2} \cos \alpha}{\cos[\theta - (K-2)\alpha]}, & k = 1, 3, 5, \dots \text{ and } k \leq \frac{\theta}{\alpha} \\ \frac{L_{K/2} \cos \alpha}{\cos[\theta - (K-1)\alpha]}, & k = 1, 3, 5, \dots \text{ and } k \leq \frac{\theta}{\alpha} \end{cases}, \quad (20)$$

$$s_N = \frac{x_0}{\cos[\theta - 2(N-1)\alpha]}. \quad (21)$$

所以第 N 条光线与第一条光线的光程差为:

$$\delta_N = P_{Nk} - P_1 = \begin{cases} \frac{L_{K+1/2} \cos \alpha}{\cos[\theta - (K-2)\alpha]} - \left[\frac{L_1 \cos \alpha}{\cos(\alpha + \theta)} + \frac{x_0}{\cos \theta} \right], & k = 1, 3, 5, \dots \text{ and } k \leq \frac{\theta}{\alpha} \\ \frac{L_{K/2} \cos \alpha}{\cos[\theta - (K-1)\alpha]} - \left[\frac{L_1 \cos \alpha}{\cos(\alpha + \theta)} + \frac{x_0}{\cos \theta} \right], & k = 1, 3, 5, \dots \text{ and } k \leq \frac{\theta}{\alpha} \end{cases}. \quad (22)$$

将得到的光程差公式带入理想情况下多光束 Fizeau 干涉仪透射率函数,理想情况下多光束 Fizeau 干涉仪透射率函数 T 为

$$T = (1 - A - R)^2 \left| 1 + \sum_{N=1}^n R^N \exp(ik\delta_N) \right|^2, \quad (23)$$

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

3 Fizeau 干涉仪参数分析与优化

3.1 多光束 Fizeau 干涉仪透过频谱分析

Fizeau 干涉仪作为本设计中的鉴频器,其平板反射率 R , 平板间隔 L_0 和顶角 α 决定了干涉仪本身的透射率谱线形状,从而决定了多普勒频移的测量灵敏度。为了优化探测信噪比和测量灵敏度,设定一个优化评价函数: $Q(R, L_0, \alpha)$ 用于平衡大气分子平均透射率 T_{mean} , 大气分子测量灵敏度 S 和大气分子透过谱线对比度 R_c 三者之间关系:

$$Q = T_{\text{mean}} \times S \times R_c, \quad (24)$$

其中,

$$T_{\text{mean}} = f(\nu) \otimes \tau(\nu), \quad (25)$$

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta \nu}, \quad (26)$$

$$R_c = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}}). \quad (27)$$

下面对不同的参数进行了枚举,通过对比得到了优化的 Fizeau 干涉仪的基本技术参数。

3.1.1 优化分析

由于 Fizeau 干涉仪平板的反射率、板间顶角、间距和光束发散角将影响干涉仪的透过谱线的透射率和半峰全宽,所以它们是优化干涉仪的重要参数。4 个重要参数中只有透过光谱的半峰全宽, Fizeau 干涉仪平均透射率与光束发散角是反相关关系。光束发散角越大,半峰全宽越大,平均透射率越低,测量能力越弱,因

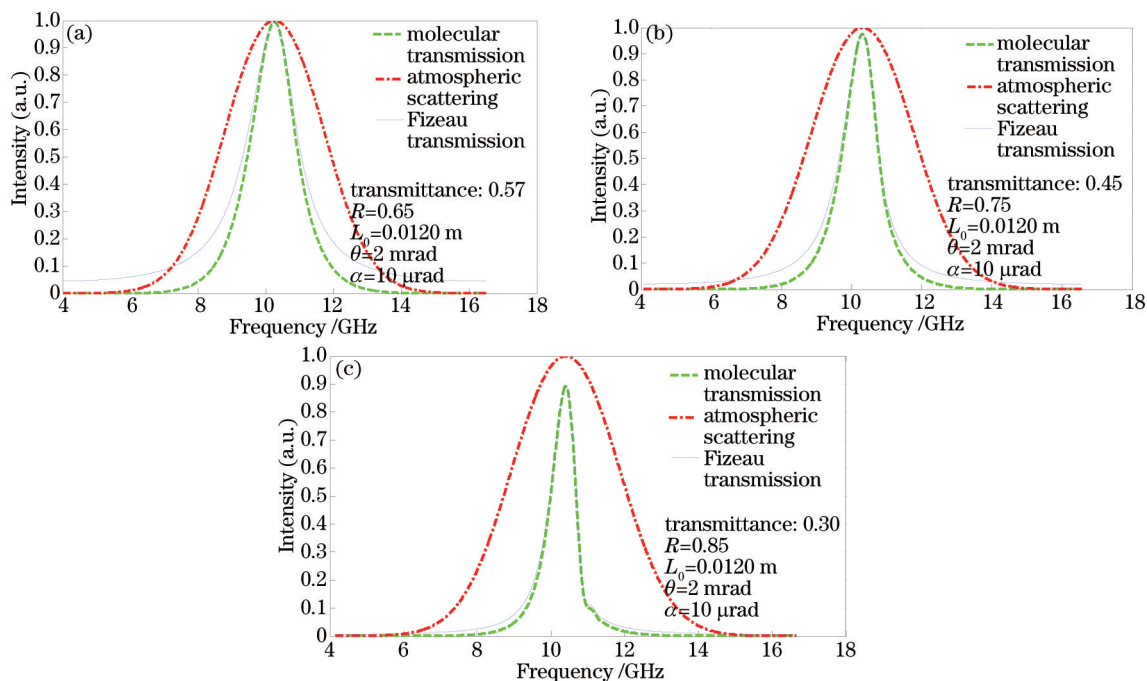


图 2 在不同反射率条件下, Fizeau 透射光谱、大气分子散射光谱、分子透射谱与分子散射光谱的关系。

(a) $R=0.65$; (b) $R=0.75$; (c) $R=0.85$

Fig.2 Under the condition of different reflectivities, Fizeau transmission spectra, atmospheric scattering spectrum, molecular transmission and molecular scattering spectra. (a) $R=0.65$; (b) $R=0.75$; (c) $R=0.85$

此模拟中光束发散角设定为恒定值 2 mrad。

在平板平均间隔 L_0 为 0.0120 m, 入射光与 x 轴的夹角 θ 为 2 mrad, 两平板的夹角 α 为 10 μ rad 的条件下。图 2 比较了在不同反射率下干涉仪光谱和接收信号的光谱形状和透射率。其中大气分子散射曲线是在大气温度为 216 K, 0.086 标准大气压测得。

从图 2 可以看出, 大气散射光谱宽度为 3.5 GHz, 谱线加宽的程度主要取决于 Fizeau 干涉仪的线宽。影响 Fizeau 干涉仪线宽主要参量为: 平板反射率 R , 平板平均间隔 L_0 。减少平板反射率, 可增加干涉仪的光谱宽度, 同时透射率也增加了, 但是对比度降低了。根据比较得出, 随着反射率的增大, 干涉仪的透射率在减少, 所以 R 不宜取得太高。

图 3 比较了在不同平板平均间隔 L_0 下, 干涉仪光谱和接收信号的光谱形状和透射率。

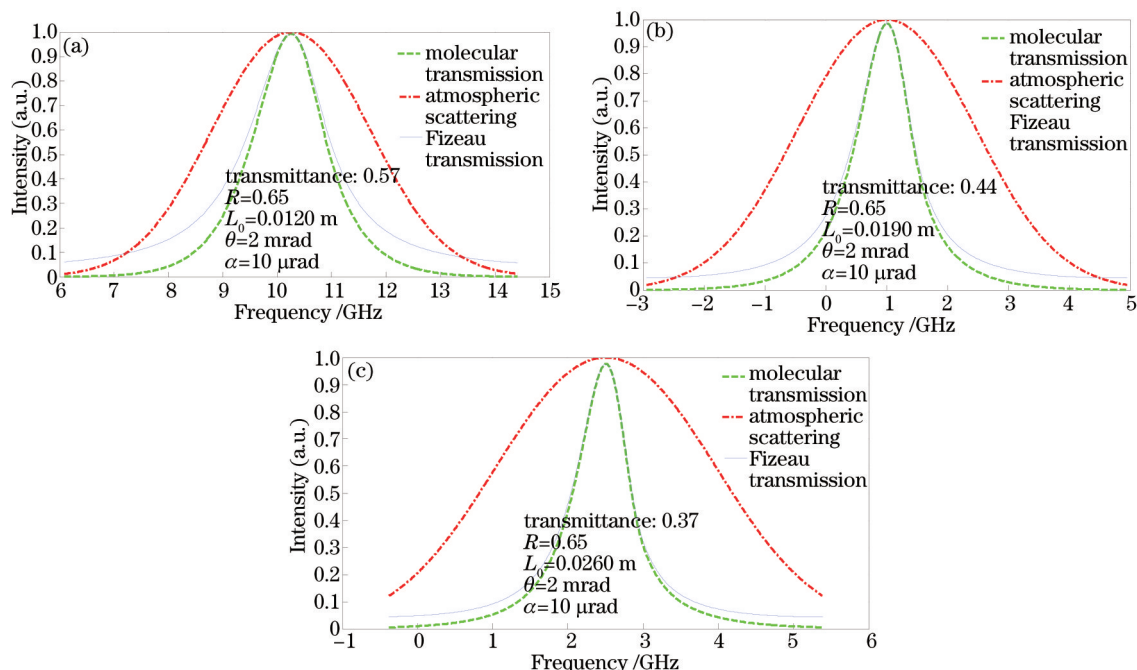


图 3 在不同平板间隔下, Fizeau 透射光谱、大气分子散射光谱、分子透射谱与分子散射光谱的关系。

(a) $L_0=0.0120$ m; (b) $L_0=0.0190$ m; (c) $L_0=0.0260$ m

Fig.3 Under the condition of different cavity lengths, Fizeau transmission spectra, atmospheric scattering spectrum, molecular transmission and molecular scattering spectra. (a) $L_0=0.0120$ m; (b) $L_0=0.0190$ m; (c) $L_0=0.0260$ m

由图 3 可知, 随着平板间隔的增加, 透射率逐渐减少, 由于平板间隔的增大会造成干涉仪不稳定性的增加, 因此在满足风速精度的条件下, 尽可能降低平板间隔。

3.1.2 干涉仪透过频谱对比度分析

在平板间隔 L_0 为 0.0120 m, 入射光与 x 轴的夹角 θ 为 2 mrad, 两平板的夹角 α 为 10 μ rad 的条件下。图 4 比较了在不同反射率下, 激光和大气回波信号卷积后透过谱的对比度。

如图 4 所示, 由于与大气回波信号卷积后形成的 Fizeau 干涉仪的透射谱的最大值与没有与大气回波信号卷积后形成的 Fizeau 干涉仪的透射率的最大值比减少很多, 条纹宽度也增大。同时反射率的增加, 增加了 Fizeau 干涉仪的透射谱的对比度, 但在 $R=0.65$ 时, 对比度为 0.87。所以 $R=0.65$ 是比较合理的值。

从图 5 可以看出对于平板间隔 L_0 , 小的 L_0 自由光谱范围太宽, 一个自由光谱对应速度测量动态范围太大, 大的 L_0 很难稳定控制。综合考虑这些因素, Fizeau 的反射率 $R=0.65$, 平板间隔为 $L_0=0.012$ m

3.2 Fizeau 干涉仪分子测量能力分析

基于上述 Fizeau 干涉仪的参数设计, 直接探测多普勒测风激光雷达的技术参数如表 1 所示。

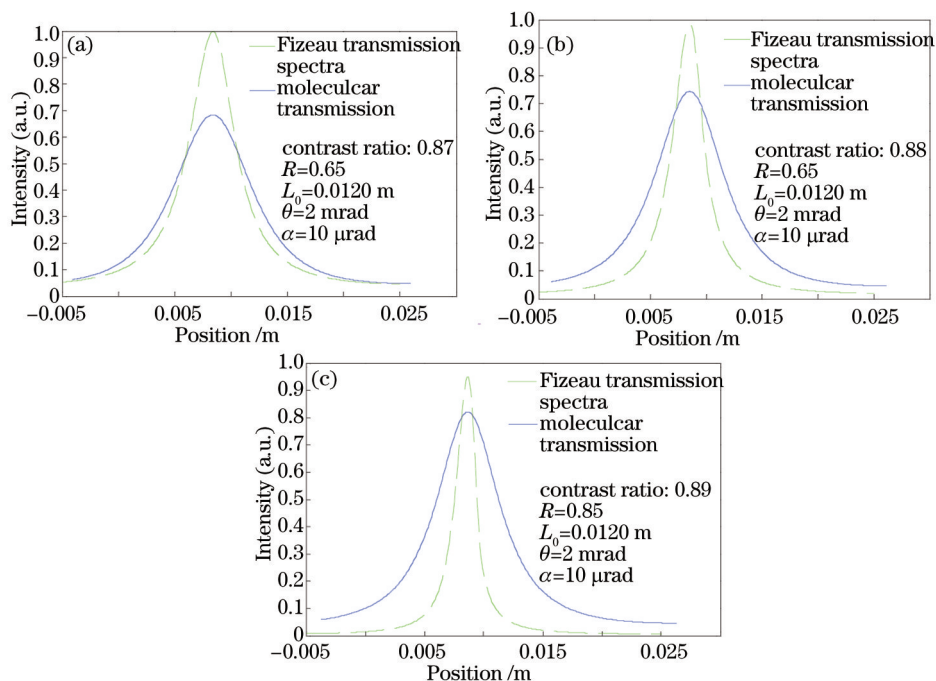


图4 在不同反射率下, Fizeau干涉仪的透射谱的对比度。(a) $R=0.65$; (b) $R=0.75$; (c) $R=0.85$

Fig.4 Under the condition of different reflectivities, the contrast of the transmission spectrum of Fizeau interferometer.

(a) $R=0.65$; (b) $R=0.75$; (c) $R=0.85$

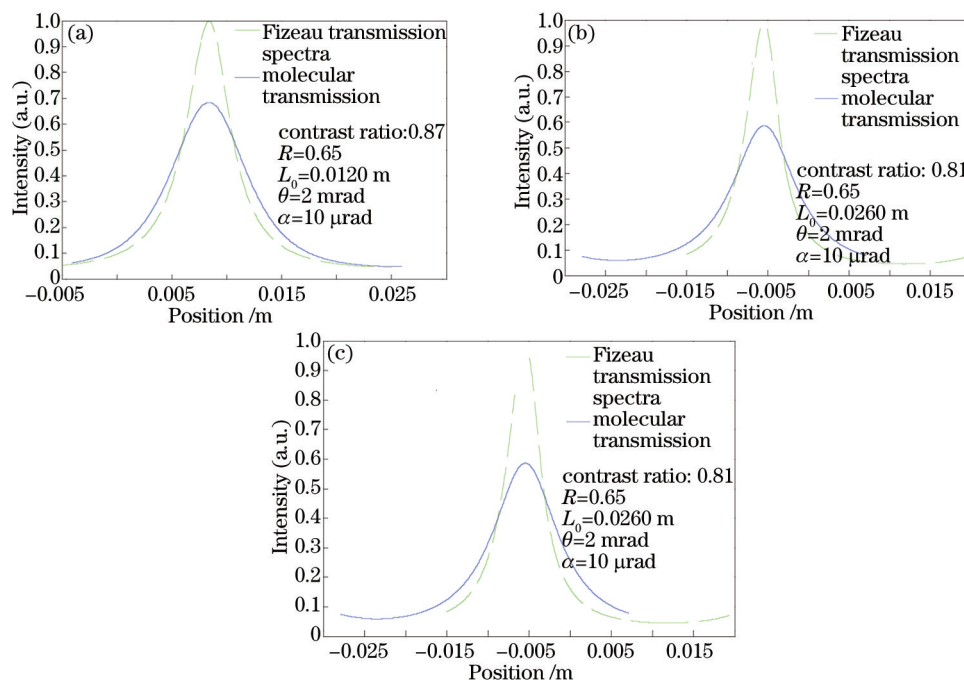


图5 不同平板间隔下, Fizeau干涉仪的透射谱对比度。(a) $L_0=0.0120$ m; (b) $L_0=0.0190$ m; (c) $L_0=0.0260$ m

Fig.5 Under the condition of different cavities length, the contrast of the transmission spectrum of Fizeau interferometer.

(a) $L_0=0.0120$ m; (b) $L_0=0.0190$ m; (c) $L_0=0.0260$ m

直接探测多普勒激光雷达接收的分子的后向散射信号光子数可表示为

$$N_s(r) = \varepsilon \Delta t \frac{E_0}{h\nu} \frac{E}{(r \sec \Phi)^3} \eta_0 \eta \beta_a(r) \Delta r \sec \Phi \exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r) dr \sec \Phi \right], \quad (28)$$

其中 E 为接收望远系统的面积, r 是垂直高度, Δr 为垂直方向上探测高度分辨率, $\beta_a(r)$ 为 r 高度气溶胶后向散射系数, η 为探测器量子效率, η_0 为光学效率(不包括 Fizeau 干涉仪透射率)。 E_0 为发射激光单脉冲能

表1 直接探测多普勒测风激光雷达系统设计参数

Table 1 Design parameters of direct detection Doppler wind lidar system

Parameter	Value	Parameter	Value
Laser wavelength	355 nm	Linear detector quantum efficiency	43%
Single pulse energy	20 mJ	Interferometer flat angle	10 μ rad
Laser line width	180 MHz	Incident light angle	2 mrad
Repetition frequency	100 Hz	Interferometer free spectral range	12.5 GHz
Integration time	10 s	Interferometer apex angle	10 μ rad
Telescope diameter	200 mm	Linear array detector imaging spectrum range	3 GHz
Range resolution	100 m	Number of channels on linear array detector	128

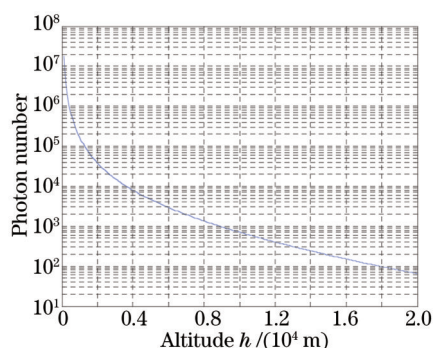


图6 大气分子散射光子数

Fig.6 Atmospheric molecule scattering photon number

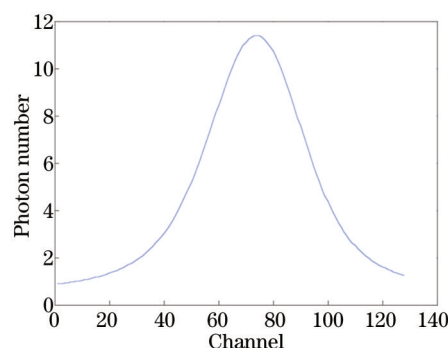


图7 在 17.8 km 处各通道接收到的光子数分布

Fig.7 In the 17.8 km, each channel of the photon number distribution

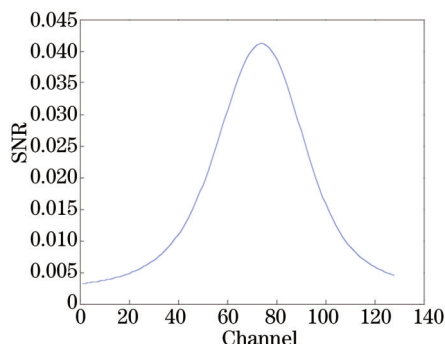


图8 在 17.8 km 处各通道的信噪比分布

Fig.8 In the 17.8 km, each channel of SNR distribution

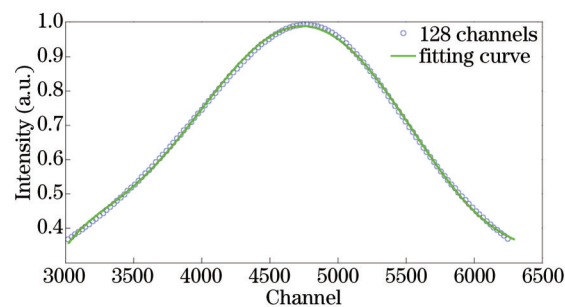


图9 128个通道拟合曲线

Fig.9 128 channels fitting curve

量, ε 为脉冲重复频率, Δt 为积分时间, Φ 为发射激光仰角。 $\alpha(r)$ 为大气总的消光系数。

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。由激光雷达方程计算的单脉冲发射时的分子的散射光子数如图6所示,在单通道信噪比为10的时候,探测的距离为17.8 km,在17.8 km处各个通道接受到的光子数如图7所示,在17.8 km处各个通道信噪比(SNR)如图8所示。

光电探测器优先选用填充因子高的线阵探测器,目前选用的线阵探测器为128 \times 1,在表1中所述的参数下,对探测器进行了抽样拟合如图9所示

由于设计的Fizeau干涉仪的自由光谱范围为10 GHz左右,利用128个通道对透过谱线最大值的 $1/e^2$ 光谱范围进行探测。由于探测器接收到的信噪比增大了风速测量误差,风速测量误差等于在风速改变1 m/s下,实际条纹平移的距离减去拟合后的拟合条纹平移的距离差除以光速。为了定量的估计,在条件为 $R=0.65$, $L_0=0.012$ m对具体系统的风速测量误差进行了模拟计算,在风速1 m/s下,抽样的拟合曲线平移了7.5 μ m,实际曲线平移了8 μ m,理论实际模拟出的风速误差为0.1875 m/s。

4 结 论

对基于 Fizeau 干涉仪多普勒激光雷达进行分子多普勒频移能力研究的技术可行性和性能进行了理论分析和数值模拟。首先,根据光线实际的几何路线推导了利用 Fizeau 干涉仪进行多普勒频移检测的透射率,根据优化评价函数得到优化结果是反射率 0.65,夹角 $10 \mu\text{rad}$,板间平均间距 12 mm。在此基础上,提出了利用 Fizeau 干涉仪和线性探测器,利用图像条纹技术测量大气边界层风场的激光雷达系统参数,并利用该参数进行系统性能模拟。模拟结果显示水平风速测量精度为 1 m/s。理论分析及模拟计算发现影响速度测量精度的主要因素是信号光子数、反射率、平板间隔。小的激光线宽以及适当的倾斜激光在干涉平板上的照射角,也可以进一步提高风速测量精度。因此,Fizeau 干涉仪多普勒激光雷达进行分子多普勒频移能力研究中将有很好的应用前景。

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.
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 Flesia C, C L Korb. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(38): 432–440.
- 3 Chanin, M L, A Garmier, A Hauchecorne, *et al.*. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere[J]. *Geophys Res Lett*, 1989, 16(11): 1273–1276.
- 4 Diao Weifeng, Liu Jiqiao, Zhu Xiaopeng, *et al.*. Study of all-fiber coherent Doppler lidar wind profile nonlinear least square retrieval method and validation experiment[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0914003.
刁伟峰, 刘继桥, 竹孝鹏, 等. 全光纤相干多普勒激光雷达非线性最小二乘风速反演方法及实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0914003.
- 5 Wang Guocheng, Sun Dongsong, Duan Lianfei, *et al.*. Analysis of factors affecting the data accuracy of Doppler wind lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0901003.
王国成, 孙东松, 段连飞, 等. 多普勒测风激光雷达风场数据影响因素分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0901003.
- 6 Abreu V J. Wind measurements from an orbital platform using a lidar system with incoherent detection: an analysis[J]. *Appl Opt*, 1979, 18(17): 2992–2997.
- 7 Jack A Mckay. Modeling of direct detection Doppler wind lidar II . The fringe imaging technique[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(27): 6487–6493.
- 8 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.
- 9 Zhang Feifei, Wang Guocheng, Sun Dongsong, *et al.*. Research on the radial velocity bias in Doppler wind lidar based on Fabry-Perot interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0814002.
张飞飞, 王国成, 孙东松, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪多普勒测风激光雷达径向风速漂移研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0814002.
- 10 M J Mc Gill, M Marzouk, V S Scott III, *et al.*. Holographic circle-to-point converter with particular applications for lidar work[J]. *Opt Eng*, 1997, 36(8): 2171–2175.
- 11 Mckay J A. Assessment of a multibeam Fizeau wedge interferometer for Doppler wind lidar[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(9): 1760–1767.
- 12 P Langenbeck. Fizeau interferometer-fringe sharpening[J]. *Appl Opt*, 1970, 9(9): 2053–2058.
- 13 Abdelsalam D G. Numerical evaluation of the intensity distribution of a multiple-beam Fizeau fringe in reflection at finite number of beams collected[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, 123(21): 1938–1942.
- 14 W A Ramadan. Intensity distribution of Fizeau fringes in transmission with the real path of the interfered multiple-beams[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 58(4): 27–32.

栏目编辑: 何卓铭