0254-6124/2019/39(1)-076–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YANG Run, XU Jiyao, ZHU Yajun, YUAN Wei. Comparison of retrieval methods for neutral wind based on airglow measurements by a ground-based Fabry-Perot interferometer (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(1): 76-83. DOI:10.11728/cjss2019.01.076

基于 Fabry-Perot 干涉仪气辉观测数据反演中性风速方法比较*

杨 润[1,2] 徐寄遥[1,2] 朱亚军[3] 袁 韦[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(能源与气候研究院 于利希 999035)

摘 要 利用半径法、完整傅里叶级数描述法和非线性回归法分别对安装在河北省境内国家天文台兴隆园区 (40.2°N, 117.4°E) 的 Fabry-Perot 干涉仪 (FPI) 获得的地基中高层大气气辉观测数据进行风速反演. 反演结果表明, 半径法、完整傅里叶级数描述法和非线性回归法均能很好地反演风速, 在误差范围内反演结果存在很好的一致性. 相对于半径法和完整傅里叶级数描述法, 非线性回归方法更完整地利用了观测数据信息, 反演结果可信度较高.

关键词 Fabry-Perot 干涉仪, 风速, 反演方法

中图分类号 P 356

Comparison of Retrieval Methods for Neutral Wind Based on Airglow Measurements by a Ground-based Fabry-Perot Interferometer

YANG Run[1,2] XU Jiyao[1,2] ZHU Yajun[3] YUAN Wei[1]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100010)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*Institute of Energy and Climate Research* (*IEK*-7), *Jülich* 999035)

Abstract Three methods are used to derive neutral winds from mid- and upper atmospheric airglow measurements by a ground-based Fabry-Perot Interferometer (FPI), which was deployed at Xinglong station (40.2°N, 117.4°E) in Hebei province. The three methods are the radius method, the complete Fourier series description method and the nonlinear regression fitting method, respectively. The retrieval results show that the three methods can derive the neutral winds correctly within a given

* 中国科学院战略性先导科技专项 A 类 (XDA17010302), 国家自然科学基金项目 (41674152, 41704151, 41331069) 和国家重点实验室专项基金项目共同资助

2018-01-24 收到原稿, 2018-08-08 收到修定稿

E-mail: 13020008611@163.com

range of error. The nonlinear regression fitting method is recommended among the three methods, because more comprehensive fringe information is taken into account to derive the neutral winds by this method.

Key words Fabry-Perot interferometer, Wind velocity, Retrieval method

0 引言

中高层大气风场是研究热层暴、电离层暴、热层–电离层耦合以及中高层大气动力学的重要物理参数, 也是近地空间环境预报的重要基础参量 [1]. 太阳暴发性事件和地磁活动可以引起高层大气的剧烈扰动, 理论模拟研究和有限的卫星探测结果表明, 在太阳暴发和磁暴期间, 高层大气风场速度从几十米每秒可以突然增加到几百米每秒, 显著影响着热层、电离层以及等离子体层的形态结构 [2−4]. 因此, 中高层大气风场探测是研究高层大气动力学过程的重要手段之一.

FPI 干涉仪具有高分辨率和高灵敏度, 被广泛应用于中高层大气观测. FPI 干涉仪通过观测夜间大气的微弱气辉辐射, 可以获得包含大气风场信息的干涉圆环. 利用 FPI 观测数据反演中高层大气风速和温度已开展了很多研究工作. 1979 年 Hays 等 [5] 利用安装在 Alaska (64.8°N, 147.8°W) 台站的 FPI 观测数据估测了高纬度夜间高层大气风速, 其结果与利用经验模型所得结果不一致, 这可能是由于纬向方向离子拖拽力与压力不平衡导致的. Sipler 和 Biondi 等 [6,7] 利用美国 Laurel Ridge 台站的 FPI 观测磁暴发生期间的气辉辐射, 估测出中纬度高层大气的风速和温度, 发现在磁暴期间大气速度和温度都急速增大, 并且北向风速和南向风速具有很大差异. 他们还在太平洋西部的 Kwajalein 台站进行了 FPI 观测实验, 估测出 F 层的中性风风速和温度. 通过将估测结果与 NCAR 热层环流模型模拟结果进行对比分析, 认为风速差异是由赤道电离层带电粒子 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移引起的. 基于 FPI 对低纬地区中高层大气风场也进行了探测, 巴西 Natal 台站的 FPI 观测到风速存在着 40∼50 min 的周期, 这是重力波存在的良好指标. Nakajima 等 [8] 利用安装在日本 Syowa 观测站的 FPI 数据, 反演中高层大气风速和温度, 反演的风速误差分别小于 35 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 和 25 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 温度误差范围分别小于 170 K 和 100 K. 2012 年 Shiokawa 等 [9] 利用挪威 EISCAT 台站的 FPI 观测氧原子红线 630.0 nm 辐射, 反演的风速存在典型的 2∼13 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 随机误差, 利用氧原子绿线 557.7 nm 辐射反演的风速存在 4∼27 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 的随机误差. 利用日本 Shigaraki 台站 FPI 观测数据反演的风速存在 2∼50 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 的随机误差.

中国在 2010 年 4 月首次实现利用 FPI 光学干涉仪对北京地区上空中高层大气风场测量. 子午工程光学干涉仪安装在河北省境内的国家天文台兴隆园区 (40.2°N, 117.4°E), 对高度在 87, 98 和 250 km 的 OH 892.0 nm, OI 557.7 nm 和 OI 630.0 nm 气辉辐射进行长期连续的地基观测, 获得大量中高层大气风场观测数据 [10]. Jiang 等 [11] 通过将 FPI 数据与雷达测风数据进行对比, 发现 2010 年 4 月有一个频率为 0.2 $\mathrm{d^{-1}}$ 的横波. Liu 等 [12] 利用 2010−2013 年风速数据研究了周期为 4∼19 d 的大气行星波振荡特征. Wu 等 [13] 利用 2012 年兴隆台站 FPI 观测数据发现, 经向风速变化不是由离子漂移引起的, 而是受压力梯度直接影响.

从 FPI 观测所得干涉条纹提取风场信息的反演算法有多种, 已有研究采用了不同反演算法进行风速提取. Shiokawa 等 [9] 结合南北向或东西向观测数据, 利用各级数对应半径获得经向风速或纬向风速. Wang 等 [14] 利用半径法对 FPI 观测数据进行研究, 发现风速反演结果受气辉辐射强度及参与环数影响较大. 如果气辉辐射较弱, 参与的反演环数过少或过多时反演偏差均较大. Makela 等 [15] 利用完整傅里叶级数描述法来描述仪器函数, 将激光校准图像与气辉干涉图像相结合, 从激光校准图像中获得仪器的函数参数, 把这些参数应用到气辉观测到的干涉条纹中, 利用 Levenberg-Marquardt 算法拟合得到风速. 通过这种方法仿真了信噪比对反演参数误差的影响, 研究结果表明信噪比为 1.5 时会引起 5 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 的风速反演误差和 20 K 的温度反演误差. 目前针对这种方法的研究较多, Killeen 等 [16] 利用插值法将由激光干涉图获得的傅里叶系数插值到观测气辉干涉图

样中, 并利用线性最小二乘法进行拟合. 1999 年 Shiokawa 等 [17] 也利用这种方法对 Shigaraki 观测站数据实现了反演自动处理. 2014 年 Harding 等 [18] 采用新的方法, 即非线性回归方法模拟一维干涉条纹, 通过引入点扩展函数对激光干涉图的所有级进行拟合获得相关参数, 并将这些参数应用到气辉干涉图中进行拟合, 进而反演出风速. 利用这种方法进行模拟仿真, 结果表明反演的风速和温度没有严重偏差, 其反演参数不确定度也可以准确估计. 这种方法还需要在其他 FPI 观测数据上进行验证, 截至目前尚未有针对这几种反演算法的比较研究.

本文主要利用半径法、完整傅里叶级数描述法和非线性回归方法分别对安装在国家天文台兴隆园区 (40.2°N, 117.4°E) 的 FPI 获得的地基观测数据进行反演, 并对反演结果进行比较.

1 FPI 干涉仪

位于河北兴隆的地基 FPI 干涉仪由天空扫描系统、激光定标系统、滤波片控制系统、F-P 标准具系统、自动聚焦系统以及数据采集与存储系统组成. 设备运行时各系统之间的配合由控制计算机通过程序实现, 天空扫描系统分别对天顶角为 0° 的天顶方向和天顶角为 45° 的东南西北方向进行观测 [10]. 在大约 98 km 和 250 km 高度处, 由于基态氧原子分别与激发态 O_2^* 和游离氧气离子 O_2^+ 重新结合, 形成了 557.7 nm 绿线和 630.0 nm 红线的微弱气辉辐射 [19], 通过天空扫描系统将气辉辐射信号通过上述 5 个方向导入到 FPI 光路中即可获得干涉图像. 所观测到的干涉圆环图像包含有气辉辐射层风速引起的波长多普勒频移信息和温度引起的线型多普勒增宽信息. 通过对干涉条纹进行处理, 可以反演出中性风速度.

2 三种方法反演原理

2.1 半径法

经向风速与南北方向观测到的干涉圆环半径关系可表示为 [9]

$$v_{\mathrm{n}} = \frac{c}{\cos\alpha}\frac{r_{\mathrm{s}}^2 - r_{\mathrm{n}}^2}{4f^2 - (r_{\mathrm{s}}^2 + r_{\mathrm{n}}^2)}. \tag{1}$$

纬向风速与东西方向观测到的干涉圆环半径关系可表示为

$$v_{\mathrm{e}} = \frac{c}{\cos\alpha}\frac{r_{\mathrm{w}}^2 - r_{\mathrm{e}}^2}{4f^2 - (r_{\mathrm{w}}^2 + r_{\mathrm{e}}^2)}. \tag{2}$$

其中, r_{w}, r_{e}, r_{s}, r_{n} 分别为 FPI 向西、向东、向南、向北观测的干涉圆环半径, c 为光速, f 为焦距, α 为 FPI 观测方向与地面的倾角. 利用观测到的东西或南北方向干涉圆环得到各级对应的半径, 进一步计算可得纬向或经向的中性风速.

利用中值滤波器对获得的干涉图样进行去噪处理. 将二维干涉图像转换为一维干涉图像: (1) 对激光定标干涉图像利用迭代法或拟合圆环法寻找圆心 [20]; (2) 为提高信噪比, 对二维干涉图像进行圆周积分, 将二维干涉图像转化为一维干涉图像. 利用偏差补偿法修正可能由于非线性透镜响应等因素引起的极小值未在同一水平高度上的影响 [20]. 得出随半径变化的一维图像后, 其峰值附近强度满足高斯分布, 利用 $y = a\mathrm{e}^{-(\frac{x-p}{b})^2}$ 进行高斯拟合得到各峰值 (各级) 的对应半径, 通过式 (1) 和式 (2) 即可得到经向或纬向风速.

2.2 完整傅里叶级数描述法

FPI 得到的干涉图像本质上是入射谱线通过有限带宽物理仪器的响应, 即入射谱线与仪器函数的卷积. 标准具和透镜存在缺陷, 这导致仪器函数更为复杂. 利用完整傅里叶级数来描述整个系统的增宽影响, 仪器函数与源函数的卷积可表示为 [14]

$$\begin{aligned} N_i = {} & C_{0i}t\Bigg\{\Delta\lambda_F\frac{\partial\Re}{\partial\lambda}\Big|_0 a_{0i}\Big(\frac{1-R}{1+R}\Big) + \\ & T_{F0}(\lambda)\Re_0 \times \Bigg\{a_{0i} + \\ & \sum_{n=1}^{\infty}\Bigg\{a_{ni}\cos\Big[\frac{2\pi n}{\Delta\lambda_0}(\lambda_l - \lambda_r) + 2\pi n\phi_i\Big] + \\ & b_{ni}\sin\Big[\frac{2\pi n}{\Delta\lambda_0}(\lambda_l - \lambda_r) + 2\pi n\phi_i\Big]\Bigg\}\cdot \\ & \exp[-n^2G^2(T)]\Bigg\}\Bigg\} + B_i. \end{aligned} \tag{3}$$

式中:

$$C_{0i} = 10^6 \times \frac{A_0\Omega_i t Q_i T}{4\pi}$$

为系统灵敏度, 其中 A_0 为标准具有效面积, Ω_i 为第 i 个环形的视场立体角, t 为曝光时间, Q_i 为探测器的

量子效率, T 为光学透过率;

$$\Delta\lambda_F = \int_0^{\infty} T_F(\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

为滤波器的积分宽度, $T_{F0}(\lambda_l)$ 为 $T_F(\lambda)$ 的泰勒展开第一项, 这里 $T_F(\lambda)$ 为滤波器的透射函数; $\Re_0$ 为入射强度, 即辐射源的表面亮度; 修正项 $\left.\dfrac{\partial\Re}{\partial\lambda}\right|_0$ 代表表面亮度随波长的变化, 是连续的背景噪声谱密度; R 为标准具的反射率; 自由光谱区 $\Delta\lambda_0 = \dfrac{\lambda^2}{2ud}$, λ 为观测到的波长, λ_r 为任意的参考波长; $\phi_i = \dfrac{\mathrm{d}u}{\lambda_l}(\theta_l^2 - \theta_i^2)$, 表示第一个圆环与第 i 圆环之间的相位差, 这里 d 为标准具两平行板之间的距离, u 为两平行板之间介质的折射率, θ_i 为第 i 个环形的视场角,

$$\theta_i = \tan^{-1}\Big[\frac{1}{f}\Big(\frac{r_i^2 + r_{i+1}^2}{2}\Big)^2\Big].$$

其中, f 为聚焦透镜的焦距, r_i 为第 i 个环形的内边界的半径.

$$G(T) = \frac{\pi}{c}\sqrt{\frac{2KT}{m}}\frac{\lambda_l}{\Delta\lambda_0} = \frac{\pi\Delta\lambda_T}{\Delta\lambda_0}.$$

$$\lambda_l = \lambda_0\Big(1 + \frac{v}{c}\Big)$$

为考虑了多普勒平移后的中心波长.

$$\Delta\lambda_T = \frac{\lambda_0}{c}\sqrt{\frac{2k_bT}{m}}$$

为热增宽. a, b 为傅里叶系数. n 为傅里叶级数.

对激光校准 (波长为 632.8 nm 的稳频激光) 得到的一维干涉图像某一级, 利用式 (3) 拟合得到傅里叶系数, 进而得到仪器函数. 通过波长变换法确定 630.0 nm 或 557.7 nm 的傅里叶系数 [16], 利用获得的傅里叶系数对全天空一维干涉图像中相应的某一级进行最小二乘法拟合反演出视线风.

2.3　非线性回归方法

在实际情况下, 仪器的增宽函数不能满足仪器函数的所有特征, 至少存在两个偏差. 首先, 由于光的吸收、损失以及其他非理想的情况, 随着半径增大即越接近 CCD 边缘, 条纹衰减得越多 [18]. 可以采用一个二次衰减方程来修正强度, 其次, 条纹的形状变宽变短, 引入一个点扩展函数 $a(s,r)$ 模糊艾里函数, 则修正后的仪器函数为

$$\tilde{\Psi}(r,\lambda) = \int_0^{r_{\max}} a(s,r)\cdot \frac{I_0\Big[1 + I_1\Big(\dfrac{r}{r_{\max}}\Big) + I_2\Big(\dfrac{r}{r_{\max}}\Big)^2\Big]}{1 + \dfrac{4R}{(1-R)^2}\sin^2\Big[\dfrac{2\pi nt}{\lambda}\cos\theta(r)\Big]}\mathrm{d}s. \quad (4)$$

式中, s 是一个与半径 r 具有相同坐标的虚拟变量, 点扩展函数以高斯形式表示, R 为标准具的反射率, n 为介质折射率, I 为强度, t 为标准具间距. 实际中 I_1 和 I_2 通常为负值, $\theta(r) = \tan^{-1}(kr)$, k 可从激光校准图像中估计得到.

最终干涉图像每像素的光子数可表示为

$$N(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{\Psi}(r,\lambda)Y(\lambda)\mathrm{d}\lambda + B. \quad (5)$$

其中, B 为 CCD 偏差, $Y(\lambda)$ 为源函数.

对一维激光干涉图像的所有级数利用式 (4) 和式 (5) 拟合得到仪器参数, 通过仪器参数再拟合气辉干涉图像, 即可反演出风速和温度.

3　反演结果分析

利用半径法、完整傅里叶级数描述法和非线性回归三种不同方法, 对 2010 年 6 月 4 日所观测到的 630.0 nm 氧原子红线辐射和 2010 年 6 月 21 日所观测到的 557.7 nm 氧原子绿线辐射所获得的带有风场信息的干涉圆环数据进行风速反演, 分别得到 250 km 和 98 km 高度处的东西南北向风速, 结果如图 1 和图 2 所示. 由于半径法使用南北方向或东西方向的两组观测数据反演出一个结果, 所以图 1 中南北向的半径法反演结果是同一组数据, 东西向的半径法反演结果也是同一组数据.

从图 1 和图 2 中可以看到, 利用半径法、完整傅里叶级数描述法和非线性回归拟合三种方法均能很好地反演出风速. 利用完整傅里叶级数描述法、半径法和非线性回归法, 反演 2010 年 6 月 4 日 250 km 高度处的风速. 其中: 东向风速变化区间为

$$-15.76 \sim 34.82\,\mathrm{m\cdot s^{-1}},\ -21.01 \sim 8.94\,\mathrm{m\cdot s^{-1}},$$
$$-35.18 \sim 10.36\,\mathrm{m\cdot s^{-1}};$$

西向风速变化区间为

$$-20.11 \sim 12.90\,\mathrm{m\cdot s^{-1}},\ -21.01 \sim 8.94\,\mathrm{m\cdot s^{-1}},$$
$$27.69 \sim 24.31\,\mathrm{m\cdot s^{-1}};$$

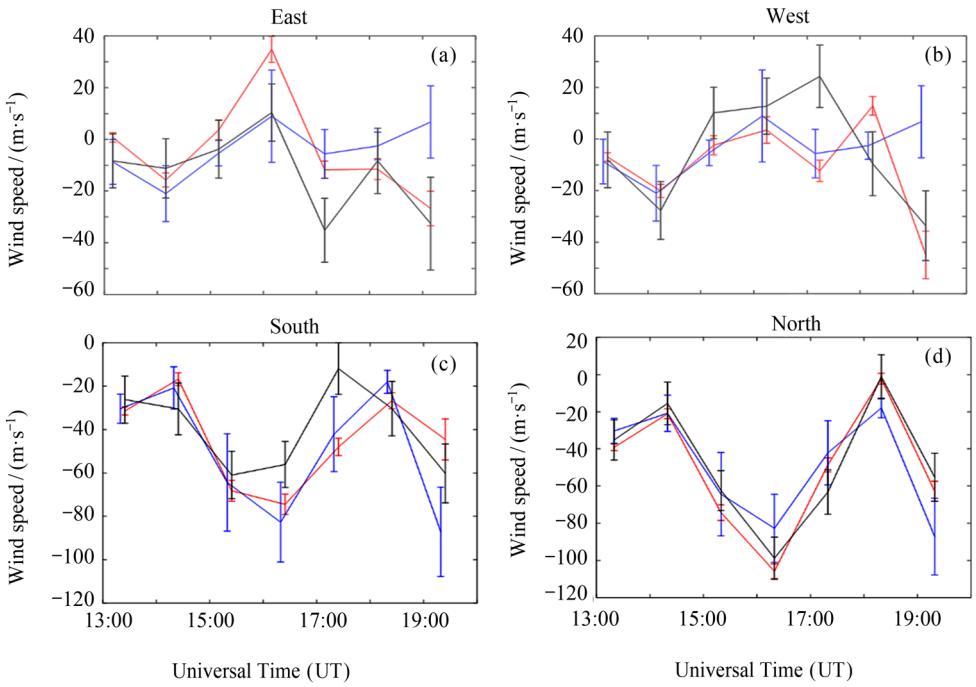


图 1 FPI 在 2010 年 6 月 4 日夜间 250 km 高度处观测的 630.0 nm 氧原子红线在东西南北方向的风速反演结果. 红线代表完整傅里叶级数描述法, 蓝线代表半径法, 黑线代表非线性回归方法. 垂直线段表示风速反演误差

Fig. 1 Retrieval wind of east, west, south and north direction for the radius method (blue line), the complete Fourier series description method (red line) and the nonlinear regression fitting method (black line) by 630.0 nm airglow on 4 June 2010. The vertical line segments represent the wind speed inversion error

南向风速变化区间为

$-74.48 \sim -16.76\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, $-82.71 \sim -18.00\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$,
$-60.97 \sim -11.91\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$;

北向风速变化区间为

$-105.77 \sim -2.29\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, $-82.71 \sim -18.00\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$,
$-98.76 \sim -1.16\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

利用完整傅里叶级数描述法、半径法和非线性回归方法, 反演 2010 年 6 月 21 日 98 km 高度处的东向风速变化区间为

$4.88 \sim 38.98\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, $3.86 \sim 34.93\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$,
$-0.010 \sim 50.16\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$;

西向风速变化区间为

$5.27 \sim 35.013\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, $3.86 \sim 34.93\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$,
$-5.72 \sim 21.00\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$;

南向风速变化区间为

$-49.01 \sim 11.25\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, $-52.94 \sim 3.39\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$,
$-56.33 \sim -5.09\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$;

北向风速变化区间为

$-50.61 \sim 0.45\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, $-52.94 \sim 3.39\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$,
$-41.63 \sim 4.52\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

三种方法反演结果存在很好的一致性.

相对于其他两种方法算法, 半径法比较简单, 只需要进行一次拟合, 但其缺点是需要两次观测数据才能得到一个反演结果, 而两次观测之间不仅存在时间误差, 还存在空间误差. 在 250 km 和 98 km 高度处, 连续两次观测的曝光时间间隔分别为 5 min 和 3 min, 南北或东西方向上, 250 km 高度处两次观测区域相距 500 km, 98 km 高度处两次观测区域相距 196 km. 利用半径法反演风速时, 假设南北或东西方向的观测是在同一时刻进行的并且其观测区域之间风场相同.

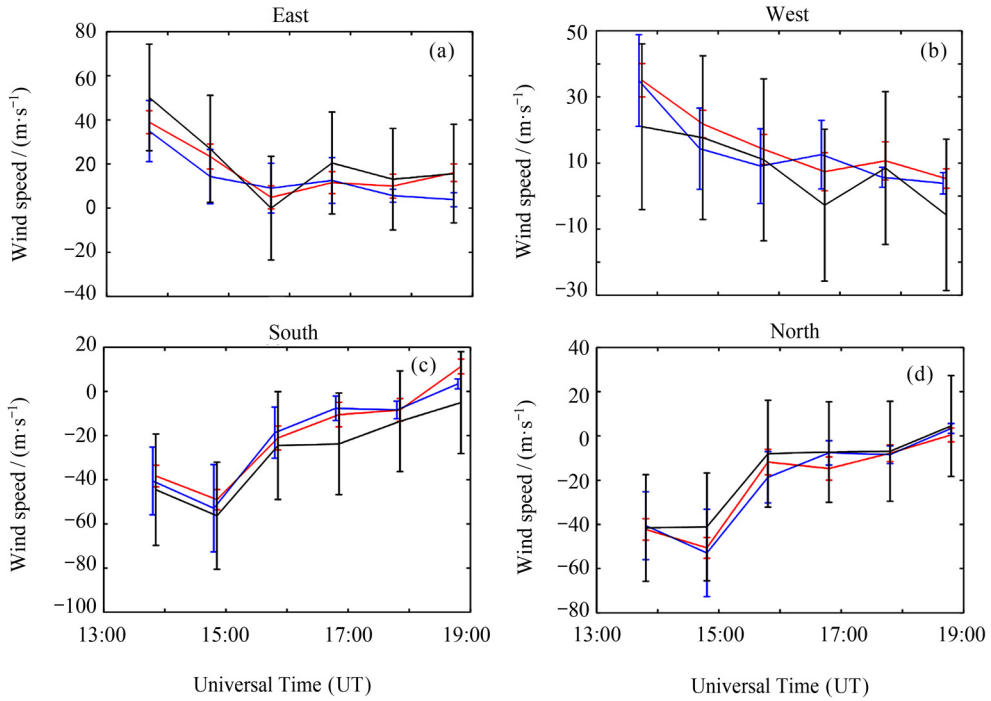


图 2　FPI 在 2010 年 6 月 21 日夜间 98 km 高度处观测的 557.7 nm 氧原子绿线在东 (a) 西 (b) 南 (c) 北 (d) 方向的风速反演结果. 红线代表完整傅里叶级数描述法, 蓝线代表半径法, 黑线代表非线性回归方法. 垂直线段表示风速反演误差

Fig. 2　Retrieval wind of east(a), west (b), south (c) and north (d) direction for the radius method (blue line), the complete Fourier series description method (red line) and the nonlinear regression fitting method (black line) by 557.7 nm airglow on 21 June 2010. The vertical line segments represent the wind speed inversion error

由于时间和空间上的不一致, 导致反演结果误差增大. 对于完整傅里叶级数描述法和非线性回归拟合法, 均需使用稳频激光 (波长 632.8 nm) 定标间接拟合出仪器函数, 再对气辉干涉图像进行拟合. 在两次拟合中, 完整傅里叶级数描述法只需要对一维干涉图中某一级进行拟合, 计算速度较快. 非线性拟合回归法实现了对干涉图样中所有级数的拟合, 更全面包含了仪器的缺陷展宽函数, 但是对拟合的要求更高, 计算速度比完整傅里叶级数描述法慢.

基于对这三种方法的分析, 舍去半径法, 利用完整傅里叶描述法和非线性拟合回归法对 2012 年第 80−100 天的数据进行反演, 对获得的东西南北方向结果以 d 为单位进行平均, 得到东西南北向风速随天数的变化, 如图 3 所示.

从图 3 可以看到: 完整傅里叶级数法反演得到的东西南北向风速的天平均值分别位于

$$-31.59 \sim 44.60\,\mathrm{m\cdot s^{-1}},\ -24.22 \sim 42.32\,\mathrm{m\cdot s^{-1}},$$

$$-64.80 \sim 9.81\,\mathrm{m\cdot s^{-1}},\ -62.77 \sim 2.94\,\mathrm{m\cdot s^{-1}};$$

非线性回归方法反演得到的东西南北向风速的平均值分别位于

$$-50.20 \sim 42.51\,\mathrm{m\cdot s^{-1}},\ -36.96 \sim 39.85\,\mathrm{m\cdot s^{-1}},$$

$$-65.17 \sim 16.17\,\mathrm{m\cdot s^{-1}},\ -58.3 \sim 4.92\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}.$$

完整傅里叶级数法和非线性回归方法的反演结果十分吻合, 验证了 Harding 和 Gehrels 等提出的非线性回归方法的准确性. 从图 3 的南北风速图中明显可以看出, 这 20 天中存在 4~5 天的周期, 而东西向不太明显.

4　结论

利用半径法、完整傅里叶级数描述法和非线性拟合回归法分别对兴隆站 (40.2°N, 117.4°E) FPI 地基观测数据进行反演. 结果表明, 在误差范围内, 三种方法的反演结果具有很好的一致性, 由于时间和空间上的不统一, 半径法反演结果误差较大. 从反演原理

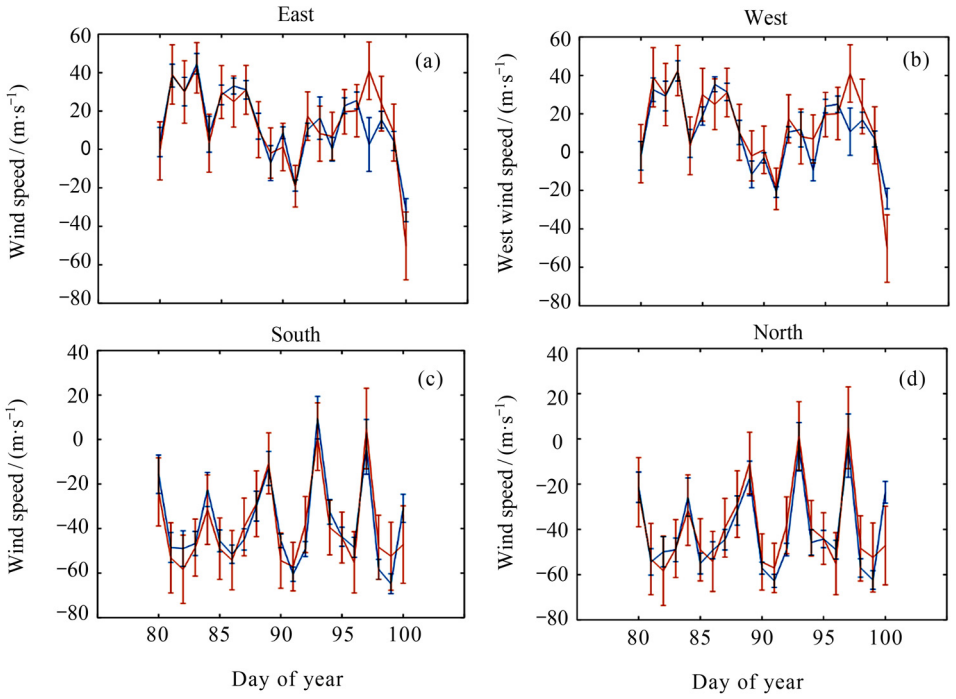


图 3 对 2011 年第 80~100 天观测数据进行反演得到的东西南北向风速. 蓝线代表完整傅里叶级数法, 红线代表非线性回归方法

Fig. 3 Retrieval wind of east, west, south and north direction for the complete Fourier series description method (blue line) and the nonlinear regression fitting method (red line) by 630.0 nm airglow from the 80th to 100th days in 2010. The vertical line segments represent the wind speed inversion error

看, 完整傅里叶级数法仅对干涉图像的某一级进行拟合, 不能真实反映探测数据所包含的完整信息, 其计算速度较快. 非线性拟合回归方法实现了对所有级数的拟合, 更完整地包含了仪器各类缺陷展宽函数, 可以更全面地反映实际观测数据所包含的信息, 可信度较高, 但其缺点是对拟合要求较高, 计算速度慢. 同时验证了 Harding 和 Gehrels 等提出的非线性回归方法结果的准确性.

从三种反演方法原理来看, 半径法只能反演速度而不能反演温度, 完整傅里叶描述法和非线性拟合回归法在反演速度的同时能够反演温度. 这两种方法得到的温度反演精度还有待提高.

致谢 本研究使用了国家重大科技基础设施子午工程科学数据.

参考文献

[1] WANG Houmao, WANG Yongmei. Error calculation and analysis for an improved wind retrieval method based on the ground-based Fabry-Perot interferometer measurements [J]. *Adv. Space Res.*, 2015, **56**(9): 1815-1821

[2] WANG Yingjian, WANG Yongmei, *et al.* Numerical simulation of the wind based on the ground-based Fabry-Perot interferometer measurements in the upper atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2014, **57**(6): 1732-1739 (王英鉴, 王咏梅, 等. 高层大气测风用地基 F-P 干涉仪的数值模拟 [J]. 地球物理学报, 2014, **57**(6): 1732-1739)

[3] WANG Hong. An Study of the Atmospheric Wind Speed Algorithm Based on the Fabry-Perot Interferometer [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014 (王宏. 基于 Fabry-Perot 干涉仪反演大气风速和温度的算法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014)

[4] HEDLUND P R. Using a Bistatic Fabry-Perot Interferometer System to Improve the Estimation of Thermospheric Winds [D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010

[5] HAYS P B, MERIWETHER J W, ROBLE R G. Nighttime thermospheric winds at high latitudes [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1979, **84** (A5): 1905-1913

[6] SIPLER D P, BIONDI M A. Midlatitude F region neutral winds and temperatures during the geomagnetic storm of March 26, 1976 [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1979, **84**(A1): 37-40

[7] BIONDI M A, SIPLER D P. Horizontal and vertical winds and temperatures in the equatorial thermosphere: Measurements from Natal, Brazil during August-September 1982 [J]. *Planet. Space Sci.*, 1985, **33**(7): 817-823

[8] NAKAJIMA H, OKANO S, FUKUNISHI H, *et al.* Observations of thermospheric wind velocities and temperatures by the use of a Fabry-Perot Doppler imaging system at Syowa Station, Antarctica [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(36): 8382-8395

[9] SHIOKAWA K, OTSUKA Y, OYAMA S, *et al.* Development of low-cost sky-scanning Fabry-Perot interferometers for airglow and auroral studies [J]. *Earth Planet. Space.* 2012, **64**(11): 1033-1046

[10] YUAN Wei, XU JiYao, MA RuiPing, *et al.* First observatiom of msopheric winds by a Fabry-Perot interferometer in China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2010, **55**(35): 3378-3383 (袁伟, 徐寄遥, 马瑞平, 等. 我国光学干涉仪对中高层大气风场的首次观测 [J]. 科学通报, 2010, **55**(35): 3378-3383)

[11] JIANG GuoYing, XU JiYao, YUAN Wei, *et al.* A comparison of mesospheric winds measured by FPI and meteor radar located at 40N [J]. *Sci. China Tech. Sci.*, 2012, **55**(5): 1245-1250

[12] LIU Xiao, XU Jiyao. Thermospheric planetary wave-type oscillations observed by FPIs over XingLong and Millstone Hill [J]. *J. Geophys. Res.*. 2014, **119**(8): 6891-6901

[13] WU Qian, YUAN Wei, XU Jiyao, *et al.* First US-China joint ground-based Fabry-Perot interferometer observations of longitudinal variations in the thermospheric winds [J]. *J. Geophys. Res.*, 2014, **119**(7): 5755-5763

[14] WANG Houmao, WANG Yongmei, WANG Yingjian, *et al.* Inversion and error Analysis of mesospheric and Upper-atmospheric winds based on the Fabry-Perot interferometer [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(4): 415-425 (王后茂, 王咏梅, 王英鉴, 等. 地基 Fabry-Perot 中高层大气风速反演及误差分析 [J]. 空间科学学报, 2014, **34**(4): 415-425)

[15] MAKELA J J, MERIWETHER J W, HUANG Y, *et al.* Simulation and analysis of a multi-order imaging Fabry-Perot interferometer for the study of thermospheric winds and temperatures [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(22): 4403-4416

[16] KILLEEN T L, HAYS P B. Doppler line profile analysis for a multichannel Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(4): 612-620

[17] SHIOKAWA K, KADOTA T, EJIRI M K, *et al.* Three-channel imaging Fabry-Perot interferometer for measurement of mid-latitude airglow [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24): 4286-4296

[18] HARDING B J, GEHRELS T W ,MAKELA J J. Nonlinear regression method for estimating neutral wind and temperature from Fabry-Perot interferometer data [J]. *Appl. opt.*, 2014, **53**(4): 666-673

[19] HUANG Y, MEKELA J J, SWENSON G R. Simulations of imaging FabryPerot interferometers for measuring upper-atmospheric temperatures and winds [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(17): 3787-3800

[20] JOSEPH S, MAKELA J J. Fabry-Perot Data Analysis and Simulation for the Renoir Observatories [D]. Illinois: Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008