

高层大气被动探测技术

张淳民^{1,2} 朱化春^{1,2} 王鼎益^{1,3} 赵葆常⁴ 代海山^{1,2} 张霖^{1,5}

¹西安交通大学理学院, 陕西 西安 710049

²非平衡物质结构及量子调控教育部重点实验室, 陕西 西安 710049

³加拿大纽布朗斯维克大学物理系, 弗里德里克顿 E3B5A3, 加拿大

⁴中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 陕西 西安 710068

⁵柏林自由大学物理系, 柏林 14195, 德国

摘要 简要介绍了高层大气被动探测技术的研究历史、现状和发展趋势。论述了高层大气被动探测技术的基本原理和方法, 给出了高层大气被动探测的辐射源和气辉谱线、四强度探测法和临边探测模式。重点介绍了自行设计研制的风成像干涉仪的宽场、消色差、温度补偿理论以及工程设计和研制。采用风成像干涉仪进行了模拟高层大气探测实验, 给出了高层大气风场、温度和压强的探测结果。该研究对空间探测、对地观测、军事、国家安全和国民经济建设均具有科学意义和应用价值。

关键词 大气光学; 高层大气; 被动探测; 风成像干涉仪

中图分类号 P412.27; O436.1; P356

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201131.0900136

Passive Measurement Technology Used for Upper Atmosphere Measurement

Zhang Chunmin^{1,2} Zhu Huachun^{1,2} Wang Dingyi^{1,3} Zhao Baochang⁴
Dai Haishan^{1,2} Zhang Lin^{1,5}

¹ School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

² Non-Equilibrium Condensed Matter and Quantum Engineering Laboratory, the Key Laboratory of Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710049, China

³ Physical Department, University of New Brunswick, Fredericton, E3B5A3, Canada

⁴ Space Optical Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China

⁵ Physics Department, Free University of Berlin, Berlin 14195, Germany

Abstract The history, status and the future of the passive measurement technology used for upper atmosphere measurement (UAM) are introduced. The principle and method for UAM are introduced. The emission source, four intensities method, and limb measurement model for UAM are presented. The design and manufacture of field-widened, achromatic, temperature compensation wind imaging interferometer (FATWindII) developed are described emphatically. The laboratory experimental system for simulation measurement of FATWindII is built up. Based on this experimental system, some simulation measurement results of velocity, temperature and pressure of upper atmosphere are presented in this paper. The research has scientific significance and practical value for physical geography, atmospheric science, environment protection, national defense and national economic construction.

Key words atmospheric optics; upper atmosphere; passive measurement; wind imaging interferometer

OCIS codes 010.0280; 010.290; 110.3175; 120.4750; 260.3160

收稿日期: 2011-08-01; **收到修改稿日期:** 2011-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(40875013)、国防基础科研项目(A1420080187)、国家 863 计划(2006AA122152)、国家自然科学基金重点项目(40537031)、国家重大专项项目(E0310/1112/JC02)和 2010 苏州大学省级重点实验室开放课题(KJS1001)资助课题。

作者简介: 张淳民(1956—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事空间光学,光谱成像技术和大气光学等方面的研究。

E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

1 引 言

高层大气被动探测是当前地球大气遥感探测的前沿课题和研究热点,其基本原理是应用干涉成像光谱技术探测大气中目标谱线的辐射强度和电磁波的多普勒频移,从而反演出高层大气风场、温度、压强、粒子辐射率和大气成分等^[1~11]。这种探测方法是以高层大气中产生的气辉为光源,通过探测目标大气四幅不同相位的干涉图来获知高层大气的基本信息。通过高层大气的探测,人们可以获知大气的基本特征;可以描绘出大区域、大范围的大气波现象;了解高层大气的空间分布与基本信息。该研究对航天器的发射与运行、军事气象、对地观测、空间探测和国民经济建设均具有重要的科学意义和应用价值。

基于宽场迈克耳孙干涉仪的高层大气被动探测技术是以高层大气中自然形成的气辉为光源(无须发射源),具有大视场和高探测灵敏度,适合大范围颗星载探测,目前已成为国际上的前沿科学和研究热点。

20世纪50年代以来,被动式大气风场探测技术获得了迅猛发展。1966年 Hilliard 等^[12]提出了基于宽场迈克耳孙干涉仪的风成像干涉仪(WAMI)。1985年 Shepherd 等^[13]又提出了适用于星载探测的WAMDII(Wide-angle Michelson Doppler Imaging Interferometer)。目前国际上高层大气被动探测的成功范例是美国航空航天局(NASA)1991年发射的高层大气研究卫星 UARS(Upper Atmosphere Research Satellite)所搭载的风成像干涉仪(WINDII),由加拿大、法国和美国 NASA 共同研制^[14]。由 Gault 等^[15]设计用于红外波段探测的 SWIFT 已处于工程研制阶段。

国内西安交通大学和中国科学院西安光学精密机械研究所从1997年开始联合开展了高层大气风场被动探测研究,该课题组对高层大气被动探测的理论、原理、方案进行了深入的研究,提出了全方位、

多方向、大视场、高灵敏度的高层大气风场探测的创新性原理、探测模式和实施方案,克服了一维探测方式的缺点,极大地提高了探测效率和探测精度^[16,17];对极光的产生机理进行了深入研究,拓展了适合风场探测的光源种类;对最接近实际的佛克脱轮廓谱线的形成及佛克脱轮廓大气风场探测进行了深入研究,使风场探测理论、测量结果与太空环境的客观实际更加符合^[18];研究了日光与大气相互作用的物理与化学过程,将高层大气被动探测推广到同温层与中间层;研制了先进的实验装置——宽场、消色差、温度补偿透镜扫描型风成像干涉仪实验样机,进行了模拟星载探测实验,获取了大气风场的速度场、温度场的相关信息。先后获国家自然科学基金重点项目、国家863计划、国防基础科研计划等多项资助^[19~34]。

2 高层大气被动探测原理

2.1 探测辐射源——气辉

气辉是地球高层大气吸收太阳电磁辐射所产生的微弱光辐射现象,正是有了气辉才使得夜晚的天空不是一片漆黑。气辉出现在地球上空50~500 km之间,亮度比极光低得多,分布也比较均匀,不易被人们察觉,只有用敏感的仪器才能发现。气辉发射所需要的能量来自于太阳电磁辐射。太阳辐射通过直接和间接的作用,使高层大气中的原子、分子和离子激发到较高的能态,激发粒子由高能态跃迁到较低的能态时发射光子,即产生气辉。气辉可存在于可见光、紫外和红外等很宽的波段,光谱中包含有许多原子、分子和离子的谱线或谱带,在可见光和近红外区还叠加有连续谱。

综合考虑气辉谱线的空间分布、辐射强度以及仪器特征等,高层大气被动探测中使用了5条谱线作为探测源,如表1所示^[14]。

表1 高层大气探测所使用的谱线的发射特征

Table 1 Emission characteristics of spectral lines used for UAM

Emission line	Lifetime /s	Wavelength /nm	Height range /km	Peak altitude /km	Half width /km
O(¹ S) green line	0.8	557.7	lower 80~90	97	15
			upper 150~300	200	50
O(¹ D) red line	110	630.0	150~300	~250	~100
OH(8-3) band	4.2	730.0	80~110	87	10
O ₂ 分子(0-0) band	14	762.0	80~110	94	10
O ⁺ line	5	732.0	200~300	~150	~50

2.2 高层大气被动探测原理——四强度探测法

线分布可用高斯线型描述^[13]

$$B(\sigma) = B_0 \exp\{-4(\sigma - \sigma_0)^2 \ln 2 / W^2\}, \quad (1)$$

由于高层大气谱线以多普勒展宽为主,因此谱

式中 B_0 为波数 σ 等于中心波数 σ_0 时光源的辐射强度, W 为半峰全宽^[13]

$$W = [(7.16 \times 10^{-7})^2 \sigma_0^2 T/M]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 T 为热力学温度(单位为 K), M 为原子量。对(1)式进行傅里叶变换, 则可得到干涉强度的分布函数^[13]

$$I(\Delta) = I_0 [1 + \exp(-QT\Delta^2) \cos(2\pi\sigma_0\Delta)], \quad (3)$$

式中 $Q = 1.82 \times 10^{-12} (\sigma_0^2/M)$, Δ 为有效光程差, I_0 为平均强度。则干涉条纹的调制度为^[13]

$$V = \exp(-QT\Delta^2) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (4)$$

把(4)式代入(3)式可得^[13]

$$I = I_0 [1 + V \cos(2\pi\sigma_0\Delta)], \quad (5)$$

式中 σ_0 为零风速时的波数, 由电磁波的多普勒效应可得

$$\sigma = \sigma_0 (1 + v/c), \quad (6)$$

式中 v 为光源与仪器的相对速度, c 为光速。令

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta', \quad (7)$$

Δ_0 称为基准光程差, 且 $\cos(2\pi\Delta_0\sigma_0) = 1$ 。 Δ' 为仪器以 $\lambda/4$ 为间隔的步进光程差。将(6)和(7)式代入(5)式, 化简并消去极小项可得^[13]

$$I = I_0 [1 + V \cos(\phi + 2\pi\sigma_0\Delta')], \quad (8)$$

式中^[13]

$$\phi = 2\pi\sigma_0\Delta_0 \frac{v}{c} \quad (9)$$

是由风速而产生的多普勒位移。

假定 Δ' 从 $\Delta' = 0$ 以 $\lambda/4$ 的步进递增, 得到每一步的干涉强度, 分别为^[13]

$$I_1 = I_0 (1 + V \cos \phi), \quad (10)$$

$$I_2 = I_0 (1 - V \sin \phi), \quad (11)$$

$$I_3 = I_0 (1 - V \cos \phi), \quad (12)$$

$$I_4 = I_0 (1 + V \sin \phi), \quad (13)$$

由以上 4 式可以获得^[13]

$$I_0 = (I_1 + I_3)/2 = (I_2 + I_4)/2, \quad (14)$$

$$V = [(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2]^{1/2} / 2I_0, \quad (15)$$

$$\tan \phi = (I_4 - I_2) / (I_1 - I_3). \quad (16)$$

得到调制度 V 和 ϕ 后, 分别利用(4)式和(9)式, 即可求得大气风场的温度和速度。

2.3 临边探测原理

高层大气被动探测中为了探测高层大气的垂直廓线, 使用了临边探测模式, 卫星临边探测的原理如图 1 所示。地球大气是包裹着地球的一层很厚的膜层, 在实际处理的时候把大气层分成很多厚度相等的层。在临边探测中仪器的视线方向与大气层的切

线方向平行。这样仪器一次测量即可以获得目标大气的垂直分布情况。

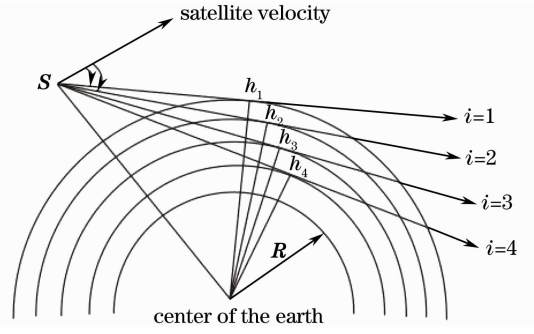


图 1 临边探测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of limb viewing measurement

3 风成像干涉仪宽场、消色差、温度补偿原理

3.1 风成像干涉仪原理

图 2 为新型风成像干涉仪系统原理图, 它由前置望远系统(lens1), 分束器(BS), 补偿介质包括玻璃 1(G1)、玻璃 2(G2)、玻璃 3(G3)以及空气隙, 静镜(Ms), 动静(Mm)以及纳米压电步进装置(PI), 成像光学系统(lens2)和 CCD 构成。

进入新型风成像干涉仪的光线, 首先经过前置望远系统准直, 进入分束器, 分为两束光, 一束被反射后通过 G1, G2 到达反射镜(Ms), 被反射回来通过分束器经成像光学系统, 另一束通过分束器后经过 G3 和空气隙到达反射镜(Mm), 被反射回来后, 再经分束器反射后通过成像光学系统, 两束光线汇聚后在 CCD 上干涉, 形成干涉图。

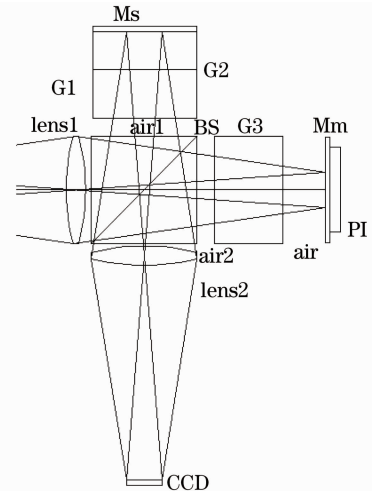


图 2 新型风成像干涉仪原理图

Fig. 2 Schematic of a novel wind imaging interferometer

3.2 风成像干涉仪宽场、消色差、温度补偿原理

适合大气风场探测的大光程差、宽场、消色差、温度补偿的风成像干涉仪,在原理、理论上须满足以下5个方程^[35]。

基准光程差

$$\Delta_0 = D, \quad (17)$$

光程差的二次项的系数和为零

$$\omega = 0, \quad (18)$$

消色差条件

$$\frac{\partial \omega}{\partial \lambda} = 0, \quad (19)$$

消温差条件

$$\frac{\partial \Delta_0}{\partial T} = 0, \quad (20)$$

消复色温差

$$\frac{\partial^2 \Delta_0}{\partial T \partial \lambda} = 0. \quad (21)$$

图3为自行设计的宽场消色差温度补偿型风成像干涉仪的原理图。它由一块分束器和3块不同材质的玻璃及一层空气隙组成。在风成像干涉仪的一个臂上加两块不同的(或一块)玻璃,而在另一个臂上加上一块玻璃(或两块玻璃)和空气隙,以实现风成像干涉仪的宽场、消色差和温度补偿的目的。

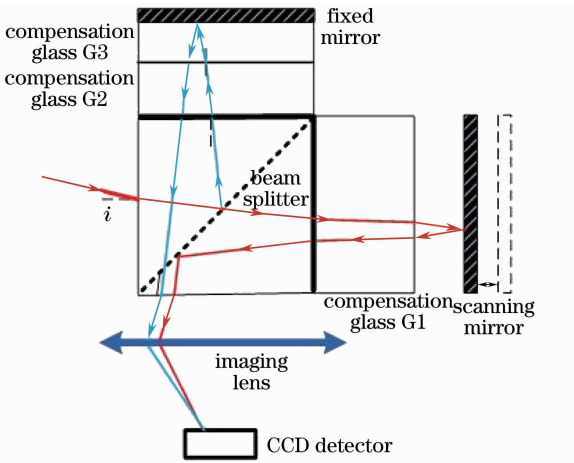


图3 宽场、消色差、温度补偿风成像干涉仪补偿原理图

Fig. 3 Schematic of compensation for field-widened, achromatic, temperature-compensated wind imaging interferometer (FATWindII)

如图3所示,风成像干涉仪单臂上的光程分别为^[13]

$$P_1 = 2(n_1 d_1 \cos \theta_1 + n_2 d_2 \cos \theta_2 + n_3 d_3 \cos \theta_3), \quad (22)$$

式中 n_1, n_2, n_3 分别为分束器、补偿玻璃1和2的折射率, d_1, d_2, d_3 分别为分束器、补偿玻璃1和2的厚度, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为光线进入分束器、补偿介质1和2后的折射角^[13]。

$$P_2 = 2(n_4 d_4 \cos \theta_4 + n_5 d_5 \cos \theta_5), \quad (23)$$

式中 n_4, n_5 分别为分束器、补偿玻璃3和4的折射率, d_4, d_5 分别是分束器、补偿玻璃3和4(空气隙)的厚度, θ_4, θ_5 分别为光线进入分束器、补偿介质3和4后的折射角。

(22)式与(23)式相减可得系统的光程差为^[34]

$$\Delta = 2(n_2 d_2 \cos \theta_2 + n_3 d_3 \cos \theta_3 - n_4 d_4 \cos \theta_4 - n_5 d_5 \cos \theta_5), \quad (24)$$

令(24)式角标从1开始,在风成像干涉仪臂1的介质的厚度为正,在干涉仪臂2上的介质的厚度为负,则可得^[34]

$$\Delta = 2(n_1 d_1 \cos \theta_1 + n_2 d_2 \cos \theta_2 + n_3 d_3 \cos \theta_3 + n_4 d_4 \cos \theta_4), \quad (25)$$

对(25)式进行展开,并代入初始条件可得^[34]

$$\begin{aligned} \Delta = & 2(n_1 d_1 + n_2 d_2 + n_3 d_3 + n_4 d_4) - \\ & \sin^2 i \left(\frac{d_1}{n_1} + \frac{d_2}{n_2} + \frac{d_3}{n_3} + \frac{d_4}{n_4} \right) - \\ & \frac{\sin^4 i}{4} \left(\frac{d_1}{n_1^3} + \frac{d_2}{n_2^3} + \frac{d_3}{n_3^3} + \frac{d_4}{n_4^3} \right) - \dots, \end{aligned} \quad (26)$$

式中 i 为光线进入分束器的入射角。

所以可得基准光程差为^[34]

$$\Delta_0 = 2(n_1 d_1 + n_2 d_2 + n_3 d_3 + n_4 d_4), \quad (27)$$

宽场条件为^[34]

$$\frac{d_1}{n_1} + \frac{d_2}{n_2} + \frac{d_3}{n_3} + \frac{d_4}{n_4} \Big|_{\lambda=\lambda_0} = 0, \quad (28)$$

(28)式两端对波长求导,即可得到消色差条件,为^[34]

$$\frac{d_1}{n_1^2} \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} + \frac{d_2}{n_2^2} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} + \frac{d_3}{n_3^2} \frac{\partial n_3}{\partial \lambda} + \frac{d_4}{n_4^2} \frac{\partial n_4}{\partial \lambda} = 0, \quad (29)$$

(29)式两端对温度求导,即可得到消单色温差条件为^[34]

$$\begin{aligned} & d_1(n_1 \alpha_1 + \beta_1) + d_2(n_2 \alpha_2 + \beta_2) + \\ & d_3(n_3 \alpha_3 + \beta_3) + d_4(n_4 \alpha_4 + \beta_4) = 0, \end{aligned} \quad (30)$$

式中, α 为玻璃的线性膨胀系数, β 为折射率随温度变化系数,在玻璃选定的情况下,这两个参数为定值。

联立(27)~(30)式可得^[34,35]

$$\begin{cases} \Delta_0 = 2(n_1 d_1 + n_2 d_2 + n_3 d_3 + n_4 d_4) \\ \frac{d_1}{n_1} + \frac{d_2}{n_2} + \frac{d_3}{n_3} + \frac{d_4}{n_4} \Big|_{\lambda=\lambda_0} = 0 \\ \frac{d_1}{n_1^2} \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} + \frac{d_2}{n_2^2} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} + \frac{d_3}{n_3^2} \frac{\partial n_3}{\partial \lambda} + \frac{d_4}{n_4^2} \frac{\partial n_4}{\partial \lambda} = 0 \\ d_1(n_1 \alpha_1 + \beta_1) + d_2(n_2 \alpha_2 + \beta_2) + \\ d_3(n_3 \alpha_3 + \beta_3) + d_4(n_4 \alpha_4 + \beta_4) = 0 \end{cases} \quad (31)$$

综上所述可知,(31)式中只有介质(包括玻璃和空气隙)的厚度是未知变量,方程组有4个方程,4个未知量,理论上可以解出4个未知变量,即介质的厚度,且得到的结果可以完全满足(30)式,即消单色温差的要求。

3.3 宽场、消色差、温度补偿风成像干涉仪的设计与研制

使用三层介质和四层介质,可分别得到两组风成像干涉仪补偿玻璃对,如表2和表3所示。使用四层介质的玻璃对在获得良好的宽场效果的同时,可以消去风成像干涉仪的单色温差,对复色温差起到了很好的补偿作用^[34]。

表2 四层介质时的补偿方案

Table 2 Compensation scheme of four medium layers

	Glass G1 (arm 1)	Glass G2 (arm 2)	Glass G3 (arm 2)	Medium 4 (arm 2)
Glass	N-KF9	N-LASF44	P-PK53	Vacuum

表3 三层介质时的补偿方案

Table 3 Compensation scheme of three medium layers

	Glass G1 (arm 1)	Glass G2 (arm 2)	Medium 3 (arm 2)
Glass	LF5	N-LaF21	Air gap

3.3.1 动镜扫描型风成像干涉仪

宽场、消色差、温度补偿动镜扫描型风成像干涉仪实验样机由宽场消色差温度补偿风成像干涉仪、前置频移系统和数据采集与处理系统组成。由散射板,准直透镜组 lens1,干涉仪系统,纳米步进装置,成像光学系统 lens2,面阵 CCD 组成。如图4所示,前置频移系统收集的光线,经过光纤传入风成像干涉仪系统,照射在扩散板上,变成强度均匀的面光源。然后经过光阑(stop)后通过准直透镜组(lens1),进入分束器变成两束光(一束反射光,一束透射光)。反射光经过补偿玻璃 G1、空气隙被静镜反射镜反射后再次经过空气隙、补偿玻璃 G1 后被分束器透射。透射光经过补偿玻璃 G2、空气隙被动镜反射镜反射后再次经过空气隙、补偿玻璃 G2,被分束器反射,两束光被成像系统(lens2)汇聚在 CCD 上,在 CCD 的感光面上发生干涉,干涉数据经由数据线传入数据采集与处理系统(计算机),纳米步进装置推动动镜按 $\lambda/8$ 步进4次后,即可得到4幅干涉图像,利用这4幅干涉图,即可以反演出速度、温度等信息。

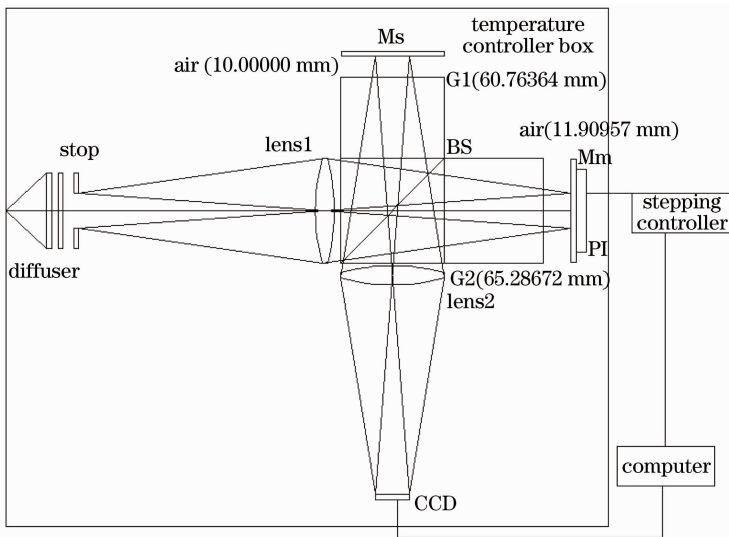


图4 动镜扫描型风成像干涉仪实验样机系统图

Fig. 4 Mirror-scanning FAT wind II experimental system system

扩散板是为了将前置频移系统收集到的光线经变成均匀的面光源,使光线光强在 $6^\circ \times 6^\circ$ 的立体角锥内分布均匀。之所以使用该装置,是因为激光的能量比较集中,而实验中,希望光源是均匀的面光

源。在实际的风成像干涉仪中,该装置是不存在的。前置准直透镜系统 lens1 和成像光学系统 lens2 为项目组自行设计,干涉仪的视场角为 $6^\circ \times 6^\circ$ 。风成像干涉仪主体系统由分束器 BS,补偿玻璃

G1, 补偿玻璃 G2, 静镜反射镜 Ms, 动镜反射镜 Mm 组成。因造价和加工精度等原因, 使用了表 3 中三层介质的补偿方案。

动镜直接连接在纳米步进装置上, 纳米步进装置是控制动镜按波长的 1/8(光程差按 $\lambda/4$) 步进。

CCD 相机和纳米步进装置通过数据线连接到计算机上。实验中可以通过计算机控制纳米步进装置推动动镜按需要的方式步进以及控制 CCD 采集干涉数据。

3.3.2 风成像干涉仪频移系统

前置频移系统的作用是在实验室中产生可控的

多普勒频移光源(在实际星载、机载探测中不需要此部分)。

前置频移系统由光源(激光器)、光隔离器(OI)、光谱分析仪、转盘系统、反射镜、光线收集透镜和光纤组成, 其光路如图 5 所示。由激光产生的光线经过光隔离器, 再经过分束器, 产生两束光, 一束到达光谱分析仪(用来监视光源的频率, 功率的稳定性); 一束穿过反射镜中心的小孔, 到达转盘系统, 经转盘边缘的漫反射膜反射后到达收集透镜, 收集透镜将该光束会聚在光纤收集端面上, 然后经由光纤传入干涉仪系统, 在 CCD 感光面上产生干涉。

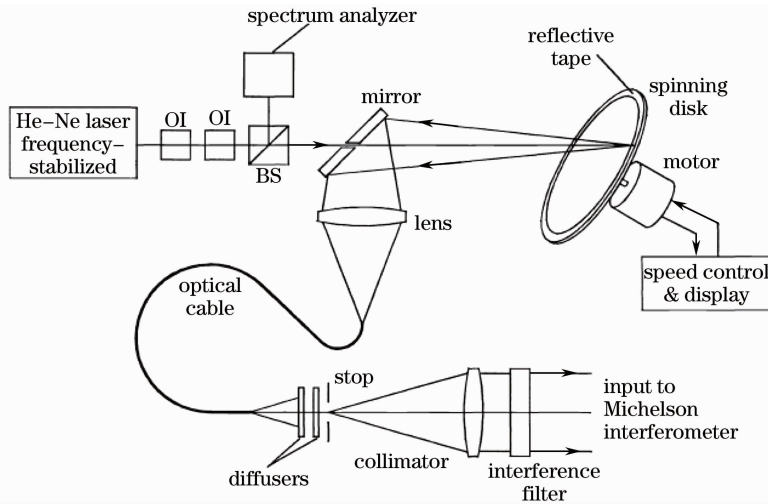


图 5 前置频移系统

Fig. 5 Proposed frequency shift system

光隔离器用来隔离反射光线, 消除反射光线对激光器的反馈, 以保证激光器输出频率和功率的稳定。

转盘直径为 30 cm, 边缘贴有漫反射纸(高速路上路标反射膜), 用来产生漫反射光。

模拟产生的速度为^[36]

$$v = 2\pi d\omega \cos \alpha, \quad (32)$$

式中 d 为转盘的直径, ω 为转盘的转速, α 为转盘法线和入射光线的夹角, 实验中使 α 为 45° 。

4 模拟探测实验研究

为了验证新型风成像干涉仪的工作原理, 搭建了一台宽场、消色差、温度补偿风成像干涉仪的实验系统; 使用该风成像干涉仪实验系统, 进行了星载模拟实验, 得到了风成像干涉仪干涉图, 反演得出了多普勒风速, 实验结果显示, 该仪器的测量精度达到了仪器的设计指标。

4.1 暗电流测量

模拟测量实验过程如图 6 所示, 首先应测量系

统的暗电流。实验中, 使用黑布罩住仪器, 测量暗电流 100 次, 以获取平均暗电流, 如图 7 所示。

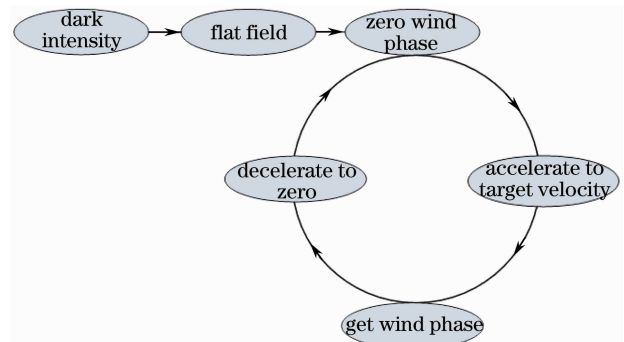


图 6 宽场、消色差、温度补偿风成像干涉仪实验系统测量过程示意图

Fig. 6 Measurement processes for FATWindII experimental system

4.2 平 场

系统接通光源, 测量 100 次系统的强度, 利用公式

$$F_f = \frac{I_{\max} - D}{I - D}, \quad (33)$$

可以求出每个像素点对应的平场系数。 (33) 式中 I_{\max} 为 CCD 读取的最大强度值(原始计数 R_{DN}), D

为该像素的暗电流强度值, I 为该像素点的强度值。该系数如图 8 所示。

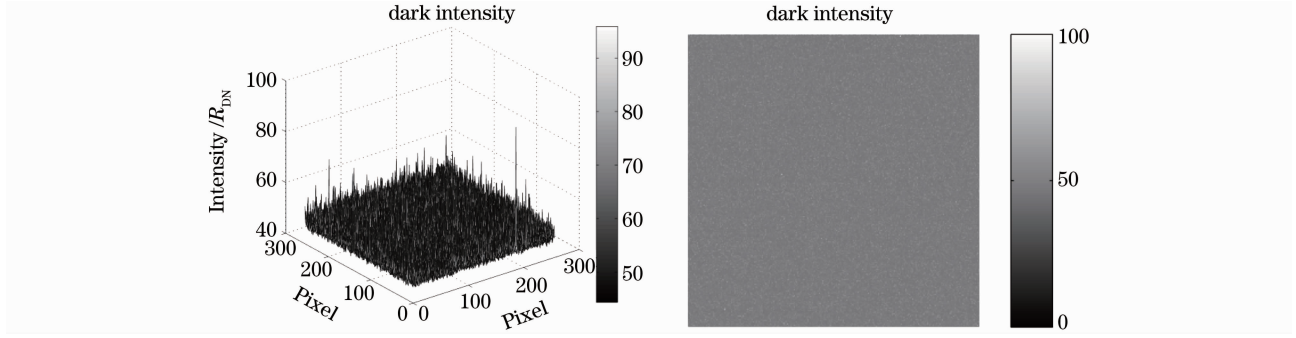


图 7 系统暗电流

Fig. 7 Dark current intensity for system

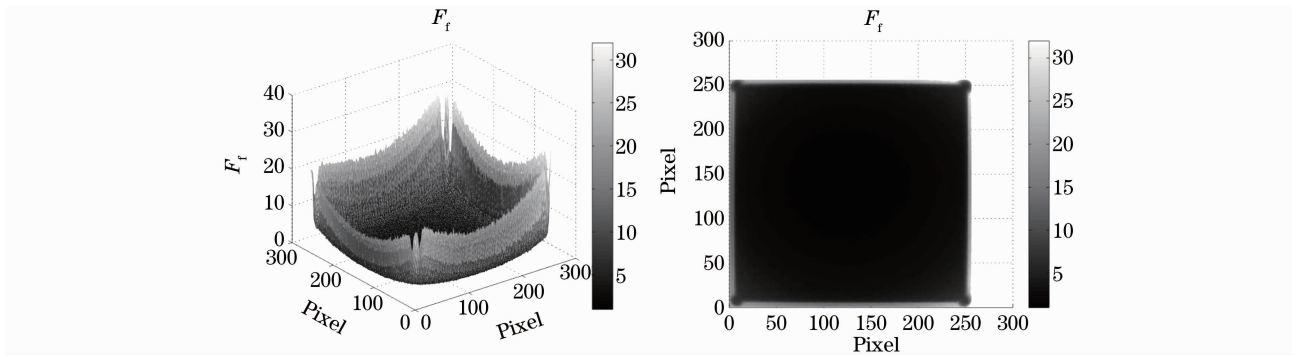


图 8 宽场、消色差、温度补偿风成像干涉仪实验系统平场系数

Fig. 8 Flat factor for FATWindII experimental system

利用

$$I_f = (I - D) \times F_f, \quad (34)$$

可以求出每个像素点平场后的强度。

图 9 为未平场前同一相位的 4 幅干涉图, 图 10

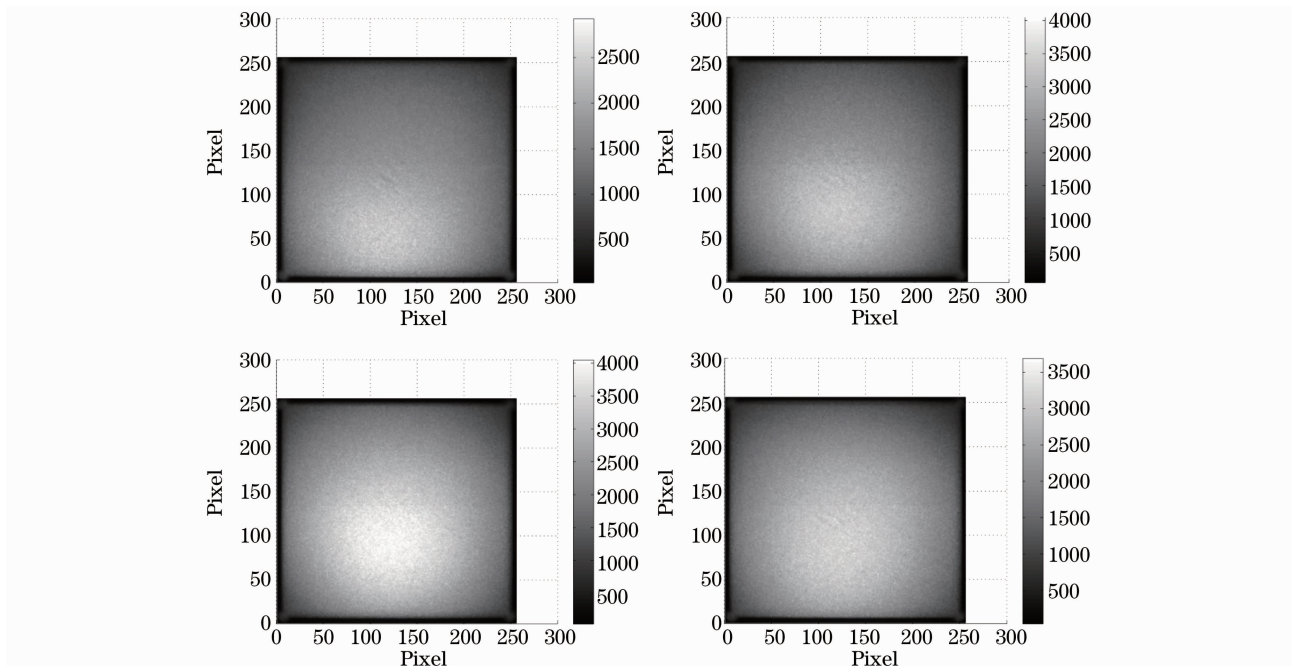


图 9 未平场时同一相位 4 幅干涉图

Fig. 9 Four interferograms before flatting field

为平场后的 4 幅干涉图。可以看到,经过平场后,干涉图的强度变化较为平滑,消除了由于透镜通光不均

匀造成的强度误差,为后续的风速反演奠定了基础。

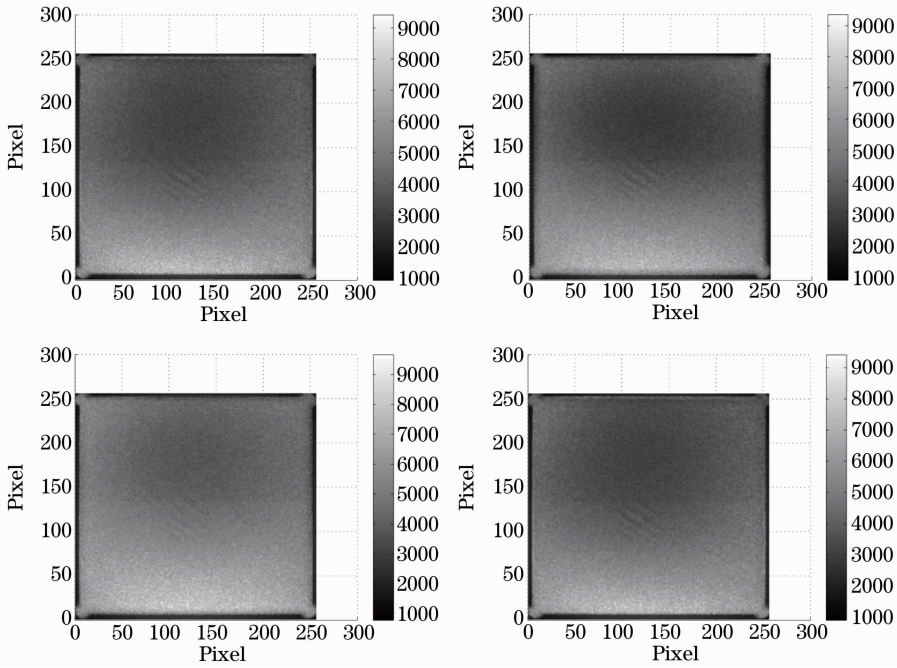


图 10 平场后同一相位 4 幅干涉图

Fig. 10 Four interferograms after flattening field

4.3 风速的测量

转盘转速调为零的时候,纳米步进装置带着动镜按 $\lambda/8$ 步进。动镜每步进一次,记录一幅干涉图,测量 4 次,得到 4 幅干涉图。利用四强度法,可以测得一个多普勒相位,该多普勒相位即为零风速的相位。然后调节电机的转速,使之达到需要的转速(如

600 r/m,此时产生的多普勒风速约为 13 m/s),测量 4 次,得到 4 幅干涉图,同样利用四强度法,可以得到转盘转动时的相位。两个相位相减,即可以得到由多普勒频移产生的相位。然后利用风速和相位的对应关系公式,求出风速,此时风速如图 11 所示。图中左半部分为风速立体显示,右半部分为风速俯视图。

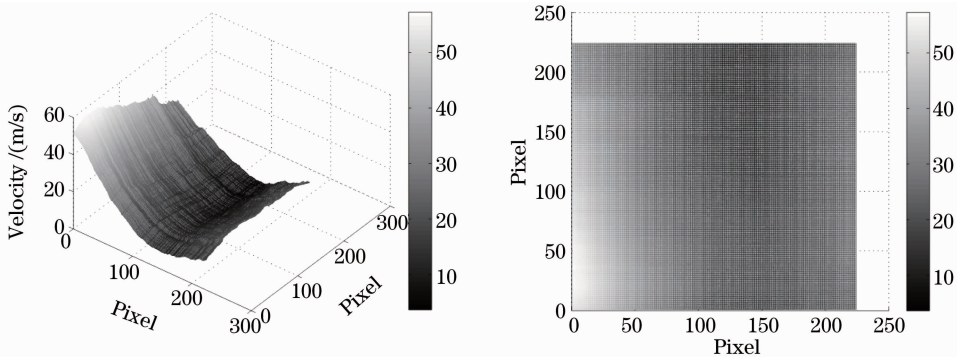


图 11 转盘转速为 600 r/m 时测量得到的风速

Fig. 11 Measured wind velocity when rotation speed of spinning disk is 600 r/m

4.4 温度测量

因实验室环境温度变化很小,且激光的发光机理和高层大气所用的谱线的发光机理不同,目前国际上没有很好的办法在实验室内模拟温度。但根据调制度测量误差和温度测量误差之间的关系式^[35]

$$\delta T = -\frac{1}{Q\Delta^2} \frac{\delta V}{V}, \quad (35)$$

利用测量到的调制度的变化可以准确地计算出温度测量误差。

电机转速调为零,做两次测量,可以得到两个调制度,然后计算调制度的误差,根据(35)式,可得宽场、消色差、温度补偿风成像干涉仪实验样机的温度测量误差如图 12 所示。

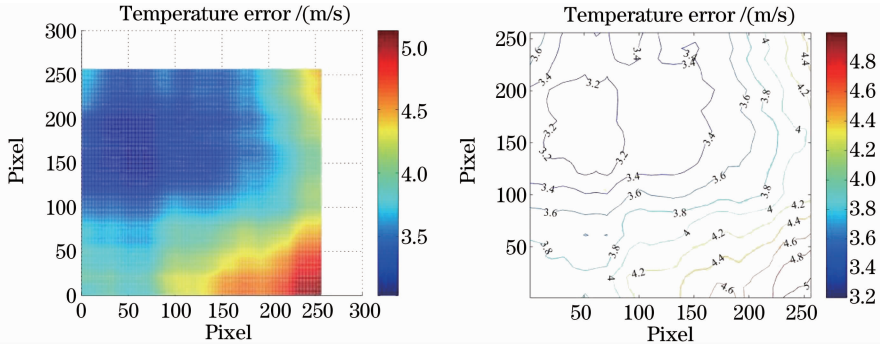


图 12 宽场、消色差、温度补偿风成像干涉仪实验系统温度测量误差

Fig. 12 Temperature measurement error of FATWindII experimental system

4.5 压强测量

因温度的测量精度基本小于 5 K,因而压强的测量精度如图 13 所示。

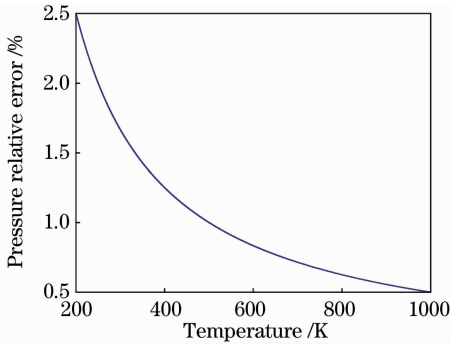


图 13 压强的相对误差与大气温度的关系

Fig. 13 Relation between pressure relative error and atmosphere temperature

由图 13 可以看出,大气温度为 200 K 时压强的相对误差最大为 2.5%,大气温度为 1000 K 时,压强的相对误差为 0.5%。即温度测量误差控制在 5 K 以内时,大气压强的测量误差可以控制在 2.5% 以内。因风成像干涉仪的温度测量误差基本可以控制在 5 K 以内,所以大气压强的测量误差可以控制在 2.5% 以内。

5 高层大气被动探测的未来发展趋势

高层大气被动探测技术的未来发展向着静态、实时探测方向发展。目前正在研制的装置有静态偏振风成像干涉仪、静态四分区镀膜风成像干涉仪以及空间外差风成像干涉仪,但都处于实验室研究阶段。

静态偏振风成像干涉仪是在偏振风成像干涉仪的基础上发展而来的,其原理是使用四分区偏振阵列(该偏振阵列的相邻分区偏振化方向以 45° 递增)代替偏振风成像干涉仪的偏振片,可实现静态、实时探测^[17,31]。

静态四分区镀膜风成像干涉仪基于风成像干涉仪,使用四分区镀膜的反射镜代替风成像干涉仪的动镜,一次测量可以获得四个不同相位的干涉仪强度,从而实现静态、实时测量^[37]。

空间外差风成像干涉仪基于宽场迈克耳孙干涉仪,其原理是使用光栅代替迈克耳孙干涉仪两臂上的反射镜,在实现静态、实时测量的同时,可以使用定标谱线监视仪器的状态^[38]。

6 结 论

简要介绍了高层大气被动探测技术的研究历史、现状和发展趋势。论述了高层大气被动探测技术的基本原理和方法,给出了高层大气被动探测的辐射源和气辉谱线、四强度探测法和临边探测模式。介绍了自行设计研制的风成像干涉仪的宽场、消色差、温度补偿理论以及工程设计和研制。采用宽场、消色差、温度补偿动镜扫描型风成像干涉仪实验样机进行了模拟高层大气探测实验,得到了高层大气风场、温度和压强的模拟探测结果。

1) 针对高层大气探测区域大和受环境温度影响大等问题,从理论和装置研制两方面研究解决了风场探测宽场、消色差及温度补偿关键技术问题。

2) 设计、研制了具有自主知识产权的宽场、消色差、温度补偿型风成像干涉仪原理样机和实验系统。

3) 开展了模拟星载探测实验,获得了大气风场速度、温度和压强。

4) 针对目前国际上星载遥感大气均采用动镜扫描型干涉仪,不能实时探测等问题,提出了静态偏振风成像干涉仪。

高层大气探测已成为当今国际上一个新兴的、具有重大科学意义和广阔应用前景的前沿热门研究课题。开展对高层大气风场的研究将为全面、系统

地研究全球大气奠定基础并提供重要的基础数据,对空间探测、对地观测、军事、国家安全和国民经济建设均具有重要的科学意义和应用价值。

参 考 文 献

- 1 Chunmin Zhang, Xiaohua Jian. Wide-spectrum reconstruction method for a birefringence interference imaging spectrometer[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(3): 366~368
- 2 Xiaohua Jian, Chunmin Zhang, Lin Zhang *et al.*. The data processing of the temporarily and spatially mixed modulated polarization interference imaging spectrometer[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5674~5680
- 3 C. M. Zhang, B. C. Zhao, Z. L. Yuan *et al.*. Analysis of signal-to-noise ratio of ultra-compact static polarization interference imaging spectrometer [J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2009, **11**(8): 085401
- 4 Mu Tingkui, Chunmin Zhang, Baochang Zhao. Optical path difference evaluation of the polarization interference imaging spectrometer[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(10): 1984~1992
- 5 Mu Tingkui, Zhang Chunmin, Zhao Baochang. Principle and analysis of a polarization imaging spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(12): 2333~2339
- 6 Chunmin Zhang, Xinge Yan, Baochang Zhao. A novel model for obtaining interferogram and spectrum based on the temporarily and spatially mixed modulated polarization interference imaging spectrometer[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(8): 2050~2056
- 7 Lei Wu, Chunmin Zhang, Baochang Zhao. Analysis of the lateral displacement and optical path difference in wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **273**(1): 67~73
- 8 Chunmin Zhang, Baochang Zhao, Bin Xiangli. Wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(33): 6090~6094
- 9 Chunmin Zhang, Bin Xiangli, Baochang Zhao. Permissible deviations of the polarization orientation in the polarization imaging spectrometer[J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2004, **6**(8): 815~817
- 10 Chunmin Zhang, Baochang Zhao, Bin Xiangli. Analysis of the modulation depth affected by the polarization orientation in polarization interference imaging spectrometers [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **227**(4-6): 221~225
- 11 Chunmin Zhang, Bin Xiangli, Baochang Zhao. A static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(1-2): 21~26
- 12 R. Hilliard, G. Shepherd. Wide-angle Michelson interferometer for measuring Doppler line widths[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(3): 362~369
- 13 G. Shepherd, W. Gault, D. Miller *et al.*. WAMDII: wide-angle Michelson Doppler imaging interferometer for spacelab[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(11): 1571~1584
- 14 G. G. Shepherd, G. Thuillier, W. A. Gault *et al.*. WINDII, the wind imaging interferometer on the upper-atmosphere research satellite [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98** (D6): 10725~10750
- 15 W. A. Gault, I. C. McDade, G. G. Shepherd *et al.*. SWIFT: an infrared doppler Michelson interferometer for measuring stratospheric winds[C]. *SPIE*, 2001, **4540**: 476~481
- 16 Chunmin Zhang, Baochang Zhao, Bin Xiangli *et al.*. Interference image spectroscopy for upper atmospheric wind field measurement [J]. *Optik*, 2006, **117**(6): 265~270
- 17 Chunmin Zhang, Huachun Zhu, Baochang Zhao. The temporally modulated polarization atmosphere Michelson interferometer[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(10): 9626~9635
- 18 Chunmin Zhang, Jian He. The generalization of upper atmospheric wind and temperature based on the Voigt line shape profile[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(26): 12561~12567
- 19 Zhang Chunmin, Wang Wei, Xiang Libin *et al.*. Interference image spectroscopy for upper atmospheric wind field measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 234~239
张淳民, 王伟, 相里斌等. 利用干涉成像光谱技术测量大气风场[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 234~239
- 20 Zhang Chunmin, Xiang Libin. Velocity and temperature measurement of upper atmosphere wind field using Fabry-Perot interferometer[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2000, **34**(4): 97~99
张淳民, 相里斌. 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
- 21 Tang Yuanhe, Zhang Chunmin, Liu Hanchen *et al.*. Study of the technique of 4-face coated pyramid prism for measurement of upper atmospheric wind field [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(9): 4065~4071
唐远河, 张淳民, 刘汉臣等. 基于镀膜四面角锥棱镜技术的上层大气风场探测研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(9): 4065~4071
- 22 Tang Yuanhe, Zhang Chunmin, Chen Guangde *et al.*. The satellite-borne super-wide angle shape-changed Sagnac interferometer push-detecting atmosphere wind field[J]. *Progress in Natural Science*, 2005, **16**(11): 1491~1495
唐远河, 张淳民, 陈光德等. 星载超广角改形 Sagnac 干涉仪的自推扫探测大气风场[J]. *自然科学进展*, 2006, **16**(11): 1491~1495
- 23 Wang Li, Zhao Baochang, Xiang Libin *et al.*. The selective principle of fixed optical path difference of wind measurement interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35** (8): 1254~1258
汪 丽, 赵葆常, 相里斌等. 风场探测干涉仪中基准光程差的选择原理[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8): 1254~1258
- 24 He Jian, Zhang Chunmin, Zhang Qingguo. Research on theory and application of the interferogram of Voigt profile [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(3): 423~426
贺 健, 张淳民, 张庆国. 佛克脱光谱线型干涉图的理论及其应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(3): 423~426
- 25 Wang Li, Zhao Baochang, Xiang Libin *et al.*. On the tolerance of fixed optical path difference and step in Michelson interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1697~1700
汪 丽, 赵葆常, 相里斌等. 迈克尔逊风场干涉仪基准光程差及步长误差容限分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1697~1700
- 26 Ye Jianyong, Zhang Chunmin, Zhao Baochang *et al.*. Optical path difference and detection mode of Sagnac interferometer used for upper atmospheric detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1145~1150
叶剑勇, 张淳民, 赵葆常等. 大气风场探测萨尼亚克干涉仪光程差的计算及探测模式研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1145~1150
- 27 Ruan Kai, Zhang Chunmin, Zhao Baochang. Exact calculation of the optical path difference and lateral displacement of modified large optical path difference Sagnac interferometer in full view field used in upper atmospheric wind field measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 5435~5441
阮 楷, 张淳民, 赵葆常. 高层大气风场探测改型大光程差 Sagnac 干涉仪全视场角光程差与横向剪切量的精确计算[J]. *物理学报*, 2008, **57**(9): 5435~5441
- 28 Wang Li, Zhao Baochang, Zhang Chunmin. Study on theory of polarizing Michelson interferometer for wind measurement based on polarizing arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28** (4): 700~704
汪 丽, 赵葆常, 张淳民. 基于偏振阵列的偏振迈克耳孙风场探测干涉仪系统的理论研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 700~704

- 29 Ye Jianyong, Zhang Chunmin, Zhao Baochang *et al.*. Error analysis of four-intensity algorithm used for the measurement of upper atmosphere [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1): 67~73
叶剑勇, 张淳民, 赵葆常等. 高层大气风场四强度测量法误差分析与计算[J]. *物理学报*, 2008, **57**(1): 67~73
- 30 Bu Zhichao, Zhang Chunmin, Zhao Baochang *et al.*. Analysis and calculation of the modulation depth of the Michelson interferometer with wide field, chromatic compensation and thermal compensation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2415~2422
步志超, 张淳民, 赵葆常等. 大视场消色差温度补偿型风成像干涉仪调制度的分析与计算 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(4): 2415~2422
- 31 Wang Jinchan, Zhang Chunmin, Zhao Baochang *et al.*. Study on the rule of light transmission through the four-sided pyramid prism in the static polarization wind imaging interferometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(3): 1625~1631
王金婵, 张淳民, 赵葆常等. 静态偏振风成像干涉仪中光在四面角锥棱镜中的传播规律研究 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(3): 1625~1631
- 32 Zhang Chunmin, Zhu Lanyan. Influence of the polarization direction on the modulation depth and interferential intensity of a new polarization atmospheric Michelson interferometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 989~997
张淳民, 朱兰艳. 新型偏振风成像干涉仪中偏振化方向对调制度和干涉强度的影响研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 989~997
- 33 Zhang Lin, Zhang Chunmin, Jian Xiaohua. Passive detection of upper atmospheric wind field based on the Lorentzian line shape profile [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 899~906
张霖, 张淳民, 简小华. 高层大气风场洛伦兹光谱线型粒子辐射率探测研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 899~906
- 34 Zhu Huachun, Zhang Chunmin, Jian Xiaohua. A wide field wind image interferometer with chromatic and thermal compensation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 893~898
朱化春, 张淳民, 简小华. 新型风成像干涉仪温度补偿理论研究 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 893~898
- 35 G. Thuillier, M. Herse. Thermally stable field compensated Michelson interferometer for measurement of temperature and wind of the planetary atmospheres [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(10): 1210~1220
- 36 W. Gault, S. Sargoytchev, S. Brown. Divided mirror technique for measuring Doppler shifts with a Michelson interferometer[C]. *SPIE*, 2001, **4306**: 266~272
- 37 D. Babcock, G. Shepherd, W. Ward *et al.*. A prototype near-IR mesospheric imaging Michelson interferometer (MIMI) for atmospheric wind measurement [C]. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2004: SA41A-1040
- 38 C. R. Englert, D. D. Babcock, J. M. Harlander. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): concept and experimental demonstration[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(29): 7297~7307