

文章编号: 1001-5078(2007)12-1255-04

基于菲索干涉仪多普勒激光雷达的风速及后向散射系数反演

杨春沪¹, 孙东松², 沈法华², 夏海云³, 胡海宁¹

(1 上海电力学院数理系, 上海 200090 2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230034

3 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要: 提出在基于 Fizeau 干涉仪的测风激光雷达的系统中, 对回波信号利用非线性最小二乘法可同时反演得到风速和后向散射系数比。该方法无需确切知道实际的系统参数大小如望远镜视场角、几何重叠因子等。用 Monte Carlo 方法模拟了回波信号并利用该方法进行了风速和后向散射系数比的反演, 结果表明: 在 3 km 高度处, 由信号的散粒噪声引起的相对测量误差小于 0.2%。同时, 又给出了在不同信噪比情况下, 反演精度随之变化的关系图。当峰值信号光子数高于 500 时, 风速和后向散射比误差很小。

关键词: 反演方法; Fizeau 干涉仪; 风速; 后向散射比; 激光雷达

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Inversion of Wind and Backscatter Coefficients from a Fizeau Interferometer Based Doppler Lidar

YANG Chun-hu, SUN Dong-song, SHEN Fa-hua, XIA Hai-yun, HU Hai-ning

(1. Department of Mathematics and Physics Shanghai University of Electric Power Shanghai 200090

2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences Hefei 230034

3. School of Instrument Science and Photoelectronics Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083 China)

Abstract: A nonlinear least squares inversion method is then described that permits the recovery of wind velocity and aerosol molecular ratio without requiring system parameters such as the telescope field of view and laser beam overlap function. The signals simulated by Monte Carlo technique are used to retrieve the wind velocity and aerosol molecular ratio. The results show that the relative measure error is below 0.2% at altitude of 3 kilometers. Simultaneously inversion accuracy is given under various signal noise levels. For a peak signal level of more than about 500 counts the measure error in the fitted parameters is reasonable.

Key words: inversion method; Fizeau interferometer; wind velocity; aerosol molecular ratio; lidar

1 引言

高分辨率、高精度的风场分布测量在气象研究、天气预报、大气环境监测和国防高技术战略战术武器系统的气象保障、靶场气象条件监测、机场切变风预警等方面都具有迫切的需要, 直接探测多普勒激光雷达系统是大气近表层到中间顶层区域水平风场探测的主要手段之一。它有两种不同的多普勒频移

检测技术来测定风速——边缘技术^[1-2]和多通道条纹技术^[3]。条纹技术不需要将气溶胶散射信号和分子散射信号区分, 在实际应用中尤其在地表边界

基金项目: 上海市教委优青基金 (Z-2006-84) 上海市教委一般项目 (06LJ04)

作者简介: 杨春沪 (1980-) 女, 助教, 硕士, 主要研究方向为直接接收激光雷达及微波信号检测。E-mail: yangchunhu_cr@163.com

收稿日期: 2007-06-06

层和气溶胶浓度较高的区域具有一定优势。Fizeau 条纹是线条纹,有利于采用线列探测器直接探测条纹移动^[4]。气溶胶后向散射系数是获得其粒径分布的重要参数。利用准确的气溶胶散射系数可以很好地辨认其所包含的物质。而且气溶胶本身对全球热平衡和人类生存也具有重要意义。因此,对于风场的测量,除得到风速数据以外,气溶胶浓度廓线也是期望能监测到的。而传统的测量气溶胶浓度廓线的方法是独立采用米散射激光雷达。本文首先建立了基于 Fizeau 干涉仪的测风激光雷达的后向散射信号模型,然后采用非线性最小二乘拟合方法同时反演得到风速和分子气溶胶后向散射比。

2 理论模型

利用 Fizeau 干涉仪作为鉴频器、线列 CCD 作为探测器的测风激光雷达系统中,假定干涉仪具有高斯分布的缺陷,大气气溶胶后向散射信号的频谱与发射激光的高斯分布频谱相近似。最终可得到线列探测器每个通道的气溶胶信号透过率^[5]:

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

式中, $P_n = [\sin \theta - \sin(\theta - 2n\alpha)] / (2 \tan \alpha)$, α 为楔角, θ 为入射光在上一块平板上照射角; A 为光束通过干涉仪的光损耗; 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; n_z 为探测器的通道数; $\Delta \nu_{FSR} = c/2L_\sigma$ 为自由谱范围, L_σ 为干涉仪中心腔长, 其对应激光发射频率 ν_0 ; Δd_f 为缺陷因子; $\Delta \nu_1 = \delta / \sqrt{4 \ln 2}$ (δ 为激光发射谱宽); $\Delta \nu_z$ 为探测器探测的总的频率范围; $\phi = n_z [(n_z + 1) \cdot \Delta \nu_z / 2 n_z - (\nu_0 - \nu_c) + 2\nu_r \nu_0 / c] / \Delta \nu_z$ 为透过率频谱的中心, ν_c 为干涉仪中心频率, $2\nu_r \nu_0 / c$ 为多普勒频移量, ν_r 为径向风速。

直接探测多普勒激光雷达接收的气溶胶散射信号光子数可表示为^[6]:

$$N_A(Z) = \epsilon \Delta \frac{E_0}{h\nu} \frac{A}{Z} \eta_0 \eta \beta_a(Z) \Delta Z \cos \phi$$

$$\exp \left[-2 \operatorname{sech} \phi \int_0^Z \alpha(Z) dZ \right] \quad (2)$$

式中, E_0 是发射激光脉冲能量; ϵ 为激光脉冲重复频率; Δ 为积分时间; A 是接收望远镜的有效接收面积; η 是探测器的量子效率; η_0 为光学效率 (不包括 Fizeau 干涉仪透过率); ϕ 为发射激光仰角; Z 为垂直高度; ΔZ 为垂直分辨率; $\beta_a(Z)$ 为 Z 高度气溶胶后向散射系数; $\alpha(Z)$ 为大气总的消光系数。将式 (2) 的 $\beta_a(Z)$ 换为 $\beta_m(Z)$ 就是激光雷达接收的 Z 高度处分子后向散射信号光子数 $N_M(Z)$ 。

则探测器每个通道接收到的气溶胶和分子散射光子数分别表示为:

$$N_A(Z, j) = \frac{N_A(Z)}{n_z} \cdot T_a(j)$$

$$N_M(Z, j) = \frac{N_M(Z)}{n_z} \cdot T_m(j)$$

式中, 将式 (1) 的 $\Delta \nu_1$ 换成 $(\Delta \nu_1^2 + \Delta \nu_M^2)^{1/2}$ 即得 $T_m(j)$ 其中 $\Delta \nu_M$ 为瑞利散射增宽。实际探测器每个通道接收到的光子数为两者之和 (背景和探测器噪声相对很小, 未考虑):

$$N(Z, j) = C(Z) \cdot (1 - A - R)^2 \cdot \left\{ \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N R^{n+m} \cos \left[2\pi \frac{(P_n - P_m) \cdot \Delta \nu_z}{n_z \cdot \Delta \nu_{FSR}} (j - \phi) \right] \cdot \exp \left\{ - \frac{4\pi^2 (P_n - P_m)^2 \Delta d_f^2}{\lambda_0^2} \right\} \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{\pi (P_n - P_m) \Delta \nu}{\Delta \nu_{FSR}} \right]^2 \right\} \cdot \operatorname{sinc} \left[\frac{P_n - P_m}{n_z} \cdot \frac{\Delta \nu_z}{\Delta \nu_{FSR}} \right] \cdot [A(Z) + M(Z) \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{\pi (P_n - P_m) \Delta \nu_M}{\Delta \nu_{FSR}} \right]^2 \right\}] \right\} \quad (3)$$

其中:

$$C(Z) = \frac{\epsilon \Delta E_0 A}{n_z h \nu Z} \eta_0 \eta \Delta Z \cos \phi$$

$$A(Z) = \beta_a(Z) \cdot \exp \left[-2 \operatorname{sech} \phi \int_0^Z \alpha(Z) dZ \right]$$

$$M(Z) = \beta_m(Z) \cdot \exp \left[-2 \operatorname{sech} \phi \int_0^Z \alpha(Z) dZ \right]$$

3 大气回波信号模拟

表 1 为模拟系统参数, 文中采用图 1 所示的模拟软件结构和文献 [7] 的大气模型, 模拟了 3 km 高度处, 探测器每个通道接收到的回波信号光电子数, 如图 2 所示。

表 1 直接接收激光雷达系统参数
Table 1 Parameters for direct detection lidar

	Parameter	value
System	Vertical resolution Δr	30m
	Integration time Δt	5 s
	Zenith angle Φ	45°
Transmitter	Wave length	1064nm
	Line width	80MHz
	PRF ϵ	50Hz
	Energy E_0	170mJ/pulse
Receiver	Optical efficiency η_0	5%
	Detector efficiency η	80%
	Number of channels	16
	Range imaging on detector $\Delta \nu_z$	1 FSR
Fizeau interferometer	FSR	500MHz
	Reflective finesse	9 94
	Etalon defect Δd_0	6 m
	Fizeau diameter ΔY	60mm
	Wedge angle α	8.87 μ rad

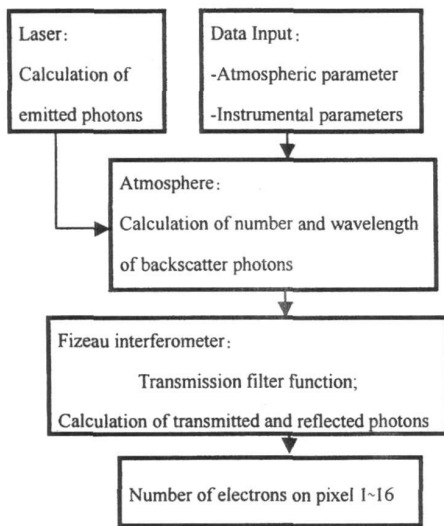


图 1 模拟软件结构图

Fig 1 the structure of the simulation software

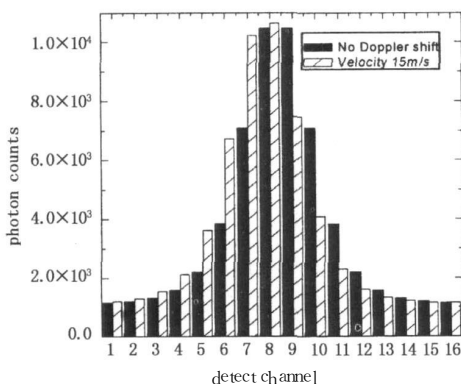


图 2 每个探测器通道的信号光子数

Fig 2 Photon counts on channel 1 ~ 16

4 风速及后向散射系数比的反演方法

将公式 (3) 对相关变量进行泰勒展开^[8]:

$$N(i, j, Z, A, M, j) = N_0(i, j, Z, A_0, M_0, j) + \left. \frac{\partial N}{\partial j} \right|_{j_0} (j - j_0) + \left. \frac{\partial N}{\partial A} \right|_{A_0} (A - A_0) + \left. \frac{\partial N}{\partial M} \right|_{M_0} (M - M_0) \quad (4)$$

探测器通道数为 16 即 $i = 1 \sim 16$ 上式可以按通道数写成矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} N_1 - N_{01} \\ \vdots \\ N_{16} - N_{016} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial N}{\partial j} \right|_{j_0} & \left. \frac{\partial N}{\partial A} \right|_{A_0} & \left. \frac{\partial N}{\partial M} \right|_{M_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial N_6}{\partial j} \right|_{j_0} & \left. \frac{\partial N_6}{\partial A} \right|_{A_0} & \left. \frac{\partial N_6}{\partial M} \right|_{M_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j - j_0 \\ A - A_0 \\ M - M_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

写成更一般的形式为: $\Delta Y = K \Delta X$ 假设每个通道的信号不相关, 利用加权最小二乘法求解方程得:

$$\Delta X^{est} = (K^T W K)^{-1} K^T W \Delta Y \quad (6)$$

其中, W 是权函数矩阵, 它的对角线元素是各个通道信号光子数的倒数, 其余元素为零。最终的径向风速为:

$$U_r = -\frac{\Delta \nu_z}{2\nu_0 n_z} (j - j_0) \quad (7)$$

式中, j_0 为无多普勒频移时的参考谱线中心位置。

由式 (6) 得到 A 和 M 即可以求 $(A+M)/M$ 等同于后向散射系数比 $(\beta_a + \beta_m) / \beta_m$ 。这个比值代表了气溶胶密度。

5 反演结果讨论

大气回波信号的主要噪声是光子的量子随机效应而产生的散粒噪声, 这里采用 Monte Carlo 方法^[9], 首先输入一个信号光谱 (3 km 高度处), 对其加入噪声进行 500 次模拟, 然后采用非线性最小二乘法进行处理数据, 反演出 500 次模拟结果的平均值, 如表 2 所示。可以看出, 该方法反演得到的风速和后向散射系数比与实际值非常接近; 同时, 表 3 又给出了 500 次模拟结果的标准偏差的平均值和理论计算值的比较, 说明了该反演方法的可靠性。

为了进一步证明该反演方法在不同信噪比情况下的适用性, 图 3 分别给出了风速与后向散射比测量精度随接收光子数变化的关系图。仍旧采用上述 Monte Carlo 方法, 可以看出, 接受信号光子数有个

最低阈值,当低于这个阈值的时候,风速和后向散射比将产生较大的反演误差;当峰值信号光子数高于 500 时,风速误差小于 0.78m s^{-1} ,后向散射比误差小于 0.49

表 2 蒙特卡罗方法反演输入参数值与百分误差
Tab 2 recovered input values and percent error obtained with Monte Carlo technique

Parameter	Input Value	Recovered Value	Error/%
U	15	15.007	0.05
A	2.09335×10^{-7}	2.09353×10^{-7}	0.01
M	4.76311×10^{-8}	4.759006×10^{-8}	0.08
$[(A+M)/M]$	5.3949	5.4014	0.12

表 3 蒙特卡罗方法反演标准偏差
Tab 3 recovered standard deviation obtained with Monte Carlo technique

Parameter	Standard Deviation	
	Calculated	Average
σ_v	0.1696	0.1728
σ_A	1.314×10^{-9}	1.298×10^{-9}
σ_m	1.024×10^{-9}	9.820×10^{-10}
σ_{Ratp}	0.109	0.104

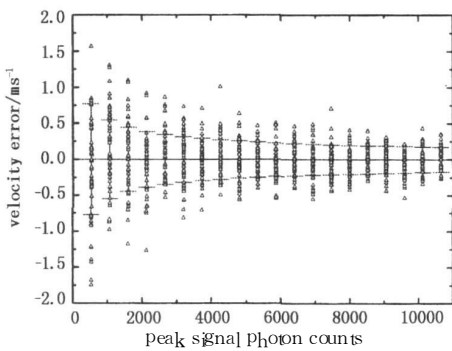


图 3(a) 风速测量精度与信号光子数的关系
Fig 3(a) wind velocity error vs peak signal level

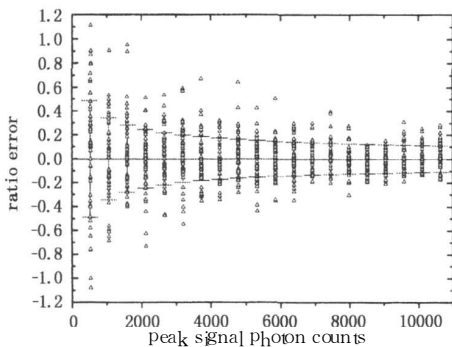


图 3(b) 后向散射比测量精度与信号光子数的关系
Fig 3(b) aerosol molecular ratio error vs peak signal level

5 结论

本文基于 Fizeau干涉仪的测风激光雷达的后向散射信号理论模型基础上,提出了同时反演风速和后向散射系数比的方法。在不需要确切知道实际的系统参数大小和对大气中的分子成分做任何假定,就可以得到风速和气溶胶密度的随高度的廓线。用 Monte Carlo方法模拟回波信号光谱,并进行风速和后向散射系数比的反演,验证了该方法的可行性。

参考文献:

[1] Bruce M Gentry, C L Korh, Edge technique for high-accuracy Doppler velocimetry [J]. *APPL OPT*, 1994, 33(24): 5770—5777.

[2] Dongsong Sun, Zhifeng Zhong, Jun Zhou, et al. Accuracy analysis of the Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar [J]. *Optical Review*, 2005, 12(5): 409—414.

[3] Wilbert R Skinner, Paul B Hayes. Incoherent Doppler lidar for measurement of atmospheric winds [C] // *SPIE*, 1994, 2266: 383—394.

[4] Jack A McKay. Assessment of a multibeam Fizeau wedge interferometer for Doppler wind lidar [J]. *APPL OPT*, 2002, 41: 1460—1767.

[5] 沈法华, 孙东松, 陈敏. 利用 Fizeau干涉仪进行激光风速测量的原理分析 [J]. *量子电子学报*, 2006, 23(3): 330—334.

[6] 刘继桥, 陈卫标, 周军, 等. 基于菲索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.

[7] Y Sano, T Kobayashi, et al. Feasibility study on space lidars for measuring global atmospheric environment [J]. 1995, No.4 Final Report F-82 NIES.

[8] M J McGill, W R Skinner, T D Irigang. 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] 徐钟济. 蒙特卡罗方法 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985, 102—112.