

doi:10.3788/gzxb20154408.0812001

# 风场探测 Fabry-Perot 干涉仪定标与反演算法研究

石大莲<sup>1,2</sup>, 冯玉涛<sup>1</sup>, 张耿<sup>1</sup>, 李勇<sup>1</sup>, 白清兰<sup>1</sup>, 汶德胜<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:**利用非线性回归法结合仪器的传递函数模型对大气风场探测法布里-珀罗干涉仪进行了定标和反演. 首先, 基于修正的艾里函数建立了仪器的传递函数及气辉响应函数模型; 然后, 利用稳频激光器对现有法布里-珀罗干涉仪系统进行了实验室定标, 获取了定标数据; 采用分步非线性回归拟合法对定标数据进行处理, 获取仪器传递函数模型参量; 最后利用标定的仪器传递函数模型, 对不同信噪比、不同风速温度预估输入的法布里-珀罗干涉仪气辉仿真数据进行了风速和温度反演. 实验结果表明, 在信噪比优于 40 的情况下, 风速和温度反演准确度分别可以达到 5 m/s 和 10 K.

**关键词:**法布里-珀罗干涉仪; 定标; 数据反演; 非线性回归拟合; 传递函数; 中高层大气; 气辉

中图分类号: P353

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)08-0812001-6

## Research on the Calibration and Data Retrieval of the Wind Field Measurement Fabry-Perot Interferometer

SHI Da-lian<sup>1,2</sup>, FENG Yu-tao<sup>1</sup>, ZHANG Geng<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, BAI Qing-lan<sup>1</sup>, WEN De-sheng<sup>1</sup>

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For the work of calibration and data retrieval of the wind field measuring Fabry-Perot interferometer, a method of nonlinear regression fitting combined with transfer function model was researched. First of all, the instrument transfer function and air-glow response model were established with a modified Airy function. Secondly, ground calibration was done to the Fabry-Perot interferometer system with a frequency-stabilized laser and the calibration data was collected. Nonlinear regression fitting step by step was applied to the processing of the calibration data to get parameters of the instrument transfer function. Finally, the wind and temperature of the simulated air-glow fringe, with different signal noise ratio, wind and temperature input, were estimated with the calibrated instrument transfer function model. The results show that the wind and temperature retrieval accuracy can excel 5 m/s and 10 K respectively for data with signal noise ratio better than 40.

**Key words:** Perot interferometer; Calibration; Data retrieval; Nonlinear regression fitting; Transfer functions; Upper atmosphere; Airglow

**OCIS Codes:** 120.2230; 150.1488; 010.0280; 070.4340; 100.2650

## 0 引言

近年来,我国对中高层大气风场探测技术的需求日益强烈. 中高层大气的风场和温度场探测对于建立大气中上下层的能量和动量传输模型、理解大气潮汐、电离层的粒子风暴、极地磁暴等独特天气现象提供重

要数据参考,对天气预报、航天器发射与再入安全性预估等具有重大影响<sup>[1-3]</sup>. 中高层大气风场的探测要求探测仪器具有极高的光谱分辨率,法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer, FPI)以其高灵敏度、高光谱分辨率、结构简单等优点,成为大气风场被动探测的主要仪器之一<sup>[4-10]</sup>.

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 41005019)和中科院光谱成像技术重点实验室创新基金(No. Y255C61220)资助

**第一作者:**石大莲(1982-),女,副研究员,博士研究生,主要研究方向为成像光谱仪定标与数据处理技术. Email: lotus@opt. ac. cn

**导 师:**汶德胜(1965-),男,研究员,博导,主要研究方向为光电成像技术及快速信号处理技术. Email: ven@opt. ac. cn

**收稿日期:**2015-03-06; **录用日期:**2015-05-15

<http://www.photon.ac.cn>

对于高灵敏度的风场探测 FPI, 高准确度的定标和反演算法非常重要, 并且密不可分. 风场探测 FPI 的实验室定标一般采用与气辉谱线波长接近的 632.8 nm、543.5 nm 的稳频激光进行标定, 而天上定标则采用含有 Ar、Kr、Hg 等元素的气体放电灯的特征谱线进行标定<sup>[11]</sup>. 比较经典的风场探测 FPI 的风速和温度反演算法有非线性最小二乘法<sup>[12]</sup>、完整傅里叶级数描述法<sup>[13]</sup>、高斯拟合法<sup>[13]</sup>、干涉图图像处理法<sup>[15-17]</sup>以及非线性回归拟合法<sup>[17]</sup>. 其中高斯拟合法、干涉图图像处理法算法简单, 不需要知道仪器参量, 只能反演风速. 其它三种算法都是基于仪器响应函数模型的, 必须通过定标确定 FPI 的关键参量. 非线性回归法, 定标方法简单, 更适合用于目前普遍使用 CCD 探测器的 FPI.

本文基于非线性回归法和改进 FPI 的仪器传递函数模型, 对 FPI 定标数据和气辉数据进行处理, 取得了仪器传递函数关键参量, 并实现了风速与温度的反演.

## 1 风场探测 FPI 的原理

大气风场探测 FPI 主要基于多普勒 (Doppler) 原理, 即大气中的气辉谱线的频率或者波长随气辉发射物质的速度具有如下关系

$$\lambda = (1 + V/c)\lambda_0 \quad (1)$$

式中  $V$  是大气风场的速度,  $c$  是光速,  $\lambda_0$  是没有发生 Doppler 频移的波长值,  $\lambda$  是发生 Doppler 频移后的波长值. 由于  $V$  远小于光速  $c$ , 波长的变化量极其微小 (约  $10^{-5}$  nm).

而气辉谱线的宽度与发射物质的温度有如下关系

$$\Delta\lambda_T = \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{kT}{m}} \quad (2)$$

式中  $k$  为波尔兹曼常量,  $T$  为气辉粒子温度,  $m$  为气辉粒子质量.

风场探测 FPI 是典型的多光束干涉仪, 其核心部件 F-P 标准具为两块高度平行的高反射玻璃平板, 利用干涉级次实现高光谱分辨率. 气辉谱线的多普勒频移会使得 FPI 的输出干涉条纹相位发生变化, 而气辉谱线的多普勒展宽会使 FPI 的输出干涉条纹形状展宽, FPI 正是利用这一现象进行大气风场温度场探测.

## 2 风场探测 FPI 的仪器传递函数与气辉响应模型

### 2.1 风场探测 FPI 的仪器传递函数

理想情况下, F-P 干涉光谱仪的仪器传递函数就是艾里函数<sup>[8]</sup>, 即

$$A(a, \lambda) = \frac{I}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\Phi}{2}} =$$

$$\frac{I}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left( \frac{2\pi uh}{\lambda} \cos \theta(a, f) \right)} \quad (3)$$

式中,  $I$  为入射光线的光强,  $R$  为标准具反射率,  $u$  为折射率,  $h$  为标准具间隙,  $\lambda$  为入射光的波长.  $\theta(a, f) = \arctan(a/f)$  为探测器面阵上距离干涉环中心半径等于  $a$  处对应的入射角,  $a$  为半径,  $f$  为成像透镜的焦距. 每个探测元收集对应入射角的相干光, 当入射角变化使相位等于  $2\pi$  的整数倍时, 干涉曲线有峰值.

由于仪器的一些元件制造过程或者仪器装配过程导致的仪器缺陷, 理想仪器传递函数与实际情况有一定偏差, 主要有<sup>[17]</sup>: 1) 渐晕效应, 指由于系统光学响应不均匀等原因导致仪器响应中间高, 周围低的情况; 2) 展宽效应, 指的是由于玻璃平板平面度不够等光学畸变的原因导致仪器传递函数展宽的情况. 因此, 需要对理想仪器传递函数进行修正.

对第一个偏差渐晕效应的修正, 是将渐晕效应等同于入射光强  $I$  随半径  $a$  的分布变化来表示, 即用式 (4) 所示的二次多项式来代替  $I$ , 即

$$I = I_0 \left[ 1 + I_1 \left( \frac{a}{a_{\max}} \right) + I_2 \left( \frac{a}{a_{\max}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中  $a_{\max}$  是  $a$  在 CCD 上的最大值.  $I_0$  可根据定标数据幅值的最大值估计.  $I_1$ 、 $I_2$  则根据经验设置.

第二个偏差展宽效应, 是利用点扩散函数  $b(s, a)$  与理想艾里函数的卷积表示为

$$A'(a, \lambda) = \int_0^{a_{\max}} b(s, a) A(s, \lambda) ds \quad (5)$$

点扩散函数使条纹展宽, 模拟了光学畸变的影响, 其形式是高斯函数, 即

$$b(s, a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi p(a)^2}} e^{-(s-a)^2/p(a)^2} \quad (6)$$

式中的参量  $p(a)$  随半径有微小变化, 采用一阶傅里叶级数进行近似拟合, 即

$$p(a) = p_0 + p_1 \sin \left( \pi \frac{a}{a_{\max}} \right) + p_2 \cos \left( \pi \frac{a}{a_{\max}} \right) \quad (7)$$

将式 (4)、(5) 表示的两个偏差函数代入式 (3), 就可以得到完整的仪器传递函数.

仪器传递函数模型的部分参量是已知的, 如激光波长, 空气隙 F-P 标准具的折射率; 还有一些参量是未知的, 或者只知道设计值. 要得到仪器参量的准确数值, 需要对仪器进行定标, 并对定标数据进行非线性回归拟合处理.

当入射光为理想单色光时, 仪器在半径  $a$  处的响应输出是入射光的  $\delta$  函数与仪器传递函数卷积的结果, 即

$$N_c(a) = \int_0^{\infty} A(a, \lambda) S(\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} A(a, \lambda) \delta(\lambda_0) d\lambda = A(a, \lambda_0) \quad (8)$$

因此, 可以用式 (8) 近似描述激光入射时仪器响应函数模型. 变换模型中的波长参量就可以得到其它波

长下的仪器输出,这也就是 FPI 采用激光进行定标的原理。

该方法的前提是单色光波长与目标气辉谱线的波长非常接近,因为该方法需要假定在定标波长与气辉谱线波长下部分仪器参量,如反射率,是相同的.例如对于风场探测的目标谱线 630 nm 的氧原子谱,通常用 632.8 nm 的稳频激光器对风场探测 FPI 进行定标。

### 2.2 风场探测 FPI 的气辉响应模型

对于 FPI 的气辉响应模型,它的入射谱线不再是一个  $\delta$  函数,而是一个具有多普勒展宽和频移的高斯函数<sup>[17]</sup>,即

$$S(\lambda) = S_{bg} + S_{line} \exp \left\{ \left( \frac{\lambda - \lambda_c}{\Delta\lambda_T} \right)^2 \right\} \quad (9)$$

式中,  $S_{bg}$  为连续背景噪声信号幅值,  $S_{line}$  定义为入射谱线的光强,  $\lambda_c$  为气辉谱线多普勒频移后的中心波长,  $\Delta\lambda_T$  为多普勒宽度。

将式(9)与仪器传递函数式(3)卷积就可以得到气辉输入时的仪器响应模型。

## 3 风场探测 FPI 的定标与数据反演

### 3.1 非线性回归拟合法进行定标数据处理以及风速温度反演

非线性回归拟合法处理定标数据是利用 FPI 系统已知的或者预估的函数参量作为初步输入,代入系统的非线性仪器传递函数模型,对仪器的定标数据进行非线性回归拟合,从而确定仪器传递函数参量。

有了仪器传递函数,将其与式(9)所示的气辉谱进行卷积,可得仪器的气辉响应模型.利用该模型对气辉干涉数据进行非线性回归拟合,可得到多普勒频移后气辉谱线的中心波长和多普勒宽度,最终由式(1)、(2)反演得到风速和温度。

因此该方法的关键是 FPI 仪器传递函数模型参量的确定,也就是 FPI 的实验室定标及其数据处理。

### 3.2 风场探测 FPI 的定标

风场探测 FPI 的定标与数据处理方法有着紧密的联系,根据数据处理方法的不同,定标有两种方法:1)气压扫描法,数据处理采用傅里叶级数描述法;2)激光照射法,数据处理采用非线性回归拟合法。

气压扫描法是通过改变标准具间的压强,以改变标准具内空气折射率,从而实现相对位的调制.该方法实验条件复杂,数据处理计算量大,不适用于目前广泛使用的面阵探测器。

激光照射法是采用极窄线宽的稳频激光器作为入射光源,光线经过均匀、准直后进入 F-P 干涉仪系统,获取干涉环数据.再通过非线性回归拟合法对数据进行处理,得到仪器传递函数参量.该方法实验条件简

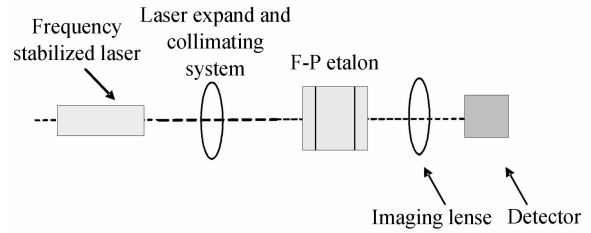


图 1 风场探测 FPI 激光照射定标法光路示意图

Fig. 1 Laser calibration of the wind-measuring FPI single, data processing calculation amount also greatly reduced. Specific optical path as shown in Fig. 1.

### 3.3 定标实验数据处理

按照图 1 所示光路图,搭建风场探测 FPI 的激光照射定标实验光路,得到如图 3 所示的 FPI 激光定标数据.对风场探测 FPI 的定标与气辉数据进行处理的流程如图 2 所示。

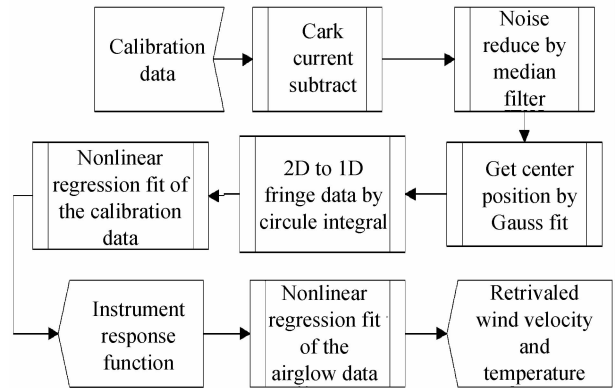


图 2 风场探测 FPI 定标与气辉数据的数据处理流程图

Fig. 2 Process flow of the FPI calibration and airglow data

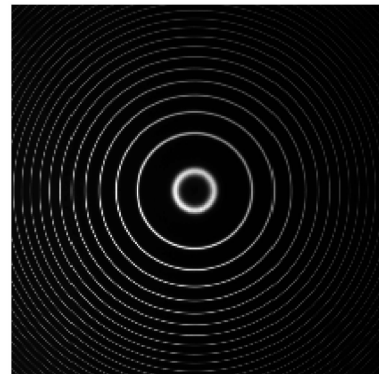


图 3 FPI 激光定标干涉图

Fig. 3 FPI laser calibration fringe image

定标数据处理中的高斯拟合取圆环中心和圆环积分可参考文献[19].

圆环积分后,数据由二维干涉环转换为一维干涉条纹曲线,如图 4、图 5 中的实线所示.图中的横坐标为以干涉环中心为零点的干涉环半径像素值.对该曲线用式(8)进行非线性回归拟合,可得到公式中的各项仪器传递函数的参量。

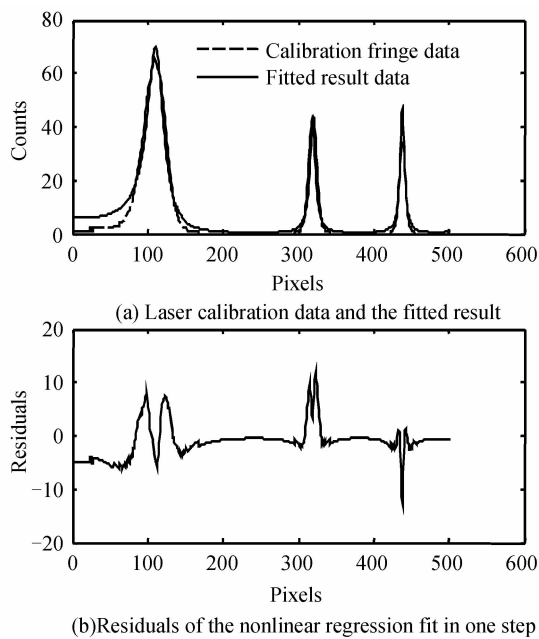


图4 激光定标数据的单步非线性回归拟合结果  
Fig. 4 Result of Nonlinear regression fit in one step

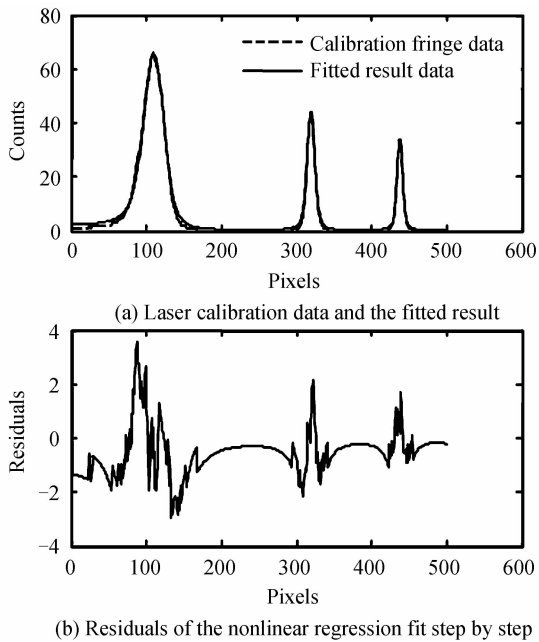


图5 分步非线性回归法拟合结果  
Fig. 5 Result of Nonlinear regression fit step by step

由于仪器传递函数复杂,直接拟合计算量大,并且拟合误差大.如图4所示为直接进行单次非线性回归拟合得到的结果.

本文采用分步骤的非线性回归拟合法,其具体处理步骤是:

1)首先将如表1所列的仪器已知参量及估计参量代入式(8),其中的点扩散函数由于需要与艾里函数进行卷积,计算量大,暂不考虑.用非线性回归法对干涉曲线进行拟合,获取仪器部分参量.

2)然后将初步拟合的函数参量再代入式(8),获取

点扩散函数.

3)最后再将点扩散函数代入式(8),重新拟合,得到的完整的仪器函数,得到的拟合结果如图5所示.

对比图4、图5中的拟合残留误差幅值可以看出,采用分步骤的非线性回归法拟合,相比直接进行非线性拟合,拟合残留误差大大减小.

非线性回归拟合需要输入所有参量的一个预估值.表1中的参量1激光波长和参量2标准具内气体的散射率为已知且固定不变;参量3~5分别为标准具反射面的反射率、标准具间隙和成像透镜的焦距,这些参量可以通过预先的测量知道大概的数值;参量6~8为式(4)所示的渐晕效应函数参量;参量9~11为式(5)~(7)描述的展宽效应中的点扩散函数的参量.其中参量6可根据条纹强度最大值进行估计;其他参量7~11则无法估计,只能根据经验设定预估值.

对比表1中参量3~6的拟合结果与预估值,可以看出其数值非常接近,并且拟合结果的准确度更高.参量7~11为仪器传递函数的微调参量,输入值可与真实值相差较大,但是通过分步非线性回归拟合,得到的拟合结果是固定的.说明该方法在较大误差的拟合输入下,都能够得到精确地拟合结果.这也正是该方法的优势所在.根据以上分析可以得出结论,利用分步非线性回归拟合法可以精确地获得风场探测FPI的仪器传递函数参量.

表1 仪器函数参量与拟合结果列表  
Table 1 Parameters of the FPI instrument function and the fitting result

No.	Parameters	Known fixed value	Estimated input value	Fitting result
1	Laser wavelength $\lambda/\text{nm}$	632.8	/	/
2	Index of refraction $u$	1	/	/
3	Index of reflection $R$	/	0.9	0.9
4	Gap of etalon $t/\text{cm}$	/	1	1.0082
5	Focal length of the imaging lens $f/\text{mm}$	/	210	210.62
6	First coefficient of the vignette function $I_0$	/	80	73
7	Second coefficient of the vignette function $I_1$	/	-0.1	-0.509 5
8	Third coefficient of the vignette function $I_2$	/	0.005	-0.062 3
9	First coefficient of the point spread function $p_0$	/	0.8	2.122 3
10	Second coefficient of the point spread function $p_1$	/	0.1	-0.367 7
11	Third coefficient of the point spread function $p_2$	/	0.05	-0.674 1

### 3.4 气辉数据处理仿真实验

由于在实验室无法得到气辉数据,只能通过仿真获取仪器的气辉数据.假设一定风速和温度下,并叠加一定信噪比的高斯白噪声,数据信噪比定义为干涉条纹幅值与噪声标准方差的比值,利用式(8)可以得到气辉的谱线函数.将其与定标数据处理得到的仪器函数卷积,得到气辉响应输出.图6为风速  $V=100\text{ m/s}$ 、温度  $T=800\text{ K}$ 、信噪比  $\text{SNR}=40$  时仿真得到的  $630\text{ nm}$  气辉谱线的 FPI 输出数据.

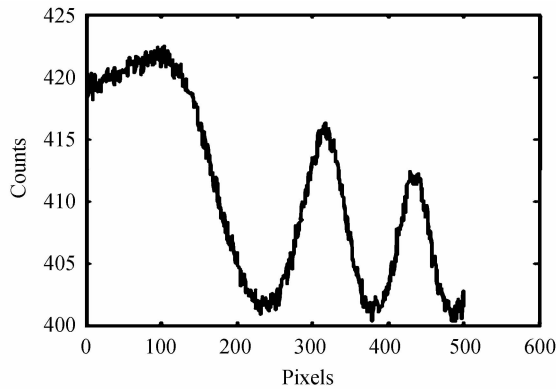


图6 仿真的气辉干涉数据 ( $\text{SNR}=40$ ,  $V=100\text{ m/s}$ ,  $T=800\text{ K}$ )

Fig. 6 The simulated airglow fringe data with  $\text{SNR}=40$ , velocity= $100\text{ m/s}$  and temperature= $1\ 000\text{ K}$

对气辉干涉数据的处理仍然采用非线性回归拟合法,图7为不同信噪比下的风速温度反演误差.可以看到,所有的误差平均分布于零值上下,并且随着信噪比的提高,误差逐渐减小.仿真实验结果表明,在数据信噪比为40的时候,风速和温度的反演误差均方值分别为  $4.22\text{ m/s}$  和  $9.28\text{ K}$ .

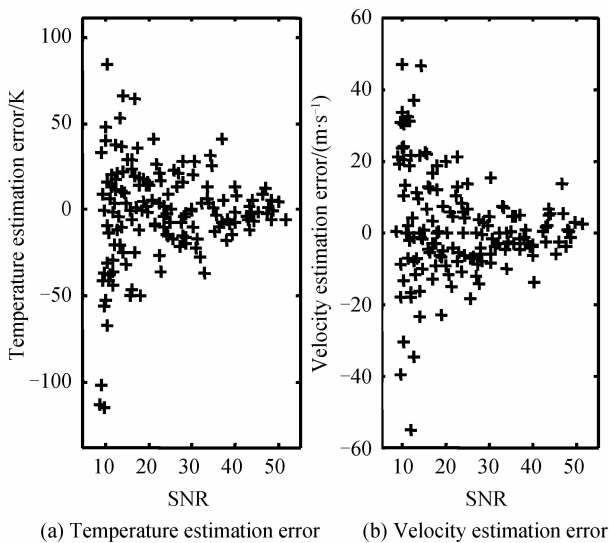


图7 不同信噪比下的风速温度反演误差

Fig. 7 Estimation error as a function of SNR

图8为数据信噪比等于40、风速预估输入在  $0\sim 300\text{ m/s}$ ,非线性回归拟合的风速与温度反演误差.

而图9为温度预估输入在  $500\sim 1\ 500\text{ K}$  的情况下的反演误差.由图中的误差分布可以看到,在上述风速和温度输入范围内的反演误差均分布在相同的范围内,证明了反演结果没有受到预估输入值的影响.

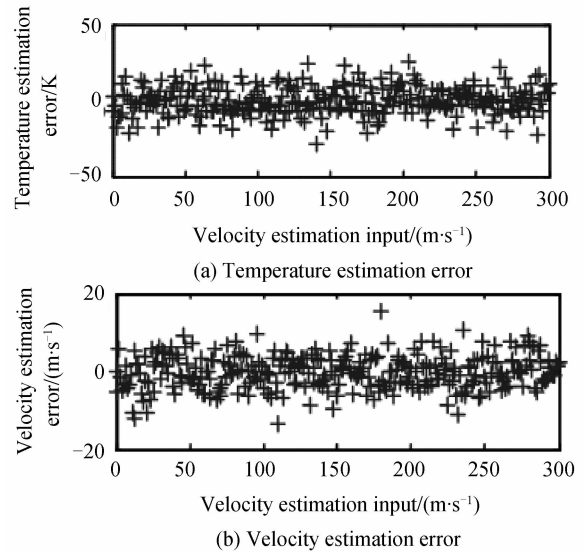


图8 不同风速输入下的风速温度反演误差

Fig. 8 Estimation error as a function of velocity input

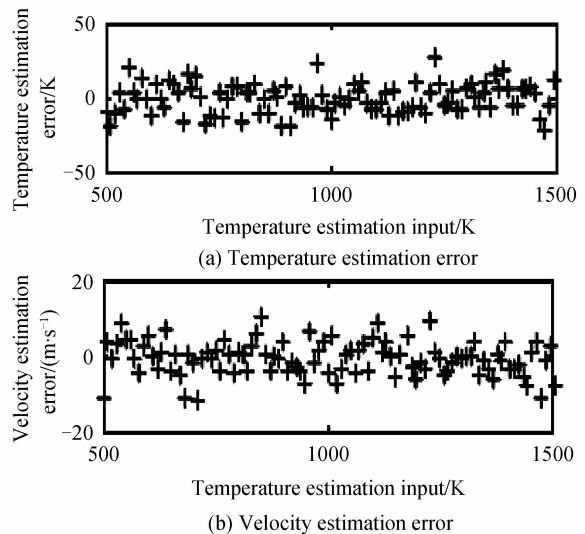


图9 不同温度输入下的风速温度反演误差

Fig. 9 Estimation error as a function of temperature input

## 4 结论

本文针对风场探测 FPI 的定标与数据反演算法,基于修正的艾里函数建立了仪器传递函数模型和气辉响应模型;搭建了激光定标实验光路,取得了定标数据;利用非线性回归拟合法,并基于仪器传递函数模型对定标数据进行了处理,取得了仪器传递函数所有参量;另外,基于仿真的气辉干涉数据对数据反演算法进行了验证,结果表明在数据信噪比达到40的情况下,风速和温度反演准确度可分别达到  $4.22\text{ m/s}$  和  $9.28\text{ K}$ .

## 参考文献

- [1] MERIWETHER J W. Studies of thermospheric dynamics with a Fabry-Perot interferometer network: a review[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, **68**(13): 1576-1589.
- [2] 王英鉴. 中高层大气对卫星系统的影响[J]. *中国科学*, 2000, **30**(12): 17-20.
- [3] 吴传竹. 大气风场对发射航天器的影响[J]. *导弹试验技术*, 1997, **97**(2): 1-6.
- [4] ZHANG Chun-min, ZHU Hua-chun, WANG Ding-yi, et al. Passive measurement technology used for upper atmosphere measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 090036-1-11.  
张淳民, 朱化春, 王鼎益等. 高层大气被动探测技术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 090036-1-11
- [5] 汪丽. 干涉大气风场探测技术研究[D]. 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2007.
- [6] WANG Yong-mei, FU Li-ping, DU Shu-song, et al. Development for detecting upper atmospheric wind and temperature from satellite [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2009, **29**(1): 1-5.  
王咏梅, 付利平, 杜述松, 等. 中高层大气风场和温度场星载探测技术研究进展[J]. *空间科学学报*, 2009, **29**(1): 1-5.
- [7] HUANG F T, REBER C A. Nonmigrating semidiurnal and diurnal tides at 95 km based on wind measurements from the high resolution doppler imager on UARS [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(D10): 646-650.
- [8] HAYS P B, ABREU V J, DOBBS M E, et al. The high resolution doppler imager on the upper atmosphere research satellite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**(D6): 10713-10723.
- [9] HEMANDEZ G. Fabry-Perot Interferometers [M]. Cambridge University Press, 1986.
- [10] WANG Li, ZHAO Bao-chang, ZHANG Chun-min, et al. Analysis on uncertainty of temperature for michelson interferometer for temperature and wind of atmosphere [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 2031-2034.  
汪丽, 赵葆常, 张淳民, 等. 迈克尔逊风场探测干涉仪探测温度不确定度分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 2031-2034.
- [11] SHI Da-lian, BAI Qing-lan, FENG Yu-tao, et al. In-flight calibration of atmospheric wind and temperature measurement spectrometer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(5): 926-930.  
石大莲, 白清兰, 冯玉涛, 等. 大气风场和温度场星载探测光谱仪的星上定标技术[J]. *应用光学*, 2011, **32**(5): 926-930.
- [12] HAYS P B, ROBLE R G. A technique for recovering doppler line profiles from Fabry-Perot interferometer [J]. *Applied Optics*, 1971, **10**(1): 193-200.
- [13] KILLEEN T L, HAYS P B. Doppler line profile analysis for a multichannel Fabry-Perot interferometer [J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(4): 612-620.
- [14] LI Hao, ZHANG Yan-ge. Simulation and analysis of thermospheric wind velocity [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(2): 285-290.  
李浩, 张燕革. 模拟大气风场及其数据处理技术的研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(2): 285-290.
- [15] WANG Hou-mao, WANG Yong-mei, WANG Ying-jian. Data processing of the middle and upper atmospheric and field retrieval based on the Fabry-Perot Interferometer [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(4): 1095-1101.  
王后茂, 王咏梅, 王英鉴. 基于 Fabry-Perot 的中高层大气风速反演数据处理研究[J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(4): 1095-1101.
- [16] E Fei, GAO Qiu-yan, AI Yong. A new method of processing the Fabry-Perot interference fringes [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(4): 499-501.  
鄂非, 高秋艳, 艾勇. 一种新的 Fabry-Perot 干涉条纹处理方法[J]. *光学技术*, 2009, **35**(4): 499-501.
- [17] HAN Wei-hua, LU jian-gong, WANG Yong-mei, et al. Image data processing of spaceborne Fabry-Perot interferometer prototype [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, **31**(6): 784-788.  
韩威华, 吕建工, 王咏梅, 等. Fabry-Perot 测风干涉仪数据处理[J]. *空间科学学报*, 2011, **31**(6): 784-788.
- [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]. *Applied Optics*, 2014, **53**(4): 666-673.
- [19] 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]. *Applied Optics*, 2011, **50**(22): 4403-4416.