

大光程差、宽场、消色差、热补偿型迈克耳孙风成像干涉仪动镜倾斜误差分析

祝宝辉^{1,2} 张淳民² 鲁辉东¹ 曾文锋¹

¹武汉军械士官学校光电仪器与指挥控制系, 湖北, 武汉 430075
²西安交通大学理学院, 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

摘要 大光程差、宽场、消色差、热补偿型风成像干涉仪是在一定的基准光程差的基础上, 通过动镜步进的方法, 获得观测目标在一个波长范围内间隔为 $\lambda/4$ 的 4 个干涉强度, 并依此推算出高层大气的风速、气压、温度的新型风场探测装置。而在干涉仪的工程研制和实际风场测量过程中不可避免地存在着基准光程差误差、步长误差以及动镜倾斜误差等。为了精确地掌握这些误差对最终观测结果的影响以更好地满足风成像干涉仪的工程化和实际应用, 对在一定的不确定度范围内的动镜倾斜误差进行了理论计算和分析, 得到并给出了动镜倾斜误差的计算方法, 计算了在误差允许范围内的动镜倾斜容限, 并通过计算机模拟讨论并分析了研究结果。这些研究工作对风成像干涉仪的理论研究、技术创新、研制、性能改进和工程化都具有理论与实践指导意义, 并为其更好地应用于高层大气风场被动探测提供了理论依据。

关键词 成像系统; 风成像干涉仪; 误差分析; 动镜倾斜

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.1108001

Error Analysis of the Moving Mirror Tilting in Michelson Wind Imaging Interferometer with Big Optical Path Difference, Wide Field, Adromatism and Thermal Compensation

Zhu Baohui^{1,2} Zhang Chunmin² Lu Huidong¹ Zeng Wenfeng¹

¹Department of Optoelectronics Apparatus & Command Control, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan, Hubei 430075, China

²Key Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter, Ministry of Education, School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract On fixed optical path difference, interference intensity of four steps in an interval of quarter of wavelength is achieved by moving mirror step of $\lambda/4$ for Michelson wind imaging interferometer (MWII) with large optical path difference, wide field, chromatic compensation and thermal compensation. In this way, the information of velocity, air pressure and temperature for aerosphere can be achieved. In this course, the error of fixed optical path difference, step error and tilting of the moving mirror will affect the results. To better meet the actual application and engineering for MWII, the tolerance of the error for tilting of the moving mirror is discussed in the range of allowance precision, the method of the error is derived, and the curves of the relationship between the

收稿日期: 2012-06-10; 收到修改稿日期: 2012-07-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40537031), 国防基础科学研究项目(A1420080187), 国家自然科学基金(40375010、60278019), 国家重大科技专项(E03101112JC02), 陕西省科技攻关项目(2001K06-G12、2005K04-G18), 2010 苏州大学省重点实验室专项项目(KJS1001)和陕西省教育厅科学研究计划项目(09JK799)资助课题。

作者简介: 祝宝辉(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事大气光学、干涉成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: raclen@gmail.com

导师简介: 张淳民(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光学、大气光学等方面的研究。

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

temperature, velocity and the tilting of the moving mirror are simulated by computer. This work has a great meaning on the theory research, capability improvement, engineering of MWII and will be useful for the application of Michelson interferometer on the passive measurement of the wind field in the upper atmosphere.

Key words imaging systems; wind imaging interferometer; error analysis; tilting of the moving mirror

OCIS codes 010.1290; 120.4820; 110.2970

1 引 言

大气风场的被动探测是现代科学的前沿技术和发展趋势,它通过对大气中极光或气辉的探测,来获得干涉图,利用四强度法反演出大气风场的速度和温度等信息^[1~9]。采用风成像干涉仪对大气中某些特定波长气辉发射谱线进行探测,用来确定大气温度以及风场速度的方法已经得到了广泛应用。1991年,美国航空航天总署(NASA)发射了风成像干涉仪(WINDII),用以提供中间层和低气热层的风矢量、大气温度和气辉强度,研究潮汐风场、大行星尺度结构及由极光产生的加强风场。它是第一个发射升空的用于上层大气风场被动探测的迈克耳孙干涉仪。而平流层臭氧转换风成像干涉仪(SWIFT)也计划在近年发射,用以探测全球同温层 20~40 km 水平风速矢量和臭氧浓度。在大气风场被动探测研究中,美国和加拿大一直处于领先地位,而我国对大气风场探测的研究目前仍处于起步阶段。由我国自主研制的大光程差(OPD)、宽场、消色差、热补偿型风成像干涉仪,要实现大气风场的探测,主要靠纳米频移系统带动动镜四步步进的方法来完成,而在这一过程中,除了基准光程差以及步进过程中的误差会对结果产生影响外,动镜初始位置的倾斜以及移动过程中产生的倾斜也会对大气温度和风场速度的测量结果造成影响。目前,在大气风场的被动探测研究中,对于动镜在初始位置倾斜以及移动过程中的倾斜产生的相关误差分析未见详细报道。本文主要针对动镜初始位置以及步进过程中动镜倾斜时产生的大气温度以及风场速度等的误差情况进行研究,分别得到误差计算的表达式以及误差允许范围内的误差容限值,并通过计算机模拟画出倾斜误差变化对风场速度和大气温度影响值的关系图,定量地描述了两者之间的关系。

2 风成像干涉仪风场探测理论

大光程差、宽场、消色差、热补偿型风成像干涉仪,其结构主要由分束器、静镜、动镜、补偿板、纳米频移系统以及包围干涉仪的恒温装置等组成,如图 1 所示。其探测风场的原理为在一定基准光程差

Δ_0 的基础上,通过纳米频移系统使得动镜以 $\lambda/4$ 步长为间隔移动,分别记录四步对应 CCD 上干涉条纹的强度,进行一系列数学处理后得到大气温度和风场速度^[10]。CCD 探测器上获取的对应于步进光程差分别为 $0, \frac{\lambda}{4}, \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{4}\lambda$ 时的干涉强度为

$$\begin{cases} I_1 = I_0(1 + V\cos\phi) \\ I_2 = I_0(1 - V\sin\phi) \\ I_3 = I_0(1 - V\cos\phi) \\ I_4 = I_0(1 + V\sin\phi) \end{cases} \quad (1)$$

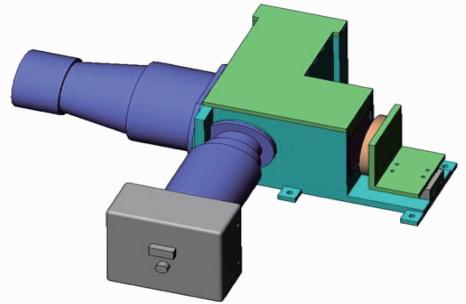


图 1 风成像干涉仪结构图

Fig. 1 Structure of wind imaging interferometer

由四步强度值可推导出关系式

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

$$V = [(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2]^{1/2} / (2I_0), \quad (3)$$

$$\tan\phi = (I_4 - I_2) / (I_1 - I_3), \quad (4)$$

式中 I_0 为干涉强度幅值, V 为调制度, ϕ 为相位。根据调制度与大气温度、相位变化与风场速度的关系可以最终得到大气温度 T 和风场速度 v , 即

$$V = \exp(-QT\Delta^2) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

$$\phi = \phi_0 + \delta\phi = 2\pi\sigma_0\Delta_0\left(1 + \frac{v}{c}\right), \quad (6)$$

式中 $Q = 1.82 \times 10^{-12} \sigma_0^2 / M (\text{K}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$, 其中 σ_0 为目标谱线的中心波数, M 为目标的原子量, c 为光速, Δ 为风成像干涉仪探测过程中获取的两次光强间的光程差, Δ_0 为基准光程差。

3 倾斜误差产生机理

图 2 为风成像干涉仪的动镜、静镜及其干涉面坐标的对应示意图。图中动镜位于 xOy 平面上, z

为动镜中心轴线, y 轴与静镜平面垂直, BS 为分束镜。理想情况下, 动镜随驱动系统只在 z 轴上做扫描运动。由于机械以及外部环境振动等多种原因^[11~14], 它可能具有其他运动方式: 在 x 和 y 方向的平移, 绕 x 轴、 y 轴和 z 轴 3 条轴线平行轴的轻微转动。这几种运动形式中, 轻微平移对系统影响可忽略, 绕 z 轴平行轴方向的轻微转动的影响也可忽略, 但是绕 x 轴和 y 轴平行轴的转动将分别带来俯仰和左右方向的倾斜, 对干涉系统会带来大的影响(取各坐标轴方向的右手螺旋方向为正方向)。

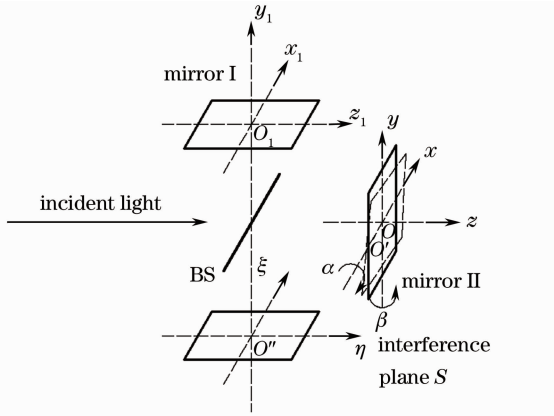


图 2 动镜倾斜情况示意图

Fig. 2 Sketch map of moving mirror tilting

设信号光束孔径为矩形, 尺寸大小为 $D_1 \times D_2$, 矩形的两边分别平行于 x 和 y 轴, 中心光线与 z 轴共线。入射光束通过分束器后分为两部分: 光束 I 和光束 II, 它们分别到达静镜和动镜, 被反射后, 在 S 面上形成干涉平面。设动镜以点 $O'(x_0, y_0, 0)$ 为倾斜中心, 该点与镜中心原点距离为 d , 在俯仰方向倾斜 α 角, 在左右方向上倾斜 β 角, 则当 α 和 β 不同为 0 时, 动镜发生倾斜, 光束 II 中, 各条光线之间的光程都发生变化。与理想状态相比, 光束 II 中过 $(x, y, 0)$ 的光线通过动镜反射后, 产生附加光程差为

$$\Delta_l = -2(x - x_0)\alpha + 2(y - y_0)\beta. \quad (7)$$

此时, 在 S 处的干涉面上有光强不均匀的干涉光斑, 设过倾斜中心点 $O'(x_0, y_0, 0)$ 的光线在此干

涉图上的对应点为原点 O' , 建立与理想动镜平面相对应的干涉平面坐标系 $\xi O''\eta$, 此时原点 O' 处的光程差为 l , 任意点 $N(\xi, \eta)$ 处对应的光程差为

$$l(\xi, \eta) = l - 2\alpha\xi + 2\beta\eta. \quad (8)$$

正是因为这一光程差的改变, 进而对所得的干涉图会产生一定的影响, 从而进一步影响计算所得到的大气温度和风场速度的精确值。

4 倾斜误差容限

根据倾斜误差产生机理, 分别讨论两种情况下的倾斜误差: 1) 仅在初始安装时存在倾斜误差, 步进时不再产生倾斜; 2) 四步步进时存在一定的倾斜误差。在这两种误差的情况下, 可以根据原理式得到误差与调制度和相位之间的关系表达式, 给定参数, 进而获得定量关系。这样就可以在一定的测量准确度的限制下, 得到误差容限值, 为干涉仪的设计等提供一定的标准和要求。

4.1 初始时存在倾斜误差

如第 3 节中所述, 假使动镜在以点 $O'(x_0, y_0, 0)$ 为倾斜中心, 在俯仰方向倾斜 α 角, 在左右方向上倾斜 β 角。此时在干涉平面上对应的光程差如(8)式。

从最基本的干涉强度公式出发, 对于该种情况下, 由于 $\xi \in [-D_1/2 - x_0, D_1/2 - x_0]$, $\eta \in [-D_2/2 - y_0, D_2/2 - y_0]$, 对于风成像干涉仪, 取 $D_1 = D_2$, 以倾斜中心处光程差 l 为变量, 那么探测器上获取的干涉图强度可通过光谱强度 $B(\nu)$ 表示为

$$I(l) = \frac{1}{D_1^2} \int_{-D_1/2 - y_0}^{D_1/2 - y_0} \int_{-D_1/2 - x_0}^{D_1/2 - x_0} B(\nu) \times \{1 + \cos[2\pi\sigma_0(l - 2\alpha\xi + 2\beta\eta)]\} d\xi d\eta, \quad (9)$$

积分可得

$$I(l) = B(\nu) \{1 + \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \alpha) \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \beta) \times \cos[2\pi\sigma_0(l - 2\alpha x_0 + 2\beta y_0)]\}. \quad (10)$$

此时, 四强度方程组(1)式可改写为

$$\begin{cases} I'_1 = I_0 \{1 + \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \alpha) \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \beta) V \cos[\phi + 2\pi\sigma_0(-2\alpha x_0 + 2\beta y_0)]\} \\ I'_2 = I_0 \{1 - \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \alpha) \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \beta) V \sin[\phi + 2\pi\sigma_0(-2\alpha x_0 + 2\beta y_0)]\} \\ I'_3 = I_0 \{1 - \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \alpha) \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \beta) V \cos[\phi + 2\pi\sigma_0(-2\alpha x_0 + 2\beta y_0)]\} \\ I'_4 = I_0 \{1 + \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \alpha) \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \beta) V \sin[\phi + 2\pi\sigma_0(-2\alpha x_0 + 2\beta y_0)]\} \end{cases}, \quad (11)$$

进而可知

$$I'_0 = \frac{I'_1 + I'_3}{2} = \frac{I'_2 + I'_4}{2} = I_0, \quad (12)$$

$$V' = \frac{[(I'_1 - I'_3)^2 + (I'_4 - I'_2)^2]^{1/2}}{2I'_0} = \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \alpha) \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \beta) V, \quad (13)$$

$$\tan \phi = \frac{I'_4 - I'_2}{I'_1 - I'_3} = \tan[\phi + 2\pi\sigma_0(-2\alpha x_0 + 2\beta y_0)]. \quad (14)$$

与原理式相比,可见调制度因为动镜倾斜误差的存在会受到两个 sinc 函数的调制,那么调制度所决定的温度也会受到误差的影响;另外,由于相位也受到该误差影响,因而也必然影响到速度。

由 $V = \exp(-QT\Delta^2)$ 可得

$$T = -\frac{\ln V}{Q\Delta^2}, \quad (15)$$

考虑倾斜误差后,温度为

$$T' = -\frac{\ln V'}{Q\Delta^2} = -\left\{ \frac{\ln[\text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \alpha) \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \beta)] + \ln V}{Q\Delta^2} \right\}, \quad (16)$$

则倾斜误差对温度的影响值为

$$\delta T = -\frac{\ln[\text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \alpha) \text{sinc}(2\pi\sigma_0 D_1 \beta)]}{Q\Delta^2}. \quad (17)$$

由 $\phi = \phi_0 + \delta\phi = 2\pi\sigma_0\Delta_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$ 可得

$$v = c \left(\frac{\phi}{2\pi\sigma_0\Delta_0} - 1 \right), \quad (18)$$

而加上倾斜误差影响后速度为

$$v = c \left(\frac{\phi}{2\pi\sigma_0\Delta_0} + \frac{-2\alpha x_0 + 2\beta y_0}{\Delta_0} - 1 \right), \quad (19)$$

误差对速度的影响值为

$$\Delta v = c \frac{-2\alpha x_0 + 2\beta y_0}{\Delta_0}. \quad (20)$$

对于波长为 630.0 nm 的探测光源,可知波数 $\sigma_0 \approx 1.5873 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, $Q = 1.82 \times 10^{-12} \sigma_0^2 / M(\text{K}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$, 设理想时调制度 $V = 1$, 则在 $\Delta \simeq \Delta_0 = 4.5 \text{ cm}$, $D_1 = 50.8 \text{ mm}$, $x_0, y_0 \in (-D_1/2, D_1/2)$ 的条件下,可以得到调制度 V , 温度改变 δT 与速度 Δv 随倾斜误差的改变量对应关系曲线如图 3~6 所示。

由图 3~6 可知,调制度 V 随两个角度的变化相对较小,在 α 与 β 均倾斜 $80''$ 时,调制度仍能达到 0.8;而温度受倾斜的影响较大,在温度误差允许为 5 K 时, α 与 β 倾斜角度则均要求为 $[-10'', 10'']$;而速度误差由于与倾斜中心位置以及倾斜角度均相关,分别从两个方向进行了讨论,在倾斜转动中心为 $[-5 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}]$ 时,要求速度误差小于 10 m/s,倾斜角度在 $[-40'', 40'']$ 。

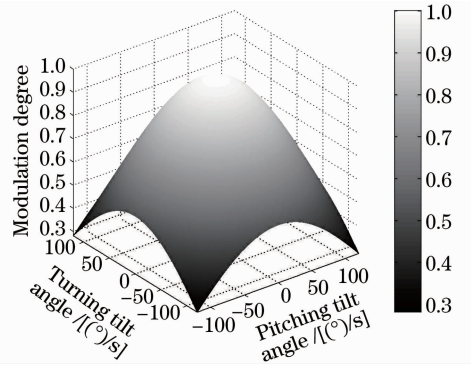


图 3 调制度随倾斜角度的变化关系

Fig. 3 Change of modulation degree with the tilting angle

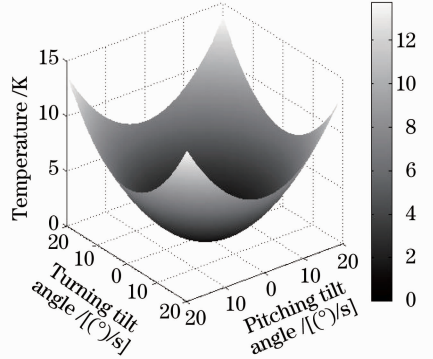


图 4 温度随倾斜角度的变化关系

Fig. 4 Change of temperature with the tilting angle

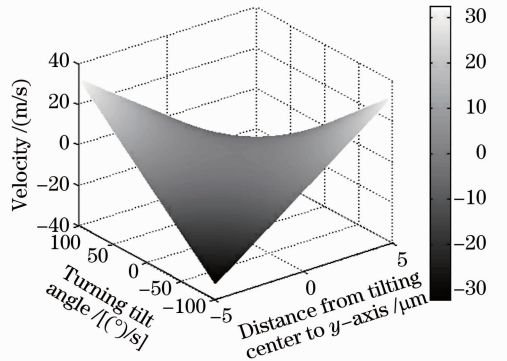


图 5 速度在俯仰方向随角度与距离变化关系

Fig. 5 Change of velocity with tilt angle and x -distance

4.2 四步进时存在一定的倾斜误差

由于机械以及外界环境因素的影响,在四步步进时的每一步中还有可能产生一定的倾斜误差。假设在每一步步进时,发生的倾斜量分别为 $\alpha_1, \beta_1; \alpha_2, \beta_2; \alpha_3, \beta_3$; 倾斜中心固定在各个步进过程中相同为 $O'(x_0, y_0, 0)$ 。则由于倾斜而对光路产生的光程差的改变分别为

$$\begin{cases} \Delta l_1 = -2\alpha_1 x_0 + 2\beta_1 y_0 \\ \Delta l_2 = -2\alpha_2 x_0 + 2\beta_2 y_0, \\ \Delta l_3 = -2\alpha_3 x_0 + 2\beta_3 y_0 \end{cases} \quad (21)$$

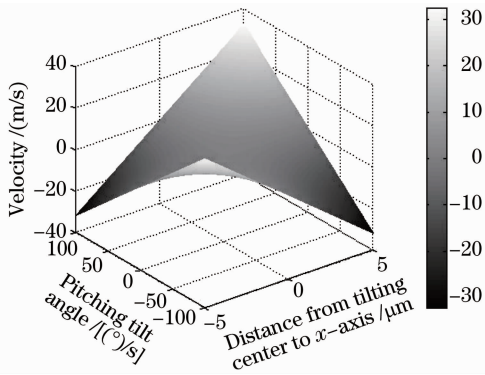


图6 速度在转动方向随角度与距离变化关系

Fig. 6 Change of velocity with tilt angle and y-distance

在步进时会产生上述的误差,则光程改变量依次为

$0, \frac{\lambda}{4} + \Delta_{l_1}, \frac{\lambda}{2} + \Delta_{l_1} + \Delta_{l_2}, \frac{3\lambda}{4} + \Delta_{l_1} + \Delta_{l_2} + \Delta_{l_3}$, 此时,

在应用四强度法探测时,可写为

$$\begin{cases} I'_1 = I_0(1 + V\cos\phi) \\ I'_2 = I_0[1 - V\sin(\phi + 2\pi\sigma_0\Delta_{l_1})] \\ I'_3 = I_0\{1 - V\cos[\phi + 2\pi\sigma_0(\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2})]\} \\ I'_4 = I_0\{1 + V\sin[\phi + 2\pi\sigma_0(\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2} + \Delta_{l_3})]\} \end{cases} \quad (22)$$

根据(2)~(4)式,可以得到两个 I'_0 和两个 V' 的值,计算为

$$\begin{cases} I'_{01} = \frac{I'_1 + I'_3}{2} = I_0 + I_0V\sin[\phi + \pi\sigma_0(\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2})]\sin[\pi\sigma_0(\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2})], \\ I'_{02} = \frac{I'_2 + I'_4}{2} = I_0 + I_0V\cos[\phi + \pi\sigma_0(2\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2} + \Delta_{l_3})]\sin[\pi\sigma_0(\Delta_{l_2} + \Delta_{l_3})]. \end{cases} \quad (23)$$

为简化公式,定义为

$$\begin{aligned} M &= \sin[\phi + \pi\sigma_0(\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2})]\sin[\pi\sigma_0(\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2})], \\ N &= \cos[\phi + \pi\sigma_0(2\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2} + \Delta_{l_3})] \times \\ &\quad \sin[\pi\sigma_0(\Delta_{l_2} + \Delta_{l_3})], \\ A &= \cos[\phi + \pi\sigma_0(\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2})]\cos[\pi\sigma_0(\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2})], \\ B &= \sin[\phi + \pi\sigma_0(2\Delta_{l_1} + \Delta_{l_2} + \Delta_{l_3})] \times \\ &\quad \cos[\pi\sigma_0(\Delta_{l_2} + \Delta_{l_3})], \end{aligned} \quad (24)$$

则推导可以得出

$$V'_1 = \frac{[(I'_1 - I'_3)^2 + (I'_4 - I'_2)^2]^{1/2}}{2I'_{01}} = \frac{V(A^2 + B^2)^{1/2}}{1 + VM}, \quad (25)$$

$$V'_2 = \frac{[(I'_1 - I'_3)^2 + (I'_4 - I'_2)^2]^{1/2}}{2I'_{02}} = \frac{V(A^2 + B^2)^{1/2}}{1 + VN}, \quad (26)$$

$$\tan\phi' = \frac{I'_4 - I'_2}{I'_1 - I'_3} = \frac{B}{A}. \quad (27)$$

通过分析可知,最终的调制度 V 与相位 ϕ 都会受到倾斜角度以及倾斜中心位置的影响,从而引起探测温度以及风场速度的改变。为了方便,以各个步进过程中由于动镜倾斜带来的光程差的改变作为变量进行讨论,同理可分别得到温度改变量 δT (由于调制度因不同光强度会有两个计算值,则 δT 也有两个计算值) 和风场速度改变量 δv 为

$$\delta T_{01} = -\frac{1}{Q\Delta^2} \ln \frac{(A^2 + B^2)^{1/2}}{1 + VM}, \quad (28)$$

$$\delta T_{02} = -\frac{1}{Q\Delta^2} \ln \frac{(A^2 + B^2)^{1/2}}{1 + VN}, \quad (29)$$

$$\delta v = c \left[\frac{1}{2\pi\sigma_0\Delta_0} a \tan\left(\frac{B}{A}\right) \right]. \quad (30)$$

可见温度以及速度都会受到各个步进过程中动镜倾斜产生的影响,为了便于讨论,假设每步步进时由动镜倾斜带来的光程差的影响相同,即 $\Delta_{l_1} = \Delta_{l_2} = \Delta_{l_3}$, 在该种情况下通过计算机模拟可以得到温度随光程差的变化图(图7~9)和速度误差随光程差的变化图(图10)。

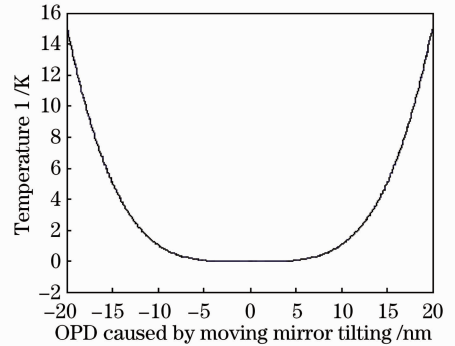


图7 温度1随倾斜引起的光程改变量变化关系
Fig. 7 Change of temperature1 with OPD caused by moving mirror tilting

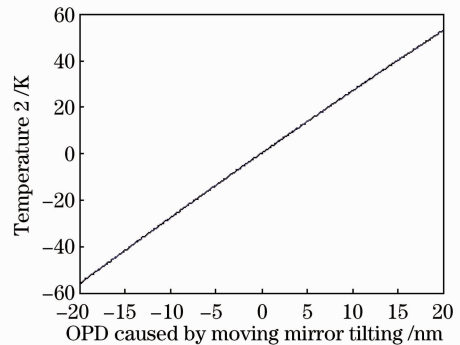


图8 温度2随倾斜引起的光程改变量变化关系
Fig. 8 Change of temperature2 with OPD caused by moving mirror tilting

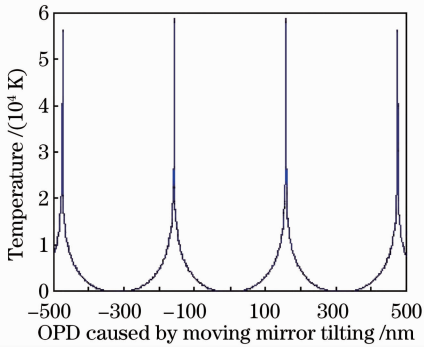


图9 温度随光程差变化在较大光程差内的整体关系图
Fig. 9 Change of temperature with OPD in wide range

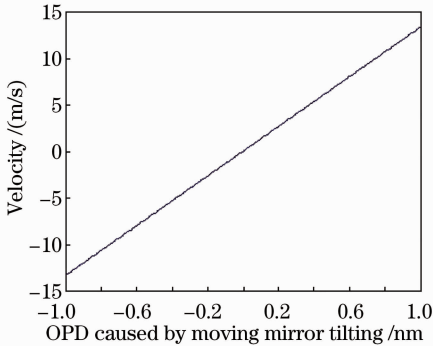


图10 速度误差随光程误差改变量关系图
Fig. 10 Velocity error with the OPD

由(21)式可知,光程改变量会随着倾斜角度以及倾斜位置而改变。在上述讨论中,由于变量较多,仅以光程改变量 Δ_l 来进行讨论,根据(21)式,可以得到倾斜角度以及倾斜中心的允许值;对比图7与图8可知,在采用 I'_{01} 进行计算时,所允许的 Δ_l 值较大,具有较好的结果,在温度改变 5 K 时, Δ_l 可以达到 $[-15 \text{ nm}, 15 \text{ nm}]$,而在采用 I'_{02} 进行计算时,允许的光程差改变量较小,这是因为在 I'_{02} 的计算中,多引入了一个光程差变量 Δ_{l_3} ,因此采用 I'_{01} 计算会有一个较为精确的结果;从图9可以看出,在速度误差允许值 10 m/s 时,光程差改变量可以为 $[-0.9 \text{ nm}, 0.9 \text{ nm}]$ 。为了能充分显示误差带来结果的影响,做出了在较大改变量 $[-500 \text{ nm}, 500 \text{ nm}]$ 之间大于一个波长误差内的温度改变量曲线,可见,它会以大约半个波长为周期来进行改变,这与理论结果相一致。

5 结 论

从大气风场探测的基本原理出发,通过分析动镜倾斜对大气温度以及风场速度带来的影响,尤其是对其中的两种情况:1) 仅在初始安装时存在倾斜误差,四步步进时不再产生倾斜;2) 仅四步步进时

存在一定的倾斜误差,进行了系统的理论分析与研究,并最终得出以下结论:

1) 通过精确的理论计算和推导可知,在初始存在误差时,动镜倾斜对系统调制度有两个 sinc 函数的调制作用,但影响相对较小;

2) 通过计算机模拟可知,当温度误差允许为 5 K 时,倾斜角度 α 与 β 均要求在 $[-10'', 10'']$ 之内;当要求风场速度误差小于 10 m/s 时,倾斜角度 α 与 β 都必须在 $[-40'', 40'']$ 之间,而倾斜转动中心需控制在 $[-5 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}]$ 之间;

3) 由于步进过程中动镜倾斜误差的存在,导致计算产生两个不同的光强度值,分析可知在利用第一个光强度值计算时,结果较为精确;

4) 在步进过程中存在动镜倾斜时,如果允许的温度误差为 5 K,则由倾斜产生的光程差误差在 $[-15 \text{ nm}, 15 \text{ nm}]$ 范围内;如果要求测量的风场速度精度达到 10 m/s,则由倾斜产生的光程差误差必须控制在 $[-0.9 \text{ nm}, 0.9 \text{ nm}]$ 之间;

总而言之,动镜倾斜以及运动过程中的倾斜,均会对风成像干涉仪的精度以及性能产生极大的影响,它的倾斜角度必须控制在一定范围内(上述结果按风成像干涉仪精度讨论),并且应尽量使光束的中心与动静倾斜中心重合,来减小倾斜带来的误差。由于机械加工精度有限,因而建立动态校正系统是十分必要的,采用自适应动态校正系统后,将会大大提高风成像干涉仪的性能。该研究工作为风成像干涉仪的结构设计提供了一定的参考标准与精度要求,对风成像干涉仪的理论研究、技术创新、研制、性能改进和工程化等都具有理论与实践指导意义。

参 考 文 献

- 1 L. J. Otten III, E. W. Butter, B. Rafert *et al.*. Design of an airborne Fourier transform visible hyper spectral imaging system for light aircraft environmental remote sensing[C]. *SPIE*, 1995, **2480**: 418~424
- 2 C. Zhang, J. He. The generalization of upper atmospheric wind and temperature based on the Voigt line shape profile[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(26): 12561~12567
- 3 C. Zhang, B. Zhao, B. Xiangli. Wide field of view polarization interference imaging spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(33): 6090~6094
- 4 C. Zhang, B. Xiangli, B. Zhao. Permissible deviations of the polarization orientation in the polarization imaging spectrometer [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2004, **6**(8): 815~817
- 5 C. Zhang, B. Zhao, B. Xiangli. Analysis of the modulation depth affected by the polarization orientation in polarization interference imaging spectrometer [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **227**(4-6): 221~225
- 6 Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Sun Qiang *et al.*. Optical system design for a dual-band space imaging spectrometer [J]. *Acta*

- Photonica Sinica, 2005, **34**(1): 50~54
- 杨新军, 王肇圻, 孙强等. 空间双波段成像光谱仪红外光学系统的设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(1): 50~54
- 7 C. Zhang, B. Xiangli, B. Zhao. A static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(1-2): 21~26
- 8 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674~2679
- 陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2674~2679
- 9 Wang Haiyong, Lin Haoyu, Zhou Wenrui. Technology of atmospheric refraction compensation in starlight observation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1101002
- 王海涌, 林浩宇, 周文睿. 星光观测蒙气差补偿技术[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1101002
- 10 G. G. Shepherd, W. A. Gault, D. W. Miller *et al.*. WAMDII: wide-angle michelson doppler imaging interferometer for Spacelab [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(11): 1571~1584
- 11 Xiangli Bin, Yang Jianfeng. Tilt tolerance of the moving mirror in interferometric spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(2): 132~135
- 相里斌, 杨建峰. 干涉光谱仪动镜倾斜误差容限分析[J]. 光子学报, 1997, **26**(2): 132~135
- 12 Zeng Libo, Yin Bangsheng, He Bing *et al.*. Error analysis of moving mirror in Fourier transform interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 191~196
- 曾立波, 尹邦胜, 何冰等. 傅里叶变换红外光谱仪动镜倾斜误差分析[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(2): 191~196
- 13 Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi *et al.*. Study on the relation of ocean atmospheric aerosol optical model parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1101005
- 王家成, 乔延利, 杨世植等. 海洋大气气溶胶光学模型参数的相关性研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1101005
- 14 Chang Lingying, Zhao Baochang, Wen Desheng *et al.*. Optical system design of visible camera for space target detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 136~140
- 常凌颖, 赵葆常, 汶德胜等. 空间目标探测相机光学系统设计 [J]. 中国激光, 2010, **37**(s1): 136~140

栏目编辑:何卓铭