

· 激光技术 ·

文章编号:1001-5078(2004)06-0412-04

1.06 μm 直接接收米散射测风激光雷达的性能分析

孙东松^{1,2}, 钟志庆², 迟如利², 李贤敏², 周 军², 胡欢陵²

(1. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:介绍了基于 Fabry-Perot 标准具的直接接收米散射 1064nm 测风激光雷达的工作原理, 设计了利用该原理进行风场测量的激光雷达, 并估算了该系统的设计性能, 进行了系统测量误差分析, 结果表明:高度在 10km 内和风速测量的动态范围内的误差小于 2m/s, 测量精度随径向测量速度的增大而下降, 在低对流层的测量精度、分辨率和测量时间在目前的系统参数条件下还可以提高。

关键词:测风激光雷达; 多普勒; 米散射; 干涉仪

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Performance and Analysis of 1.06 μm Direct Detection Wind Lidar

SUN Dong-song^{1,2}, ZHONG Zhi-qing², CHI Ru-li², LI Xian-min², ZHOU Jun², HU Huan-ling²

(1. College of Instrument Science & Optical Engi. University of Aeronautical & Aerospace Engineering, Beijing 100083, China;

2. Institute of Anhui Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The 1064nm direct detection Doppler wind lidar based on a Fabry-Perot etalon is described in the paper. The design of the Doppler wind lidar is presented, and the performance and the accuracy of the system are estimated. The simulated results show that the error in the velocity dynamic range is less than 2m/s up to 10km, and the error increases with the large radial velocity. The accuracy, resolution and measurement period can be improved with the current parameters of the Mie lidar system.

Key words: wind lidar; Doppler; Mie scattering; interferometer

1 引言

全球的大气观测经过了几十年的历程,但是在覆盖范围和观测频率上都受到限制,阻碍了有关的气象研究和常规的天气预报的发展,尤其是全球的直接三维风场测量仍是个未解决的问题,世界气象组织提出了全球范围的高分辨率大气风场数据的迫切需要^[1]。

目前可以利用的各种测量手段还不能直接获得海洋、热带地区和南半球上空的三维风场分布^[2],风的数据还主要是利用卫星物质场观测和地转风理论推导出来。用激光作为光源的激光雷达具有空间、时间、角分辨率高等特点。激光雷达可以测量气溶胶和分子散射信号,由此得到各种大气参数,为预

见各种大气变化提供数据。

近十几年发展起来的直接探测工作方式的激光雷达系统简单、技术较成熟、造价相对低、商业开发前景好,同时直接接收多普勒激光雷达可以进行气溶胶和分子散射的多普勒测量^[3],实现全球范围的风场观测。目前,直接探测的测风激光雷达系统在美国和欧洲正迅速发展,直接探测的测风激光雷达系统在上个世纪末只有几个系统工作^[4-7],有资料表明在不到五年的时间里这种系统已经增加了一倍,而且还在迅速扩大。由于直接探测测风激光

作者简介:孙东松(1962-),男,研究员,哈尔滨工业大学理学院博士毕业,长期从事激光雷达的研究和开发工作。

收稿日期:2004-02-23

雷达的多项优点, NASA (美国宇航局) 原定的 SPARCLE (星载相干激光雷达实验) 计划因此取消。

本文介绍了正在进行研制的一台基于气溶胶散射的直接探测测风激光雷达系统, 描述了直接探测激光多普勒测量原理、设计参数选取、系统结构和测量误差分析等, 该研究将为基于分子散射的测风激光雷达和激光雷达进行全球大气风场观测打下基础。

2 直接探测激光多普勒测量原理

激光雷达是由激光发射系统、激光接收系统和后继信号处理系统构成, 我们研制的测风激光雷达系统结构如图 1。发射机采用 Continuum 公司的注入锁定 Nd:YAG 激光器, 波长为 1064nm 的激光束经过 8X 的扩束镜, 通过扫描反射镜指向大气探测区域。大气散射信号经过扫描和望远镜接收系统耦合到光纤一端, 光纤的另一端输出光束经过组合透镜耦合到 Fabry-Perot 标准具。光束在进入标准具之前, 一部分光信号入射到光子计数探测器 (PC) 中, 作为入射总光信号的监测。标准具由两个通道构成, 两个通道的输出光束由一个三角棱镜分离, 分别入射到两个 PerkinElmer 生产的 Si:APD 光子计数探测器 (PC) 表面。三个光子探测器的信号输出经过采集卡送入计算机进行数据处理。

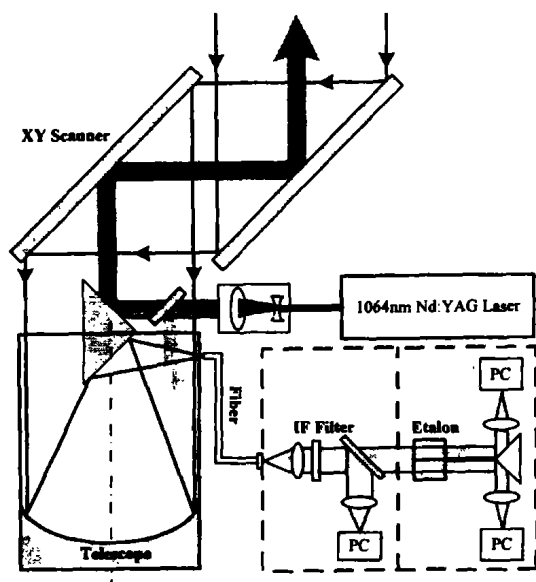


图 1 1064nm 测风激光雷达光学结构

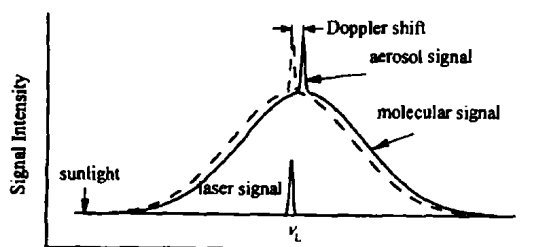


图 2 激光大气散射信号谱特性

发射的激光束被大气中的气溶胶粒子和大气分子散射, 其中一小部分散射光沿发射方向返回激光雷达接收望远镜。由于风的作用或大气粒子的运动, 接收的光信号包含气溶胶和分子散射, 它们的频谱宽度不同, 但是都产生相对于发射激光频率的多普勒频移, 如图 2, 该多普勒频移直接与径向风速的关系为

$$V_r = \frac{\lambda}{2} \Delta v \quad (1)$$

式中, V_r 是径向风速, λ 是激光波长, Δv 是多普勒频移。扫描装置可以沿预先选定的方向发射激光, 径向风速和发射激光方位、光束天顶角的关系 (如图 3) 为

$$V_r = V \cos \alpha \sin \theta \quad (2)$$

式中, V 是水平风层速度大小, α 是风速方位或激光雷达扫描方位角, θ 是激光雷达天顶角。为了求解方程 (2) 中的速度和方位角, 最少需要两个扫描位置, 然后根据矢量合成得到风场的矢量分布。考虑到当风速与扫描方位角垂直时, 径向速度为零 (多普勒频率为零), 这时需要增加另一个方位的测量, 因此在实际测量时, 可以采用连续扫描的测量方式, 并利用多个方位角 (最少 4 个) 的测量结果确定风场矢量。

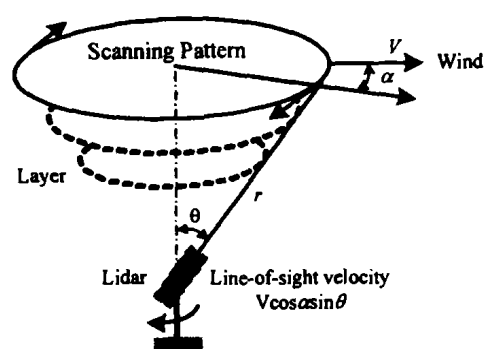


图 3 测风激光雷达扫描方式

对于直接接收系统, 确定激光后向散射信号频率的中心位置的技术有两种: 边缘技术^[3]和干涉条纹成像技术^[2]。干涉条纹技术适合于气溶胶 (米散射) 散射的测量, 而边缘技术对于窄带的气溶胶散射信号和宽带的分子散射信号都比较有效。我们采用双边缘技术和气溶胶探测进行后向散射频谱分析, 测量原理如图 4。高精度高分辨率的两个标准具 Etalon-1 和 Etalon-2 的频谱中心以一定的频率间

隔分开,出射激光频率位于两个标准具频谱的交叉点处,发射激光被大气中运动的分子和气溶胶散射。由于多普勒效应,后向散射光的频谱相对于发射激光有一个频移并进入双标准具检测系统。散射信号谱中的瑞利散射信号谱相对于多普勒频移和气溶胶谱宽很多,在测量的动态范围内可以近似看成均匀分布,即可以近似看成是一种均匀的背景噪声信号。如果多普勒为零或风速为零时,两个标准具的输出信号相平衡或相等;当米散射信号存在多普勒频移时,通过两个标准具的输出信号强度就会有差别,比较它们之间的差别大小就可以直接得到多普勒频移。

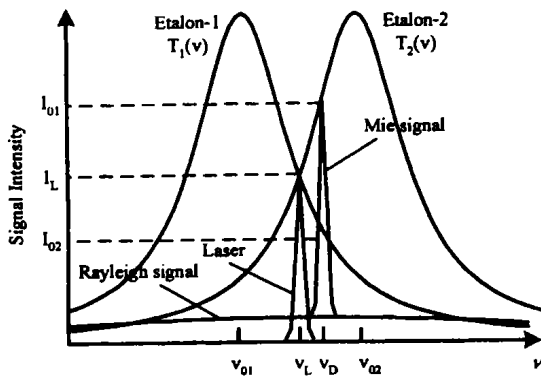


图4 米散射信号的多普勒测量原理图

3 标准具的设计与系统参数

理想的 Fabry-Perot 标准具由两个完全平行平板玻璃组成,当平行光入射时,出射光会产生干涉条纹。如果平板玻璃的间距为 d ,对应入射光波长的反射率为 R ,光在通过标准具的光损耗为 L ,则通过标准具的透过率为

$$h(\lambda) = \left(1 - \frac{L}{1-R}\right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{2\pi nd}{\lambda} \cos\theta\right)} \quad (3)$$

式中, n 是平板间介质的折射率, λ 是入射光波长, θ 是入射光与标准具反射表面法线的夹角, F 是有效精细度(Finesse)。我们采用的双 Fabry-Perot 标准具的结构如图 5,在一对基板上通过镀膜或沉积的方式形成面积大小和形状相同的两个标准具。通过控制镀膜的厚度形成两个频谱中心分离的标准具透过率曲线,如图 4。由于两个标准具固定在一个基板上,在受到环境干扰时它们的中心频率漂移变化相同,于是可以保证标准具的频谱中心间隔不受干扰。

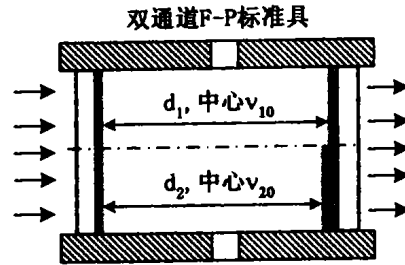


图5 双 Fabry-Perot 标准具的结构

在图 4 的信号分布情况,多普勒频移或被测区域粒子的径向运动速度可以通过归一化接收信号强度确定,即径向速率为

$$v_r = \frac{\lambda (R(v_d) - R(0))}{2 \theta_v R(0)} \quad (4)$$

其中, $R(v_d)$ 和 $R(0)$ 分别是接收光信号和发射激光信号在两个标准具通道的比值,即

$$R(v_d) = \frac{I_1}{I_2} = \frac{T_1(v_1 + v_d)}{T_2(v_2 + v_d)} \quad (5)$$

其中, $T(v)$ 是标准具透过函数和激光脉冲谱的卷积(假设米散射信号谱和发射激光脉冲相同), $v_1 = v_l - v_{10}$ 和 $v_2 = v_l - v_{20}$ 是发射激光中心频率 v_l 分别与两个标准具频谱中心 v_{10} 和 v_{20} 的距离。 θ_v 是多普勒灵敏度,定义为^[8]

$$\theta_v = \frac{1}{R} \frac{dR(v)}{dv} \quad (6)$$

系统的测量误差可以由下式估算,即

$$\varepsilon_v = \frac{1}{\theta_v (S/N)} \quad (7)$$

式中, S/N 是系统总的接收信噪比。

表1 Mie 散射测风激光雷达系统参数

Item		Value
System	Scanning angle	45°
	Vertical resolution	100m
	Max velocity	±50m/s
Optics	Aperture	300mm
	Receiver FOV	0.15mrad
	Coefficient	80%
	Bandwidth	0.5nm
Transmitter	Wavelength	1064nm
	Energy	500mj/pulse
	Line width	0.003cm ⁻¹
	PRF	50Hz
Receiver	Quantum coefficient	18% @ 1064nm
	Etalon peak transmission	>60%
	Etalon bandwidth	170MHz
	Etalon central distance	200MHz

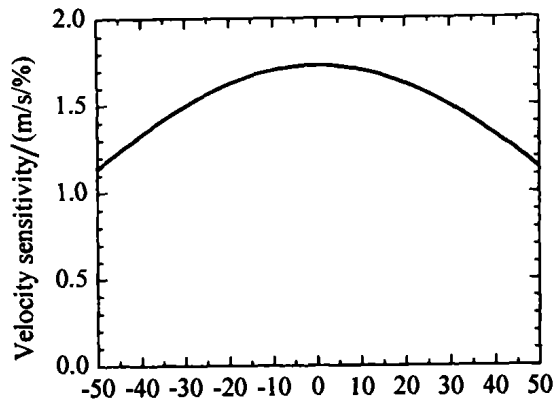


图6 双标准具的多普勒测量灵敏度

对于 1064nm 的激光, 1m/s 的径向速度将产生约 1.88MHz 的多普勒频率。根据系统的速度测量范围为 $\pm 50\text{m/s}$ 的要求(见表 1), 选取双标准具的中心间隔为 200MHz。根据激光线宽和测量的动态范围, 可以得到在最佳速度灵敏度时的标准具带宽为 170MHz, 如图 6。

4 系统测量性能和结果分析

接收信号光子数可以由激光雷达方程得到, 即

$$n = \frac{\eta E \lambda A_r}{hc r^2} \Delta r \beta T_{\text{sys}} T_{\text{am}}^2(r) \quad (8)$$

式中, E 是激光出射脉冲能量, A_r 是接收天线有效面积, η 是探测器的量子效率, T_{sys} 是系统总的光子透过率, T_{am} 是单程大气透过率, β 是大气总的后向散射系数, Δr 是距离分辨率。式(7)中的总信噪比表示为

$$S/N = \sqrt{\sum_i \left(\frac{S}{N}\right)_i^{-2}} \quad (9)$$

式中, i 表示各个探测通道。根据图 1 的探测结构, 我们设计方案有三个探测通道, 两个标准具探测通道和一个人射光信号总强度的监测通道。

根据世界气象组织的建议, 风场数据的最低测量精度为 2m/s 下可以满足气象模型和数值天气预报的要求。利用上述系统参数和标准具的参数, 我们采用美国大气标准和气溶胶模式对风测量的误差进行了模拟计算, 如图 7。由于低大气层气流变化迅速, 我们选取的积分时间不宜过长(60s), 选取垂直分辨率为 100m。因为速度灵敏度随速率的增大而下降(如图 6), 所以大的径向速度对应的测量误差也大。从图中可以看出, 在保证测量精度要求(2m/s)的前提下, 完全可以在测量时间或空间垂直分辨率等方面提高指标。根据计算可以得到以下结论:

- 基于气溶胶散射的径向速度测量在低大气层

($<5\text{km}$) 的测量精度高

- 测量精度受大气风场径向速度的影响, 尤其对于远距离的弱信号影响较大
- 对于边界层近距离测量或信噪比较大的情况, 积分时间或空间分辨率可以进一步提高
- 由于基于相似的测量原理, 该测量方法和结果可以拓展到分子散射的风场测量系统中
- 直接探测系统对光学系统要求较低, 这个测量方案更适用于商业开发, 发展为车载、机载和空载等激光雷达形式

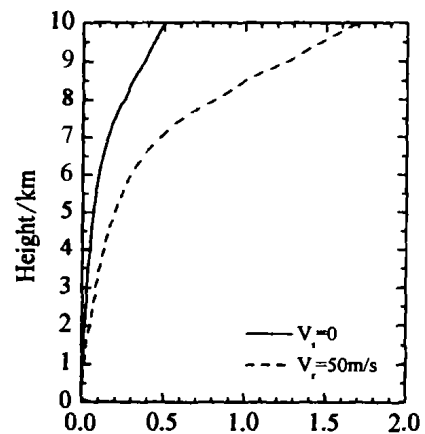


图7 Mie 散射激光测风雷达径向风速测量误差

参考文献:

- [1] Paul Ingmann, Atmospheric Dynamics Mission [R]. ESA Report, SP-1233(4), July, 1999.
- [2] C Flesia, C L Korb. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. Appl. Opt. 1999, 38(3): 432 - 440.
- [3] Dongsong Sun. Mie-Rayleigh Doppler Wind Lidar with Two Double-edge Interferometers [J]. Chinese J. of Lasers B(English Edition), 2002. B11(4): 296 - 300.
- [4] B M Gentry, H Chen, S X Li. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar [J]. Opt. Lett. 2000, 25(17): 1231 - 1233.
- [5] M Dehring, C A Nardell, J Pavlich, et al. Performance and comparison of 532 nm and 355 GroundWinds lidars [J]. SPIE 2002. 4893: 337 - 347.
- [6] C Souprayen, A Garnier, A Hertzog, 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.
- [7] M Imaki, D Sun, T Kobayashi. Direct-detection Doppler lidar for two-dimensional wind field measurements of the troposphere [A]. SPIE 2002, Vol. 4893.
- [8] C L Korb, B Gentry, C Weng. The edge technique theory and application to the lidar measurement of atmospheric winds [J]. Appl. Opt. 1992, 31(21): 4202 - 4213.