

# 高层大气风场四强度测量法误差分析与计算<sup>\*</sup>

叶剑勇<sup>1)</sup> 张淳民<sup>1)†</sup> 赵葆常<sup>2)</sup> 李英才<sup>2)</sup>

1) 西安交通大学理学院, 西安 710049)

2) 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2006 年 12 月 21 日收到, 2007 年 4 月 22 日收到修改稿)

利用干涉成像光谱技术和电磁波的多普勒效应, 通过测量高层大气(80—300 km)中的气辉(极光)辐射线的四个干涉强度值而获知高层大气的速度和温度信息. 采用四强度干涉测量法, 分别对基于 Michelson 干涉仪的动镜扫描和基于无动镜四分区镀膜干涉图获取模式所引起的测量误差进行了深入的理论分析与研究. 给出了由于此测量误差所导致的相位误差所引起的高层大气风场速度、温度的误差数值; 采用计算机模拟得出了在不同相位误差条件下, 两种模式计算得到的风场速度和温度的误差分布图, 给出了风速误差、温度误差与相位步进误差的关系曲线. 理论计算结果表明, 基于 Michelson 干涉仪动镜扫描探测模式的速度误差是基于无动镜四分区镀膜模式的两倍, 而动镜模式的温度精度略高一些. 该研究对提高高层大气风场的探测精度提供了重要的理论指导, 对高层大气风场探测模式的研究以及仪器装置的研制均具有重大的理论意义和实践价值.

关键词: 高层大气风场测量, 四强度测量法, 模拟计算

PACC: 0760, 0765, 0620D

## 1. 引言

高层大气风场被动探测的基本原理是干涉成像光谱技术和电磁波的多普勒效应, 它以高层大气中的气辉(极光)作为被探测源, 在大光程差下探测干涉条纹的频移及调制度来反演出高层大气的速度、温度信息<sup>[1,2]</sup>. 被动式高层大气风场探测由于具有高的灵敏度, 且无须外部发射装置, 更加适合星载探测, 因此已成为近年来的研究热点, 得到了各国政府, 特别是军方的高度重视<sup>[3-8]</sup>.

风场探测的四强度测量法具有原理简单, 精确度高, 易于操作和实现等显著优点, 已被国内外学者和航空航天专家所采用. 四强度法是在探测器和光源的相对运动中通过取步递增获得基准光程差以上一个入射波长内的四个强度值  $I_1$ — $I_4$ , 经过理论反演得出被探测源的速度、温度和压力场分布<sup>[9]</sup>. 但在实际探测中, 由于各种因素的存在, 实际测量的四个干涉图之间的相位总有一定的误差存在, 由此将使得反演所得到的风场速度和温度产生一定的误差.

在目前的国外研究文献报道中, 尚未考虑干涉图的不同获取模式下引起相位误差的分布情况, 而是将四次干涉图测量的相位误差当作常数处理, 这极不符合实际探测状况<sup>[10]</sup>. 本文依据风场探测的基本原理, 结合两种探测模式的实际, 对风场实际探测误差来源进行了分析, 采用统计的方法分别模拟计算了两种不同干涉图获取模式的情况下, 步进相位误差所引起的速度与温度误差的大小, 该研究对提高高层大气风场的探测精度, 使高层大气风场探测更符合客观情况提供了理论指导, 同时对高层大气风场的探测模式研究以及风场探测仪器装置的研制均具有重大的理论意义和实际应用价值.

## 2. 高层大气风场速度、温度“四强度测量法”原理

高层大气中极光辐射线的谱线近似为高斯线型, 其光谱强度可以表示为<sup>[11]</sup>

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

式中  $W = [(7.16 \times 10^{-7})^2 \sigma_0^2 T/M]^2$  为谱线半高宽,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40537031), 国家高技术研究发展计划(863)(批准号: 2006AA12Z152), 国防基础科研计划项目(批准号: XAJT2008169), 国家自然科学基金(批准号: 40375010, 60278019), 陕西省科技攻关项目(批准号: 2001K06-G12, 2005K04-G18), 西安交通大学“985 工程”二期信息电子综合技术项目平台资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

$\sigma$  为波数,  $\sigma_0$  为谱线的中心波数(单位均为  $\text{cm}^{-1}$ ),  $T$  为热力学温度(单位为 K),  $M$  为原子质量,  $B_0$  为  $\sigma$  等于中心波数  $\sigma_0$  时光源的辐射强度.

根据傅里叶变换光谱学原理,干涉条纹的强度是其谱线的傅氏变换,由此有<sup>[11]</sup>

$$K(\Delta) = I_0[1 + UV\cos(2\pi\sigma_0\Delta)], \quad (2)$$

$$V = \exp(-QT\Delta^2), \quad (3)$$

式中  $U$  为仪器函数,  $V$  为调制度,  $Q = 1.82 \times 10^{-12}$  ( $\sigma_0^2/M$ ) (单位为  $\text{K}^{-1}\text{cm}^{-2}$ ),  $\Delta$  为光程差(单位 cm).

对于速度大小  $v$ , 运动方向与光源同探测器之间的连线的夹角为  $\theta$  的光源,其干涉强度为<sup>[12]</sup>

$$K(\Delta) = I_0[1 + UV\cos(2\pi\sigma_0\Delta' + \Phi)], \quad (4)$$

$$\Phi = 2\pi \frac{v}{c} \sigma_0 \Delta \cos\theta. \quad (5)$$

(4) 式中  $\Delta'$  为步进光程差,  $\Delta$  为总光程差, 它们满足  $\Delta = \Delta_0 + \Delta'$ , 其中  $\Delta_0$  为基准光程差, 根据不同的探测需要有着不同的最佳值<sup>[10]</sup>.  $\Phi$  为频移量, 其与风场的速度相关.

在风场探测中, 获取四幅干涉图的方法主要有以下两种: 一是基于动镜扫描的获取模式, 它通过动镜依次步进得到四幅不同相位的干涉图, 其代表有 WAMDII, WINDII, ERWIN 等<sup>[13, 14]</sup>. 另一种是基于四分区镀膜获取模式, 即将 Michelson 干涉仪的两臂固定, 在其中一臂末端设置四个对等的分区, 依靠四分区上所镀多层介质膜反射系数的相位变化而得到四幅不同相位的干涉图. 它可以同时获取四幅干涉图并处理, 代表为 WAMI 等<sup>[15-17]</sup>.

设四幅干涉图的步进光程差依次  $\Delta'_1, \Delta'_2, \Delta'_3, \Delta'_4$ , 则由(4)式得到四强度值为

$$I_i = I_0[1 + UV\cos(2\pi\sigma_0\Delta'_i + \Phi)], \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (6)$$

由此有<sup>[13]</sup>

$$\tan\Phi = \frac{\frac{C_{12}}{S_{12}} - \frac{C_{23}}{S_{23}} \frac{I_2 - I_1}{C_{23}} - \frac{I_3 - I_4}{C_{34}}}{\frac{S_{34}}{C_{34}} - \frac{S_{23}}{C_{23}} \frac{I_1 - I_2}{S_{12}} - \frac{I_2 - I_3}{S_{23}}},$$

$$V = \frac{I_i - I_0}{U_i \cos(2\pi\sigma_0\Delta'_i + \Phi)},$$

$$C_{12} = U_1 \cos(2\pi\sigma_0\Delta'_1) - U_2 \cos(2\pi\sigma_0\Delta'_2)$$

$$C_{23} = U_2 \cos(2\pi\sigma_0\Delta'_2) - U_3 \cos(2\pi\sigma_0\Delta'_3)$$

$$C_{34} = U_3 \cos(2\pi\sigma_0\Delta'_3) - U_4 \cos(2\pi\sigma_0\Delta'_4)$$

$$S_{12} = U_1 \sin(2\pi\sigma_0\Delta'_1) - U_2 \sin(2\pi\sigma_0\Delta'_2)$$

$$S_{23} = U_2 \sin(2\pi\sigma_0\Delta'_2) - U_3 \sin(2\pi\sigma_0\Delta'_3)$$

$$S_{34} = U_3 \sin(2\pi\sigma_0\Delta'_3) - U_4 \sin(2\pi\sigma_0\Delta'_4), \quad (7)$$

以上就是普遍情形下风场探测的四强度算法. 可见该方法具有原理正确, 形式简洁, 计算方便等优点. 由四个强度值, 经(7)式即可得出干涉图的频移量及调制度, 再根据(3)(5)式就可以得到风场的速度和温度信息.

### 3. 四强度测量法的误差分析与计算

#### 3.1. 误差来源分析

由上述风场探测理论可知, 要想得到高精度的风场信息, 用于计算的四幅干涉图的相位必须足够精确, 但是由于各种因素的存在, 必将造成得到的四幅干涉图的相位与实际值有一定的偏差, 由此将造成利用四强度算法计算的速度和温度产生误差.

引起干涉图相位步进误差的因素主要有以下几个方面<sup>[11, 18, 19]</sup>:

1) 风场干涉仪的误差. 风场干涉仪的光程差仅与入射角度正弦的偶次函数有关, 我们通过设置其二次项为零达到了宽场的目的, 通过令二次项对谱线的波长和温度的偏导数为零达到消色差和热补偿的目的. 理想情况下, 干涉仪的光程差应当不随入射角度、外界环境参数的改变而改变. 但是不论是宽场、消色差还是热补偿都是一定条件下的近似的, 例如宽场条件中光程差与入射角高次项仍存在函数关系, 光程差与温度有近似线性的关系等等. 因此随环境参数的改变, 干涉仪的光程差也将发生改变从而引起干涉图相位的改变.

2) 步进装置的误差. 在动镜扫描获取模式中, 步进装置采用的是纳米步进机械装置, 其精度达到数十皮米量级, 步进的误差来源于压电陶瓷的控制电压的漂移. 从其使用手册可知该误差满足高斯分布. 同时, 在动镜运动过程中, 由于动镜的倾斜也将使得光程差发生改变. 在镀膜获取模式中, 多层介质膜的缺陷将导致光线在膜上各点产生的相位改变大小不尽相同. 另外, 由于多层介质膜受环境的影响比较大, 因此环境参数等的改变将导致整个多层介质膜的相位发生改变. 所有这些都使得步进相位产生误差, 使得最后的风场测量产生误差.

3) 电子仪器的噪声以及 CCD 的误差. 一方面干涉强度量化和离散取值及 CCD 的暗电流将带来误差, 另外一方面由于单个像素将收集一定相位范围内

的干涉图,尤其是光通量低的时候,在合并像素的过程中,将造成比较大的相位变化,由此也将带来误差。

### 3.2. 误差理论与计算

根据上面的分析可知,风场的误差主要是由于光程差的测量误差所致,包括基准光程差和步进光程差的误差,但是从(2)和(4)式可知,这个误差可以单独看成是步进光程差的误差而认为基准光程差无误。虽然风场探测有上述三方面的误差来源,但是因素1)和2)是风场探测误差的主要来源,并且根据误差的性质可知,该误差可分为固定误差和随机误差。例如安装动镜时的倾斜就是固定误差,它在动镜的运动过程中不会改变,而纳米步进装置以及多层介质膜受外界环境发生的误差就是随机的。由于固定误差在探测过程中不会改变,可以通过实验中的标定来消除,因此本文将就仅对该类型的随机相位误差产生的风场误差作详细地分析计算。

设第  $k$  次步进的误差为  $\Delta_k''$ ,由于四分区探测模式的步进仅与初始所镀在四分区上的膜有关,于是有

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 [1 + U_1 V \cos(2\pi\sigma_0\Delta_1'' + \Phi)], \\ I_2 &= I_0 \left\{ 1 + U_2 V \cos \left[ 2\pi\sigma_0 \left( \Delta_2'' + \frac{\lambda}{4} \right) + \Phi \right] \right\}, \\ I_3 &= I_0 \left\{ 1 + U_3 V \cos \left[ 2\pi\sigma_0 \left( \Delta_3'' + \frac{\lambda}{2} \right) + \Phi \right] \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta v &= \int_{-3\tau}^{3\tau} \int_{-3\tau}^{3\tau} \int_{-3\tau}^{3\tau} \sqrt{(v - v_0) f(\Delta_1'') f(\Delta_2'') f(\Delta_3'') f(\Delta_4'')} d\Delta_1'' d\Delta_2'' d\Delta_3'' d\Delta_4'' \\ &= \int_{-3\tau}^{3\tau} \int_{-3\tau}^{3\tau} \int_{-3\tau}^{3\tau} \sqrt{\left( \operatorname{atan} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) c(2\pi\sigma_0\Delta_0) - v_0 \right)^2 f(\Delta_1'') f(\Delta_2'') f(\Delta_3'') f(\Delta_4'')} d\Delta_1'' d\Delta_2'' d\Delta_3'' d\Delta_4''}, \\ \Delta T &= \int_{-3\tau}^{3\tau} \int_{-3\tau}^{3\tau} \int_{-3\tau}^{3\tau} \sqrt{(v - v_0) f(\Delta_1'') f(\Delta_2'') f(\Delta_3'') f(\Delta_4'')} d\Delta_1'' d\Delta_2'' d\Delta_3'' d\Delta_4'' \\ &= \int_{-3\tau}^{3\tau} \int_{-3\tau}^{3\tau} \int_{-3\tau}^{3\tau} \sqrt{\left( \frac{-\ln \left[ \sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2} (I_1 + I_3) \right]}{Q\Delta^2} - v_0 \right)^2 f(\Delta_1'') f(\Delta_2'') f(\Delta_3'') f(\Delta_4'')} d\Delta_1'' d\Delta_2'' d\Delta_3'' d\Delta_4''}. \end{aligned}$$

上述的积分方程普通条件下很难求解,但是我们可以数值模拟得到其数值解。方法是利用 Matlab 仿真产生高斯误差分布的相位步进值,根据上述步骤计算得到各次模拟下得  $T_i'$  与  $v_i'$ ,当计算的数据足够多时,将每次得到的  $T_i'$ ,  $v_i'$  作统计,得到两种探测模式各自的速度和温度误差为

$$I_4 = I_0 \left\{ 1 + U_4 V \cos \left[ 2\pi\sigma_0 \left( \Delta_4'' + \frac{3\lambda}{4} \right) + \Phi \right] \right\} \quad (8)$$

而在动镜扫描获取模式中,由于前一次步进的误差将被叠加到下一幅干涉图中,于是有

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 [1 + U_1 V \cos(2\pi\sigma_0\Delta_1'' + \Phi)], \\ I_2 &= I_0 \{1 + U_2 V \cos[2\pi\sigma_0(\Delta_1'' + \Delta_2'' + \lambda/4) + \Phi]\}, \\ I_3 &= I_0 \{1 + U_3 V \cos[2\pi\sigma_0(\Delta_1'' + \Delta_2'' + \Delta_3'' + \lambda/2) + \Phi]\}, \\ I_4 &= I_0 \{1 + U_4 V \cos[2\pi\sigma_0(\Delta_1'' + \Delta_2'' + \Delta_3'' + \Delta_4'' + 3\lambda/4) + \Phi]\}. \quad (9) \end{aligned}$$

将上述带误差的四个强度值代入(7)式即可计算得到干涉条纹的频移  $\Phi'$  和调制度  $V'$ 。由此根据四强度法计算得到的风场的温度和速度分别为

$$\begin{aligned} T' &= -\ln V' / (Q\Delta^2), \\ v' &= \Phi' c / 2\pi\sigma_0\Delta_0. \quad (10) \end{aligned}$$

步进光程差的随机误差具有统计规律,其中最常见的是高斯分布,其概率密度可表示为

$$f(\Delta_i'') = \frac{1}{\tau \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\Delta_i''^2}{2\tau^2}\right), \quad (11)$$

式中误差  $\Delta_0''$  均值  $\tau$  为步进光程差的随机误差的均值。

由此得到速度误差和温度误差表示为

$$\Delta v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i' - \bar{v}')^2}, \quad (12)$$

$$\Delta T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i' - \bar{T}')^2}, \quad (13)$$

式中  $\Delta v$ ,  $\Delta T$  分别表示速度、温度的测量误差,  $v_i'$ ,  $T_i'$  分别表示第  $i$  次测量得到的速度和温度值,  $\bar{v}'$ ,  $\bar{T}'$  分别表示速度  $v_i'$  和温度  $T_i'$  的平均值。由于我们

模拟取值区间满足  $3\sigma$  原则,因此由此带来的相对偏差低于 1.19%.

### 4. 计算机模拟速度温度误差分布

下面我们结合高层大气风场测量的实际状况,

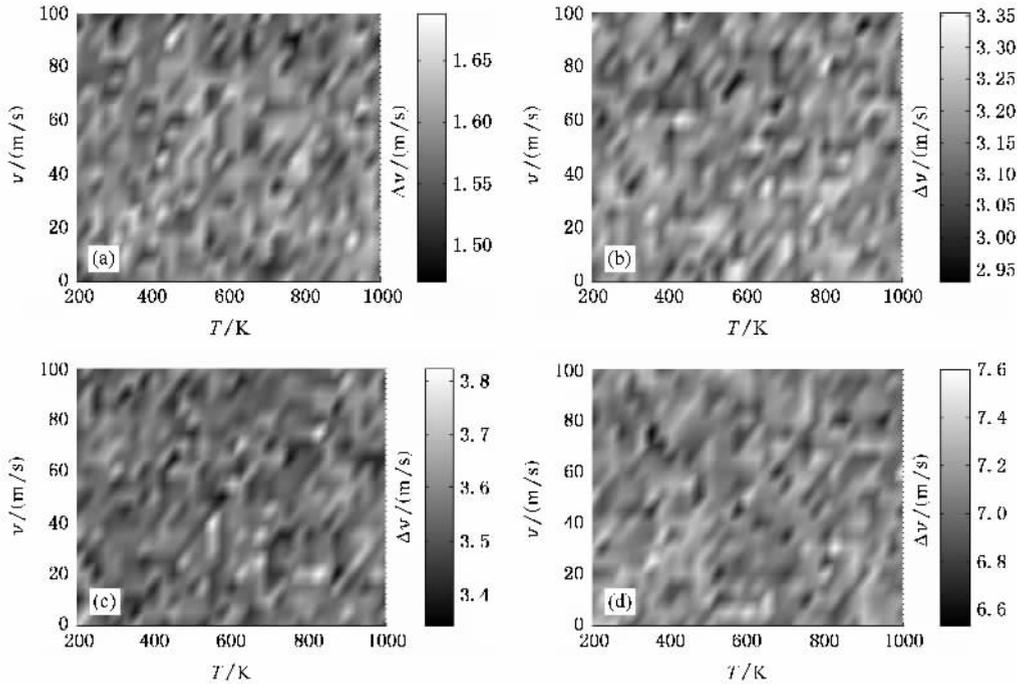


图 1 速度误差随环境温度和速度的分布图 (a)(b)为镀膜模式 (c)(d)为动镜扫描模式

#### 4.1. 速度误差分析与讨论

图 1(a)(b)和(c)(d)分别给出了四分区镀膜与动镜扫描两种干涉图获取模式下,在速度区间 0—100 m/s,温度 200—1000 K 区间内速度测量误差的分布图,其中(a)(c)对应步进误差为  $\lambda/2000$ ; (b)(d)对应步进误差  $\lambda/1000$ .由图可见,对于每种探测模式,当我们确定步进误差后,其计算得到的速度误差在整个探测范围内有着比较均匀的分布,对比不同步进误差引起的速度误差可见:步进误差越小,其对应的速度误差也越小.

图 2 为测量所得速度误差与步进误差的曲线关系,图中的实线和虚线分别对应四分区和动镜扫描模式,可见速度误差  $\Delta v$  与步进误差  $\Delta''$ 成线性关系.这与图 1 的定性分析是一致的.计算表明,四分区和动镜扫描方式的速度误差的斜率依次为 3.1575 和 7.1040.可见当步进误差相同时,四分区速度相对误差在数值上近似为动镜扫描方式的一半,因此同等条件下四分区模式拥有更高的精度.由该两条曲线

对高层大气风场的速度温度测量误差做一理论计算.设探测的极光谱线波长为 630 nm,探测区域对应大气层中的热层(80—300 km),其速度分布为 0—100 m/s,温度分布在 200—1000 K,仪器函数  $U = 0.9$ ,基准光程差为 4.200021 cm,则谱线调制度为

$$V = \exp(-Q\Delta^2) = 0.60317.$$

计算得到,当风速误差需要控制在 5 m/s 时,四分区模式和动镜扫描模式的步进误差应当分别控制在 0.9976 nm 和 0.4434 nm.

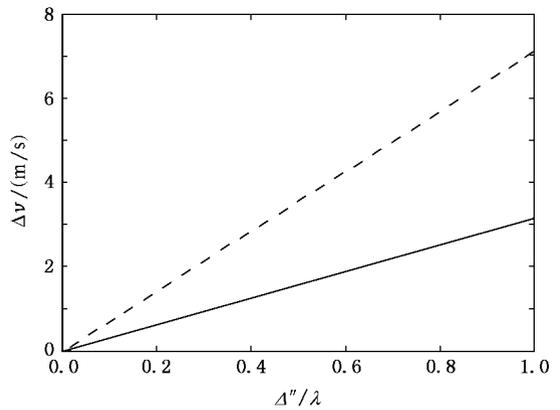


图 2 速度误差与步进误差的关系曲线

#### 4.2. 温度误差分析与讨论

通过与求速度误差相同的方法,我们得到四分

区和动镜扫描方式温度误差分布图如图 3(a)(b)和(c)(d)所示。由图可见,对于任何获取模式均有步进误差越小,其温度误差也将越小。与速度误差不同的是温度测量误差与被测风场速度和温度有一定的关系。对于镀膜方式,被测风场温度越高、速度越

小,其温度测量误差也越小。因此有结论镀膜探测模式适合测量高温、低速大气的信息。而对于动镜扫描探测模式,则有温度越高、速度越大,其温度测量误差越小。可见动镜扫描方式适合探测高温、高速大气的信息。

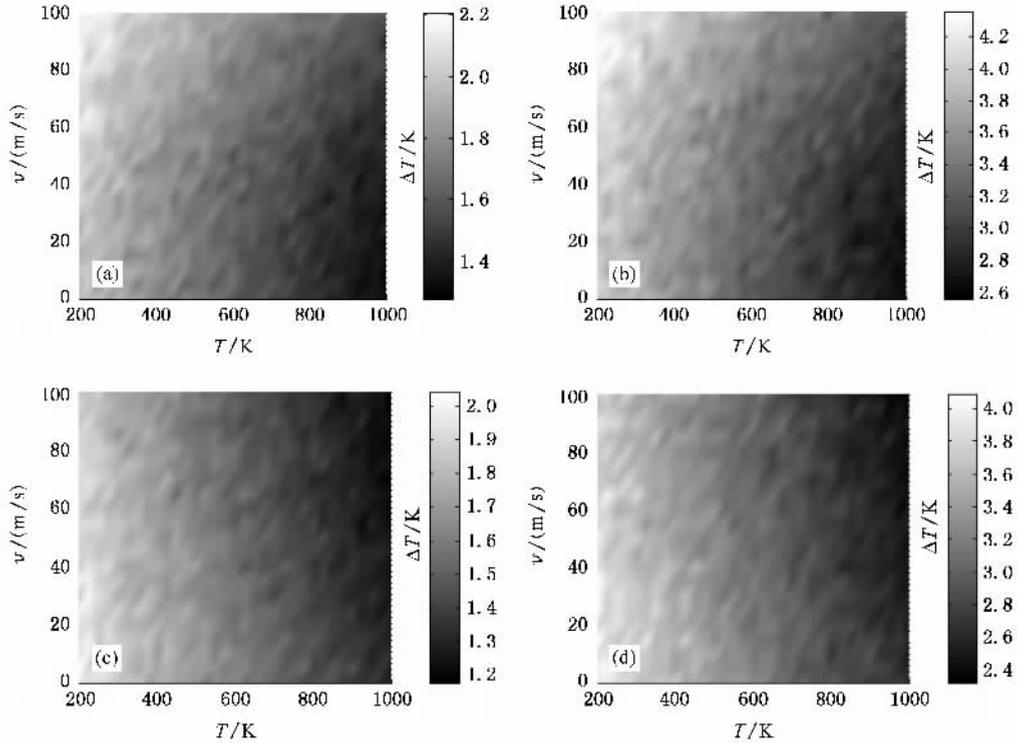


图 3 温度误差随环境温度和速度的分布图, (a)(b)为镀膜模式 (c)(d)为动镜扫描模式

图 4 中的实线和虚线分别给出了四分区和动镜扫描模式的温度误差与步进误差的曲线关系。两图同样显示了温度的误差  $\Delta T$  与步进误差  $\Delta''$  成线性关系。计算表明,四分区和动镜扫描方式的温度相对误差的斜率依次为 3.4095 和 3.1201。可见当步进误差相同时,四分区模式的温度误差在数值上略微大于动镜扫描方式。

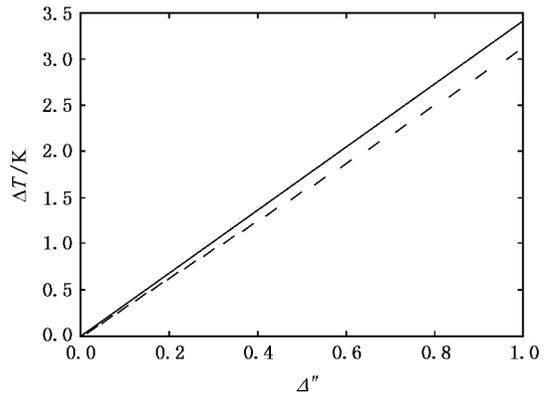


图 4 温度误差与步进误差的关系

### 5. 结 论

本文对高层大气风场四强度测量法的速度和温度误差的来源作了深入地分析,采用误差统计分析理论研究了相位误差对风场探测误差的影响,得到如下结论:

1. 分别给出了四分区镀膜与动镜扫描干涉图获取模式下在  $v$  为 0—100 m/s, 温度  $T$  为 200—1000 K 区间内的速度误差和温度误差分布图。结果表明:在两种探测模式中,被测目标的速度和温度对速度

的测量误差影响很小;并且最终的速度误差与相位步进误差成正比关系,其曲线斜率分别为 3.1575 和 7.1040。可见步进误差越小,速度误差也越小。对比两种探测模式有结论:在同样的相位误差下,基于四分区探测模式的速度误差小于动镜扫描模式的速度

误差,其数值约为动镜扫描模式的一半。

2. 对基于四分区镀膜和动镜扫描干涉图获取模式的温度误差的计算结果表明:探测的温度误差与被测目标的速度和温度有一定的关系。对于四分区镀膜模式,当目标温度高且速度低时,其温度探测精度较高,因此四分区镀膜探测模式更加适合探测高温、低速时的风场探测;而对于高温和高速的目标,动镜扫描探测模式误差较小,因此动镜扫描模式更加适合高温、高速目标的探测。另外从两种模式的温度误差的拟合曲线可以看出温度误差与步进误差成正比关系,其曲线斜率分别为 3.4095 和 3.1201。所以对动镜扫描来说,步进误差越小,或对四分区镀膜来说,膜层反射光的相位误差越小,风场温度测量的误差也越小。两种探测模式相比,在同样的相位误

差下,基于四分区探测模式的温度相对误差略大于动镜扫描方式。

3. 由我们以上的计算和计算机模拟所得到的结论,我们在实际应用中,可以确定误差的精度分析,即在给定风场速度温度误差下,可以确定在四分区镀膜和动镜扫描两种模式中其相位误差的允许范围应为多少,同时也可根据我们需要的探测精度来确定采用何种探测模式。另一方面,更重要的是我们在风场探测的仪器设计和研制中,我们尽量地减少其误差,根据误差曲线,在动镜扫描技术中确定步进电机的精度和在镀膜技术中以确定镀膜精度而使其探测精度控制在我们要求的范围内,为风场探测的模式研究、为设计和研制风场探测装置与仪器提供重要的理论与实践指导。

- [ 1 ] Shepherd G G 1996 *Appl. Opt.* **35** 2764
- [ 2 ] Ward W E ,Gault W A ,Shepherd G G ,Rowlands N 2001 *Proc. SPIE* **4540** 100
- [ 3 ] Zhang C M ,He J 2006 *Optics Express* **14** 12561
- [ 4 ] Peng Z H ,Zhang C M ,Zhao B C ,Li Y C ,Wu F Q 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 6374 ( in Chinese )[ 彭志红、张淳民、赵葆常、李英才、吴福全 2006 物理学报 **55** 6374 ]
- [ 5 ] Zhang C M ,Zhao B C ,Xiang L B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
- [ 6 ] Zhang C M ,Xiang L B ,Zhao B C ,Zha X W 2002 *Opt. Commun.* **203** 21
- [ 7 ] Zhang C M , Zhao B C , Xiang L B 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
- [ 8 ] Zhang C M , Xiang L B , Zhao B C 2004 *J. Opt. A :Pure Appl. Opt.* **6** 815
- [ 9 ] He J ,Zhang C M 2005 *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* **7** 613
- [ 10 ] Rochon Y J ,Rahnama P ,McDade I C ,Scott A ,Gault W A ,Lukovich J 2004 *Proc. SPIE* **5234** 335
- [ 11 ] Shepherd G G ,Thullier G ,Gault W A ,Solheim B H ,Hersom C ,Alumni J M ,Brun J F ,Charlot P ,Cogger L L ,Desaulniers D L ,Evans W F J ,Gattinger R L ,Girod F ,Harvie D ,Hum R H ,Kendall D J W ,Llewellyn E J ,Lowe R P ,Ohr J ,Pasternak F ,Peillet O ,Powell I ,Rochon Y ,Ward W E ,Wiens R H ,Wimperis J 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 10725
- [ 12 ] Zhang C M ,Zhao B C ,Xiang L B ,Li Y C 2006 *Optik* **117** 265
- [ 13 ] Gault W A ,Brown S ,Moise A ,Liang D ,Sellar G ,Shepherd G G ,Wimperis J 1996 *Appl. Opt.* **35** 2913
- [ 14 ] Gault W A ,McDade I C ,Rochon Y J ,Scott A 2003 *Proc. SPIE* **4881** 60
- [ 15 ] Gault W A ,Sargoytchev S ,Brown S 2001 *Proc. SPIE* **4306** 266
- [ 16 ] Bird J C ,Liang F C ,Solheim B H ,Shepherd G G 1995 *Meas. Sci. Technol.* **6** 1368
- [ 17 ] Tang Y H ,Zhang C M ,Liu H C ,Chen G D ,He J 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 4065 ( in Chinese )[ 唐远河、张淳民、刘汉臣、陈光德、贺 健 2005 物理学报 **54** 4065 ]
- [ 18 ] Shepherd G G 1985 *Appl. Opt.* **24** 1571
- [ 19 ] Mani R ,Dobbie S ,Scott A ,Shepherd G ,Gault W ,Brown S 2005 *Appl. Opt.* **44** 7144

# Error analysis of four-intensity algorithm used for the measurement of upper atmosphere<sup>\*</sup>

Ye Jian-Yong<sup>1)</sup> Zhang Chun-Min<sup>1)†</sup> Zhao Bao-Chang<sup>2)</sup> Li Ying-Cai<sup>2)</sup>

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

2) *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China*

( Received 21 December 2006 ; revised manuscript received 22 April 2007 )

## Abstract

With imaging interferometry and Doppler Effect, the information of the upper atmosphere including velocity and temperature can be obtained by measuring four interference intensities of the aurora in the upper atmosphere ( 80—300 km ). Theoretical analysis of the measurement error when using four-intensity algorithm in the moving mirror model and divided mirror model is presented respectively. The error of velocity and temperature of the upper atmosphere caused by random phase error is given. By computer simulation, we get the distribution map of velocity error and temperature error in the two models. The result shows that the error of the velocity with the divided mirror model is about half that with the moving mirror model, while the moving mirror model has appreciably higher accuracy for temperature. The research can help us to improve the detection precision of upper atmospheric wind in theory. It has important theoretical significance and practical value both for the research of the detect mode and manufacture of the equipment.

**Keywords** : upper atmospheric measurement , four intensities arithmetic , error analysis

**PACC** : 0760 , 0765 , 0620D

---

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Program of National Natural Science of China ( Grant No. 40537031 ), the National Defence Basic Scientific Research Project ( Grant No. XAJT2008169 ), the National High Technology Research and Development Program of China ( 863 Program ) ( Grant No. 2006AA12Z152 ), the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 40375010 , 60278019 ), the Science and Technology Program of the Shaanxi Province, China ( Grant Nos. 2001K06-G12 , 2005K04-G18 ), the Second Phase of the " 985 Project " of Xi'an Jiaotong University ( Integrated electronic information technology projects platform ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : zcm@mail.xjtu.edu.cn