

基于法布里-珀罗标准具四边缘技术的双频率多普勒激光雷达研究

沈法华 夏益祺 於爱爱 刘成林

(盐城师范学院物理系, 江苏 盐城 224002)

摘要 对基于法布里-珀罗(F-P)标准具四边缘技术的双频率多普勒测风激光雷达进行研究。简要分析了F-P标准具四边缘双频率风速测量原理。详细介绍了基于F-P标准具四边缘双频率多普勒激光雷达系统结构。对发射激光双频率间隔、入射光束发散角、标准具有效口径和标准具干涉平板反射率等参数进行了详细的优化设计。根据选取的系统参数,对多普勒激光雷达系统的探测性能进行了仿真。仿真结果表明:晴天天气条件下,在 ± 25 m/s的径向风速测量动态范围内,在满足径向风速误差小于2 m/s的情况下,当发射激光仰角为 60° 、距离和时间分辨率分别为60 m和1 min时,系统在晚间和白天的探测高度分别可达到8 km和6.5 km。系统在晚间的整体探测性能明显要优于基于F-P标准具双边缘技术的双频率多普勒测风激光雷达系统。同时,系统的探测性能受天空背景噪声的影响较大,系统在白天工作时应采用窄带宽的滤光片以提高系统的探测性能。

关键词 大气光学;多普勒激光雷达;Fabry-Perot标准具;四边缘技术;双频率

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1001002

Research on Dual-Frequency Doppler Lidar Based on Fabry-Perot Etalon Quad-Edge Technique

Shen Fahua Xia Yiqi Yu Aiai Liu Chenglin

(Department of Physics, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224002, China)

Abstract The dual frequency Doppler wind lidar based on Fabry-Perot (F-P) etalon quad-edge technique is studied. The principle of wind speed measurement by using F-P etalon four edges and two frequencies is analyzed briefly. The system structure of the dual frequency Doppler wind lidar based on F-P etalon quad-edge technique is described in detail. Several parameters, such as the two-frequency interval of outgoing laser, the incident beam divergence angle, the effective aperture of the etalon, and the reflectivity of etalon plates are optimized thoroughly. According to the selected system parameters, the detection performance of the Doppler lidar system is simulated. The simulation results show that on sunny weather conditions, within ± 25 m/s radial velocity measurement dynamic range, the system can achieve 8 km height at nighttime and 6.5 km height at daytime when the laser elevation is 60° , the spatial and temporal resolution are 60 m and 1 min, to meet the radial wind velocity measurement error less than 2 m/s. The overall system performance at nighttime is significantly better than that of Doppler wind lidar system based on F-P etalon double-edge technique. Meanwhile, the system's detection performance is greatly influenced by the sky background noise. Therefore, the system should be working during the day with a narrow bandwidth filter to improve the detection performance of the system.

Key words atmospheric optics; Doppler lidar; Fabry-Perot etalon; quad-edge technique; dual frequency

OCIS codes 010.3640; 280.3640; 280.3340; 120.2230

收稿日期: 2014-04-07; 收到修改稿日期: 2014-06-04

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金(BK2012246)、江苏省高校自然科学基金(12KJB170014)、江苏省大学生创新创业训练计划项目(201310324049X)

作者简介: 沈法华(1981—),男,讲师,博士,副教授,主要从事多普勒测风激光雷达方面的研究。

E-mail: sfh81914@tom.com

1 引 言

从 20 世纪 80 年代开始,直接探测多普勒激光雷达技术得到了迅猛的发展,先后出现了两种多普勒频率检测技术:边缘技术^[1-12]和条纹成像技术^[13-16]。边缘技术最先是基于法布里-珀罗(F-P)干涉仪的单边缘技术^[2]。1998年,Korb等^[3-4]发展了基于F-P干涉仪的双边缘技术。除了采用F-P干涉仪作为鉴频器之外,后来还发展了采用碘分子谱线进行鉴频的方法^[9-11]。2001年Bruneau^[12]提出了采用马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪作为边缘技术的鉴频器。条纹成像技术最先采用的是F-P干涉仪作为鉴频器^[13-14]。由于F-P干涉仪产生的是环状条纹,给直接检测带来不便。2002年,Mckay^[15]分析了采用Fizeau干涉仪作为鉴频器的检测性能,同年Bruneau^[16]提出了采用M-Z干涉仪作为条纹成像技术的鉴频器。

相比较而言,基于F-P干涉仪双边缘技术是目前最为普遍采用的技术。但通过仔细分析发现,该技术只利用了F-P干涉仪透射信号的鉴频能力,而没有利用反射信号的鉴频能力^[3-8]。这样无论从信噪比角度,还是从鉴频灵敏度来看,都可能没有充分挖掘F-P干涉仪的频谱特性。针对这一问题,本课题组先前提出了可同时利用F-P标准具的透射信号和反射信号的基于单F-P标准具的双频率四边缘鉴频光电探测技术^[17]。本文则建立了基于该探测技术的多普勒激光雷达系统,与现有的基于F-P干涉仪的双边缘技术的多普勒激光雷达系统相比,既提高了信噪比,又充分利用了反射信号的鉴频能力,提高了鉴频灵敏度,从而提高了系统的风速测量精度。

2 基于 F-P 标准具四边缘双频率风速测量原理

如图 1 所示,F-P 标准具的任意一级透射谱和反射谱的前后两腰分别相交,形成四个边缘。为充分利用这四个边缘,发射激光频率 ν_{0i} ($i = 1, 2$) 在两个交点附近交替改变,从而形成“双频率四边缘”探测技术。发射激光入射到大气中,遇到有宏观运动速度的气溶胶粒子或大气分子(即风速),由于光的多普勒效应,与发射激光相比,后向散射光的频率 ν_i ($i = 1, 2$) 将存在和激光发射方向风速分量(即径向风速) V_r 相对应的多普勒频移量 $\nu_d = \nu_i - \nu_{0i} = 2V_r/\lambda$,其中 λ 为发射激光波长。这样,后向散射光信

号经过 F-P 标准具的透射率和反射率将发生相应变化。根据透射率和反射率的变化量,及事先已知的透射谱和反射谱可以算得多普勒频移量,进而得到径向风速的大小和方向。

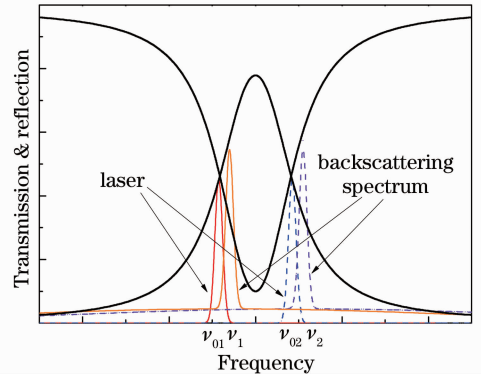


图 1 基于 F-P 标准具四边缘双频率技术风速测量原理

Fig. 1 Wind measurement principle based on F-P etalon quad-edge and dual-frequency technique

频率为 ν 的单色平行光入射到理想的 F-P 标准具的透射率和反射率分别为

$$\mathcal{T}_{id} = \left[1 + 4 \left(\frac{\nu_{FSR}}{\pi \Delta \nu_{1/2}} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi \nu \cos \theta}{\nu_{FSR}} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$\mathcal{R}_{id} = 4 \left(\frac{\nu_{FSR}}{\pi \Delta \nu_{1/2}} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi \nu \cos \theta}{\nu_{FSR}} \right) \left[1 + 4 \left(\frac{\nu_{FSR}}{\pi \Delta \nu_{1/2}} \right)^2 \times \sin^2 \left(\frac{\pi \nu \cos \theta}{\nu_{FSR}} \right) \right]^{-1}. \quad (2)$$

式中 θ 为入射角, $\nu_{FSR} = c/2nd$ 为标准具自由谱间距, d 为平板的间隔, n 为板间的折射率, c 为真空中光速, $\Delta \nu_{1/2}$ 为标准具带宽。

然而,实际入射到 F-P 标准具的光信号是由光纤耦合,并经过准直系统后得到,故不是严格的平行光;同时,无论是发射激光,还是后向散射信号光都不是严格的单色光。此外,实际 F-P 标准具对入射光信号存在吸收和散射等影响,实际标准具的两个平板表面不严格平整,存在一定的缺陷,两平板也不可能做到严格平行,存在一定的不平行度。假设入射到实际 F-P 标准具的光信号全发散角为 $2\theta_0$ 、频谱为高斯分布(因发射激光谱线、米氏后向散射谱和瑞利后向散射谱理论上都近似为高斯分布)且光强均匀,经推导该光信号经过 F-P 标准具后的透射率和反射率分别为^[17]

$$\mathcal{T}(\nu) = T_{av} M(\nu), \quad (3)$$

$$\mathcal{R}(\nu) = 1 - A - \frac{[1 - R(1 - A)](1 - R - A)}{1 - R^2} M(\nu), \quad (4)$$

其中

$$M(\nu) = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} R^m \cos \left[\frac{2\pi m \nu}{\nu_{\text{FSR}}} \left(1 - \frac{\Omega_{\text{FP}}}{4\pi} \right) \right] \exp \left[- \left(\frac{\pi m \Delta \nu_e}{\nu_{\text{FSR}}} \right)^2 \right] \text{sinc} \left(\frac{2m \nu}{\nu_{\text{FSR}}} \frac{\Omega_{\text{FP}}}{4\pi} \right).$$

式中 A 为平板表面金属膜的吸收率, R 为对应波长标准具平板的反射率, $T_{\text{av}} = (1 - R - A)^2 / (1 - R^2)$ 为标准具的平均透射率, $\Omega_{\text{FP}} = 2\pi(1 - \cos \theta_0)$ 为入射光束立体角, ν 为入射光中心频率, $\Delta \nu_e = \sqrt{(\Delta \nu)^2 + (\nu/d)^2 [(\Delta d_D)^2 + (\alpha \rho)^2 / 2]}$ 为等效入射激光 $1/e$ 高度谱宽, 其中 Δd_D 为标准具平板缺陷因子, α 为两干涉平板夹角, ρ 为圆形孔径标准具平板半径, $\Delta \nu$ 为高斯入射光谱 $1/e$ 高度处的宽度。对于发射激光本身或米氏后向散射信号, $\Delta \nu = \Delta \nu_1 = \delta \nu / (4 \ln 2)^{1/2}$, $\delta \nu$ 为激光发射谱半峰全宽 (FWHM); 对于瑞利后向散射信号, $\Delta \nu = \sqrt{\Delta \nu_i^2 + \Delta \nu_r^2}$, 其中 $\Delta \nu_i = (8kT/M\lambda^2)^{1/2}$, T 为大气温度, λ 为激光波长, k 为玻耳兹曼常数, M 大气分子质量。

定义多普勒频率响应函数 $Q(\nu_d)$ 为

$$Q(\nu_d) = \frac{h(\nu_{10} + \nu_d) - h(\nu_{20} + \nu_d)}{h(\nu_{10} + \nu_d) + h(\nu_{20} + \nu_d)}, \quad (5)$$

式中 $h(\nu) = \mathcal{I}(\nu) / \mathcal{R}(\nu)$, 则径向风速为

$$V_r = \frac{\lambda}{2} \nu_d = \frac{\lambda}{2} [Q(\nu_d) - Q(0)] \left[\frac{dQ(\nu_d)}{d\nu_d} \right]^{-1} \Big|_{\nu_d=0}. \quad (6)$$

利用误差传递公式得到径向风速测量误差为

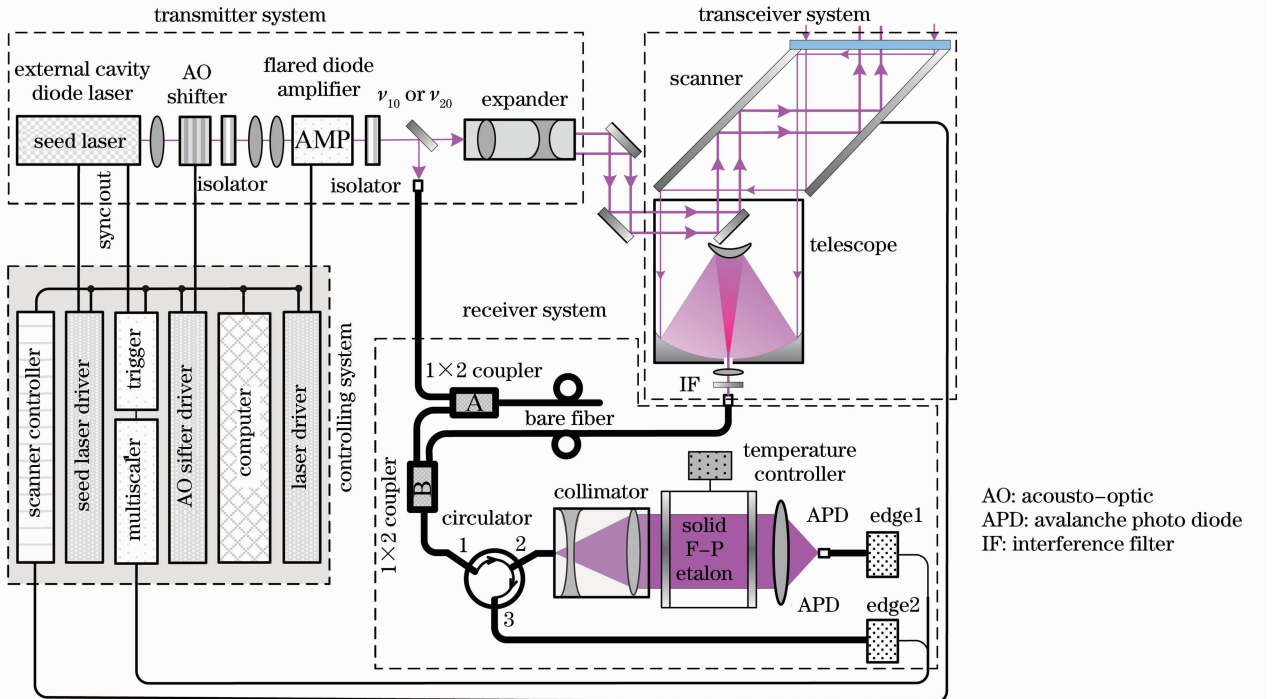


图 2 基于 F-P 标准具四边缘技术的双频率多普勒激光雷达系统结构

Fig. 2 Structure of dual frequency Doppler lidar system based on F-P etalon quad-edge technique

$$\epsilon_V = 1/R_{\text{SN}} \cdot \theta_V. \quad (7)$$

式中 θ_V 为多普勒频率响应函数速度灵敏度, R_{SN} 为系统探测信号总的信噪比。假定参考信号很强, 对发射激光频率的测量可忽略噪声的影响, 分析得到 θ_V 和 R_{SN} 可分别表示为

$$\theta_V = \frac{2}{\lambda} (1 - A) \left(\frac{1}{\mathcal{R}_1} \frac{1}{M_1} \frac{dM_1}{d\nu} - \frac{1}{\mathcal{R}_2} \frac{1}{M_2} \frac{dM_2}{d\nu} \right), \quad (8)$$

$$R_{\text{SN}} = \left[\frac{(\delta I_{t1})^2}{I_{t1}^2} + \frac{(\delta I_{r1})^2}{I_{r1}^2} + \frac{(\delta I_{t2})^2}{I_{t2}^2} + \frac{(\delta I_{r2})^2}{I_{r2}^2} \right]^{-1/2}, \quad (9)$$

式中 $\mathcal{R}_i = \mathcal{R}(\nu_{0i} + \nu_d)$; $M_i = M(\nu_{0i} + \nu_d)$; $I_{ti} = I_t(\nu_{0i} + \nu_d)$; $I_{ri} = I_r(\nu_{0i} + \nu_d)$, $i = 1, 2$ 。 I_{ti} 和 I_{ri} 分别为频率为 ν_i 的后向散射光信号入射到标准具后的透射信号和反射信号。

3 基于 F-P 标准具四边缘技术的双频率多普勒激光雷达系统结构

图 2 给出了基于 F-P 标准具四边缘技术的双频率多普勒激光雷达系统结构。采用外腔式半导体激光器和喇叭形二极管放大器组成主振荡功率放大 (MOPA) 结构的 852 nm 窄线宽稳频可调谐半导体

激光系统作为发射源。在种子光与放大器之间插入声光频移器,每累积一定的脉冲数后,激光发射程序通过控制声光频移器的驱动使出射的脉冲激光频率在 ν_{01} 和 ν_{02} 之间交替改变。发射激光在经过光隔离器之后,再由分束镜分成两束。占有很少能量的反射光作为参考光入射到 1×2 多模光纤耦合器 A 的一个支路端,在经过一段约 100 m 长的裸光纤散射后,后向散射光由耦合器 A 的另一支路端输出,并进入 1×2 多模光纤耦合器 B 的一个支路端。占有绝大部分能量的透射光由扩束镜扩束后,依次经过导光反射镜、望远系统副镜、二维扫描镜,最后以程序设定的角度入射到大气待测区域。其大气后向散射光由望远镜接收,依次经过 852 nm 窄带干涉滤光片和一段约 200 m 长的延时光纤后,进入到耦合器 B 的另一个支路端。从耦合器 B 合束端输出的光信号经过光环路器的 $1 \rightarrow 2$ 路径,由准直系统准直之后正入射到固体 F-P 标准具。其透射光信号利用透镜会聚后由光子计数探测器 APD1 接收;而反射光信号反向经过准直系统会聚后入射到光环路器

的 2 端口,经过光环路器的 $2 \rightarrow 3$ 路径,直接由光子计数探测器 APD2 接收。APD1 和 APD2 的输出信号被双通道光子计数卡采集后,由工控机进行数据处理、存储、风速反演以及结果图像显示等。整个系统的激光器、声光频移器、二维扫描仪、光子计数卡等均通过 RS232 串口由工控机统一控制。

4 系统探测指标及相关参数的优化设计

系统探测技术指标如表 1 所示。表中 RHI 和 PPI 分别表示特定方位角的垂直扫描和特定仰角的锥形扫描方式。在对相关参数进行优化之前,一些参数可以先确定下来。发射激光谱宽 $\delta\nu$ 、平板表面金属膜的吸收率 A 、标准具平板缺陷因子 Δd_D 、两干涉平板夹角 α 等参数总是越小越好。通过调研目前半导体激光器和固体 F-P 标准具的发展水平,合理选取 $\delta\nu = 30$ MHz, $A = 0.1\%$, $\Delta d_D = 4$ nm, $\alpha = 0$ 。此外,F-P 标准具的自由谱间距 ν_{FSR} 和文献[18]的选取原因一致,确定为 3.5 GHz。

表 1 多普勒激光雷达系统探测技术指标

Table 1 Detection technical specifications of Doppler lidar

Parameter	Value
Detection range	50~8000 m
Range resolution	60 m (adjustable)
Wind accuracy	2 m/s at 8 km night; 2 m/s at 6.5 km day
Dynamic range	± 25 m/s
Vertical/horizontal scanning range	$0 \sim 180^\circ / 0 \sim 360^\circ$
Scanning mode	RHI, PPI or four-beam directional stare
Cycle for radial velocity detection	1 min (adjustable)

4.1 发射激光双频率间隔

经过深入研究发现:在综合考虑了实际标准具平板金属膜的吸收损耗、平板表面缺陷以及实际入射光束发散角和频谱谱宽之后,若不考虑由于发散角引起的谱线整体平移,实际和理想情况下的标准具透射谱和反射谱的交点几乎在同一个位置,即理想情况下的标准具透射谱和反射谱的半峰全宽的位置,如图 3 所示。再考虑到系统实际工作过程中便于锁频,将两个发射激光频率 ν_{0i} ($i = 1, 2$) 分别锁定在前后两腰交点处。因此,双频率间隔 $\nu_{02} - \nu_{01} = \Delta\nu_{1/2}$, $\Delta\nu_{1/2}$ 为理想情况下标准具带宽。

4.2 入射光束发散角和标准具有效口径

利用(7)~(9)式,代入已知参数,可以得到相对风速测量误差与干涉平板反射率以及入射光束发散角的关系。图 4 给出了当风速为 15 m/s 的情况下,相对风速测量误差随干涉平板反射率和入射光束发散角变化的等高图。可以明显得出结论:发散角越

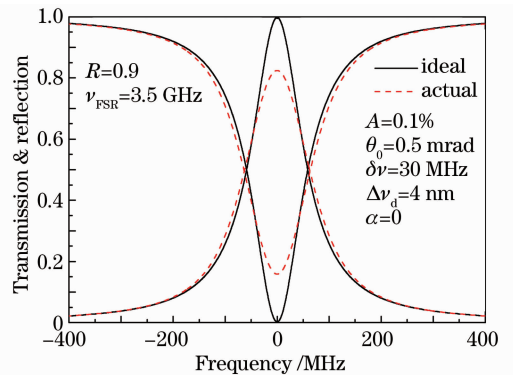


图 3 理想和实际情况下,F-P 标准具的透射谱和反射谱

Fig. 3 Ideal and actual transmission and reflection spectral lines of F-P etalon

大对测量越不利,发散角应尽可能取小。

另一方面,入射到标准具的光束是通过光纤耦合得到的。为了保证信号的接收效率,光束发散角

与标准具有效口径的乘积需要满足^[17]：

$$d_e \theta_0 \geq \arcsin(NA) \cdot d_f \quad (10)$$

式中 NA 为光纤的数值孔径, d_f 为光纤芯径, d_e 为标准具有效口径。

通过调研,目前市场上能适合本系统的耦合光纤主要有三种。分别将三种光纤参数代入(10)式,得到标准具有效口径随入射光束发散角的变化关系如图 5 所示。考虑到价格和小型化的因素,标准具口径取 20 mm。考虑到发散角应尽可能取小,应该选用 $NA=0.2, d_f=50$ mm 的耦合光纤。由此得到,此时光束发散角 $\theta_0=0.5$ mrad。

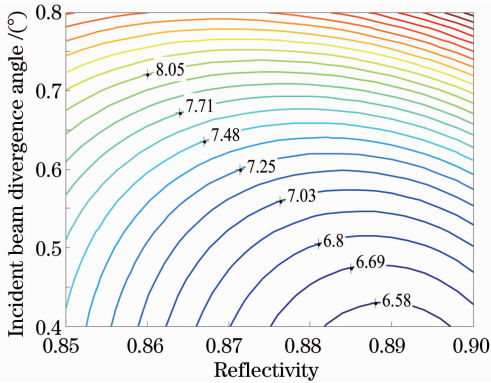


图 4 $V_r=15$ m/s 时,风速相对测量误差随 R 和 θ_0 变化的等高图

Fig. 4 Contour map of relative wind speed measurement error changes with R and θ_0 when $V_r=15$ m/s

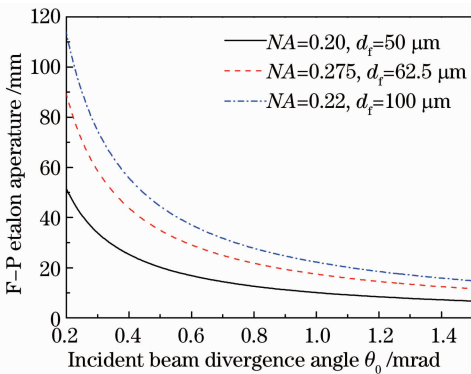


图 5 F-P 标准具有效口径随入射光束发散角的变化关系

Fig. 5 Effective aperture of F-P etalon changes with the divergence angle of incident beam

4.3 标准具干涉平板反射率

同样,将所有已知参数代入(7)~(9)式可得到在不同径向风速的情况下,径向风速相对误差随标准具干涉平板反射率的变化曲线,如图 6 所示。明显可以看出:小风速的情况下,反射率越大,风速误差越小;大风速的情况下,反射率越大,风速误差越大。为了

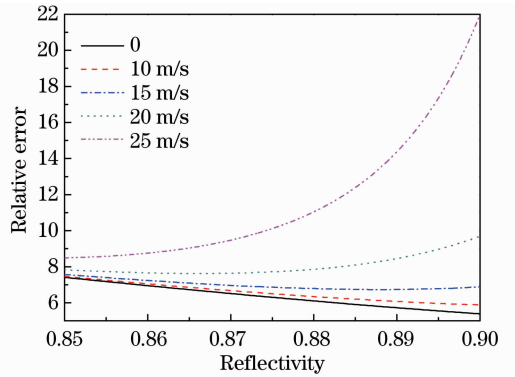


图 6 不同径向风速时,径向风速相对误差随 R 的变化曲线

Fig. 6 Relative errors of radial wind speed change with R for different radial wind speeds

综合考虑系统的探测性能,不以零风速情况下的风速误差最小的原则进行参数优化,而是对不同风速情况下的风速误差取不同的权重后相加,得到加权平均风速误差,再以加权平均风速误差最小的原则进行参数优化。如图 7 所示,是对径向风速为 0、10、15、20、25 m/s 时的风速误差分别取权重 0.5、0.2、0.15、0.1、0.05 后的加权平均风速误差随标准具干涉平板反射率的变化曲线。可以看出,最佳反射率为 0.886,对应的 $\nu_{02}-\nu_{01}=\Delta\nu_{1/2}=135$ MHz。若以零风速情况下的风速误差最小的原则进行参数优化,则只需根据 ± 25 m/s 风速测量动态范围,得到标准具带宽为 117.4 MHz,再根据 $\nu_{FSR}=3.5$ GHz 得到 $R=0.90$ 。为了比较两种优化结果,图 8 给出了不同反射率的情况下,风速相对误差随径向风速大小的变化曲线。明显可以看出,当 $R=0.90$ 时,虽然零风速情况下的风速误差最小,但是误差随风速的增大而迅速增大,相反的,当 $R=0.886$ 时,虽

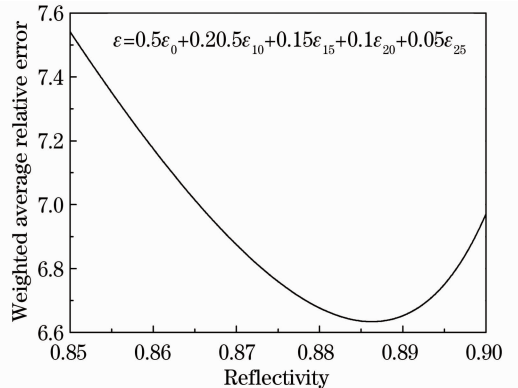


图 7 加权平均风速误差随 R 的变化曲线
Fig. 7 Weighted average wind speed error changes with R

然零风速情况下的风速误差不是最小,但是误差随风速的增大而变化平缓。当径向风速大于 14 m/s 时, $R=0.90$ 时的风速误差就会大于 $R=0.886$ 时的风速误差。零风速情况下, $R=0.886$ 时的风速误差比 $R=0.9$ 时的高 9%。然而,径向风速为 25 m/s 的情况下, $R=0.886$ 时的风速误差比 $R=0.9$ 时的低

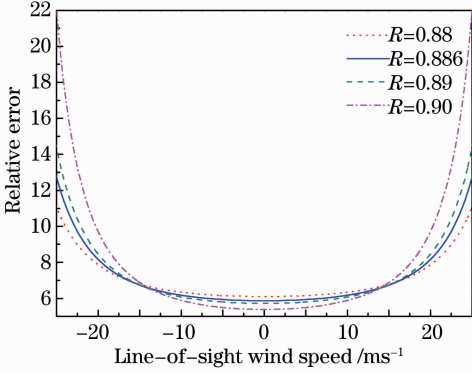


图 8 不同反射率 R 时,风速相对误差随 V_r 的变化曲线

Fig. 8 Relative errors of wind speed change with V_r for different reflectivities R

了 43%。

5 探测性能仿真

激光发射频率为 ν_{0i} 时,对应垂直高度范围为 $z \sim z + \Delta z$,多普勒激光雷达探测器接收到的总光电子数包含了该高度范围内气溶胶和分子后向散射回波信号的光电子数 $N_{ai}(z)$ 和 $N_{mi}(z)$ 、天空背景光电子数 N_b 以及探测器产生的暗计数 N_d ,其计算公式参考文献[17]中已详细给出。假定两个探测器参数完全相同,则光子计数探测器 APD1 和 APD2 接收到的总光电子数分别为

$$N_{ti} = N_{ai} \mathcal{F}^{(a)}(\nu_{0i} + \nu_d) + N_{mi} \mathcal{F}^{(m)}(\nu_{0i} + \nu_d) + N_b T_{av} + N_d, \quad (11)$$

$$N_{ri} = N_{ai} \mathcal{R}^{(a)}(\nu_{0i} + \nu_d) + N_{mi} \mathcal{R}^{(m)}(\nu_{0i} + \nu_d) + N_b(1 - T_{av}) + N_d, \quad (12)$$

式中 $\mathcal{F}^{(a)}(\nu)$ 和 $\mathcal{F}^{(m)}(\nu)$ 分别为气溶胶散射信号入射到标准具的反射谱和透射谱函数, $\mathcal{R}^{(a)}(\nu)$ 和 $\mathcal{R}^{(m)}(\nu)$ 分别为分子散射信号入射到标准具的反射谱和透射谱函数。

相应探测信号对应的信噪比为

$$R_{SNti} = \frac{N_{ai} \mathcal{F}^{(a)}(\nu_{0i} + \nu_d)}{\sqrt{N_{ai} \mathcal{F}^{(a)}(\nu_{0i} + \nu_d) + N_{mi} \mathcal{F}^{(m)}(\nu_{0i} + \nu_d) + N_b T_{av} + N_d}}, \quad (13)$$

$$R_{SNri} = \frac{N_{ai} \mathcal{R}^{(a)}(\nu_{0i} + \nu_d)}{\sqrt{N_{ai} \mathcal{R}^{(a)}(\nu_{0i} + \nu_d) + N_{mi} \mathcal{R}^{(m)}(\nu_{0i} + \nu_d) + N_b(1 - T_{av}) + N_d}}, \quad (14)$$

则总的信噪比为

$$R_{SN} = \left(\sum_{i=1,2} R_{SNti}^2 + R_{SNri}^2 \right)^{-1/2}. \quad (15)$$

采用美国标准大气模型和表 2 所列的系统总体参数,利用(7)~(8)及(15)式模拟雷达系统探测性能。

图 9(a)、(b)分别给出了在晴天天气条件下,发射激光仰角为 60° 、距离分辨率为 60 m、单次测量两个频率总的脉冲累积时间为 1 min 时,晚间和白天 0~10 km 高度的径向风速测量误差 ϵ_q 。作为比较,图中还给出了文献[7]采用的 F-P 标准具双边缘技术时的径向风速测量误差 ϵ_d 。其中假定了两种技术所采用的 F-P 标准具参数和激光源参数相同;双频率四边缘技术的发射激光频率间隔与双边缘技术两干涉仪的透射谱峰峰间距相同;双频率四边缘技术单次测量时两个频率总脉冲累积时间与双边缘技术单次测量时的脉冲累积时间相同。从图 9(a)可以看出,在 0~25 m/s 的径向风速测量动态范围内,基

表 2 多普勒激光雷达系统参数
Table 2 Doppler lidar parameters

	Parameter	Value
Transmitter	Wavelength	852 nm
	Laser linewidth	30 MHz
	Laser energy/pulse	50 μ J
	Laser repetition frequency	6 kHz
Transceiver	Telescope/scanner aperture	20 cm
	Field of view	0.1 mrad
	Optical efficiency	>80%
	Scanning range	$360^\circ \times 90^\circ$
Receiver	Zenith angle	30°
	Etalon free spectral range	3.5 GHz
	Reflection finesse	25.65
	Dual frequency interval	135 MHz
	Detector quantum efficiency	70% at 852 nm
	Detector dark count	100 counts/s
	Filter bandwidth	0.2 nm
	Filter peak transmission	>40%

于 F-P 标准具四边缘技术的双频率多普勒激光雷达晚间的探测性能在 0~10 km 高度范围内明显优于基于 F-P 标准具双边缘技术的双频率多普勒激光雷达,其晚间在 0~8 km 高度范围的径向风速测量误差小于 2 m/s。从图 9(b)可以看出,在 0 和 25 m/s 径向风速情况下,基于 F-P 标准具四边缘技术的双频率多普勒激光雷达白天的探测性能分别在 0~8.6 km 和 0~4.5 km 范围内优于基于 F-P 标准具双边缘技术的双频率多普勒激光雷达;而在 8.6 km 以上和 4.5 km 以上将劣于基于 F-P 标准具双边缘技术的双频率多普勒激光雷达。在 0~25 m/s 的径向风速测量动态范围内,其白天在 0~6.5 km 高度范围的径向风速测量误差小于 2 m/s。综合图 9(a)、(b)可以得出:与基于 F-P 标准具双边缘技术的双频率多普勒激光雷达系统相比,基于

F-P 标准具四边缘技术的双频率多普勒激光雷达系统总的探测信噪比受天空背景噪声的影响要更严重,尤其是在大风速的情况下。因此,基于 F-P 标准具四边缘技术的双频率多普勒激光雷达系统中要选用带宽更窄的干涉滤光片、设计尽可能小的接收视场角以抑制天空背景噪声的影响。图 10 给出了 ϵ_d/ϵ_q 随高度的变化关系。由图可见,在高信噪比的情况下,当径向风速分别为 0 和 25 m/s 时,采用四边缘技术要比采用双边缘技术的风场探测精度分别提高 2.83 和 2.09 倍。当晚间和白天测量 0~3 km 高度范围的风速时,在 0~25 m/s 的径向风速测量动态范围内,四边缘技术要比采用双边缘技术的风场探测精度将分别提高 1.56~2.83 倍和 1.31~2.83 倍。

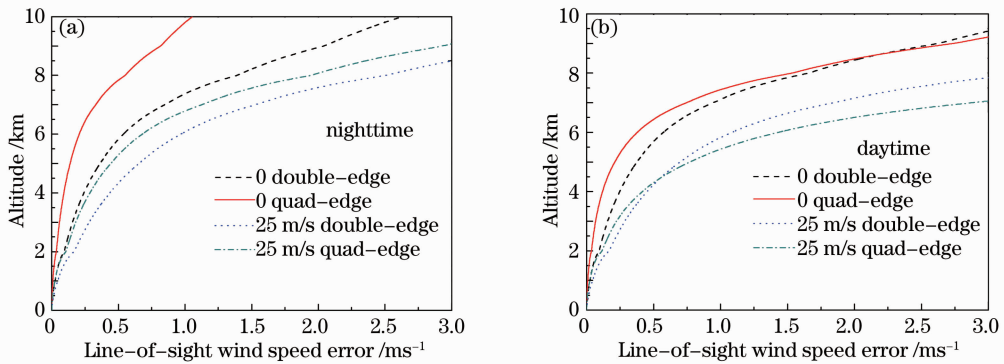


图 9 在晴天天气条件下,(a)晚间和(b)白天米氏散射多普勒激光雷达径向风速测量误差随高度的变化

Fig. 9 Radial velocity measurement errors of Mie Doppler lidar change with height on a sunny day at (a) nighttime and (b) daytime

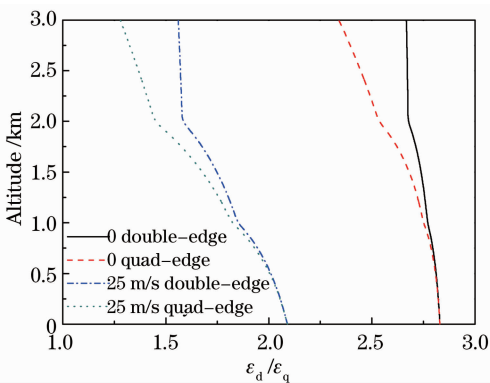


图 10 ϵ_d/ϵ_q 随高度的变化曲线

Fig. 10 Curves of ϵ_d/ϵ_q changes with height

6 结 论

提出的基于 F-P 标准具四边缘技术的双频率多普勒测风激光雷达,与传统的基于 F-P 标准具双边缘技术的双频率多普勒激光雷达相比,不仅结构相对简单,而且在较高信噪比的情况下,系统探测性能

有明显的提高。因此,基于 F-P 标准具四边缘技术的双频率多普勒测风激光雷达系统在低空风切变探测、飞机尾流的跟踪探测、边界层三维风场的常规探测等应用领域有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 M L Chanin, A Garnier, A Hauchecorne, *et al.*. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Geophys Res Lett*, 1989, 16(11): 1273-1276.
- 2 L C Korb, B M Gentry, C Y Weng. Edge technique; theory and application to the lidar measurement of atmospheric winds [J]. *Appl Opt*, 1992, 31(21): 4202-4213.
- 3 L C Korb, B M Gentry, S Li, *et al.*. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(15): 3097-3104.
- 4 C Flesia, L C Korb. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(3): 432-440.
- 5 C Flesia, L C Korb, C Hirt. Double-edge molecular measurement of lidar wind profiles at 355 nm [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(19): 1466-1468.
- 6 B M Gentry, H Chen. Profiling tropospheric winds with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW) [C]. 21st

- International Laser Radar Conference, 2002.
- 7 F H Shen, H K Cha, D S Sun, *et al.*. Low tropospheric wind measurement with Mie Doppler lidar [J]. *Opt Rev*, 2008, 15(4): 204–209.
 - 8 F H Shen, H K Cha, J H Dong, *et al.*. Design and performance simulation of a molecular Doppler wind lidar [J]. *Chin Opt Lett*, 2009, 7(7): 593–597.
 - 9 J S Friedman, C Tepley, P Castleberg, *et al.*. Middle atmosphere Doppler lidar using an iodine-vapor edge filter [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(2): 1648–1650.
 - 10 Z S Liu, D Wu, J t Liu, *et al.*. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(33): 7079–7086.
 - 11 Z S Liu, B Y Liu, S H Wu, *et al.*. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(13): 1485–1487.
 - 12 D Bruneau. Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(3): 391–399.
 - 13 M J McGill, W R Skinner, T D Irgang. Validation of wind profiles measured with incoherent Doppler lidar [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(9): 1928–1939.
 - 14 M Dehring, C Nardell, J Pavlich, *et al.*. Performance and comparison of 532 nm and 355 nm ground winds lidars[C]. *SPIE*, 2003, 4893: 337–347.
 - 15 J A Mckay. Assessment of a multibeam Fizeau wedge interferometer for Doppler wind lidar [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(9): 1760–1767.
 - 16 D Bruneau. Fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(3): 503–510.
 - 17 Shen Fahua, Yu Aiai, Dong Jihui, *et al.*. Dual-frequency quad-edge frequency discrimination photoelectric detection technique based on single F-P etalon [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0312005.
沈法华, 於爱爱, 董吉辉, 等. 基于单 F-P 标准具的双频率四边缘鉴频光电探测技术 [J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0312005.
 - 18 Shen Fahua, Sun Dongsong, Liu Chenglin, *et al.*. A single solid F-P etalon-based dual-frequency Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2944–2950.
沈法华, 孙东松, 刘成林, 等. 基于单固体 F-P 标准具的双频率多普勒激光雷达研究 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 2944–2950.

栏目编辑: 王晓琰