

基于法布里-珀罗干涉仪的大气风场及温度场 探测理论研究及仿真

汪 丽 周 毅 华 灯 鑫 王 萌

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 针对基于法布里-珀罗干涉仪的大气风场探测系统, 推导了进行风速、温度反演的理论模型并在理论上进行了模拟验证。利用光学设计软件 Zemax 完成了法布里-珀罗干涉仪系统结构的仿真。通过设定不同波长入射系统, 得到对应干涉条纹, 利用最小二乘拟合圆方法从条纹峰值移动距离可反演出风速, 与理论值进行比对, 得到风速仿真误差小于 4.2%。针对温度探测理论建立了合理的光源光谱文件, 给出理想仿真干涉圆环, 进行数据分析完成温度反演, 计算出温度的仿真误差小于 7.5%。结果表明, 仿真模型、反演理论、数据分析和处理方法是可行的。

关键词 大气光学; 风速温度反演; 系统设计仿真; 法布里-珀罗干涉仪; 条纹成像

中图分类号 P412.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1001001

Theoretical Research and Simulation of the Atmospheric Wind Field and Temperature Based on the Fabry-Perot Interferometer

Wang Li Zhou Yi Hua Dengxin Wang Meng

(School of Mechanical and Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract To counter atmospheric wind-field detection system based on Fabry-Perot interferometer the model of retrieval of wind velocity and temperature is deduced. Using Zemax software, the configuration of the system is numerical simulated, and interference fringes corresponding to two wavelengths are produced. Combined with the method of the least squares fitting a round image, data processing and the wind velocity inversion are completed. And by the comparison of the theoretical values, the accuracy of fringe movement is obtained, and wind velocity error is less than 4.2%. According to temperature detection theory, the reasonable spectrum files are built and ideal simulated interference rings are obtained. Atmospheric temperature can be retrieved, and the error is less than 7.5%. Results show that simulation model, retrieval theory, data analysis and processing method are feasible.

Key words atmospheric optics; velocity and temperature retrieval; system design and simulation; Fabry-Perot interferometer; fringe imaging

OCIS codes 010.1290; 280.4991; 260.3160

1 引 言

大气风场信息的被动探测主要是利用干涉仪以中高层大气中自然存在的气辉和极光为探测谱线, 通过干涉条纹的变化情况反演出大气温度及风速的方法。

法布里-珀罗(F-P)干涉仪用于中高层大气风场探测的研究始于 20 世纪 60 年代^[1,2]。以极光和气辉谱线为探测目标的 F-P 干涉仪大气被动风场探

测技术的研究早于激光雷达条纹成像技术。1991 年搭载于上层大气研究卫星 UARS 上的一台 F-P 风场探测干涉仪发射升空, 用于探测同温层、中间层和低热层的风速、温度及体发射速率等信息^[3~6]。1997 年 Ishii 等^[7]提出了使用两系列的滤波器和成像探测器件的成像 F-P 干涉仪, 可以同时探测 558 nm 和 630 nm 气辉谱线进行探测的双通道 F-P 风场探测干涉仪。1998 年一台三通道 F-P 干涉仪作为光

收稿日期: 2011-03-18; **收到修改稿日期:** 2011-05-11

基金项目: 国家 973 计划(2009CB426302)、教育部高等学校博士学科点基金(20106118120009)和陕西省自然科学基金(2010JQ5004)资助课题。

作者简介: 汪 丽(1979—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光学及大气风场探测等方面的研究。E-mail: wlfuyun@xaut.edu.cn

学中间层热层成像器装置(OMTIS)的一部分被安装在日本 Shigaraki 天文台,并于 1999 年开始工作^[8]。作为热成层-电离层-散逸层-能力学与动力学(TIMED)计划的一部分的 TIMED 多普勒成像仪采用了 F-P 干涉仪,并于 2001 年 12 月搭载于 Delta II7920-10 卫星上发射升空。它用来测试中间层和热层(60~180 km)的水平矢量风和温度,观测谱线是 OI(557.7 nm)和氧分子 O₂(0-0)大气带^[9,10]。此装置采用了 CLIO 系统和高量子效率低噪声的 CCD 探测器。国内西安光机所^[11]、西安交通大学、中国科学院空间中心^[12]和武汉大学^[13~15]等单位也进行了这方面的理论研究。随着我国航空航天技术的发展,对中高层大气的探测研究尤为必要,而利用 F-P 干涉仪进行大气风场被动探测的方法又是一种行之有效的手段。

由于受低层大气气溶胶及大气分子衰减的影响,在地面利用大气极光及气辉进行高层大气风场探测实验研究比较困难,这类装置主要用于星载探测。因此利用光学软件模拟光学系统,并在设定特定参数情况下进行光学系统有效分析及装置的仿真研究是目前开展地面研究的主要有效手段。本文分析了 F-P 干涉仪大气风场和温度的探测原理,对探测系统进行了设计、模拟仿真,并就仿真结果应用反演理论对大气温度和风速进行了数据反演分析和验证。

2 大气风场探测系统构成

基于 F-P 干涉仪的大气风场探测系统主要包含三部分:望远镜光学接收系统、F-P 干涉仪系统和成像系统。气辉在可见光、紫外和红外很宽的波段都有发射,光谱中包含有许多原子、分子和离子的谱线和谱带,氧原子绿线 557.7 nm 是夜气辉可见光波段最强的谱线。80~300 km 高空中的极光或气辉谱线进入望远镜光学接收系统,经滤波、准直系统后进入 F-P 干涉仪,多次反射透射经成像系统形成干涉圆环成像到 CCD 探测器上,最后再由计算机完成数据处理。系统结构示意图如图 1 所示。

3 风速反演的理论分析及模拟验证

F-P 干涉仪透射函数通常由艾里函数描述为

$$T_{FP} = \frac{T^2}{1 + R^2 - 2R\cos\left[\frac{4\pi nd}{\lambda}\left(1 - \frac{a^2}{2f^2}\right) + 2\chi\right]}, \quad (1)$$

式中 T 为膜的强度透过率, R 为膜的强度反射率, d

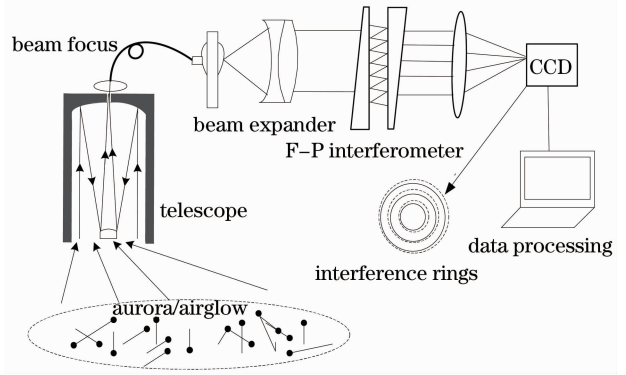


图 1 基于 F-P 干涉仪的大气风场探测系统结构示意图
Fig. 1 Schematic illustration of the atmospheric wind-field detection system based on F-P interferometer

为板间距, f 为成像系统的焦距, a 为干涉条纹峰值到条纹中心的距离, n 为板间介质的折射率, λ 为光波长, χ 为反射产生的相位变化。此式为理想情况下即设入射光为单色光,并忽略损耗时的透射函数。

忽略 χ 的情况下,当透射光强度最大即处于条纹峰值时,存在

$$\delta = \phi = 2m\pi = \frac{4\pi nd}{\lambda}\left(1 - \frac{a^2}{2f^2}\right), \quad (2)$$

得到

$$m = \frac{2nd}{\lambda}\left(1 - \frac{a^2}{2f^2}\right). \quad (3)$$

当波长受风速影响产生多普勒位移 $\Delta\lambda$ 时,对应条纹峰值到条纹中心的距离为 $a_{\lambda+\Delta\lambda}$,此时

$$m = \frac{2nd}{\lambda + \Delta\lambda}\left(1 - \frac{a_{\lambda+\Delta\lambda}^2}{2f^2}\right), \quad (4)$$

应用速度与波长的关系式为

$$\frac{1}{\lambda + \Delta\lambda} = \frac{1}{\lambda}\left(1 + \frac{v}{c}\right), \quad (5)$$

$$v = c\left(\frac{\lambda}{\lambda + \Delta\lambda} - 1\right), \quad (6)$$

$$m = \frac{2nd(1 + v/c)}{\lambda}\left(1 - \frac{a_{\lambda+\Delta\lambda}^2}{2f^2}\right). \quad (7)$$

(3)和(7)式相等,可得到速度的表达式为

$$v = \frac{c(a_{\lambda+\Delta\lambda}^2 - a^2)}{2f^2 - a_{\lambda+\Delta\lambda}^2}. \quad (8)$$

设定 F-P 风场探测干涉仪板间强度透过率为 $T=0.05$,强度反射率 $R=0.95$,折射率 $n=1$,板间距 $d=6$ mm,焦距 $f=50$ mm, $\lambda=557.7000$ nm,在忽略 χ 的情况下,应用(1)式作出透过率 T_{FP} 与 a 之间的关系曲线如图 2 所示,其中实线所示为波长 $\lambda=557.7000$ nm 对应的曲线,虚线为波长 $\lambda=557.6998$ nm 时对应的曲线。图 3 为第一亮条纹的局部放大图。

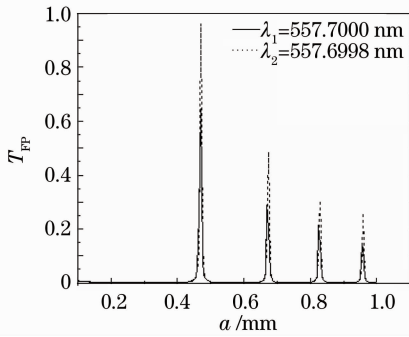
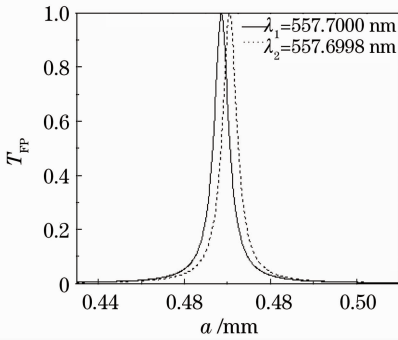
图2 T_{FP} 与 a 的关系曲线Fig. 2 Curves between transmittance T_{FP} and radius of interference rings a 

图3 第一级亮条纹的局部放大图

Fig. 3 Partial enlargement of the first-order bright fringe

这里利用第一亮条纹峰值的位移推导风速的大小。中心波长为 $\lambda = 557.7000$ nm 时对应 $a_1 = 0.4685$ mm, 中心波长移动 0.0002 nm 导致亮条纹中心移动, 此时 $a_2 = 0.4704$ mm, 由(8)式可得 $\nu = 107.04$ m/s。已知波长位移前后的波长值, 根据(6)式可得

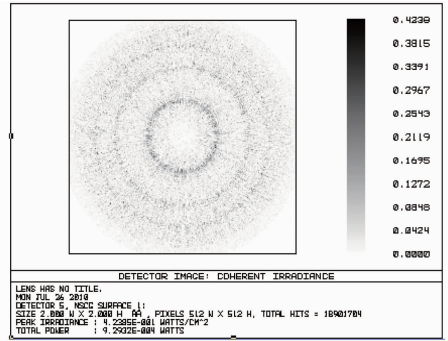
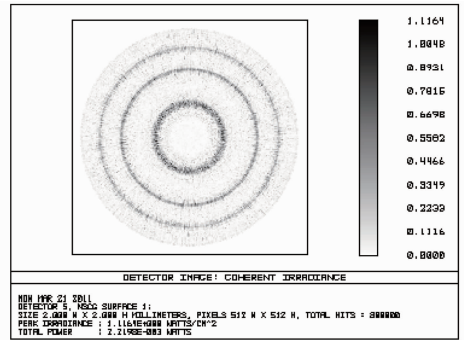
$$\nu = c \left(\frac{\lambda}{\lambda + \Delta\lambda} - 1 \right) = 107.59 \text{ m/s}, \quad (9)$$

可见通过速度反演公式得到的速度与理论值基本一致。

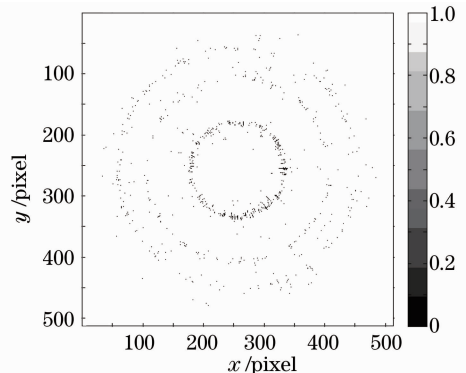
3 风速的仿真计算

利用光学设计软件 Zemax 的非序列模式模拟 F-P 干涉仪系统部分, 板反射率、透射率、板间距及板间介质折射率参数设置同上。探测器像元大小为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 像元个数为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。光源采用点光源, 设定发射角为 1° 。初始波长设定为 557.7000 nm, 经过光线追迹在探测器上可得到干涉条纹, 如图 4 所示。改变入射波长为 557.6998 nm, 得到干涉条纹强度如图 5 所示。对此仿真结果进行数据处理并应用风速反演理论得到风速值。

一定的发散角点光源垂直入射 F-P 系统, 且

图4 $\lambda = 557.7000$ nm 时干涉强度图Fig. 4 Interference strength at $\lambda = 557.7000$ nm图5 $\lambda = 557.6998$ nm 时干涉强度图Fig. 5 Interference strength at $\lambda = 557.6998$ nm

CCD 探测器垂直于光轴, 中心重合, 故假定条纹中心位于探测器中心位置处, 即(256 pixel, 256 pixel)处。提取强度大于 0.17 作为干涉环的有效信息, 提取后的干涉环分别如图 6, 7 所示。提取距离中心 $70 \sim 90$ pixel 范围内的信息点为第一干涉圆环的有效信息点, 用最小二乘拟合圆的方法进行圆拟合, 图 8 和图 9 分别为两个波长的第一干涉圆环拟合后的干涉环图, 其中点划线为拟合圆。波长 557.7000 nm 的圆心坐标(256.308 pixel, 255.931 pixel), 符合之前的假设, 第一环的半径为 0.3034 mm。同理, 在一定风速下谱线中心波长变为 557.6998 nm, 此时的圆

图6 $\lambda = 557.7000$ nm 时干涉强度图Fig. 6 Interference strength at $\lambda = 557.7000$ nm

心坐标(256.401 pixel, 256.388 pixel), 半径长度为 0.3065 mm, 由(8)式可得, $v=112.08$ m/s. 分析结果表明, 相比于理论风速值 107.59 m/s, 反演得到风速的相对误差为 4.2%, 其误差源主要是由 CCD 的分辨率不足引起。

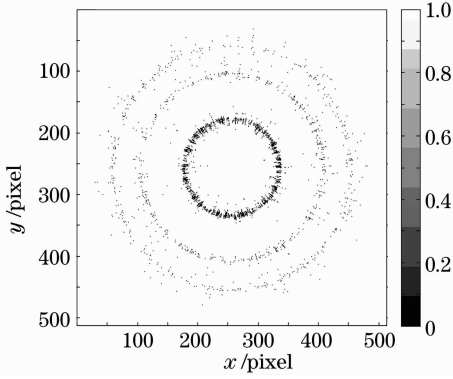


图 7 $\lambda=557.6998$ nm 时的干涉强度图
Fig. 7 Interference strength at $\lambda=557.6998$ nm

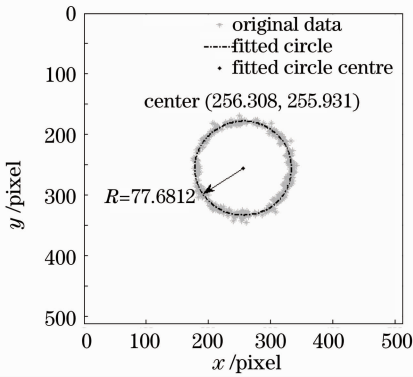


图 8 $\lambda=557.7000$ nm 时的拟合圆
Fig. 8 Fitting circle at $\lambda=557.7000$ nm

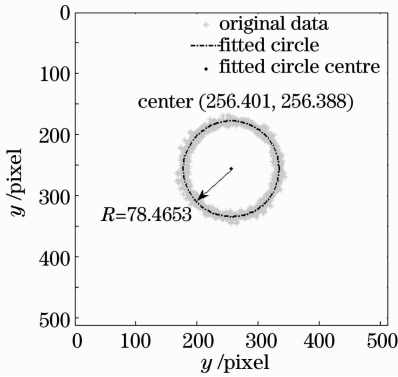


图 9 $\lambda=557.6998$ nm 时的拟合圆
Fig. 9 Fitting circle at $\lambda=557.6998$ nm

4 温度反演的理论分析及模拟验证

大气温度将使谱线的展宽发生变化, 对于具有一定展宽的谱线, 干涉仪的输出信号分布不再是艾

里函数, 而是艾里函数和谱线线型函数的卷积。对于较高层大气谱线多普勒展宽占主要地位, 以多普勒展宽线型函数为例, 输出光强度分布为

$$I = \frac{T^2}{1-R^2} \times \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n \exp\left(-\frac{\pi^2 d^2 \Delta v_D n^2}{\ln 2}\right) \cos(2\pi m n) \right], \quad (10)$$

式中 Δv_D 为谱线的半峰全宽, 其值为

$$\Delta v_D = 2v_0 \sqrt{\frac{2kT_0 \ln 2}{1.66 \times 10^{-27} mc^2}}, \quad (11)$$

式中 T_0 为大气温度。代入上式可得

$$I = \frac{T^2}{1-R^2} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n \times \exp\left(-\frac{8v_0^2 k T_0 \pi^2 d^2 n^2}{1.66 \times 10^{-27} mc^2}\right) \cos(2\pi m n) \right]. \quad (12)$$

在上式中各参数已知的情况下, 可以通过各级条纹的强度反演出温度值。下面是在上述给定特定参数的情况下得到的归一化强度与干涉级次的对应关系图, 图 10 中两条曲线分别对应不同的温度值, 图 11 为一级干涉亮条纹局部放大图。

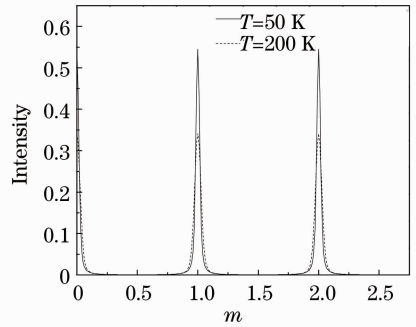


图 10 干涉强度 I 与干涉级次 m 的对应关系图
Fig. 10 Curves between interference strength I of interference fringe and interference orders m

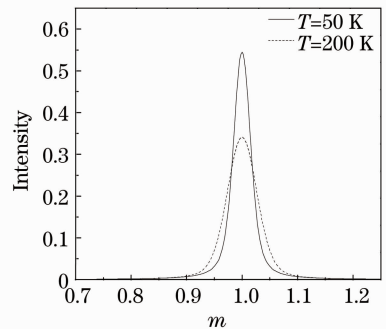


图 11 一级干涉条纹局部放大图
Fig. 11 Partial enlargement of the first-order interference fringe

从图中可以看出,对于不同温度同一级次的干涉条纹对应的强度不同,当温度 $T_0=50$ K 时,根据(11)式可知谱线的半高宽为 6.809×10^8 Hz,此时的一级干涉条纹的强度为 0.545。当温度 $T_0=200$ K 时,谱线的半峰全宽为 1.362×10^9 Hz,一级干涉条纹的强度为 0.341。

5 温度的仿真计算

根据温度反演理论,这里仍采用发散角为 1° 的点光源,仿真温度需要对光源的谱宽进行设定,在 Zemax 软件中通过用户自定义光源文件控制入射光源谱线特性,由 CCD 探测器得到的干涉条纹强度值反演温度值。

归一化后的多普勒线形分布函数及谱宽 $\Delta\lambda$ 与线宽 W_D 的关系为

$$\Delta\lambda = \frac{W_D}{c} \lambda^2, \quad (13)$$

得到关于 λ 的归一化多普勒线形分布函数(分布曲线如图 12 所示)为

$$g_D(\lambda, \lambda_0) = \frac{2\lambda^2}{\Delta\lambda_D c} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \times \exp \left\{ - \left[4 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)^2 \lambda^2 \ln 2 / \Delta\lambda_D^2 \right] \right\}, \quad (14)$$

根据多普勒原理,分别建立满足两个谱线宽的光源文件,谱线中心波长为 557.7000 nm,当 $T_1=50$ K 时, $W_{D1}=6.809 \times 10^8$ Hz, $\Delta\lambda_1=7.059 \times 10^{-3}$ nm, $T_2=200$ K 时, $W_{D2}=1.362 \times 10^9$ Hz, $\Delta\lambda_2=1.412 \times 10^{-3}$ nm。将光源文件加载入点光源属性的光谱文件(Spectrum Files)中,经过干涉系统 CCD 探测器得到了具有一定谱宽的光源干涉环,经平滑处理后如图 13 所示。由图 13 可知,两种不同线宽的光源入射得到的一级干涉环的峰值分别为 0.5389, 0.3511, 由(12)式可知反演获得温度为 51.02 K 和 185.15 K,

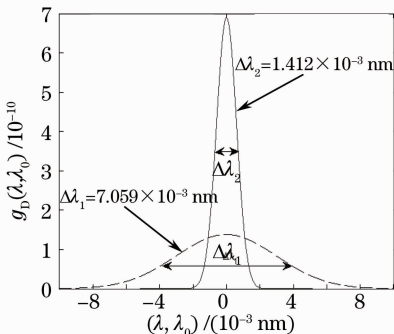


图 12 多普勒加宽谱线函数

Fig. 12 Spectral-line function of Doppler broadening

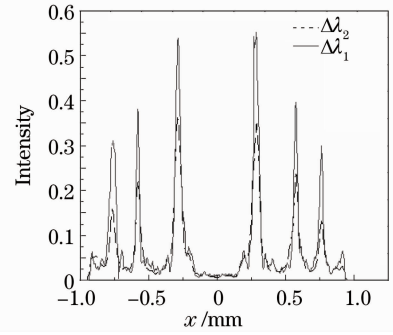


图 13 平滑处理后得干涉环截面图

Fig. 13 Section of interference rings after smooth processing

相比于理论值,其温度的相对误差小于 7.5%,而该误差主要来源于 CCD 像元数不足及反演过程中图像提取时的图形平滑处理算法。

6 结 论

本文具体分析基于 F-P 干涉仪的大气风场探测原理,完成了大气风速、温度的反演理论并进行了模拟验证。利用 Zemax 软件设计了系统结构,设定特定参数得到仿真结果,完成了风速和温度的反演,将其结果与理论值进行对比,风速仿真结果误差小于 4.2%,温度误差小于 7.5%。结果表明,仿真模型、反演理论、数据分析和处理方法的可行性,研究成果可为基于 F-P 干涉仪的中高层大气风场和温度探测装置的研制提供理论保障和前期仿真实验分析。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Timothy L. Killeen, P. B. Hays. Doppler line profile analysis for a multichannel Fabry-Perot interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(4): 612~620
- 3 W. R. Skinner, P. B. Hays, V. J. Abreu. High resolution Doppler imager [C]. Ann Arbor: International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 1987: 673~676
- 4 H. J. Grassl, W. R. Skinner, P. B. Hays *et al.*. Atmospheric wind measurements with the high-resolution Doppler imager[J]. *J. Spacecraft and Rockets*, 1995, **32**(1): 169~176
- 5 H. J. Grassl, W. R. Skinner, P. B. Hays *et al.*. The high resolution Doppler imager (HRDI) on the upper atmosphere research satellite[C]. Reno: 31st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1993: 1~11
- 6 V. J. Abreu, P. B. Hays, W. R. Skinner. The high resolution Doppler imager[J]. *Opt. Photon. News*, 1991, **2**(10): 28~30
- 7 K. Shiokawa, T. Kadota, Y. Otsuka *et al.*. A two-channel Fabry-Perot interferometer with thermoelectric-cooled CCD detectors for neutral wind measurement in the upper atmosphere [J]. *Earth Planets Space*, 2003, **55**(5): 271~275

- 8 K. Shiokawa, T. Kadota, Mitsumu K. Ejiri *et al.*. Three-channel imaging Fabry-Perot interferometer for measurement of mid-latitude airglow [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40** (24): 4286~4296
- 9 W. R. Skinner, R. J. Niciejewski, T. L. Killeen *et al.*. Operational performance of the TIMED Doppler interferometer (TIDI) [C]. *SPIE*, 2003, **5157**: 47~57
- 10 T. L. Killeen, W. R. Skinner, R. M. Johnson *et al.*. TIMED Doppler interferometer (TIDI) [C]. *SPIE*, 1999, **3756**: 289~301
- 11 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
- 12 Wang Yongmei, Fu Liping, Du Shusong *et al.*. Development for detecting upper atmospheric wind and temperature from satellite [J]. *Chinese J. 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
- 13 Zhao Zhengqi, Zhou Xiaoshan, Ai Yong. Wind-velocity detection in upper atmosphere with scanning Fabry-Perot interferometer [J]. *J. Applied Optics*, 2006, **27**(6): 558~562
赵正启, 周小珊, 艾勇. 扫描式法布里-珀罗干涉仪测量高空大气风速[J]. *应用光学*, 2006, **27**(6): 558~562
- 14 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
- 15 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