

文章编号: 0253-2239(2005)06-721-5

基于洛伦兹线型极光的上层大气风场探测模式研究*

唐远河^{1,2} 张淳民¹ 贺健¹ 陈光德¹

(¹ 西安交通大学理学院, 西安 710049)
(² 西安理工大学理学院, 西安 710048)

摘要: 从洛伦兹线型极光的干涉强度、调制度与光程差的理论公式出发,用 $\lambda/4$ 的步进光程差即“四强度法”获得一个波长范围内的4个干涉强度值,以实现基于洛伦兹线型极光的上层大气的风速、温度、压强等物理量的探测。提出用改形萨尼亚克成像干涉仪替代迈克耳孙干涉仪实现上层大气风场,给出了基准光程差的公式,并用四面角锥棱镜镀膜技术获得4个干涉强度值来同时探测上层大气风场的模式。最后在实验室将Kr灯557.0 nm调整光束到一定宽度,对称地从顶角为 60° 的两面镀膜角锥棱镜的顶点入射,用 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$ 的CCD照相机接收到两个光斑的成像,这两个光斑的再复制就得到镀膜四面角锥棱镜在一个周期内的4个干涉强度光斑,从而获得上层大气风场。

关键词: 大气光学; 洛伦兹线型风场探测; 四面角锥棱镜镀膜技术; 四强度法

中图分类号: O43 文献标识码: A

Study of the Detection Mode of Upper Atmospheric Wind Field Based on Lorentzian Profile Aurora

Tang Yuanhe^{1,2} Zhang Chunmin¹ He Jian¹ Chen Guangde¹

(¹ School of Science, Xian Jiaotong University, Xian 710049)
(² School of Science, Xian University of Technology, Xian 710048)

Abstract: Based on Lorentzian profile auroral theoretical formula of interference intensity, modulation and optical path difference (OPD), measurement of upper atmospheric wind field can be achieved. Four interference intensities are obtained by “four-intensity way” to detect upper atmosphere wind speed, temperature and pressure based on Lorentzian profile. The modified Sagnac interferometer (MSI) has been put forward to substitute Michelson interferometer for wind field; the benchmark optical path difference (OPD) formula of MSI has been presented. The technique of coating pyramid prism (CPP) has been put forward too. By the technique of coating pyramid prism's anti-reflection coating for three faces, four intensities can be obtained through stepped optical path difference of $\lambda/4$ at the same time. A simulation test has made; when the symmetrical light of Kr 557.0 nm to the two-faces CPP's vertex of 60° angle, there are two imager speckle patterns on the CCD camera of 768×576 , copying the two imager speckle patterns there are four interference intensities in a periods, so Lorentzian profile auroral upper atmospheric wind field can be achieved.

Key words: atmospheric optics; Lorentzian profile wind field measurement; coating pyramid prism (CPP) technique; four-intensity way

1 引 言

20世纪90年代初由加拿大和法国开创、近年来国内兴起的被动探测上层大气(80~300 km)风场(风速、温度、压强等)^[1~4],是利用极光(气辉)发

射时与探测器之间有相对运动所产生的微小多普勒频移,用机载成像干涉仪获得干涉条纹的调制度和强度来确定大气的温度和风速等物理量,该探测模式是基于高斯线型的极光谱线。

* 国家自然科学基金(40375010,60278019)和西安理工大学科技创新研究资助课题。

作者简介: 唐运河(1965~),女,西安交通大学在职博士研究生,西安理工大学教师,副教授。主要从事大气光学和两相流中的光学问题及激光多普勒测流速等方面的研究。E-mail: ltp200@sohu.com

收稿日期: 2004-05-28; 收到修改稿日期: 2004-09-28

来自太阳风的高能电子和质子,与地球上层大气的粒子碰撞,达到稳定的热动平衡后,成为等离子体状态的这些粒子叫气辉粒子,极光是由于太阳高能粒子注入上层大气时撞击大气中的原子和分子而激发的光现象。上层大气发射极光的气辉粒子有 O^+ 、 O 、 O_2 、 O_2^+ 、 e^- 、 N^+ 、 N 、 N^2 、 N_2^+ 、 NO^+ 、 H^+ 、 $O(^1D)$ 、 $N(^2D)$ 、 $N(^4S)$ 、 NO 、 He 、 OH 、 He^+ 、 CO_2 、 Na 、 Ar ^[5]等。除 H^+ 发射是通过中子沉降外,其它种类的可见极光和 X 射线极光都是由电子与大气主要气辉粒子的碰撞而激发的。由于气辉粒子之间的碰撞导致极光谱线为洛伦兹线型。地球上层的气辉粒子运动就形成了风,基于高斯线型极光的上层大气风场的被动探测,没有考虑气辉粒子之间的碰撞,而上层大气极光产生的根源就在于气辉粒子间的碰撞,电子与离子间的碰撞导致极光谱线为洛伦兹线型谱线,本文基于洛伦兹线型的极光谱线的上层大气风场探测模式,提出用四面角锥棱镜镀膜技术和改形萨尼亚克(Sagnac)成像干涉仪的探测模式来实现上层大气速度场、温度场、压力场的探测。

2 基于洛伦兹线型极光上层大气风场的探测公式

由气辉粒子碰撞所产生极光谱线的洛伦兹线型为

$$B(\sigma) = \frac{\Gamma/(2\pi)}{(\sigma - \sigma_0)^2 + \Gamma^2/4}, \quad (1)$$

其中 σ 是波数, σ_0 是极光的中心波数, Γ 为碰撞展宽的半峰全宽,它与压强 p 和温度 T 的关系^[6]:

$$\Gamma = 9.470 \times 10^{18} p \sigma_L^2 \times \sqrt{\frac{2R}{\pi T} \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)}, \quad (2)$$

其中 σ_L 为碰撞有效面积, R 为气体普适常量, M_1 和 M_2 为粒子摩尔质量。为研究基于洛伦兹线型极光的上层大气风场探测,将(1)式进行傅里叶变换,就得到洛伦兹线型极光的干涉强度和光程差的关系为^[7]

$$I_L(\Delta) = I_0 [1 + \exp(-2\pi\Gamma\Delta) \cdot \cos(2\pi\sigma_0\Delta)], \quad (3)$$

它与高斯线型极光的光强与光程差的公式^[1~4]

$$I_G(\Delta) = I_0 [1 + \exp(-Q\Gamma\Delta^2) \cos(2\pi\sigma_0\Delta)], \quad (4)$$

形式一致。只不过,洛伦兹线型极光所产生的干涉条纹的调制度(衬比度)

$$V_L = \exp(-2\pi\Gamma\Delta), \quad (5)$$

与高斯线型极光的调制度(衬比度)

$$V_G = \exp(-Q\Gamma\Delta^2), \quad (6)$$

跟光程差的关系均具有指数函数形式。差别在于,洛

伦兹线型极光的调制度随光程差的变化比高斯线型的变化慢。

为了实施基于洛伦兹线型极光的上层大气风场探测,在(3)式中,如果将光程差 Δ 记为基准光程差 Δ_i 、步进光程差 x 和风速光程差 Δ_w 之和,即 $\Delta = \Delta_i + x + \Delta_w$ ($x \ll \Delta$),则(3)式变为

$$I(\Delta) = I_0 \left\{ 1 + V_L \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\Delta_i + \Delta_w + x) \right] \right\}, \quad (7)$$

其中 λ 是极光中心波长。

由于被动探测上层大气风速时,携带成像干涉仪的卫星在运动,地球在自转,还有风的运动,对成像干涉仪获得的大气数据中,(7)式余弦函数内其实是总相位差,它应该包括干涉仪的内禀相位差 ϕ_i 、卫星速度引起的相位差 ϕ_s 、地球自转引起的相位差 ϕ_e 和待测风速引起的相位差 ϕ_w 。 ϕ_i 、 ϕ_e 和 ϕ_w 依赖于仪器在视场中的位置、定标数据、卫星的速度和距地面的高度等^[4]。从测量的总相位差中减去能计算的 ϕ_e 和 ϕ_s ^[8] 就得到 ϕ_w 。实际操作中往往用下面的“四强度法”获得 ϕ_w ,内禀相位差 $\phi_i = 2\pi m$ ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$) 与基准光程差 $\Delta_i = k\lambda$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) 对应,可以在(7)式中不出现,将 $\theta = \phi_e + \phi_s$ 与步进光程差 x 相对应,则洛伦兹线型的上层大气风场探测的干涉条纹的强度与相位差之间的关系为

$$I(\Delta) = I_0 [1 + V_L \cos(\phi_w + \theta)], \quad (8)$$

而视线方向(line of sight)上的气辉粒子运动的速率(风速)与相位差的关系为^[1]

$$v = \frac{c\lambda}{2\pi\Delta_w} \phi_w. \quad (9)$$

由(5)式和(9)式可见,光程差增大,干涉条纹的调制度减小,而测量风速精度的仪器灵敏度增大,在这两种矛盾中,调制度(分辨力)的选取是首要的。实际操作过程中,为了测量风场,对给定波长、线宽和谱线最合适的光程,成像干涉仪所接收的谱线有接近地球中间层(85 km 高度左右)的窄线(O_2 , OH , 氧原子 557.7 nm)和热层(85~300 km 高度)的宽线(氧原子 630.0 nm, 氧原子 557.7 nm, 氧离子 732.0/733.0 nm)极光发射谱线,最合适窄线需要大的光程差(>10 cm),但是干涉条纹的分辨力几乎为零,因为原子氧发射的 557.7 nm 极光是最重要的目标谱线,其要求干涉仪的基准光程差大约为 4.5 cm,这个值有较好的测量结果。虽然对窄线的光程差比这个小,分析表明,测量风的精度要求窄线比宽线具有更高的精度,事实上这对所有气辉粒子发射的谱线均成立。因此,实际探测风场的操作过程

中,(9)式中风速光程差 Δ_w 就用总光程差 Δ 代替。

3 “四强度法”探测方式

如果选择广角迈克尔孙干涉仪来进行上层大气风场探测,将迈克尔孙干涉仪一个臂上的镜子用压电驱动器在一个波长范围内按 $\lambda/4$ 步进移动镜子就能对(7)式中的 x 产生步进光程差,即:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = 0, \theta = 0 \text{ 时,} \\ I_1 = I_0(1 + V_L \cos \phi_w), \\ x = \lambda/4, \theta = \pi/2 \text{ 时,} \\ I_2 = I_0(1 - V_L \sin \phi_w), \\ x = 2\lambda/4, \theta = \pi \text{ 时,} \\ I_3 = I_0(1 - V_L \cos \phi_w), \\ x = 3\lambda/4, \theta = 3\pi/2 \text{ 时,} \\ I_4 = I_0(1 + V_L \sin \phi_w). \end{array} \right. \quad (10)$$

由 CCD 探测器获得一个周期内的 4 个干涉强度值 I_1, I_2, I_3, I_4 , 即所谓的“四强度法”, 则调制度 V_L 和风速相位差 ϕ_w 就可通过这 4 个强度求出来:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_0 = (I_1 + I_2)/2 = (I_2 + I_4)/2, \quad (11) \\ V_L = \sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2} / (2I_0), \quad (12) \\ \tan \phi_w = (I_4 - I_2) / (I_1 - I_3), \quad (13) \end{array} \right.$$

设计成像干涉仪的基准光程差后,由(13)式和(9)式得到视线方向上的风速,如果用两个垂直的探测视场,就可获得二维风速矢量。通过(12)式和(5)式得到干涉条纹的调制度而获得压力增宽,再由(2)式得到温度与压强的关系,通过压强与温度的气态方程就获得上层大气的压强和温度。

3 “四强度法”技术的实现模式

4.1 改形萨尼亚克干涉仪实现基准光程差

实现“四强度法”探测一个波长范围内干涉条纹的 4 个强度值是上层大气风场探测技术的关键。1991 年加拿大的 WINDII (Wind Imaging Interferometer)^[3,4], 用压电驱动器移动迈克尔孙干涉仪一个臂上的镜子,使其在一个波长范围内按递增步进产生 4 个强度值。近来发展后又将迈克尔孙干涉仪的动镜固定,将镜子分为面积相等的 4 部分,其中 3 部分用硅镀膜后再用铝处理^[9],镀膜厚度以 $\lambda/4, 2\lambda/4, 3\lambda/4$ 光程差递增,实现光程差的四分之一步进,获得一个周期内的 4 个干涉强度值。

在 WINDII 的基础上,国际上发展起来一系列探测上层大气风场的“四强度法”技术,其光学核心

是广角迈克尔孙干涉仪,但是近年来发展起来多种成像干涉仪,只要能满足大气风场探测中较大的基准光程差及大的光通量、高灵敏度、大分辨力、大视场角、适于大气的扩展光源、能捕捉到夜间弱强度极光、高信噪比等特征的要求,就可以用其它干涉仪代替迈克尔孙干涉仪。经过详细的研究对比,提出可以用改形萨尼亚克干涉仪 (Modified Sagnac interferometer, MSI) 替代迈克尔孙干涉仪实现上层大气风场的探测。

改形萨尼亚克干涉仪如图 1 所示,它由两块折射率为 n_1, n_2 的直角梯形的玻璃有错位地粘在一起。假设 a, b 分别为两直角边长, c 为它们的错位距离,直角梯形的另两个角分别为 45° 和 135° , 出射光束被分割后发生一定宽度的剪切。改形萨尼亚克干涉仪后的透镜焦平面上是面阵 CCD 探测器。改形萨尼亚克干涉仪的基准光程差为

$$\Delta_i = 2\sqrt{2} \left[an_1 - \frac{n_2^2}{n_1 + \sqrt{2n_2^2 - n_1^2}} (a + b - c) \right], \quad (14)$$

根据(14)式,对改形萨尼亚克干涉仪两边玻璃的折射率 n_1 和 n_2 、直角边 a 和 b 、错位距离 c 的合理匹配,即可满足上层大气风场探测中所要求的基准光程差,而且光程差与左右玻璃的另外直角边长无关,也与入射点的位置无关。

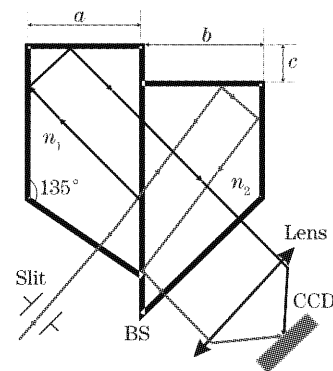


图 1 改形萨尼亚克干涉仪

Fig. 1 Modified Sagnac interferometer

例如,取改形萨尼亚克干涉仪左右两边一对玻璃为 K-LaF2 和 LF7,按玻璃的色散方程计算出它们对波长 557.7 nm 极光的折射率分别为 $n_1 = 1.746750, n_2 = 1.577309$, 将其代入(14)式后得基准光程差随 a, b, c 的变化关系为

$$\Delta_i = 2\sqrt{2} [1.346023a - 0.400727(b - c)]. \quad (15)$$

如果 $\Delta_i = 4.2$ cm, 取 $a = 1.50$ cm, $b = 1.50$ cm 时, 则 $c = 0.1677065$ cm, 亦即只需作两块相同形状的 K-LaF2 和 LF7 玻璃的直角梯形, 用分束板材料

将其错位 0.1677065 cm 地粘在一块,就可以实现 4.2 cm 的光程差。

4.2 四面角锥棱镜的镀膜实现步进光程差

采用改形萨尼亚克成像干涉仪对基于洛伦兹线型极光谱线的风场探测,实现步进光程差的“四强度法”就必须在干涉仪外的装置上完成 4 个干涉强度值的同时测量,为此设计了“四面角锥棱镜镀膜技术”实现上层大气风场探测模式的创新方案。图 2 所示为改形萨尼亚克成像干涉仪的光学元件,改形萨尼亚克干涉仪用简单的矩形框表示,用望远镜 1 保证干涉仪前的视场角。从干涉仪出来的光线未经透镜 1 汇聚之前就进入镀膜四面角锥棱镜 CPP (Coating Pyramid Prism)。CPP 是核心部件,其 4 个面大小相等,4 个顶角相同。由改形萨尼亚克干涉仪和通过棱镜某面的光线产生上层大气风场所需的 4.5 cm 基准光程差,步进光程差由镀膜四面角锥棱镜来实现:四面角锥棱镜的 1 个面不镀膜,另外 3 个面均匀镀增透膜,薄膜厚度决定于所选极光波长产生 $\lambda/4$ 递增步进的光程差。有一定宽度的极光从镀膜四面角锥棱镜顶点进入,对称地通过镀膜角锥棱镜的 4 个面,再从底面出射将光束分开,然后通过图 2 所示的透镜 2 (可以认为透镜 2 是 CCD 照相机的汇聚镜头),进一步在 CCD 上焦面上形成 4 个干涉光斑,通过 CCD 上光敏元件转换而获得进入各自对应 CCD 探测区域的 4 个干涉强度值。从而通过 (13) 式和 (9) 式获得上层大气风速探测。

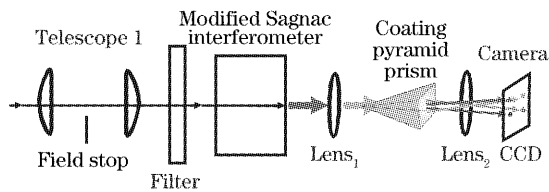


图 2 改形干涉仪的光学元件

Fig. 2 Optical elements of modified interferometer

按 (8) 式,如果将四面角锥棱镜的 3 个面均匀镀增透膜,取 $\theta=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 使各面引起 $\lambda/4$ 递增的步进光程差。因为四面角锥棱镜某个面所镀薄膜厚度引起的步进光程差 x 与入射角 i 、薄膜厚度 e 、棱镜折射率 n_c 有关系:

$$x = 2e \sqrt{n_c^2 - \sin^2 i}, \quad (16)$$

当步进光程差取 $x=0, \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$ 时,薄膜厚度为

$$e = \frac{\lambda m}{8 \sqrt{n_c^2 - \sin^2 i}}. \quad (m = 0, 1, 2, 3) \quad (17)$$

从 (17) 式可见,四面角锥棱镜面上镀膜的厚度 e 是极光波长 λ 、薄膜折射率 n_c 和入射角 i 的函数,

入射角越大,镀膜厚度也越大。由于上层大气风场探测过程中,能使用可见光波段的极光有多条,如果选用波长为 557.7 nm 的 $O(^1S)$ 极光, 60° 顶角的四面角锥棱镜的 3 个面上镀 MgF_2 增透膜,则薄膜厚度分别为 62.35 nm、124.71 nm、187.07 nm 就可以实现“四强度法”探测风场的模式。

4.3 模拟试验

我们在实验室用定标光源 Kr 灯 557.0 nm 代替上层实际大气中的 $O(^1S)$ 557.7 极光,调整光束到一定宽度,对称地入射到 60° 顶角的两面角锥镀膜棱镜的顶点进行了模拟实验,如图 3 所示。再用 768 pixel \times 576 pixel 的 MINTRON MTV-1802CB CCD 照相机接收到如图 4 所示的两个干涉光斑,图 3 和图 4 中间亮斑是棱镜顶点的投影。“四强度法”所需要的一个周期内的 4 个强度值应该是图 4 所示的两个光斑的再复制。即光线对称地从四面角锥棱镜的顶点进入,再从四面角锥棱镜的底面发生偏折地分开射出,达到 CCD 探测器上而获得一个周期内的 4 个分离的干涉强度值,通过 (13) 式和 (9) 式即可探测到上层大气视线方向上的风速。

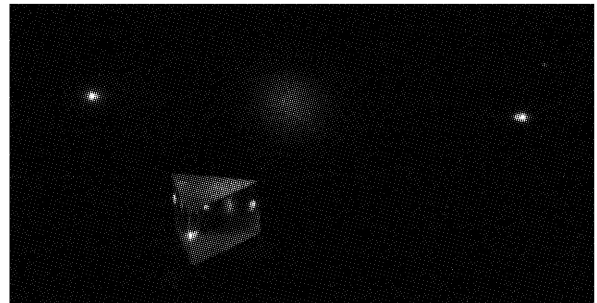


图 3 顶角为 60° 的两面镀膜角锥棱镜获得的两个光斑
Fig. 3 Two imager speckle patterns from the two faces coating pyramid prism (CPP) of 60° vertex angle

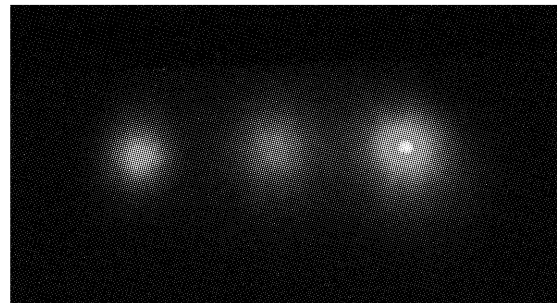


图 4 通过顶角为 60° 的两面镀膜角锥棱镜在 CCD 上所成的光斑

Fig. 4 Two imager speckle patterns on CCD from the two faces CPP of 60° vertex angle

4 结论与讨论

基于高斯线型的极光谱线进行上层大气风场探测的技术已经发展得比较完善,但卫星携带成像干涉仪进行遥感探测上层大气风场所使用的光源——极光的本质是电子与气辉粒子碰撞所产生的谱线,根据发光机制,碰撞发光具有洛伦兹线型谱线轮廓,因此探讨用洛伦兹线型极光进行上层大气风场探测具有更进一步的研究意义。从气辉粒子的碰撞所致的洛伦兹线型极光出发,通过“四强度法”反演出视线方向的风速、大气温度和压强等上层大气的特征物理量,这部分工作丰富了上层大气风场探测的理论研究。

为了实现“四强度法”,产生一个波长范围内的步进光程差,而在 CCD 上同时获得能探测的 4 个干涉强度值,提出用四面角锥棱镜镀膜技术,在四面角锥棱镜的 3 个面上分别镀增透膜,实现四分之一的步进光程差模式;

提出用改形萨尼亚克干涉仪替代由动镜驱动的迈克耳孙干涉仪,使风场探测的核心部件小型化,而且达到稳定视场,提高探测精度的目的。通过对镀膜两面角锥棱镜的模拟实验,在 CCD 上获得了两个分离的干涉光斑,这两个光斑再复制即可获得一个周期范围内的 4 个干涉强度值,从而实现上层大气风场的探测。

以镀膜四面角锥棱镜技术探测上层大气风场的研究模式中,当光线非对称地入射到镀膜四面角锥棱镜的顶点时,将导致入射到角锥棱镜 4 个面上的光线分布不均,或者某个面上没有入射光线,无法探测到干涉信号,这些将导致 CCD 探测器上光强无法准确判定,解决的措施可以在实验中尽可能准直入射到镀膜四面角锥棱镜顶点的光线,并且将光线适当地扩束到镀膜四面角锥棱镜顶点所能探测的范围。关于非对称入射光线的光束宽度极限和与 CCD 上的对应探测关系等相关内容我们还在继续

研究。镀膜四面角锥棱镜这种模式发展了上层大气风场探测的实践技术。

致谢 感谢西北工业大学宋宙模教授在四面角锥棱镜镀膜技术探测风场的思路上的给予的热心指导。

参 考 文 献

- 1 Zhang Chunmin, Wang Wei, Xiang Libin *et al.*. Interference image spectroscopy for upper atmospheric wind field measurement [M]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 234~239 (in Chinese)
张淳民,王 伟,相里斌等. 利用干涉成像技术测量大气风场[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 234~239
- 2 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiang Libin. A new method to measure upper atmospheric wind field with high stability and large field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 697~700 (in Chinese)
张淳民,赵葆常,相里斌. 高稳定度大视场大气风场测量新方法[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 697~700
- 3 G. G. Shepherd, G. Thullier, W. A. Gault *et al.*. WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite[J]. *J. Geophysical Research*, 1993, **98**(D6): 10725~10750
- 4 Shepherd G G. Application of Doppler michelson imaging to upper atmosphere wind measurement: WINDII and beyond[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(16): 2764~2773
- 5 G. B. Burns, P. F. B. Williams, R. P. Lowe *et al.*. Argon auroral emissions [J]. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, **64**: 2013~2017
- 6 Sun Hanwen. *Atomic Spectrum Analysis* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 28 (in Chinese)
孙汉文. 原子光谱分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 28
- 7 He Jian, Zhang Chunmin, Tang Yuanhe *et al.*. The principle analysis of passive detection of upper atmospheric wind field of the Lorentzian profile[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): (in Chinese)
贺 健,张淳民,唐运河等. 洛伦兹光谱线型的高层大气风场被动探测原理分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5):
- 8 Tang Yuanhe, Zhang Chunmin, Chen Guangde *et al.*. Time delay of the two fields of view about upper atmospheric wind field[C]. *Proc. China Optics Society*, 2004. 51~55 (in Chinese)
唐远河,张淳民,陈光德等. 上层大气风场探测中两视场的延时研究[C]. 中国光学学会 2004 年学术大会会议论文集, 2004. 51~55
- 9 William A. Gault, Stoyan I Sargoytchev, Gordon G. Shepherd. Divided-mirror scanning technique for a small Michelson interferometer[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2830**:15~18