

# 基于法布里-珀罗干涉仪反演大气风速和温度的简化算法

王 宏<sup>1,2</sup> 刘学斌<sup>1</sup> 冯玉涛<sup>1</sup> 白清兰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 阐述了基于法布里-珀罗干涉仪(FPI)反演中高层大气风速和温度的基本原理,研究了 FPI 系统传递函数及其对入射谱线的响应表达式。借鉴传统 FPI 反演中高层大气风速和温度的经典理论,提出一种矩阵简化算法。利用分解和近似的数学基础方法来得到系统响应表达式的矩阵形式,然后采用最小二乘法反演出大气风速和温度。仿真结果表明:当预估风速和温度偏离实际风速和温度,小于 150 m/s 和 80 K 时,反演风速和温度的误差范围在  $\pm 3$  m/s 和  $\pm 10$  K 内。矩阵简化算法不但保留了完整傅里叶级数描述法的精确性,而且避免了激光校准和波长变换,具有简单和快速的优点。

**关键词** 大气光学;风速温度反演;法布里-珀罗干涉仪;系统响应表达式;矩阵简化算法

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1130003

## A New Reduction Technique for Thermospheric Wind and Temperature Measurement with Fabry-Perot Interferometer

Wang Hong<sup>1,2</sup> Liu Xuebin<sup>1</sup> Feng Yutao<sup>1</sup> Bai Qinglan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics Precision Mechanic of Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The principle of measuring thermospheric wind and temperature by Fabry-Perot interferometer (FPI) is elaborated, the transfer function of FPI and the analytical response expression to the incident line is studied. Referring to the basic principle of traditional wind and temperature retrieval method with FPI, a new matrix reduction technique is proposed. This technique is based on the decompose and approximate mathematics to obtain the matrix form of analytical response expression, then a least-squares technique is employed to get the thermospheric wind and temperature. Simulation results show that when the guessed wind is less than 150 m/s and the guessed temperature is less than 80 K, the error range is  $\pm 3$  m/s for wind and  $\pm 10$  K for temperature. The matrix technique not only retains the accuracy of a full Fourier Series Representation method, but also avoids instrument calibration and wavelength translation, which makes it simple and fast.

**Key words** atmospheric optics; wind and temperature retrieval; Fabry-Perot interferometer; systematic response expression; matrix reduction technique

**OCIS codes** 300.6320; 010.1290; 120.2330; 260.3160

### 1 引言

大气风速和温度是中高层大气的基本参量,它

们在大气上下层之间的能量和动量传输中起着巨大作用,其探测结果可为空间天气研究提供数据支持。

收稿日期: 2013-06-03; 收到修改稿日期: 2013-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(41005109)、西部之光人才基金(Y129281213)、中科院光谱成像技术重点实验室创新基金(Y255C61ZZ0)

作者简介: 王 宏(1988—),女,硕士研究生,主要从事高速光电信息获取与处理方面的研究。

E-mail: wosky619@sina.com

导师简介: 刘学斌(1966—),男,研究员,主要从事高速光电信息获取与处理方面的研究。E-mail: lxb@opt.ac.cn

由于受到内部重力波和大气潮汐波的影响,中高层大气风速和温度在不同时间和空间位置浮动较大,使中高层大气成为航天发射的危险区域。因此,随着我国航天活动的增加,对于中高层大气风速和温度的研究十分重要,是目前科学研究热点之一<sup>[1]</sup>。

法布里-珀罗干涉仪(FPI)是中高层大气风场和温度场探测的重要手段之一<sup>[2]</sup>,其通过测量气辉谱线的频移和展宽信息反演大气风速和温度。自20世纪60年代开始,FPI的模型被建立并开始完善,1966年,Hernandez等<sup>[3-4]</sup>讨论了FPI的解析模型,推导出FPI的系统传递函数并详细描述了FPI的特性及应用。1971年,Hays等<sup>[5]</sup>采用傅里叶级数拟合FPI干涉图,借助于非线性最小二乘拟合法反演大气风速和温度。1984年,Killeen等<sup>[6-7]</sup>推导出用完整的傅里叶级数描述法来反演大气风速和温度,在此基础上初步提出矩阵算法,此算法需采用632.8 nm的激光谱线进行校准,然后进行波长变换,只适用于630.0 nm谱线,存在一定误差且计算量大。1995年,Nakajima等<sup>[8-9]</sup>提出利用高斯拟合法来反演风速,提高了风速测量精度。

西安光机所<sup>[10]</sup>、中国科学院空间中心<sup>[11]</sup>以及武汉大学<sup>[12-14]</sup>、西安理工大学<sup>[15]</sup>先后对此理论和模型进行了研究,在风速测量方面取得了较大进展,但是温度的测量存在精度低以及计算量大的问题。本文借鉴以上FPI反演大气风速和温度的经典理论,同时考虑风速和温度反演的相关性,提出一种矩阵简化算法同时反演大气风速和温度。此算法不但保留了完整傅里叶级数描述法的精确性,而且避免了激光校准和波长变换,具有简单和快速的特性。

## 2 FPI 系统描述

FPI得到的干涉曲线本质上是入射谱线通过有限带宽的物理仪器后的响应,即入射谱线与仪器展宽函数的卷积。一般情况下,FPI在一个积分时间 $t$

内探测到的信号幅值可以记为<sup>[6]</sup>

$$N = \frac{10^6 A_0 \Omega T_0 Q}{4\pi} \int_0^{\infty} T_F(\lambda) H(\lambda, \theta) S(\lambda) d\lambda + B, \quad (1)$$

其中 $A_0$ 为标准具腔的有效面积; $\Omega$ 为仪器视场对应的立体角; $T_0$ 为仪器的光学透射率,包括反射面的吸收和散射影响; $Q$ 为探测器的效率; $T_F(\lambda)$ 为窄带滤光片透射函数, $\lambda$ 为波长; $B$ 表示探测器连续背景噪声信号幅值; $H(\lambda, \theta)$ 为仪器传递函数,其中 $\theta$ 为探测器像元对应的视场角:

$$\theta = \arctan\left(\frac{a^2}{2f_0^2}\right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $f_0$ 为物镜的有效焦距, $a$ 为干涉环半径。一般情况下, $f_0$ 相对于 $a$ 较大,这样就有以下近似:

$$\cos \theta \approx 1 - \frac{a^2}{2f_0^2}. \quad (3)$$

(1)式中 $S(\lambda)$ 为入射谱线的分布,由两部分组成:

$$S(\lambda) = \frac{R_0 \exp\left(\frac{\lambda - \lambda_l}{\Delta\lambda_T}\right)^2}{\sqrt{\pi} \Delta\lambda_T} + \frac{\partial R}{\partial \lambda} \Big|_0, \quad (4)$$

式中右边的第一项为高斯函数,它与发射谱线的表面亮度 $R_0$ 、考虑了多普勒频移后的中心波长 $\lambda_l$ 以及多普勒宽度 $\Delta\lambda_T$ 有关。 $\Delta\lambda_T$ 定义为

$$\Delta\lambda_T = \left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2} \frac{\lambda_l}{c}, \quad (5)$$

式中 $T$ 为热力学温度, $k$ 为玻尔兹曼常数, $c$ 为光速, $m$ 为发光原子的质量;(4)式右边第二项表示连续背景噪声信号幅值。

仪器传递函数 $H$ 的解析形式为4个特定的仪器展宽函数的卷积,它们为1)反射率展宽函数(艾里函数),2)标准具球面缺陷展宽函数,3)光阑展宽函数,4)标准具表面不平度展宽函数。对于以上展宽函数,2)和3)为矩形展宽函数,而4)为高斯展宽函数<sup>[3]</sup>。因此, $H$ 可记为

$$H(\lambda, \theta) = \frac{1-R}{1+R} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n \operatorname{sinc}\left(\frac{n}{N_s}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{n}{N_A}\right) \exp\left(\frac{-n^2 D^2}{4}\right) \cos\left[2\pi n \mu \left(\frac{\lambda - \lambda_r}{\Delta\lambda_0}\right) \cos \theta\right] \right\}, \quad (6)$$

式中 $R$ 为标准具反射率; $N_s$ 为标准具球面缺陷展宽函数的精细度系数; $N_A$ 为光阑展宽函数的精细度系数; $D = \pi d_g [\Delta\sigma (\ln 2)^{1/2}]^{-1}$ , $\Delta\sigma$ 为关于波数 $\sigma$ 的自由光谱范围, $\Delta\sigma = (2\mu d)^{-1}$ ,其中 $d$ 为标准具间距, $\mu$ 为标准具中介质折射率, $d_g$ 为半高半宽,可以定义表面不平度缺陷展宽函数的精细度系数 $N_D =$

$\Delta\sigma/2d_g$ ;  $\Delta\lambda_0$ 为自由光谱范围,它与两个连续的透射最大值波长差相等,即 $\Delta\lambda_0 = \lambda_l^2/2d_0$ ;  $\lambda_r$ 为参考波长。

利用(4)式和(6)式可以进一步地近似(1)式,将(1)式积分展开可以得到仪器对入射谱线的响应为

$$N = C_0 t \left\{ \Delta\lambda_F \frac{\partial R}{\partial \lambda} \Big|_0 \left( \frac{1-R}{1+R} \right) + T_{F_0}(\lambda_1) \times R_0 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n \operatorname{sinc} \left( \frac{n}{N_s} \right) \operatorname{sinc} \left( \frac{n}{N_A} \right) \exp \left( \frac{-n^2 D^2}{4} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \exp \left[ -n^2 G^2(T) \right] \cos \left[ 2\pi n \mu \left( \frac{\lambda_1 - \lambda_r}{\Delta\lambda_0} \right) \cos \theta \right] \right\} \right\} + B, \quad (7)$$

$C_0 = A_0 \Omega Q T_0 (10^6/4\pi)$  为探测器信号幅值;  $T_{F_0}(\lambda_1)$

为  $T_F(\lambda)$  的泰勒展开第一项;  $\Delta\lambda_F = \int_0^{\infty} T_F(\lambda) d\lambda$ ; 函数

$G(T)$  包含入射谱线的多普勒宽度:

$$G(T) = \frac{\pi}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}} \frac{\lambda_1}{\Delta\lambda_0} = \frac{\pi\Delta\lambda_T}{\Delta\lambda_0}. \quad (8)$$

### 3 反演风速和温度

#### 3.1 完整傅里叶级数描述法

Killeen 等<sup>[6]</sup> 提出完整傅里叶级数描述法来反

演大气风速和温度。为了避免对整个系统各个展宽因素的单独考虑,把系统的传递函数  $H$  用完整傅里叶级数表示:

$$H(\lambda, \theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos \frac{2\pi n}{\Delta\lambda_0} (\lambda - \lambda_r) + b_n \sin \frac{2\pi n}{\Delta\lambda_0} (\lambda - \lambda_r) \right], \quad (9)$$

这样,系统对入射谱线的响应可以用完整傅里叶级数的形式表示:

$$N = C_0 t \left\{ \Delta\lambda_F \frac{\partial R}{\partial \lambda} \Big|_0 \left( \frac{1-R}{1+R} \right) + T_{F_0}(\lambda_1) R_0 \left\{ a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos \frac{2\pi n \mu}{\Delta\lambda_0} (\lambda_1 - \lambda_r) + b_n \sin \frac{2\pi n \mu}{\Delta\lambda_0} (\lambda_1 - \lambda_r) \right] \exp \left[ -n^2 G^2(T) \right] \right\} \right\} + B. \quad (10)$$

具体步骤如下:

1) 利用波长为 632.8 nm 的稳频激光器经过 FPI 获得干涉圆环;

2) 采用(10)式拟合干涉环确定傅里叶系数  $a_n$  和  $b_n$ ;

3) 利用波长变换方法把在波长 632.8 nm 处获得的  $a_n$  和  $b_n$  转换到 630.0 nm 处的  $a_n$  和  $b_n$ ;

4) 利用(10)式拟合观测到 630.0 nm 气辉干涉圆环反演出风速和温度。

#### 3.2 矩阵简化算法

完整傅里叶级数描述法是国际通行的风速和温度反演方法,由于不存在波长为 630.0 nm 和 557.7 nm 的激光器,需要采用 632.8 nm 的稳频激光器进行校准,然后利用波长变换方法获取 630.0 nm 处的傅里叶系数进行反演计算。波长变换的方法不适用于 557.7 nm 处的谱线,而且在增加计算量的同时带来

相应的误差,影响反演精度。针对以上问题,利用矩阵简化算法直接对系统响应表达(7)式进行分解和近似。定义以下等价关系:

$$X = \frac{2\pi}{\Delta\lambda_0} (\lambda - \lambda_r + \phi), \quad (11)$$

$$I = C_0 t \Delta\lambda_F \frac{\partial R}{\partial \lambda} \Big|_0 \left( \frac{1-R}{1+R} \right), \quad (12)$$

$$a_n = 2R^n \operatorname{sinc} \left( \frac{n}{N_s} \right) \operatorname{sinc} \left( \frac{n}{N_A} \right) \times \exp \left( \frac{-n^2 D^2}{4} \right), \quad (13)$$

$$M_0 = \lambda_0 / \Delta\lambda_0, \quad (14)$$

同时考虑到中心波长  $\lambda_1$  与速度  $v$  的关系式:

$$\lambda_1 = \lambda_0 (1 + v/c), \quad (15)$$

可以把(7)式重写为

$$N = C_0 t T_{F_0} R_0 t \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_n \exp \left[ -n^2 G^2(T) \right] \cos n \mu \left[ \left( X + \frac{2\pi M_0 v}{c} \right) \cos \theta \right] \right\} + I + B. \quad (16)$$

假定预估风速  $v_0$  和温度  $T_0$  相对于实际风速  $v$  和温度  $T$  变化较小,那么就可以有以下近似:

$$\exp \left[ -n^2 G^2(\Delta T) \right] \approx 1 - n^2 G^2(\Delta T) \cos n \left( \frac{2\pi M_0 \Delta v}{c} \right) \approx 1 \\ \sin n \left( \frac{2\pi M_0 \Delta v}{c} \right) \approx n \left( \frac{2\pi M_0 \Delta v}{c} \right). \quad (17)$$

利用以上近似,将(16)式展开并取第一项为

$$N_i(v_0 + \Delta v, T_0 + \Delta T) - B_i = C_0 T_{F_0} R_0 t [U^0(v_0, T_0) + \Delta v U^1(v_0, T_0) + \Delta T U^2(v_0, T_0)] + I, \quad (18)$$

再利用(3)式,得到各参数分别为

$$U^0 = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_n \exp[-n^2 G^2(T_0)] \cos \left[ n\mu \left( X + \frac{2\pi M_0 v_0}{c} \right) \left( 1 - \frac{a^2}{2f_0^2} \right) \right] \right\}, \quad (19)$$

$$U^1 = \frac{-2\pi M_0}{c} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ n a_{ni} \exp[-n^2 G^2(T_0)] \sin \left[ n\mu \left( X + \frac{2\pi M_0 v_0}{c} \right) \left( 1 - \frac{a^2}{2f_0^2} \right) \right] \right\}, \quad (20)$$

$$U^2 = -\frac{G^2(T_0)}{T_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ n^2 a_{ni} \exp[-n^2 G^2(T_0)] \cos \left[ n\mu \left( X + \frac{2\pi M_0 v_0}{c} \right) \left( 1 - \frac{a^2}{2f_0^2} \right) \right] \right\}. \quad (21)$$

探测器信号幅值  $C_0 = A_0 \Omega Q T_0 (10^6 / 4\pi)$ , 为仪器可知参数的乘积; 窄带滤波器带宽和透射函数  $\Delta\lambda_F, T_{F_0}(\lambda_i)$  为窄带滤波器的可知参数。在已知上述参数的情况下, 给定预估风速  $v_0$  和温度  $T_0$  的值, 就可以反演出风速和温度, 定义参数:

$$\begin{cases} x_1 = C_{01} T_{F_0} R_0 t \\ x_2 = \Delta v x_1 \\ x_3 = \Delta T x_1 \\ x_4 = I \end{cases}, \quad (22)$$

这样就可以得到一个线性系统, 用矩阵表示为

$$N' = N - B = \sum_{k=1}^4 U_k x_k, \quad (23)$$

其中  $N'$  为减去暗电流幅值  $B$  后所测量的信号幅值, 另外:

$$\begin{cases} U_k = U^{k-1}(v_0, T_0) & 1 \leq k \leq 3 \\ U_k = 1 & k = 4 \end{cases}, \quad (24)$$

这个简单的线性表达式可以利用最小二乘法来求解, 利用矩阵基本运算可以得出:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{U}^T \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{N}', \quad (25)$$

其中  $\mathbf{x}$  为未知的矢量,  $\mathbf{N}'$  为矢量, 定义一个系统矩阵  $\mathbf{C}$  且  $\mathbf{C} = (\mathbf{U}^T \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^T$ , 可得到:  $\mathbf{x} = \mathbf{C} \mathbf{N}'$ 。

## 4 Matlab 软件仿真与结果

FPI 的参数列表如表 1 所示。设实际风速和温

度分别为  $v=200$  m/s、 $T=300$  K, 预估速度和温度分别为  $v_0=195$  m/s、 $T_0=290$  K, 应用矩阵简化算法进行运算并与(16)式结果对比, 结果如图 1 所示。其中实线为(16)式所描述的实际响应信号幅值, 而虚线为利用矩阵算法得到的信号幅值。图 1(b)为图 1(a)的局部放大图。可以明显看出两个曲线基本吻合, 计算两者之间的均方差为 0.0619, 计算后存在的风速和温度的误差分别为 0.102 m/s 和 0.164 K。因此, 可以得出当预估风速和温度接近实际值时, 利用矩阵算法可以在误差极小的情况下反演出风速和温度。

固定预估温度  $T_0=290$  K, 对预估风速  $v_0$  的值从 100~300 m/s 每间隔 10 m/s 进行运算, 算出各预估风速所对应的反演风速, 如图 2 所示。得出利用矩阵简化算法得到的风速与实际风速的差距随着预估风速与实际风速的偏离量的增加而呈线性增加。

固定  $v_0=195$  m/s, 对预估温度  $T_0$  的值从 200~400 K 每间隔 10 K 进行运算, 计算出各预估温度所对应的实际温度, 结果如图 3 所示。可以明显看出温度衰减的速度比较快, 但是当预估温度接近实际温度值时, 反演效果较好。

同时, 对预估风速的值从 0 到 400 m/s 每隔 40m/s 计算, 对预估温度  $T_0$  的值从 100~500 K 每隔 40 K 进行运算, 得到反演出的风速和温度值的等

表 1 FPI 参数列表

Table 1 FPI parameter list

Instrument	Parameters	Value
Etalon plate	Reflectivity $R$	0.87
	Refractive index $n$	1
	Spacing $d$ /mm	2.4
	Roughness defect finesse $N_D$	40.2
	Spherical defect finesse $N_s$	20.48
Aperture	Finesse $N_A$	21.15
Objective lens	Focal length $f$ /mm	1000
	Peak wavelength $\lambda_i$ /nm	630.0

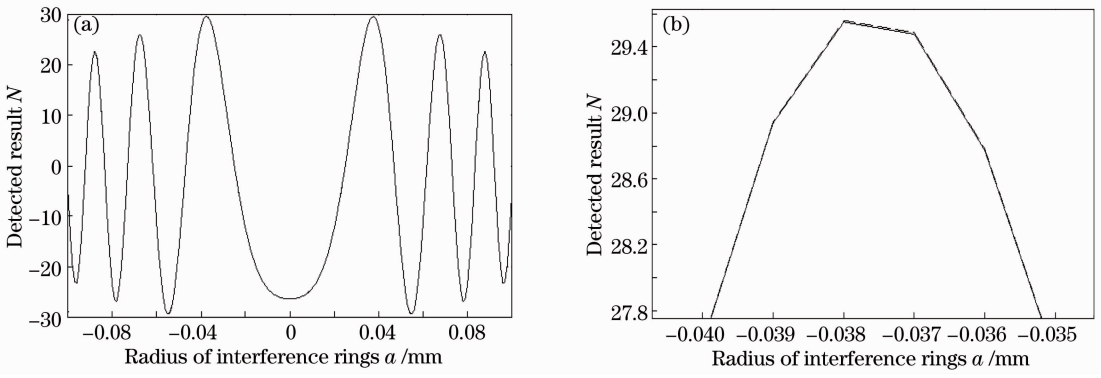


图 1 信号幅值  $N$  模拟结果。(a)  $N$  与  $a$  的关系曲线；(b) 图(a)的局部放大图

Fig. 1 Simulated result of amplitude  $N$ . (a) Curves between detected result  $N$  and radius of interference rings  $a$ ; (b) partial enlargement detail of (a)

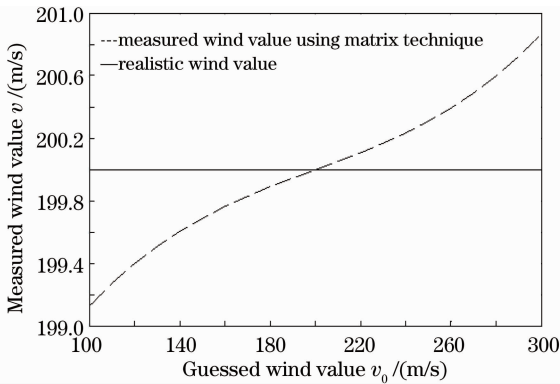


图 2 反演风速与实际风速的差距

Fig. 2 Difference between measured and realistic wind value

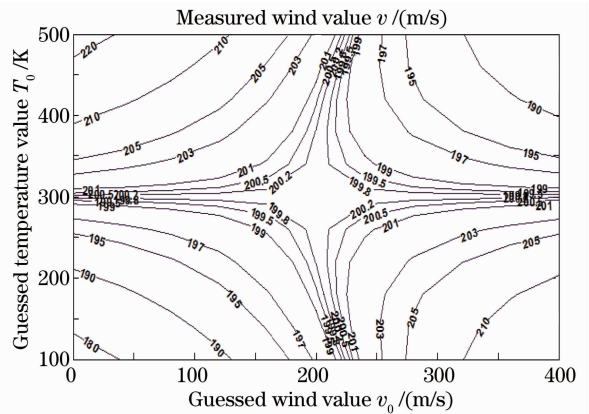


图 4 反演风速随预估风速和温度的变化

Fig. 4 Measured wind value variance with guessed wind and temperature value

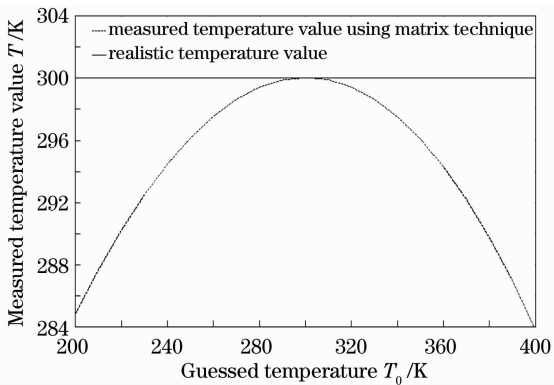


图 3 反演温度与实际温度的差距

Fig. 3 Difference between measured and realistic temperature value

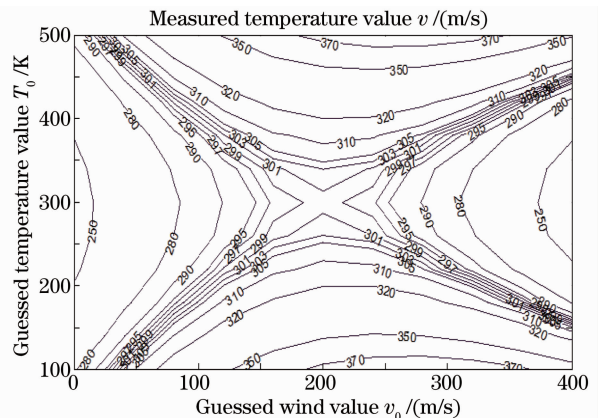


图 5 反演温度值随预估风速和温度的变化

Fig. 5 Measured temperature value variance with guessed wind and temperature value

高线图,如图 4,5 所示,仿真结果表明:当温度估计误差在  $\pm 10$  K 内时,预估风速偏离实际风速  $\pm 150$  m/s 误差依旧在  $\pm 3$  m/s 范围内。同时,当风速估计误差在  $\pm 5$  m/s 内时,预估温度偏离实际值为  $\pm 80$  K 误差依然在  $\pm 10$  K 范围内。

## 5 观测数据支持

根据子午工程对河北省境内的国家天文台兴隆园区( $40.2^\circ$  N,  $117.4^\circ$  E)的风场观测数据资料,如图 6(a)<sup>[16]</sup>所示,利用 630 nm 探测的热层大气经向风场

从第 127 天到第 128 天,风场变化大约 100 m/s。根据武汉大学对新疆观测的数据,如图 6(b)<sup>[14]</sup>所示,9 天内温度的变化不超过 10 K。设实际风速和温度分别为  $v=0$ ,  $T=1000$  K。当风速偏差达到 100 m/s 时利用矩阵简化算法进行模拟仿真,设预估风速和温度分别为  $v_0=100$  m/s、 $T_0=990$  K 时计算得到的风速误差为 1.5154 m/s。当温度偏差为 10 K 时,设预估风速和温度分别为  $v_0=100$  m/s、 $T_0=990$  K 时计算得到的温度误差为 7.017 K。而当预估风速为  $v_0=3$  m/s 时计算得到的温度误差仅为 0.0573 K;表明前文中提出风速和温度同时反演的必要性。

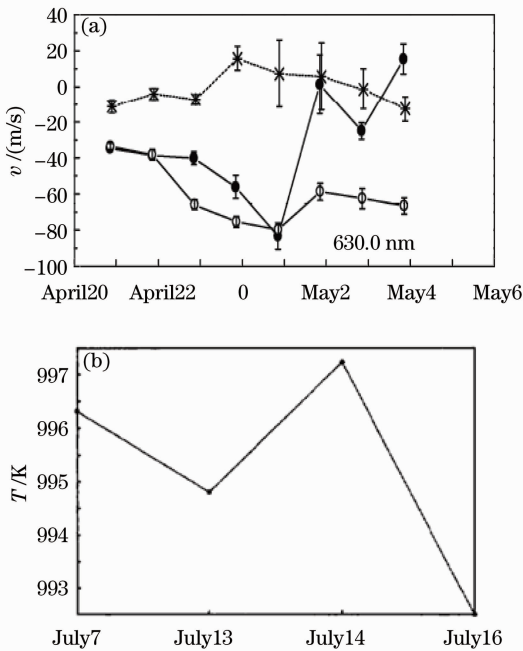


图 6 引用数据图。(a)子午工程在 2010 年 5 月 6~8 日 630.0 nm 处风场探测结果;(b)武汉大学观测 2010 年 7 月 7~16 日温度变化曲线

Fig. 6 Reference data figure. (a) Wind detection at 630.0 nm by "ZIWU" project in 6th~8th May, 2010; (b) temperature curve of variation from WuHan university in 7th~16th July, 2010

## 6 结 论

提出一种基于 FPI 反演大气风速和温度的简化算法,此算法在不进行激光校准和波长变换的情况下直接对温度和风速进行反演。仿真结果表明当预估风速和温度接近实际值的时可反演出精确度极高的风速和温度值;当其偏离值小于 150 m/s 和 80 K 时,可以保证反演风速和温度的误差范围在  $\pm 3$  m/s 和  $\pm 10$  K 内。

## 参 考 文 献

- Zhang Chunmin, Zhu Huachun, Wang Dingyi, *et al.*. Passive measurement technology used for upper atmosphere measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900136.  
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): 0900136.
- Wang Guocheng, Sun Dongsong, Duan Lianfei, *et al.*. Analysis and design of Fabry-Perot etalon of Doppler wind lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0301001.  
王国成, 孙东松, 段连飞, 等. 测风激光雷达法布里-珀罗标准具参数及其性能分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0301001.
- G Hernandez. Analytical description of a Fabry-Perot photoelectric spectrometer [J]. *Appl Opt*, 1966, 5(11): 1745-1748.
- G Hernandez. *Fabry-Perot Interferometers* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- P B Hays, R G Roble. A technique for recovering Doppler line profiles from Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl Opt*, 1971, 10(1): 193-200.
- T L Killeen, P B Hays. Doppler line profile analysis for a multichannel Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(4): 612-620.
- T L Killeen, B C Kennedy, P B Hays, *et al.*. Image plane detector for the dynamics explorer Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl Opt*, 1983, 22(22): 3503-3513.
- K Shiokawa, T Kadota, M K Ejiri, *et al.*. Three-channel imaging Fabry-Perot interferometer for measurement of mid-latitude airglow [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(24): 4286-4296.
- H Nakajima, S Okano, H Fukunishi, *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.
- Zhang Chunmin, Xiangli Bin, Zhao Baochang. Velocity and temperature measurement of upper atmosphere wind field using Fabry-Perot interferometer [J]. *J Xi'an Jiaotong University*, 2000, 34(4): 97-99.  
张淳民, 相里斌, 赵葆常. 用 Fabry-Perot 干涉仪测量上层大气风场的速度和温度[J]. *西安交通大学学报*, 2000, 34(4): 97-99.
- Han Weihua, Lü Jiangong, Wang Yongmei, *et al.*. Thinning and inversion of spaceborne FPI interference fringe pattern [J]. *J Science Technology and Engineering*, 2010, 10(13): 3308-3311.  
韩威华, 吕建工, 王咏梅, 等. 星载 FPI 干涉条纹细化 and 反演算法[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(13): 3308-3311.
- Li Hao, Zhang Yange. Simulation and analysis of thermospheric wind velocity [J]. *J Appl Opt*, 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.
- Li Hao, Zhang Yange. Atmospheric temperature measurement with Fabry-Perot airglow interferometer imaging system [J]. *J Appl Opt*, 2008, 29(6): 921-925.  
李浩, 张燕革. 法布里-珀罗气辉干涉成像仪的大气温度测量原理[J]. *应用光学*, 2008, 29(6): 921-925.
- Zhao Jiangnan, Ai Yong, Wang Jingfang. A method for temperature inversion in middle-upper atmosphere using FPI without laser calibration and its observational data preliminary analysis [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(12): 129401.  
赵江南, 艾勇, 王敬芳. 不需要校准激光的法-帕仪中高层大气温度反演古法和观测数据初步分析 [J]. *物理学报*, 2012, 61(12): 129401.
- Wang Li, Zhou Yi, Hua Dengxin, *et al.*. Theoretical research and simulation of atmospheric wind field and temperature base on Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1001001.

汪 丽, 周 毅, 华灯鑫, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的大气风场及温度场探测理论仿真及研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1001001.

16 Yuan Wei, Xu Jiyao, Ma Ruiping, *et al.*. First observation of mesospheric and thermospheric winds by a Fabry-Perot

interferometer in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 55 (35): 3378–3383.

袁 韡, 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, 2011, 55(35): 3378–3383.

栏目编辑: 韩 峰