

测风非对称空间外差干涉仪绝对相位漂移分析及校正

沈 静^{1,2,3}, 熊 伟^{1,2,3}, 施海亮^{1,3}, 罗海燕^{1,3}, 李志伟^{1,3},
胡广骁^{1,2,3}, 方雪静^{1,2,3}, 徐 标^{1,2,3}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 多普勒非对称空间外差干涉仪可用来探测氧气大气带气辉谱线的多普勒频移,进而反演中高层大气的风速。由风速变化引起的干涉条纹相位频移十分微小,而由系统误差导致的绝对相位漂移会严重影响风速反演精度。双臂式干涉仪与单臂式不同,除受扩视场棱镜和光栅影响之外,用于产生光程差的空气隔片的热膨胀也会影响干涉图的绝对相位。通过实测和仿真计算不同温度下的绝对相位漂移,分析了绝对相位漂移的原因。在此基础上,提出了一种绝对相位漂移校正方法,通过求零风速和某一给定风速下两条线性相位拟合曲线之间的距离,校正温度引起的绝对相位漂移,从而准确反演风速。结果表明,仿真分析与实测的绝对相位漂移具有较好的一致性。校正绝对相位漂移后反演的风速误差为 3.5 m/s,与校正前相比风速反演误差得到了极大的改善。

关键词 光谱学; 非对称空间外差干涉仪; 风场探测; 干涉图; 绝对相位漂移; 校正

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0430003

Absolute Phase Drift Analysis and Correction of Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer for Wind Detection

Shen Jing^{1,2,3}, Xiong Wei^{1,2,3}, Shi Hailiang^{1,3}, Luo Haiyan^{1,3}, Li Zhiwei^{1,3},
Hu Guangxiao^{1,2,3}, Fang Xuejing^{1,2,3}, Xu Biao^{1,2,3}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract A Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer can be used to detect Doppler frequency shift of airglow spectrum lines of the O₂ band, and thus the wind speed in the high-level atmosphere can be retrieved. The absolute phase frequency shift of interference fringes caused by wind speed is small, and the absolute phase drift caused by system error has significant influence on the wind retrieval precision. Different with the single arm interferometer, the dual-arm interferometer has the absolute phase of its interferograms affected not only by the field-widened prisms and gratings, but also by the thermal expansion of spacers used to produce optical path difference. Therefore, the absolute phase drifts at different temperatures are measured experimentally and simulated numerically, and the reason of absolute phase drift is analyzed. Based on this, a absolute phase drift correction method is proposed. The distance between two linear phase fitting curves under the conditions of zero wind speed and a given wind speed is calculated, the temperature dependent absolute phase drift is corrected, and the wind speed is retrieved accurately. Results show that the measured phase drift fits well with the simulated phase drift. After the absolute phase drift correction, the retrieved wind speed error is 3.5 m/s, which is greatly improved

收稿日期: 2016-11-08; **收到修改稿日期:** 2016-12-29

基金项目: 中科院创新基金(CXJJ-14-S91), xx-5 卫星数据模拟技术项目(50-Y20A38-0509-15/16)

作者简介: 沈 静(1988—),女,博士研究生,主要从事中高层大气风场探测技术方面的研究。E-mail: xingyang_jing@163.com

导师简介: 熊 伟(1976—),男,博士,研究员,主要从事高光谱遥感技术方面的研究。E-mail: frank@aiofm.ac.cn

(通信联系人)

compared with the result before absolute phase drift correction.

Key words spectroscopy; asymmetric spatial heterodyne interferometer; wind detection; interferogram; absolute phase drift; correction

OCIS codes 300.6300; 300.6320; 300.2140; 280.4991

1 引 言

中高层大气对全球气候与环境、大气物理、航天和军事等研究意义深远,受到人们越来越多的关注^[1],研究大气风场有助于获取大气行为。被动探测中高层大气风场的理论研究始于19世纪60年代,目前国际上主要采用法布里-珀罗干涉仪和迈克耳孙干涉仪实现地基和星载的中高层风场探测。具有代表性的是基于迈克耳孙干涉仪的WIND成像干涉仪(WINDII)^[1]和基于法布里-珀罗干涉仪的高分辨率多普勒成像仪(HRDI)^[2]、TIMED多普勒干涉仪(TIDI)^[3]。WINDII和HRDI搭载于同一个卫星上^[4],具有5 m/s的风速测量精度;TIDI具有3 m/s的风速测量精度^[3]。法布里-珀罗干涉仪具有高灵敏性,但是对标准具的平整度要求极高,且干涉仪的光通量很小^[4-5]。迈克耳孙干涉仪应用在风场探测中,通过不同光程差的4个点的绝对相位来获取风速信息^[1],具有光通量大的特点,但是动镜的机械步进装置增加了设计难度。

2006年由Englert等^[6]提出的多普勒非对称空间外差(DASH)光谱技术,该技术结合了空间干涉与光栅衍射,不仅继承了传统迈克耳孙干涉仪的优点,避免了运动部件和窄带滤波,而且能够同时测量多个谱线,具有较强的环境适应性。世界上第一台测氧红线DASH干涉仪(REDDI)^[7]于2009年研制成功,应用于地基风场探测。在此之后基于星载探测计划的干涉仪设计方案(MIGHTI)也被提出,目前正处于研制阶段^[8]。国内对于DASH光谱技术的研究刚刚起步,费小云等^[9]仿真设计了单臂式干涉仪模型。

国内外的研究集中于单臂式DASH干涉仪的设计,而双臂式干涉仪对于多目标探测具有更好的适应性^[10]。无论哪种形式的干涉仪,干涉仪元件的热灵敏性^[11]都会使探测仪器产生绝对相位漂移误差,极大地影响频移信号的获取和风速的反演。尤其是对于双臂式干涉仪,不仅要考虑扩视场棱镜、光栅等光学元件的热效应,还需要考虑干涉仪一臂由于光程差偏置引起的热效应,因此有必要对双臂式干涉仪在热效应下的相位漂移进行深入分析。

采用校准谱线实时跟踪的方式去除绝对相位漂移时,只有当校准灯的波长接近目标线波长时才能得到良好的校正效果^[7,10]。对于氧正离子和羟基等气辉发射线,很难找到合适的校准源进行有效的系统相位漂移校正,导致探测精度降低。本文在分析相位漂移的基础上,提出了一种通过目标线相位进行自校正的方法来去除绝对相位漂移误差,从而进一步进行风速反演。

首先设计了用于测量氧大气带气辉谱线的双臂式非对称空间外差干涉仪,以此为基础搭建了实验室风速模拟测量系统,通过采样干涉图得到绝对相位漂移与温度变化的关系。从理论上分析了绝对相位漂移的主要来源,并与实验值进行对比。针对绝对相位线性漂移的特点,通过线性拟合的方式对包含多普勒频移信号的相位序列进行校正,从而在无校准线跟踪的情况下反演风速。

2 多普勒非对称空间外差干涉原理

非对称空间外差干涉仪与对称空间外差干涉仪的不同之处在于一臂多了偏置量 Δd ^[12],如图1所示^[7],图中 2γ 为两个波面的夹角。光束经过分束器分成两束光,两束光分别到达两臂的光栅发生衍射后返回分束器,再发生双光束干涉,形成Fizeau干涉条纹。干涉条纹的亮度可以表示为^[12]

$$I(x) = \sum_j S_j [1 + E_j(x) \cos(2\pi\kappa_j x + \varphi_j + \delta\varphi_j)], \quad (1)$$

式中 j 为通带内的不同目标线的序号, x 为探测器阵列光谱维方向的变量, S_j 为谱线的辐亮度函数(与谱线的亮度成正比), $E_j(x)$ 为与谱线线型有关的包络函数, $\kappa_j = 4(\sigma_j - \sigma_L) \tan \theta_L$ 为波数 σ_j 对应的空间外差频率, σ_L 为系统基频, θ_L 为光栅Littrow角, $\varphi_j = 4\pi(\sigma_j - \sigma_L) \Delta d$ 为偏置产生的相位常量。对于波数为 σ_0 的某一特定目标,经过干涉仪后干涉图绝对相位表示为

$$\varphi_{\text{Total}} = \arctan \left\{ \frac{\mathcal{F}^{-1}[T(\sigma)] \otimes \left[\frac{1}{2} E_0(x) \sin(2\pi\kappa_0 x + \varphi_0 + \delta\varphi_0) \right]}{\mathcal{F}^{-1}[T(\sigma)] \otimes \left[\frac{1}{2} E_0(x) \cos(2\pi\kappa_0 x + \varphi_0 + \delta\varphi_0) \right]} \right\}, \quad (2)$$

式中 \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换, \otimes 表示卷积运算, $T(\sigma)$ 为窗函数。将干涉相位 φ_{Total} 减去零风速下的基准相位, 可以得到风速引起的相位频移 $\delta\varphi_0$ 。根据风速与相位频移的关系

$$\delta\varphi_0 = 2\pi L_{\text{opt}} \sigma_0 \frac{v}{c}, \quad (3)$$

在最优光程差 L_{opt} 处计算得到风速的大小, (3) 式中 $L_{\text{opt}} = 2\Delta d$, c 为光速。

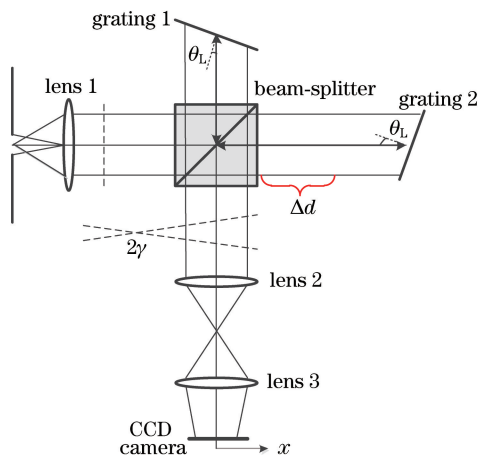


图 1 DASH 干涉仪原理图^[7]

Fig. 1 Schematic of DASH interferometer^[7]

3 实验测量

为了研究干涉图的绝对相位漂移, 需要对整个系统进行热实验。已有研究采用热循环实验^[10] 和热盘实验^[11] 得到基于 DASH 技术的大范围的温度变化与绝对相位漂移之间的关系。虽然绝对相位的热灵敏度非常高这一特征已得到证明, 但是现有研究并没有将温度变化和绝对相位漂移校正结合在一起考虑来达到高精度风速的反演。通过热实验分析温度变化与绝对相位漂移之间的关系, 进而解决风速测量中绝对相位漂移的问题。

建立如图 2 所示的实验系统进行干涉图采样。空心阴极灯光源发出的光经透镜准直后形成平行光束, 再经过分束器到达以一定转速旋转的反光盘, 光源的波长发生频移, 然后逆反射回分束器并由镜头将光束聚焦。带有频移信息的光束进入准直镜头后变成平行光, 在干涉仪中发生干涉, 形成 Fizeau 条纹^[12]。干涉条纹被成像镜头按照一定缩放比进行缩放, 最终成像于 CCD 探测器上^[13]。

DASH 干涉仪是实验系统的核心部件, 结构如图 3 所示。气辉谱线发出后进入干涉仪, 经过分束器后得到两束光, 分别经过两臂的空气隔片 1 和扩视场棱镜后以一定的角度出射。在干涉仪长臂的光束经过较

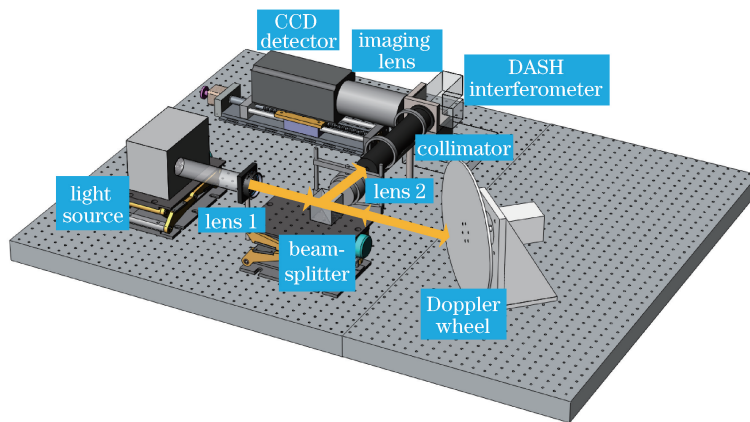


图 2 风速测量系统原理图

Fig. 2 Schematic of wind measurement system

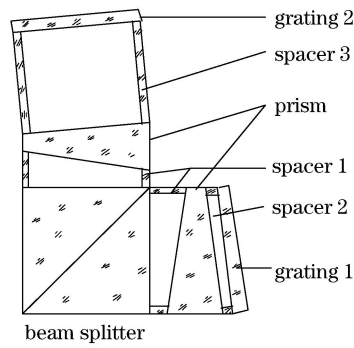


图 3 DASH 干涉仪结构示意图

Fig. 3 Schematic of DASH interferometer

表 1 DASH 干涉仪设计参数

Table 1 Design parameters of DASH interferometer

Element	Parameter	Value
Beam-splitter	Size /mm×mm	50×50
Spacer 1	Thickness /mm	10
	Bottom angle /($^{\circ}$)	77.5379
Prism (silica)	Refractive index	1.4539862
	Thickness /mm	11
	Bottom angle α_1 /($^{\circ}$)	77.5379
	Bottom angle α_2 /($^{\circ}$)	85.3692
	Apex angle /($^{\circ}$)	17.0929
Spacer 2	Thickness /mm	7
Spacer 3	Thickness /mm	62
Grating	Groove density /($\text{g}\cdot\text{mm}^{-1}$)	600
	Littrow angle /($^{\circ}$)	13.1264
Scaling	Amplification ratio	0.621

长的空气隔片 3 到达光栅发生衍射并返回,而在干涉仪短臂的光束经过空气隔片 2 到达光栅发生衍射并返回,两束光在分束面相遇并发生干涉,形成干涉条纹。DASH 干涉仪的设计参数如表 1 所示。

实验过程中采用钾元素空心阴极灯,该空心阴极灯存在两条单发射线,波长分别为 766.49 nm 和 769.90 nm,经过干涉仪后形成了双频率的干涉条纹。由于 769.90 nm 的发射线恰好处于滤光片的截止区范围内,透过率不到 50%,干涉条纹信噪比较低,因此下文针对 766.49 nm 进行相位分析。

DASH 干涉仪系统的绝对相位漂移主要来源于环境温度的变化。地基观测仪 REDDI 采用比例积分微分(PID)控制回路使干涉仪盖板温度保持 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的精度^[5],尽管如此,绝对相位漂移仍然很大。为解决这一问题,使用高精度水银温度计(精度为 0.01 $^{\circ}\text{C}$)测量干涉仪表面盖板的温度。当盖板温度稳定时,采集 30 幅干涉图样,通过相位平均得到该温度下最优光程差点的相位。干涉仪系统采样时,钾元素空心阴极灯的电流设置为 10 mA,探测器的制冷温度为 -40°C ,采集单幅干涉图样的积分时间为 0.5 s。干涉仪表面盖板的温度在 1 h 内从 21.95 $^{\circ}\text{C}$ 变化至 22.85 $^{\circ}\text{C}$ 时,得到绝对相位漂移与干涉仪盖板温度变化的关系曲线,如图 4 所示。

图 4 中黑色曲线是最优光程差 L_{opt} 处测量得到的绝对相位漂移与干涉仪盖板温度的关系;红色曲线是相位拟合曲线。需要注意的是,纵轴表示的绝对相位漂移是将每个温度处的绝对相位减去最高温度(22.85 $^{\circ}\text{C}$)处的绝对相位得到的。从图中黑色曲线可以看出,随着盖板温度的稳定升高,绝对相位漂移逐渐下降,并呈线性变化。通过对实测相位序列的线性拟合(红色曲线),得到最优光程差点的绝对相位漂移为 2.6102 rad。推算可得表面盖板的温度每变化 1 $^{\circ}\text{C}$,干涉仪内部热梯度变化产生的绝对相位漂移为 2.9002 rad。干涉仪光学元件对温度的变化非常敏感,通过理论计算和分析进一步讨论绝对相位漂移。

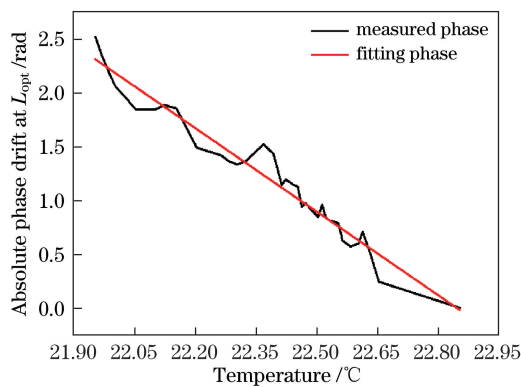


图 4 最优光程差 L_{opt} 处绝对相位漂移与干涉仪盖板温度的关系

Fig. 4 Relationship between absolute phase drift at optimal optical path difference L_{opt} and temperature of interferometer enclosure

4 绝对相位漂移分析

温度变化引起干涉仪各光学元件参数的改变,包括扩视场棱镜折射率变化引起的光线出射角度的变化、光栅热膨胀引起的刻线密度的变化,以及隔片热膨胀引起的最优光程差的变化。根据(2)式,前两个因素均影响基频,从而导致相位产生漂移;第三个因素则直接改变偏置量,从而导致相位产生漂移。

4.1 棱镜折射率变化

对于折射率为 n 的扩视场棱镜,在衍射截面上,满足扩视场条件的棱镜顶角和棱镜入射角、出射角的关系为^[8]

$$\begin{cases} n \sin(\alpha/2) = \sin \gamma \\ \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha/2 \\ \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma \end{cases}, \quad (4)$$

式中 α 为扩视场棱镜的顶角, γ_1 为轴上光束的入射角, γ_2 为轴上光束的出射角,如图 5 所示。

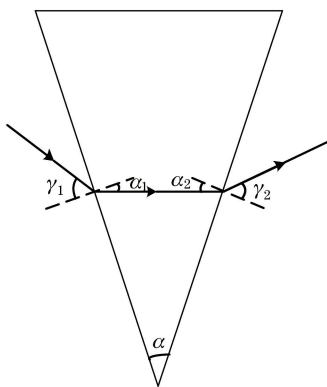


图 5 扩视场棱镜光线角度定义

Fig. 5 Definition of beam angles in field widened prism

扩视场棱镜采用融石英,折射率随温度变化的系数 $dn/dT = 8.62 \times 10^{-6}$ 。考虑最简单的轴上光束情况,当轴上光束的入射角 γ_1 保持不变时,温度改变会使棱镜的出射角 γ_2 发生变化,相当于光栅的 Littrow 角 θ_L 发生改变,由光栅衍射公式可知

$$2\sigma_L \sin \theta_L = 1/d, \quad (5)$$

式中 d 为光栅刻线周期。结合(4)式得到轴上光束经过棱镜后出射角度的变化 $\delta\gamma_2 = 1.50 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

系统 Littrow 波数变化与棱镜温度变化的关系如图 6(a)所示,最优光程差 L_{opt} 处绝对相位漂移与棱镜温度变化的关系如图 6(b)所示。系统 Littrow 波数的变化是将每个温度变化下的 Littrow 波数减去无温度变化下的 Littrow 波数得到,系统最优光程差 L_{opt} 处的绝对相位漂移是将每个温度变化下干涉图的绝对

相位减去无温度变化下的干涉图的绝对相位得到。从图 6 可以看出,随着温度的增加,基频波数和绝对相位逐渐减小,并且随着温度变化的增加呈线性变化。当干涉仪的扩视场棱镜变化单位温度时,基频波数漂移不足一个波数分辨率,因此很难从干涉图和光谱上分辨出来。但是折射率变化引起的绝对相位漂移不可忽视,这是因为对于干涉仪而言,风速变化 100 m/s 导致的绝对相位漂移为 0.34 rad,而温度变化引起的绝对相位漂移已经达到 10.3378 rad/°C,远大于实际探测信号。

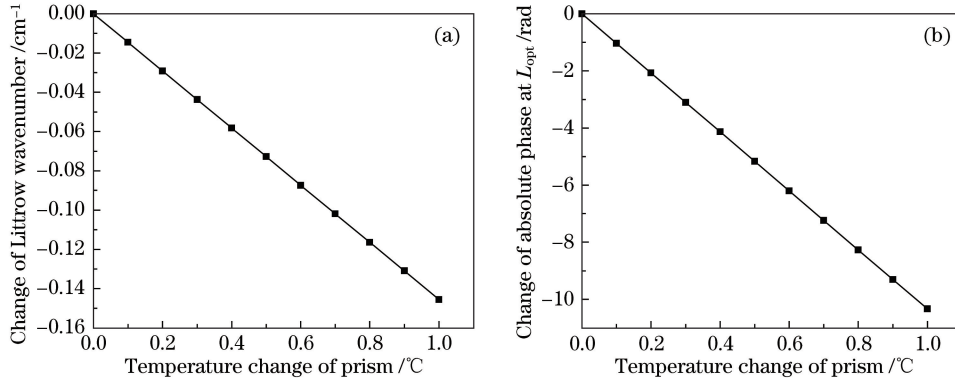


图 6 (a) Littrow 波数变化与棱镜温度变化的关系;(b) 最优光程差 L_{opt} 处绝对相位漂移与棱镜温度变化的关系

Fig. 6 (a) Relationship between change of Littrow wavenumber and temperature change of prism;

(b) relationship between absolute phase drift at optimal optical path difference L_{opt} and temperature change of prism

4.2 光栅热膨胀

对于光栅,基底材料沿着光栅衍射方向的热膨胀会引起表面刻线数的变化。玻璃材料热膨胀系数可定义为

$$\alpha_{CTE} = \frac{dL}{L} \cdot \frac{1}{dT}, \quad (6)$$

式中 L 为光栅沿衍射方向的总长度, T 为温度, dT 为温度变化量, dL 为光栅长度变化量。光栅的基底材料为融石英,刻线密度 $1/d$ 为 6000 line/cm,衍射方向的长度 $L_G = 3.2$ cm,热膨胀系数 $\alpha_{CTE} = 5.5 \times 10^{-7}$ 。根据上述条件计算出温度变化引起的光栅长度变化量 $dL_G = 1.76 \times 10^{-6}$ cm/°C,因此温度每变化 1 °C 得到实际光栅刻线密度 $1/d$ 为 5999.9967 line/cm。

由光栅衍射方程[(5)式]和干涉图绝对相位[(2)式]计算可得温度每变化 1 °C 时的 Littrow 波数变化和最优光程差 L_{opt} 处的绝对相位漂移,如图 7 所示。可以看出,光栅热膨胀引起的最优光程差 L_{opt} 处的绝对相位漂移为 0.5127 rad/°C,小于棱镜热折变引起的绝对相位漂移(10.3378 rad/°C)。光栅热膨胀导致 Littrow 波数变化和最优光程差 L_{opt} 处绝对相位漂移随着温度的升高而减小,与扩视场棱镜热折变引起的绝对相位漂移方向一致。然而,相比于 1 m/s 风速对应的相位频移(0.0034 rad),光栅热膨胀引起的绝对相位漂移仍然很大,如果不予以校正,在实际探测过程中将产生高达 150.8 m/s 的风速误差。

4.3 光程差变化

由图 3 可知,增加扩视场棱镜与光栅之间空气隔片 3 的厚度可得到系统最优光程差。最优光程差 L_{opt} 与隔片厚度 T_s 的关系为

$$L_{opt} = \frac{2T_s}{\sin \beta}, \quad (7)$$

式中 β 为轴上光线与光栅之间的夹角。已知隔片 3 的厚度 T_s 为 6 cm,隔片材料为融石英,则由(6)、(7)式可知,热膨胀引起的光程差增加量 $dL_{opt} = 6.76 \times 10^{-6}$ cm/°C,最优光程差 L_{opt} 处的绝对相位漂移如图 8 所示。

由于空气隔片的热膨胀,干涉图的绝对相位漂移随着温度的升高而增大,这与扩视场棱镜和光栅热膨胀产生的绝对相位漂移方向相反。综合考虑 3 种干涉仪组件的热效应,发现棱镜折射率随温度的变化是引起干涉图绝对相位漂移的最主要原因,次要因素是光栅基底热膨胀引起的刻线密度变化,而对绝对相位漂移贡献最小的是空气隔片热膨胀引起的最优光程差变化,可以忽略不计。仿真分析表明,光学元件的热效应导致

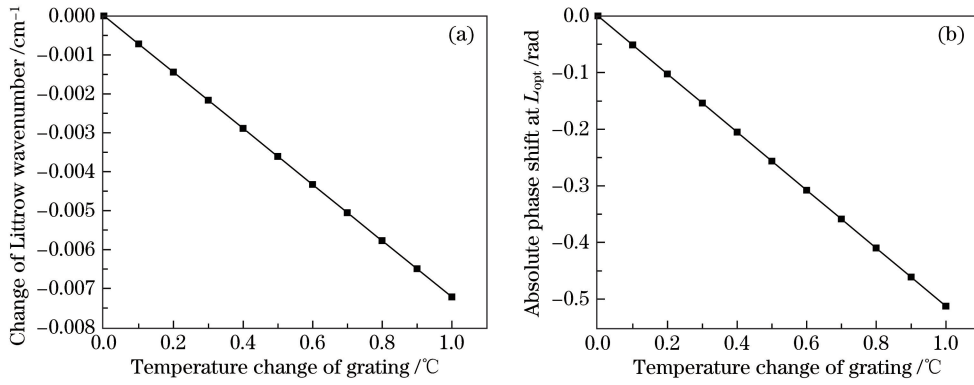


图 7 (a) 光栅温度变化与 Littrow 波数变化的关系;(b) 光栅温度变化与最优光程差 L_{opt} 处绝对相位漂移的关系

Fig. 7 (a) Relationship between temperature change of grating and change of Littrow wavenumber;

(b) relationship between temperature change of grating and absolute phase drift at optimal optical path difference L_{opt}

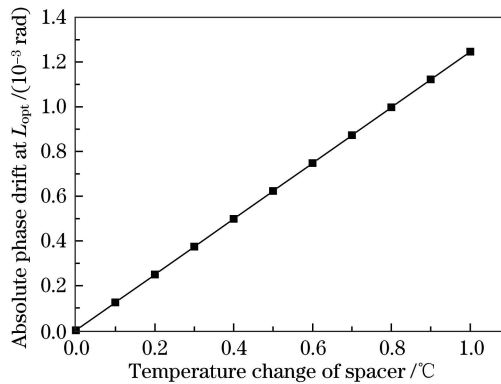


图 8 隔片温度变化与最优光程差 L_{opt} 处绝对相位漂移的关系

Fig. 8 Relationship between temperature change of spacer and change of absolute phase drift at optimal optical path difference L_{opt}

绝对相位随着温度的变化产生线性漂移。

对于已经胶合完成的一体化干涉仪,由于不可直接测量干涉仪内部光学元件的温度变化,而是测量了干涉仪表面盖板的温度,因此实测结果是干涉仪盖板温度变化与干涉图绝对相位漂移的关系,如图 4 所示。仿真结果是光学元件温度变化与干涉图绝对相位漂移的关系。虽然两者的计算结果存在差异,但是干涉图绝对相位的变化规律具有良好的一致性,即干涉图绝对相位漂移随温度的升高呈线性变化,这一特点可为下一步误差的校正提供参考。

5 相位漂移校正方法

考虑到干涉图帧相位序列的线性漂移规律(图 4),在进行风速模拟探测时,可以利用这一特征校正绝对相位漂移。实验室中通过风速模拟器装置使光源的波长发生一定的频移,其原理是在转盘上贴逆反射膜,使光束到达反射盘之后能够沿原路返回。当转盘以一定的转速 k 旋转时,反射光束产生的频移速度为

$$v' = 4\pi kr \cos \xi, \quad (8)$$

式中 r 为光束中心到转盘圆心的距离, ξ 为光轴与转盘之间的夹角。光源波数发生的频移为

$$\delta\sigma = \sigma_0 \cdot \frac{v'}{c}, \quad (9)$$

式中 σ_0 为光源的波数。

风速模拟探测实验于 2016 年 8 月 6 日晚上进行,室内温度为 25 °C,室外温度为 29 °C。实验前,将空心阴极灯的电流设置为 10 mA,探测器采样单帧干涉图的积分时间设置为 0.5 s。连续采样 120 帧干涉图,其

中前50 帧干涉图采样时保持风速模拟器的反射盘静止,当开始采样第 51 帧干涉图时,使反射盘以一定转速(3600 r/min)转动,以获得 60.37 m/s 的模拟风速,进而使干涉图产生相位频移。图 9 是采样帧数与最优光程差 L_{opt} 处绝对相位的关系曲线。图中黑色点线是最优光程差 L_{opt} 处的干涉图绝对相位实际测量值;红线是 1~50 帧干涉图的绝对相位拟合曲线;蓝线是 51~120 帧干涉图的绝对相位拟合曲线。

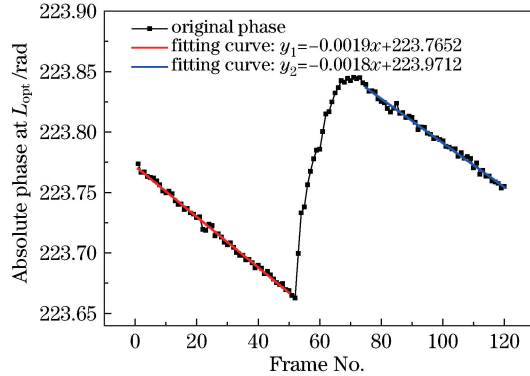


图 9 采样帧数与最优光程差 L_{opt} 处绝对相位的关系曲线

Fig. 9 Relationship between sampling frame No. and absolute phase at optimal optical path difference L_{opt}

从前 50 帧到后 50 帧,相位序列发生明显的跳变,这是由于模拟风速由零风速变成了 60.37 m/s,第 51~70 帧反映了模拟风速未达到稳定值时的调节过程。通过观察发现,在零风速(1~50 帧)和 60.37 m/s 风速(71~120 帧)条件下,绝对相位均产生漂移,根据前文的分析,该漂移源于干涉仪系统的温度变化。由于采样在短时间内完成,因此绝对相位保持较好的线性。分别对两组相位序列进行线性拟合,可以得到图 9 中红线和蓝线的拟合结果。零风速下和 60.37 m/s 风速下的绝对相位拟合曲线分别为

$$\begin{cases} y_1 = -0.0019x + 223.7652 \\ y_2 = -0.0018x + 223.9712 \end{cases} \quad (10)$$

由于风速模拟器高速转动对整个系统产生环境扰动,前后两段相位拟合曲线的斜率有 0.0001 的差异,因此不直接计算两条拟合曲线之间的距离,而是以零风速下的相位拟合曲线 y_1 (红线)为基准,将计算得到的 60.37 m/s 风速下拟合曲线 y_2 (蓝线)的中值到直线 y_1 的距离作为实际有效相位频移。

由拟合曲线方程计算出相位频移 $\delta\varphi = 0.2146$ rad。根据相位与风速的关系^[7],得到实际风速反演结果为 63.88 m/s。在未校正时,通过对多幅干涉图的绝对相位求平均的方法得到零风速和 60.37 m/s 风速下的绝对相位,作差得到相位频移(表 2),将这一结果与校正后的相位频移和风速误差值(表 2)进行对比。

表 2 校正前后的相位频移和风速反演值

Table 2 Phase frequency shift and retrieved wind speed before and after correction

Condition	Phase frequency shift /rad	Wind speed /(m/s)	Wind speed error /(m/s)
Before correction	0.1006	29.59	30.78
After correction	0.2146	63.88	3.51

干涉仪相位漂移反映在相位曲线的斜率上,通过未校正的相位频移计算得到的风速误差达到 30.78 m/s,校正后绝对相位漂移误差得以消除,得到的风速误差为 3.51 m/s。这说明连续采样干涉图并计算相位序列能够有效追踪系统的绝对相位漂移,从而通过拟合曲线的方式进行校正,不需要根据温度探测系统所反馈的温度信息自动修正相关参数。这种方法通过目标谱线自身的变化跟踪漂移,使星载探测中系统漂移的自校正成为可能。

6 结 论

设计了双臂式 DASH 干涉仪,搭建实验平台,连续采样零风速下的干涉图,得出最优光程差处的绝对相位漂移与干涉仪盖板温度变化的关系,指出干涉图绝对相位随温度的升高呈线性漂移。根据这一现象,从理论上分析由干涉仪关键光学元件的温度敏感性引起的 Littrow 波数和绝对相位漂移。仿真分析表明,光学

元件的热效应导致干涉绝对相位随温度的增加呈线性漂移,这与实际测量数据的变化规律是一致的。研究发现由扩视场棱镜的折射率变化是引起绝对相位漂移的最主要因素,由光栅刻线密度变化产生的绝对相位漂移相对较小,由最优光程差变化产生的绝对相位漂移最小。

使用风速模拟器模拟了 60.37 m/s 的风速变化,并采样干涉图。根据绝对相位漂移特点,分别线性拟合了零风速和 60.37 m/s 风速下的绝对相位序列,并通过求两条拟合直线之间距离的方法消除绝对相位漂移。结果表明,未进行线性校正时,该模拟风速下产生的误差为 30.78 m/s,而线性校正后的误差为 3.51 m/s,极大地提高了风速反演精度,为后续的应用研究提供了良好的基础。

参 考 文 献

- [1] Shepherd G G, Thuillier G, Gault W A, *et al.* WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite[J]. *J Geophys Res*, 1993, 98(D6): 10725-10750.
- [2] Hays P B, Abreu V J, Dobbs M E, *et al.* The high-resolution Doppler imager on the upper atmosphere research satellite[J]. *J Geophys Res*, 1993, 98(D6): 10713-10723.
- [3] Killeen T L, Skinner W R, Johnson R M, *et al.* TIMED Doppler interferometer (TIDI)[C]. *SPIE*, 1999, 3756: 289-303.
- [4] Mclandress C, Shepherd G G, Solheim B H, *et al.* Combined mesosphere/thermosphere winds using WINDII and HRDI data from the upper atmosphere research satellite[J]. *J Geophys Res*, 1996, 1011(D6): 10441-10454.
- [5] Wang Yingjian, Wang Yongmei, Wang Houmao. Simulation of ground-based Fabry-Perot interferometer for the measurement of upper atmospheric winds[J]. *Chinese J Geophysics*, 2014, 57(6): 1732-1739.
王英鉴, 王咏梅, 王后茂. 高层大气测风用地基 F-P 干涉仪的数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(6): 1732-1739.
- [6] 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[C]. *SPIE*, 2006, 6303: 63030T.
- [7] 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.
- [8] Englert C R, Harlander J M, Brown M, *et al.* MIGHTI: The spatial heterodyne instrument for thermospheric wind measurements on board the ICON mission[C]. *Conference on Fourier Transform Spectroscopy and Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment*, 2015: FM4A.1.
- [9] Fei Xiaoyun, Feng Yutao, Bai Qinglan, *et al.* Optical system design of a co-path Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer with two fields of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0422003.
费小云, 冯玉涛, 白清兰, 等. 双视场准共路多普勒外差干涉仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0422003.
- [10] Harlander J M, Englert C R, Babcock D D, *et al.* Design and laboratory tests of a Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne (DASH) interferometer for upper atmospheric wind and temperature observations [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26430-26440.
- [11] Marr K D, Englert C R, Harlander J M, *et al.* Measurement and modeling of the thermal behavior of a laboratory DASH interferometer[C]. *SPIE*, 2012, 8493: 849302.
- [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] Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.* Correction of detector response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0530001.
李志伟, 熊 伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差矫正[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0530001.