

大气风场探测多普勒差分干涉仪相位稳定性影响因素分离测试方法

傅颀^{1,2}, 畅晨光¹, 孙剑¹, 李娟¹, 武魁军³, 冯玉涛^{1**}, 刘学斌^{1*}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264003

摘要 多普勒差分干涉仪基于一种新型中高层大气风场探测系统,通过计算干涉图相位变化量反演观测目标源光谱的多普勒频移,实现大气风场测量。基准相位作为确定风场多普勒频移量的必要参数,其稳定性是保证风速测量精度的核心指标之一。针对非对称量相位漂移、相位斜率漂移和干涉图相位漂移这三项影响干涉仪基准相位的因素开展研究,基于多普勒差分干涉原理对其相位热漂移开展了理论分析,提出了各项因素相位漂移量的分离测试方法,并基于近红外多普勒差分干涉仪开展了实验测试。环境温度波动为 0.27 °C 时,相位斜率变化量为 670 mrad/m,干涉图相位漂移移动范围为 8.9 mrad;修正干涉图相位漂移后,非对称量相位漂移约为 4.7 mrad,均方根为 0.98 mrad,等效风速测量误差为 0.81 m/s。通过温度拉偏实验,得到非对称量相位漂移随温度的变化率为 -493 mrad/°C 的结论。

关键词 大气光学; 中高层大气风场探测; 多普勒差分干涉仪; 相位稳定性; 测试与分析

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1801003

Separating and Testing Method for Influencing Factors of Phase Stability of Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer for Atmospheric Wind-Field Detection

Fu Di^{1,2}, Chang Chengguang¹, Sun Jian¹, Li Juan¹, Wu Kuijun³, Feng Yutao^{1**}, Liu Xuebin^{1*}

¹Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Optic-Electronic Information Science and Technology, Yantai University, Yantai 264003, Shandong, China

Abstract The Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer, a new type of mid- and upper-atmospheric wind-field detection system, can achieve atmospheric wind-field measurement by the inversion of the Doppler shift of observed source spectra after calculating the changes in interferograms. The reference phase is a necessary parameter to determine the Doppler shift of the wind field, and its stability is one of the core indicators to ensure the accuracy of wind speed measurement. This paper investigates three factors that affect the reference phase of an interferometer, namely, the phase drift of asymmetric quantities, phase slope drift, and phase drift of interferograms. Moreover, the theoretical analysis of the thermal phase drift is carried out on the basis of the principle of Doppler asymmetric spatial heterodyne interference. The separating and testing method for the phase-drift quantities of each factor is proposed, and the experimental test is conducted by the near-infrared Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer. Under the ambient temperature fluctuation of 0.27 °C, the change of phase slope is 670 mrad/m, and the phase-drift fluctuation range of interferograms is 8.9 mrad. Upon the phase-drift correction of interferograms, the phase drift of asymmetric quantities is about 4.7 mrad, and the root mean square is 0.98 mrad, with the equivalent wind speed measurement error of 0.81 m/s. According to the

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2021-12-18; 录用日期: 2022-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(41005019)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20210021)、中国科学院西部之光交叉创新团队(E1294301)、中国科学院西部之光项目(XAB-2016A07)、陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2019JQ-931)

通信作者: *lxb@opt.ac.com; **fytiom@126.com

bias experiment on temperature, the rate of phase-drift change of asymmetric quantities with temperature is $-493 \text{ mrad}/^\circ\text{C}$.

Key words atmospheric optics; mid- and upper-atmospheric wind-field detection; Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer; phase stability; testing and analysis

1 引言

大气风场作为中高层大气重要的动力学参数,直接影响上下层大气之间动量、能量耦合与成分输运^[1-2],进而直接或间接对空间天气预报^[3]、航天活动安全、空间无线电导航与通信^[4]及空间科学实验^[5]等产生重要的影响。被动光学干涉风场探测作为中高层大气风场探测的重要技术手段,通过观测中性粒子气辉光谱的多普勒效应反演干涉信号、确定沿观测方向的风速,结合多角度观测实现水平矢量风场测量^[6]。

自 20 世纪 60 年代以来研究人员已发展出包括广角迈克耳孙干涉技术^[7]、法布里-珀罗干涉技术^[8]在内的多种技术,研制了众多成功的测风载荷^[9-10]。多普勒差分干涉光谱技术(DASH)是由美国 Englert 团队^[11]在 2006 年提出的一种新型的中高层大气风场探测技术,其基于双光束等厚空间调制干涉,具有稳定性高、研制加工难度低、工艺需求小、支持同步定标等优势^[12],已成为近年来星载被动测风领域的研究热点。美国国家航空航天局(NASA)支持研制的 ICON (Ionospheric Connection Explorer) 卫星^[13]上搭载了基于多普勒差分干涉光谱技术的载荷 MIGHTI (Michelson Interferometer Global High-Resolution Imaging of the Thermosphere and Ionosphere)^[14]。

多普勒差分干涉仪通过观测目标源光谱的多普勒频移实现大气风场测量,为了获取 3 m/s 的大气风速测量准确度,需要定量测量 fs 量级的波长变化。因此,要求测风载荷自身的探测基准相对工作温度变化具有极高的稳定性。针对多普勒差分干涉仪热稳定理论及测试,Englert 等^[15]对影响干涉仪相位基准的因素进行了研究,提出了基于同步定标监测干涉仪非对称量变化的理论,其依托 MIGHTI 载荷开展了干涉仪温度拉偏实验,分析了环境温度变化对干涉仪总体相位的影响^[16];Wei 等^[17]针对多普勒差分干涉仪热特性开展了研究,并对在大尺度温度变化下条纹数及基准相位变化进行测试与分析。

上述研究主要集中于对干涉仪相位热漂移的总体测试与分析,而基准相位热漂移是受到多种因素共同影响的结果,有效分离及定量测试各因素热漂移对干涉仪硬件设计优化评估及热漂移监测修正十分重要。本文针对多普勒差分干涉仪开展相位稳定性影响因素分离测试方法研究,首先基于多普勒差分干涉仪基准相位公式,对非对称量相位漂移、相位斜率漂移及干涉图相位漂移进行理论分析,提出了针对各类型基准相位漂移的定量测试方法,基于近红外多普勒差分干涉仪样机,开展了相位热稳定性的验证实验,分离出不同因素导致的基准相位热漂移,并对其与温度变化的相

关性进行了分析讨论。

2 多普勒差分干涉仪稳定性分析及测试方法

测风多普勒差分干涉仪的基本结构与广角迈克耳孙干涉仪^[18]相似,结合了空间外差干涉仪^[19]的技术思路,将迈克耳孙干涉仪中两干涉臂末端的平面反射镜替换成闪耀光栅,两干涉臂相对分束元件呈非对称结构,通过在一个干涉臂中加入非对称量 Δd ,增大基础光程差,提高了干涉仪风速测量灵敏度,如图 1 所示。

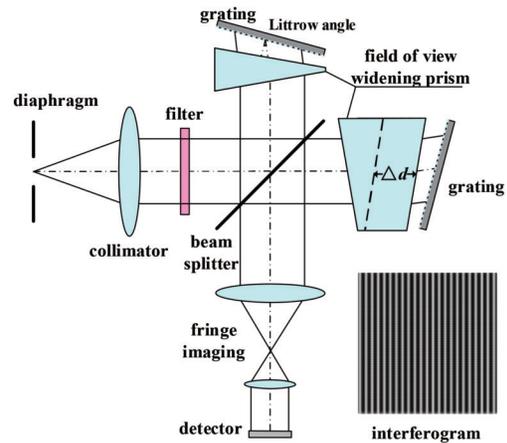


图 1 多普勒差分干涉仪原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

任意单线辐射光谱 $B(\sigma)$ (σ 为辐射光谱参考波数) 入瞳,经过准直镜、滤光片和分束器后形成两束光,并分别在两个干涉臂末端的闪耀光栅处发生衍射,经过闪耀光栅后返回,两束光的波阵面在分束器处相遇,此时两个波阵面有 $2\Delta d$ 的光程差。两束光经过条纹成像系统,在探测器上形成的等厚干涉条纹^[20]满足

$$I(x) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} B(\sigma) \left\{ 1 + \cos \left\{ 2\pi \left[4(\sigma - \sigma_L) \tan \theta_L \cdot x + 2\Delta d \cdot \sigma \right] \right\} \right\} d\sigma, \quad (1)$$

式中: σ_L 为 Littrow 波数; θ_L 为 Littrow 角; x 为探测器上位置坐标,定义探测器中心 $x=0$ 。

通过傅里叶变换、窗函数单线提取与傅里叶逆变换进行相位反演,获取复干涉图,进而通过其实部与虚部比值确定任意采样点相位:

$$\phi(x) = 2\pi\kappa x + \varphi + \delta\varphi, \quad (2)$$

式中: $\kappa = 4(\sigma_0 - \sigma_L) \tan \theta_L$ 为差分频率, σ_0 为该条谱线

的标称波数; $\varphi = 4\pi\sigma_0\Delta d$ 为非对称量相位项; $\delta\varphi$ 为大气风场引起的多普勒相位变化量。

通过在反演相位中减去基准相位 $\phi_0(x) = 2\pi\kappa x + \varphi$, 即可获取包含风速信息的多普勒相位 $\delta\varphi$ 。基于多普勒效应原理及干涉仪仪器原理, 多普勒相位与视线方向风速 v_{Los} ^[13] 的关系为

$$v_{\text{Los}} = \frac{\delta\varphi \cdot c}{4\pi\Delta d \cdot \sigma_0}, \quad (3)$$

式中: c 为光速。

干涉仪基准相位作为获取多普勒频移的必要参数, 其稳定性直接影响风速测量精度。基准相位的漂移主要受到仪器光机系统热特性的影响, 因相位热漂移的来源不同, 其可分为非对称量相位漂移、相位斜率漂移和干涉图相位漂移三部分。

非对称量相位漂移是由温度变化导致的干涉仪基础光程差漂移, 直接影响基准相位关于采样位置的线性函数的截距, 可表示为

$$\begin{aligned} \phi_0^{\text{grating, shift}}(x) = & 2\pi [4(\sigma - \sigma_L + \Delta\sigma_L)(\tan\theta_L + \tan\Delta\theta_L) \cdot x + 2(\Delta d) \cdot \sigma] = \\ & 2\pi \{ \kappa + 4 [(\sigma - \sigma_L) \tan\Delta\theta_L + \Delta\sigma_L \tan\theta_L + \Delta\sigma_L \tan\Delta\theta_L] \} x + \phi_0. \end{aligned} \quad (6)$$

此外, 成像系统放大率也会影响基准相位, 通过改变探测器位置对应的光程差影响基准相位关于采样位置的线性函数的斜率:

$$\begin{aligned} \phi_0^{(\beta, \text{shift})}(x) = & 2\pi [4(\sigma - \sigma_L) \tan\theta_L \cdot x \cdot \beta_{\text{shift}} + 2\Delta d \cdot \sigma] = \\ & 2\pi\kappa x \cdot \beta_{\text{shift}} + \phi, \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\phi_0^{(\beta, \text{shift})}(x)$ 为由成像系统放大率变化导致的相位斜率漂移量; β_{shift} 为成像系统放大率的乘性变化系数。

干涉图相位漂移是指干涉图像整体运动导致的相位漂移, 其主要来源于干涉仪与探测器组件间在热环境变化下的相对位置变化:

$$\phi_0^{\text{image, shift}}(x) = 2\pi\kappa x + \phi + \frac{2\pi \cdot D_{\text{shift}} \cdot \beta}{L_{\text{pixel}} \cdot N_{\text{pixel}}}, \quad (8)$$

式中: $\phi_0^{\text{image, shift}}(x)$ 为干涉图相位漂移量; D_{shift} 为干涉仪与探测器相对位置的变化量; β 为成像系统放大率; L_{pixel} 为探测器像元尺寸; N_{pixel} 为单周期条纹对应的像元数。

综上所述, 考虑相位热漂移及干涉图漂移情况下的基准相位表达式为

$$\begin{aligned} \phi_0^{\text{shift}}(x) = & 2\pi(\kappa + \Delta\kappa)\beta_{\text{shift}} \cdot x + \phi + 4\pi\Delta d_{\text{shift}}\sigma + \\ & \frac{2\pi \cdot D_{\text{shift}} \cdot \beta}{L_{\text{pixel}} \cdot N_{\text{pixel}}}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\phi_0^{\text{shift}}(x)$ 为考虑相位热漂移及干涉图漂移的基准相位函数; $\Delta\kappa = 4 [(\sigma - \sigma_L) \tan\Delta\theta_L + \Delta\sigma_L \tan\theta_L + \Delta\sigma_L \tan\Delta\theta_L]$ 。

相位稳定性测量以稀有气体放电灯辐射单线作为稳频输入信号, 该信号进入干涉仪后, 经长时间多次曝光形成干涉图序列, 通过相位反演计算干涉图固定区

$$\phi_0^{(\Delta d, \text{shift})}(x) =$$

$$\begin{aligned} & 2\pi [4(\sigma - \sigma_L) \tan\theta_L \cdot x + 2(\Delta d + \Delta d_{\text{shift}}) \cdot \sigma] = \\ & 2\pi\kappa x + \phi + 4\pi\Delta d_{\text{shift}}\sigma, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\phi_0^{(\Delta d, \text{shift})}(x)$ 为非对称量相位漂移量; Δd_{shift} 为由温度变化导致的干涉仪非对称量的变化量。

相位斜率漂移是指相位差分频率及成像系统放大率随温度的变化导致的相位漂移, 会影响干涉条纹空间频率, 其通过改变基准相位关于采样位置的线性函数的斜率影响基准相位, 其影响与采样位置 x 直接相关。

差分频率变化主要受到 Littrow 波数及 Littrow 角的热漂移影响, 具体如下所示:

$$\begin{aligned} \phi_0^{\text{grating, shift}}(x) = & 2\pi [4(\sigma - \sigma_L + \Delta\sigma_L) \tan(\theta_L + \Delta\theta_L) \cdot \\ & x + 2(\Delta d) \cdot \sigma], \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\phi_0^{\text{grating, shift}}(x)$ 为由差分频率变化导致的相位斜率漂移量; $\Delta\sigma_L$ 为干涉仪 Littrow 波数变化量; $\Delta\theta_L$ 为 Littrow 角变化量。由于 $\Delta\theta_L$ 量级很小, 式(5)可表示为

域内干涉条纹定点相位, 实现总体相位稳定性监测。

为分离基准相位热漂移来源, 需针对上文所示各项基准相位热漂移开展定量测试, 基于式(9), 并根据不同的测试方法, 基准相位漂移量可以分为三部分:

1) 相位斜率漂移, 其包含了干涉仪 Littrow 波数、Littrow 角与成像系统放大率的变化量引起的基准相位变化。该部分的基准相位漂移能够通过计算干涉条纹相位关于探测器采样位置 x 的线性函数的斜率获取, 即需要直接确定 $2\pi(\kappa + \Delta\kappa)\beta_{\text{shift}}$ 。本文通过对干涉条纹的相位反演获取不同探测器采样位置的相位值, 考虑到多种畸变的影响, 采用中心区域内相位进行拟合, 确定相位函数斜率。

2) 干涉图相位漂移, 其漂移量大小与成像系统及探测器间的相对位移量直接相关, 本文通过监测在光栅底部预制的刻槽位移量实现干涉图漂移的检测。通过监测连续两帧间的图像亚像元位移量, 确定干涉图漂移量 D_{shift} , 结合如式(8)所述的干涉仪系统参数, 确定干涉图相位漂移量 $\phi_0^{\text{image, shift}}(x)$, 干涉图光栅刻线图像如图 2 所示。

3) 非对称量相位漂移。通过在总体基准相位漂移中扣除相位斜率漂移和干涉图相位漂移, 可实现非对称量相位漂移的定量计算。此外, 本文还设计了干涉仪温度拉偏实验, 在干涉仪温度波动相对较大的条件下, 对非对称量相位漂移进行定量测量。

通过上述的稳定性定量测试方法, 在确定总体稳定性的同时, 还能够将各类因素造成的不稳定性进行定量分离, 支撑开展硬件优化设计及改进效果评估, 并为开展风场数据质量估计提供输入。



图 2 干涉图光栅刻线图像

Fig. 2 Grating notch pattern of interferogram

3 实验室测试及分析验证

基于前述的测风多普勒差分干涉仪稳定性测试方案,并基于近红外多普勒差分干涉仪开展了稳定性实验,如图 3 所示。所采用的近红外多普勒差分干涉仪基于热补偿理论设计及研制,实验还对干涉仪组件实施了真空保持及主动温控,以保障干涉仪组件工作在相对稳定的外部环境。实验所采用的多普勒差分干涉仪的主要参数如表 1 所示。

本文利用氩气体放电灯 866.794 nm 谱线作为单频输入信号,信号由光纤引入干涉仪主体,由 CCD 探测器接收干涉信号并将其存储于主控计算机中。干涉仪核心组件通过真空箱体及真空泵保持约 5×10^{-4} Pa 的气压,温控系统工作于上述条件下。测量温度数据包含环境温度、干涉仪核心组件温度等。各个测点的温度数据测量及输出频率为 0.1 Hz,温度测量数据由温控控制器存储至主控计算机。基于式(3)所示的相

表 1 近红外多普勒差分干涉仪的主要指标参数

Table 1 Main parameters of near infrared Doppler differential

interferometer	
Index	Value
Target line wavelength /nm	866.794
Littrow wavelength /nm	868.248
Wavelength range /nm	865.369-868.383
Littrow angle /($^{\circ}$)	10
Interferometer offset /cm	2.5
Spectral resolution /nm	0.024
CCD pixel size / μm	6.5
CCD pixel number	2048 \times 2048

位与风速的关系,结合表 1 所述的本文实验的干涉仪参数,测量得到 1 m/s 的风速对应的相位变化量为 1.2 mrad。

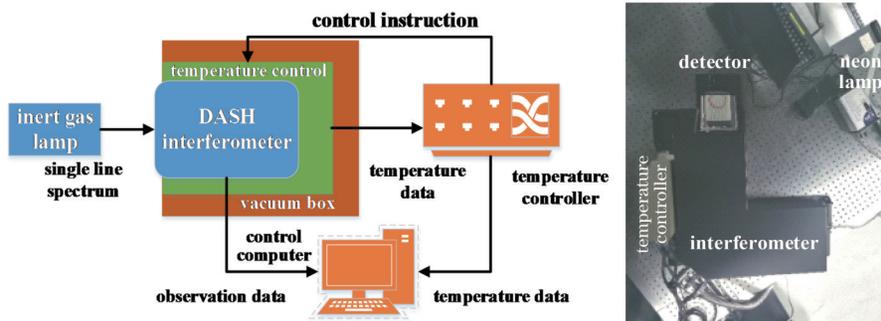


图 3 多普勒差分干涉仪相位稳定性验证实验示意图及实物

Fig. 3 Schematic diagram and actual object of the phase stability experiment of the Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

实验测试时段为 2021 年 6 月 8 日 9:07-14:41,历时约 334 min,设置探测器曝光时间为 10 s,获取 2000

帧观测图像。获取的干涉图像及干涉条纹如图 4 所示。

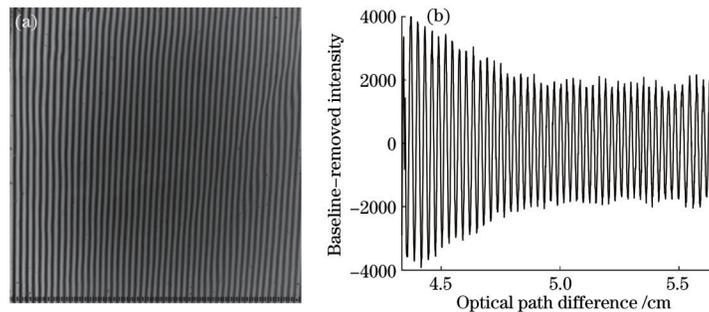


图 4 Ar 灯干涉数据。(a)原始干涉图;(b) 1024 行去基线后干涉条纹

Fig. 4 Interferogram data of argon lamp. (a) Original interferogram; (b) baseline-removed fringe of row 1024

图 4 所示为 Ar 等干涉图像及第 1024 行去基线后的干涉条纹,干涉条纹受仪器照明不均匀影响,干涉强

度在小光程差附近较强,但不影响本文对系统稳定性的研究分析。其中原始干涉条纹数为 49.25 个。

从图 5 所示的温控系统输出的温度测量数据可以看出,实验过程中环境温度受空调工作模式的影响,表现出显著的周期波动特征,波动周期约为 35 min,温度波动区间为 26.86~27.13 °C,波动范围为 0.27 °C。通过主动温控及真空保持系统,进一步

保证了干涉仪核心组件工作温度的稳定性,通过 40 点均值滤波抑制温度测量误差,干涉仪的温度波动范围优于 0.005 °C,其随温度的变化量级显著降低,但仍与环境温度变化趋势具有一定的相关性,两者的相关系数为 0.43。

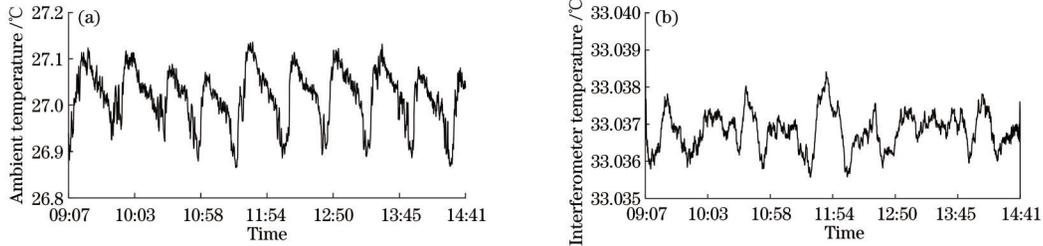


图 5 实验温度条件。(a)环境温度;(b)干涉仪组件温度

Fig. 5 Temperature condition of experiment. (a) Ambient temperature; (b) temperature of interferometer element

基于第 2 节对基准相位与采样位置线性函数斜率的计算方法,对探测器中间行(第 1024 行)的相位斜率随时间的变化趋势进行了分析,结果如图 6 所示。

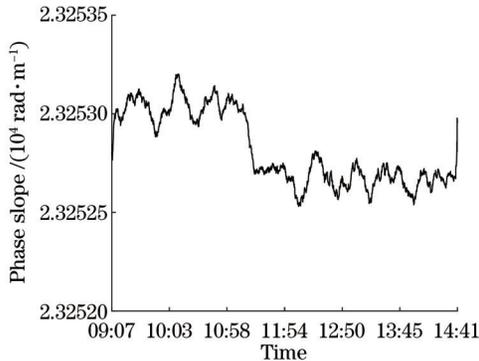


图 6 相位斜率随时间的变化

Fig. 6 Variation of phase slope with time

由图 6 可以看出:相位斜率变化趋势与干涉仪温度存在一定的相关性,40 点均值滤波后相位斜率变化量为 670 mrad/m,由斜率变化导致的图像最大采样位置的相位变化量为 4.45 mrad。考虑到基准相位选择图像中心区域位置采样点相位,故由相位斜率导致的相位变化量极小,这验证了实验所用干涉仪具有较好的热补偿及主动温控效果。

基于第 2 节所示的相位反演方法,对获取的 2000 帧干涉图的第 1024 行进行相位反演,选取探测器中心 $x=0$ 处相位,即相位截距项得到图 7 所示的相位截距随时间的变化。

由图 7 可见,相位截距随时间的变化表现出显著的周期波动特性,波动周期与环境温度波动高度相似,波动趋势与环境温度波动相反,相位波动范围为 9.7 mrad。

基于第 3 节所述的干涉图漂移计算方案,利用预制的光栅刻槽计算干涉仪组件与探测器间的相对位移变化,结果如图 8 所示。

由图 8 可见:干涉图相位漂移量的变化趋势与相

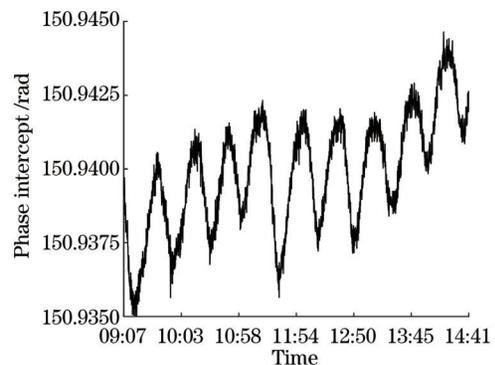


图 7 相位截距随时间的变化

Fig. 7 Variation of phase intercept with time

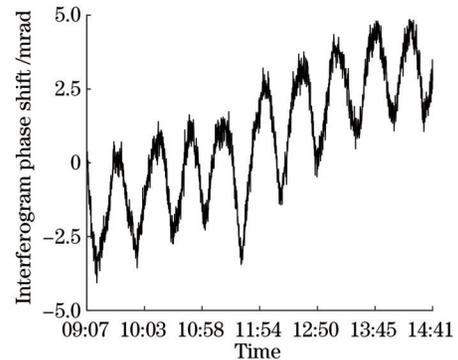


图 8 干涉图相位漂移量随时间的变化

Fig. 8 Variation of interferogram phase shift with time

位截距项高度相似,相关系数达到了 0.88,证明:在干涉仪稳定工作状态下,干涉图相位漂移在总体相位热漂移中占主导地位。干涉图相位漂移也与环境温度波动表现出频率相同、趋势相反的特征,干涉图相位漂移关于环境温度的变化率为 $-14.8 \text{ mrad}/\text{°C}$,如图 9 所示。

基于相位截距波动量与干涉图热漂移相位计算结果,确定由干涉仪非对称量变化导致的相位变化量,如图 10 所示。

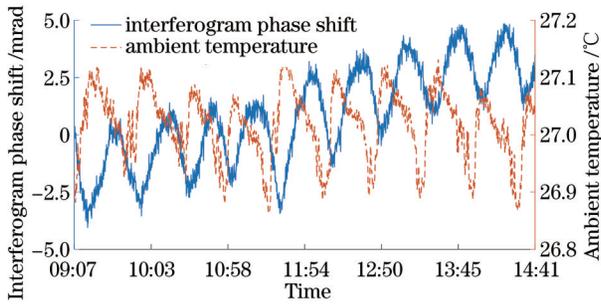


图 9 干涉图相位漂移量与环境温度的变化对比

Fig. 9 Comparison of interferogram phase shift and ambient temperature

如图 10 所示,由非对称量变化导致的相位变化量仍存在一定的周期波动特征,但相较于相位截距,其与环境温度变化的相关性不显著,而该相位作为最终计算风速的基准相位,其相位波动范围为 4.7 mrad,相位波动均方根为 0.98 mrad,等效风速测量误差为 0.81 m/s。

此外,由非对称量变化导致的相位变化量与干涉仪温度相比不存在明显的相关性,干涉仪温度波动较

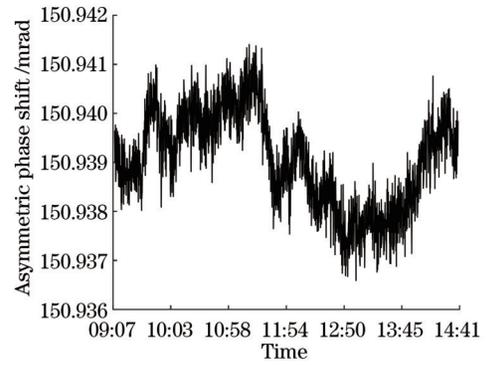


图 10 干涉仪非对称量相位漂移随时间的变化

Fig. 10 Variation of interferometer asymmetric phase shift with time

小,受到其他微弱变化因素的影响,无法显著表达其相关性。本文为进一步验证干涉仪温度与非对称量变化导致的相位波动的关系,开展了非稳态环境下的稳定性测试实验,通过改变干涉仪温控设置控制干涉仪温度持续上升,并采集对应干涉数据,通过本文上述计算方法,获取非对称量变化导致的相位波动,如图 11 所示。

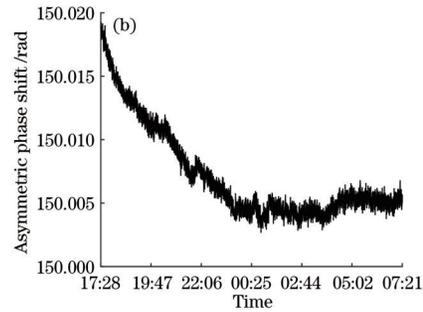
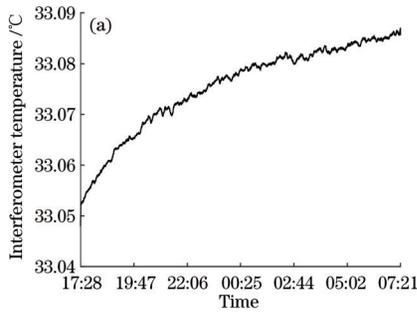


图 11 非稳态条件下干涉仪温度及非对称量相位随时间的变化。(a)干涉仪温度;(b)干涉仪非对称量相位漂移

Fig. 11 Variations of temperature and asymmetric phase shift of interferometer with time in non-steady state. (a) Temperature of interferometer; (b) asymmetric phase shift of interferometer

由图 11 可以看出:在干涉仪温度波动显著的情況下,非对称量变化导致的相位波动与干涉仪温度表现出显著的负线性相关性,相关系数达 -0.93。

图 12 所示为基于干涉仪温度与非对称量相位漂移的线性拟合结果,可看出非对称量变化导致的相位波动关于干涉仪温度的变化率为 -493 mrad/°C

基于上述实验得到的相位斜率漂移量较小,选取探测器中心采样点相位,该采样位置相位斜率漂移远小于其他两项因素;对风速测量影响较大的为相位线性函数中的相位截距,其由干涉图相位漂移与非对称量相位漂移组成。在稳态环境下干涉图相位漂移在基准相位漂移中占主导地位;由于干涉仪的工作温度稳定,非对称量相位漂移对基准相位波动的贡献相对较小。

针对相位截距的实验也表明,环境温度波动主导了干涉图漂移相位波动,且随环境温度表现出显著周期性,这是由于:探测器及其支撑结构未提供温控措施,直接与外界环境进行热传导,导致其结构受到温度

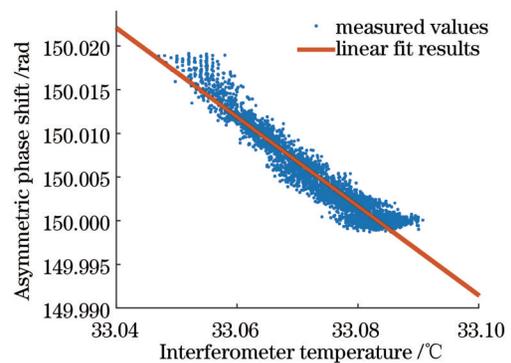


图 12 非稳态条件下干涉仪的温度与非对称量相位波动的对应关系

Fig. 12 Relationship between temperature and asymmetric phase shift of interferometer in non-steady state

波动影响,出现形变,进而影响成像空间位置关系,引起相位波动。但该项误差能够被预制的光栅刻槽有效

地监测与消除;干涉仪温度波动主导了相位斜率与非对称量相位漂移的变化,这是由于:干涉仪温度变化导致其内部元件尺寸的微小变化,虽然干涉仪已进行了热补偿设计,但温度偏移仍会对干涉仪工作状态造成影响,进而导致相位出现波动。在本文所开展实验的温控环境下,由干涉仪非对称量波动引起的相位波动均方根为 0.98 mrad,等效风速误差为 0.81 m/s。

4 结 论

基于多普勒差分干涉仪的相位测量理论,对影响基准相位的非对称量相位漂移、相位斜率漂移和干涉图相位漂移进行了理论分析,并设计了确定各项因素波动量的实验方案,基于近红外多普勒差分干涉仪开展相关实验验证。本文实验中:在环境温度波动为 0.27 °C 的条件下,相位斜率变化量为 670 mrad/m,干涉图相位漂移波动范围为 8.9 mrad;修正干涉图相位漂移后,基准相位漂移为 4.7 mrad,均方根为 0.98 mrad,等效风速测量误差为 0.81 m/s。在干涉仪温度拉偏实验中,非对称量相位漂移随温度的变化率为 $-493 \text{ mrad}/^\circ\text{C}$ 。

针对经干涉图相位漂移修正后仍存在的非对称量相位漂移,后续将开展基于同步定标的非对称量相位漂移监测及修正研究,以进一步提升各项基准相位热漂移监测能力。

参 考 文 献

- [1] Zhang S P, Roble R G, Shepherd G G. Tidal influence on the oxygen and hydroxyl nightglows: wind Imaging Interferometer observations and thermosphere/ionosphere/mesosphere electrodynamic general circulation model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, 106(A10): 21381-21393.
- [2] Zhang S P, Thayer J P, Roble R G, et al. Latitudinal variations of neutral wind structures in the lower thermosphere for the March equinox period[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66(1): 105-117.
- [3] 陈炳龙, 杨忠东, 闵敏, 等. 星载多普勒测风激光雷达应用需求与研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 190003.
Chen B L, Yang Z D, Min M, et al. Application requirements and research progress of spaceborne Doppler wind lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190003.
- [4] 马福民, 陈涌, 杨泽后, 等. 激光多普勒测风技术最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 180003.
Ma F M, Chen Y, Yang Z H, et al. Latest development of laser Doppler wind measurement technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 180003.
- [5] 冯玉涛, 武魁军, 傅頔, 等. 基于氧分子 $\text{O}_2(a^1\Delta_g)\text{O}_{15}\text{P}_{18}$ 发射谱线的平流层、中间层大气风场星载探测可行性探讨[J]. *光子学报*, 2019, 48(2): 0201001.
Feng Y T, Wu K J, Fu D, et al. Feasibility of satellite-

- borne wind observations of stratosphere and mesosphere based on the emission line $\text{O}_2(a^1\Delta_g)\text{O}_{15}\text{P}_{18}$ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(2): 0201001.
- [6] Harding B J, Makela J J, Englert C R, et al. The MIGHTI wind retrieval algorithm: description and verification[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212(1/2): 585-600.
- [7] Shepherd G G. Optical Sopleter imaging with field-widened Michelson interferometers[J]. *Surveys in Geophysics*, 1987, 9(2): 185-195.
- [8] Iimura H, Palo S E, Wu Q, et al. TIMED Doppler interferometer observations of mesosphere and lower thermosphere tides[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 114(D11): D11102.
- [9] Shepherd G G, Thuillier G, Cho Y M, et al. The Wind Imaging Interferometer (WINDII) on the upper atmosphere research satellite: a 20 year perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(2): RG2007.
- [10] Killeen T L, Wu Q, Solomon S C, et al. TIMED Doppler Interferometer: overview and recent results[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, 111(A10): A10S01.
- [11] Englert C R, Harlander J M, Babcock D D, et al. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): an innovative concept for measuring winds in planetary atmospheres[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6303: 63030T.
- [12] Englert C R, Babcock D D, Harlander J M. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): concept and experimental demonstration[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(29): 7297-7307.
- [13] Immel T J, England S L, Mende S B, et al. The ionospheric connection explorer mission: mission goals and design[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 214(1): 13.
- [14] Harlander J M, Englert C R, Brown C M, et al. Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): monolithic interferometer design and test[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212(1/2): 601-613.
- [15] Englert C R, Harlander J M, Emmert J T, et al. Initial ground-based thermospheric wind measurements using Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH)[J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27416-27430.
- [16] Englert C R, Harlander J M, Brown C M, et al. Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): instrument design and calibration[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212(1/2): 553-584.
- [17] Wei D K, Zhu Y J, Liu J L, et al. Thermally stable monolithic Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer: optical design and laboratory performance [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 19887-19900.
- [18] 何微微, 武魁军, 冯玉涛, 等. O_3 辐射源 Michelson 测风成像干涉仪临边观测正演仿真[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0512005.
He W W, Wu K J, Feng Y T, et al. Forward simulation of limb-viewing Michelson wind imaging interferometer

- based on O_3 radiation source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0512005.
- [19] 丁毅, 罗海燕, 施海亮, 等. 一种新型的空间外差光谱仪平场校正方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1930002.
Ding Y, Luo H Y, Shi H L, et al. New flat-field correction method for spatial heterodyne spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1930002.
- [20] Zhang Y F, Feng Y T, Fu D, et al. Dependence of interferogram phase on incident wavenumber and phase stability of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(10): 104204.