

低温镜面形变对非对称空间外差干涉仪影响及校正

龙泉豪 江伦 王慧月

Impact of cryogenic mirror deformation on asymmetric spatial heterodyne interferometers and its correction

LONG Quan-hao, JIANG Lun, WANG Hui-yue

引用本文:

龙泉豪, 江伦, 王慧月. 低温镜面形变对非对称空间外差干涉仪影响及校正[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.3724/CO.2026-0091

LONG Quan-hao, JIANG Lun, WANG Hui-yue. Impact of cryogenic mirror deformation on asymmetric spatial heterodyne interferometers and its correction[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.3724/CO.2026-0091

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026-0091>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多普勒外差干涉仪的光机热集成分析

Opto-mechanical-thermal integration analysis of Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1489 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0234>

星载多普勒非对称空间外差干涉测量中条纹图案的相位畸变校正

Phase distortion correction of fringe patterns in spaceborne Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometry

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 382 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0007>

557.7 nm波段地基探测风场的多普勒非对称空间外差干涉仪研制

Development of a doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer for ground-based wind field detection at the 557.7 nm wavelength

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1226 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2022-0018>

557.7 nm波段星载探测风场的多普勒非对称差分干涉仪杂散光分析与抑制

Analysis and suppression of stray light in Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer for spaceborne wind field detection at 557.7 nm band

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1066 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0060>

干涉星敏感器测角精度影响因素的研究

Influencing factors of angle measurement accuracy of an interferometer star tracker

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1433 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0232>

测试质量干涉仪抖动光程耦合噪声的多因素影响分析

Analysis of multi-factor influences of tilt-to-length coupling noise in a test mass interferometer

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 704 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0031>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-11

低温镜面形变对非对称空间外差干涉仪影响及校正

龙泉豪, 江 伦*, 王慧月

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130000;
长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130000)

摘要:针对星载长波红外多普勒非对称空间外差干涉仪在低温真空环境下热致面型形变引起的干涉条纹畸变及风速反演误差问题,开展了像差机理分析与相位补偿方法研究。首先,基于光机热集成分析,建立-113 °C 均匀稳态温度载荷下包含柔性胶层的光机有限元模型,并分析光学系统的面形变化,并采用 Zernike 多项式对面形误差进行拟合与建模,揭示热致面型形变主要引入球差和像散等低阶像差,然后分析上述像差通过引入附加光程差导致干涉条纹弯曲、对比度下降及空间分布不均匀,从而降低相位提取精度并引入风速反演误差。最后,提出基于 Zernike 多项式的相位域补偿方法,对干涉相位进行校正,抑制热致面型形变对系统性能的影响。仿真结果表明:该方法能够有效恢复干涉条纹的空间特性,风速反演误差降幅约为 62.5%,从而抑制热致面型形变对系统性能的影响。保证了系统在极端低温环境下的测风精度。

关键词:多普勒非对称空间外差干涉仪; 镜面形变; Zernike 多项式; 相位域补偿; 干涉条纹

中图分类号: O439 文献标志码: A doi: 10.3724/CO.2026-0091 CSTR: 32171.14.CO.2026-0091

Impact of cryogenic mirror deformation on asymmetric spatial heterodyne interferometers and its correction

LONG Quan-hao, JIANG Lun*, WANG Hui-yue

(Changchun University of Science and Technology College of Optical and Electronic
Engineering Changchun, Jilin 130000, China;

Changchun University of Science and Technology Institute of Space Optoelectronic
Technology Changchun, Jilin 130000, China)

* Corresponding author, E-mail: jlciomp@163.com

Abstract: To address the problem of interference fringe distortion and wind velocity retrieval errors caused by thermally induced surface deformation in a spaceborne long-wave infrared Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer operating in a low-temperature vacuum environment, a systematic study on aberration mechanisms and phase compensation methods was carried out. First, based on integrated opto-mechanical-thermal analysis, a surface deformation model of the optical system under the -113 °C operating condition was established. The surface errors were fitted and modeled using Zernike polynomials, revealing that thermally induced surface deformation primarily introduces low-order aberrations such as spherical aberration.

收稿日期: 2026-05-14; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: xxxx

Supported by

tion and astigmatism. Subsequently, the mechanism by which these aberrations generate additional optical path differences was analyzed. The results show that they lead to fringe bending, reduced contrast, and non-uniform spatial distribution, thereby degrading phase extraction accuracy and introducing wind velocity retrieval errors. Finally, a phase-domain compensation method based on Zernike polynomials was proposed to correct the interferometric phase and suppress the influence of thermally induced surface deformation on system performance. Simulation results demonstrate that the proposed method effectively restores the spatial characteristics of the interference fringes, reducing the wind velocity retrieval error by approximately 62.5%. This effectively mitigates the impact of thermal surface deformation and ensures wind measurement accuracy under extremely low-temperature conditions.

Key words: doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer; mirror surface deformation; Zernike polynomials; phase-domain compensation; interference fringes

1 引言

平流层风场是理解中高层大气动力学过程、能量与动量传输机制的关键参数,对于数值天气预报、气候变化研究及航天活动保障具有重要意义。相较于地基探测手段,星载遥感技术能够实现全球范围、连续性的风场廓线观测,已成为获取中高层大气风场信息的主要途径^[1-2]。

目前,星载风场探测主要采用法布里-珀罗(Fabry-Pérot)干涉仪、广角迈克耳孙干涉仪和多普勒非对称空间外差干涉仪(Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer, DASH)三种技术体制。其中,DASH干涉仪由美国海军实验室内于2006年首次提出,凭借其无运动部件、无需极窄带滤光片、可实现同步定标及高光通量等优势,近年来受到广泛关注。2018年,搭载于ICON卫星的MIGHTI仪器成功在轨运行,验证了DASH技术在中高层大气风场探测中的有效性^[3-4];2024年5月,我国“天雁22星”卫星搭载的小型化风场探测载荷是我国首套用于星载被动光学遥感测风的小型设备,包括载荷小型化设计、载荷高精度温控以及复杂大气风场反演算法等,使其可稳定在轨工作并提供高质量的风场数据^[5-7]。

长波红外波段(8–12.5 μm)是大气主要透过窗口之一,覆盖地物光谱特性的重要区域,基于长波红外的精细光谱探测技术在环境气候、资源探测及空间安全等领域具有重要研究价值。星载长波红外多普勒非对称空间外差干涉仪(LWIR DASH)以臭氧分子的热辐射光谱为探测信号源,可实现24–60 km高度范围内平流层风场与臭氧

浓度的高精度反演。然而,长波红外精细光谱探测属于强背景条件下的微弱信号探测,光学系统对光机内部热辐射极为敏感。为抑制系统自身热辐射噪声,LWIR DASH需置于低温真空环境(约 $-113\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、0 ATM)下工作^[8]。在该极端热环境下,光学元件因材料热膨胀系数差异产生热致形变,导致镜片面型精度劣化,进而引入系统像差并降低成像质量。对于多普勒差分干涉仪系统而言,温度引起的面型变化将导致波前畸变,产生附加光程差与相位误差,改变干涉条纹的空间分布特性,最终显著影响光谱反演精度并引入较大的风速反演误差^[9]。现有研究表明,热漂移误差是DASH干涉仪风速探测误差的重要组成部分,Englert等人提出了校准线同步检测方案以监测干涉仪基准相位热漂移,李娟等人发展了基于分段边缘拟合的成像热漂移监测方法,傅頔等人则对非对称量相位漂移、相位斜率漂移及干涉图相位漂移等热稳定影响因素进行了系统分析。然而,针对LWIR DASH在极端低温条件下面型热致畸变导致的干涉条纹退化问题,现有研究尚缺乏系统的光机热集成分析与像差校正方法^[10-11]。

针对上述问题,本文以星载LWIR DASH为研究对象,开展热致面型形变的像差效应分析及校正方法研究。通过构建光机热集成分析模型,揭示 $-113\text{ }^{\circ}\text{C}$ 极端热环境下面形变化引入的主要像差类型及其对干涉条纹的调制机理;进一步基于Zernike多项式建立像差相位模型,实现干涉条纹的校正处理,从而降低低温环境对风速反演精度的影响。本文研究旨在为星载干涉仪在极端热环境下的高精度风场探测提供理论依据与技术支撑。

2 DASH 干涉仪系统设计

2.1 干涉仪工作原理

空间外差干涉仪的光路结构如图 1 所示, 利特罗波数的轴上光线经分光棱镜分光后, 以利特罗角分别入射到两臂光栅上, 经光栅衍射后沿原路返回。工作波数的轴上光线经两臂光栅衍射后在定域面处相干叠加产生等厚干涉条纹, 经条纹成像系统后成像于探测器, 通过对探测器采集的干涉图进行傅里叶变换处理, 可反演获得入射光的光谱信息。由于该系统仅对利特罗波数附近的谱段具有响应, 因此空间外差干涉仪能够在目标谱线邻域实现高光谱分辨率探测^[12]。

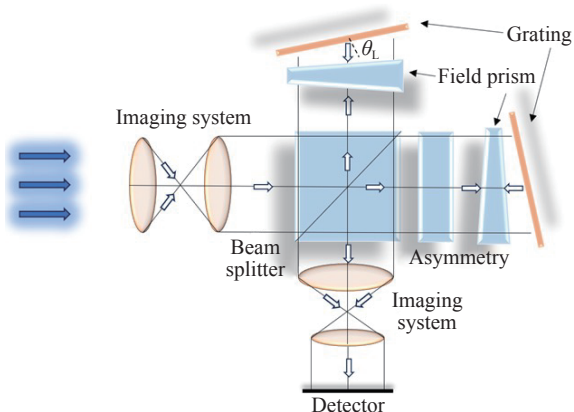


图 1 DASH 干涉仪原理

Fig. 1 Principle of the DASH Interferometer

目标辐射源发出的光线经大气传输后从前置光学系统进入干涉仪, 经干涉仪组件后在定域面处形成斐索型干涉条纹, 最终被条纹成像系统成像于探测器。

理论推导表明, 轴上光线在定域面处干涉条纹的条纹频率为^[13]。

$$f(x) = 4 \cdot (\sigma - \sigma_L) \tan \theta_L \quad (1)$$

其中, σ 为工作波数, σ_L 为利特罗波数, θ_L 为光栅利特罗角。轴上光线在定域面处的干涉图可表示为^[14]:

$$I(x) = \frac{I_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} B(\sigma) [1 + \cos 2\pi [4(\sigma - \sigma_L) \tan \theta_L \cdot x + 2\sigma \cdot \Delta d]] d\sigma \quad (2)$$

其中, I_0 为入射辐射强度, $B(\sigma)$ 为入射光谱, Δd 为干涉仪引入的两干涉臂的非对称量。定域面处干

涉图与入射光谱有傅里叶变换的关系, 因此可根据干涉图反演入射光谱信息。根据式 3 可知, 在光学系统的目标谱线波数 σ 和非对称量 Δd 确定时, 通过干涉图相位的变化量 $\delta\varphi$ 即可计算出被测大气风速^[15]。

$$\delta\varphi = 4\pi\sigma \cdot \Delta d \cdot \frac{v}{c} \quad (3)$$

2.2 干涉仪系统光学设计

星载长波红外多普勒非对称空间外差干涉仪 (LWIR DASH) 以臭氧分子的热辐射光谱为探测信号源, 用于实现平流层大气风场反演。在系统设计过程中, 首先需开展基于 LWIR DASH 的光学系统总体设计。以目标辐射源的光谱辐射特性为出发点, 结合轨道高度及星载临边观测几何模式, 以仪器辐射灵敏度作为主要评价指标, 对光学系统的总体参数进行优化设计^[16]。

在此基础上, 结合空间外差干涉仪的工作机理, 对关键结构与性能参数进行进一步优化, 包括利特罗波长、最优非对称量以及视场棱镜楔角等。通过上述综合设计与优化, 得到满足性能指标要求的多普勒差分干涉仪光学系统, 其结构如图 2 所示。同时, 在理想工作温度条件下获得的干涉条纹分布如图 3 所示。

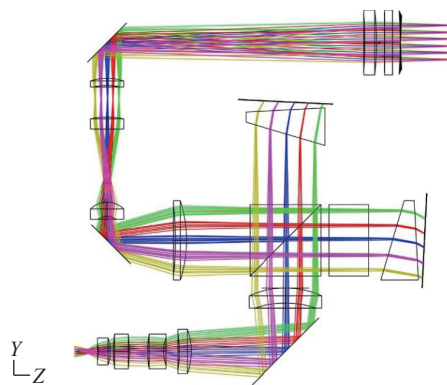


图 2 多普勒差分干涉仪

Fig. 2 Doppler Difference Interferometer

区别于工作在可见光、近红外及短波红外波段的多普勒差分干涉仪, 星载长波红外多普勒非对称空间外差干涉仪 (LWIR DASH) 采用制冷型红外探测器, 且整机处于低温真空环境 (约 $-113\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 0 ATM) 下工作。在该极端热环境条件下, 光学元件受热致形变影响显著, 镜片面型将发生不可忽略的变化, 从而引入系统像差并降低成像质量。对于多普勒差分干涉仪系统而言, 温度

引起的面型变化将进一步导致波前畸变,产生附加光程差与相位误差,进而改变干涉条纹的空间分布特性,最终显著影响光谱反演精度并引入较大的风速反演误差。

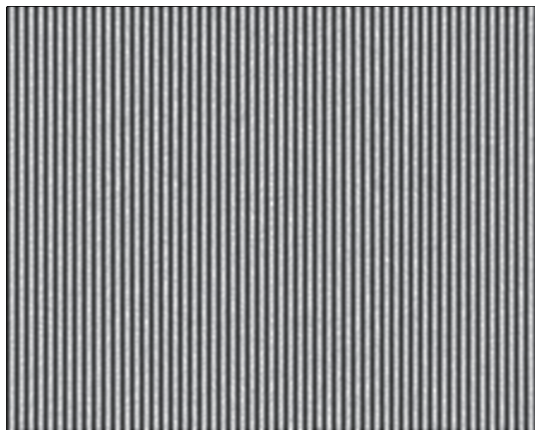


图3 理想情况下干涉条纹

Fig. 3 Interference fringes under ideal conditions

针对上述问题,本文从两方面开展研究:一方面,通过光机结构优化以抑制低温环境下的面型变化;另一方面,基于 Zernike 多项式对像差进行建模与拟合,并对干涉图进行像差校正处理,从而有效降低面型形变对系统性能及风速反演精度的影响。

2.3 光机结构设计

为减小低温环境下光学元件面形变化对干涉条纹的影响,实际装配过程中需结合光机结构的热分析结果,对结构参数进行优化设计,使光学元件在温度变化过程中尽可能实现自由膨胀,从而降低热致应力对光学表面面形精度的影响。

图4所示为系统的具体优化措施。为减小温度变化和装配应力对光学元件性能的影响,设计在透镜与支撑结构之间引入柔性缓冲材料,从而降低刚性约束的干扰。同时,对透镜压圈结构进行了优化,减小其与透镜光学面的接触面积,以进一步减少装配过程中产生的应力。镜筒材料采用钛合金,以减小温度变化引起的结构形变,提升系统整体热稳定性。

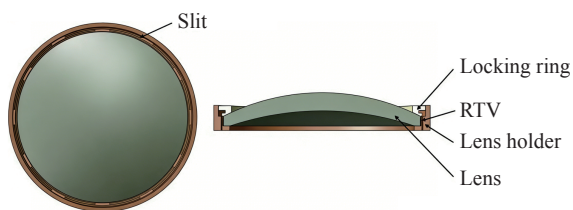


图4 透镜柔性支撑结构

Fig. 4 Flexible Support Structure for Lenses

光学系统整体结构由各镜片镜组、镜筒、压圈、隔圈及干涉模块组成。其中,超因瓦合金因具有较高刚度和较低热膨胀系数,可与光学镜片匹配良好,适合作为压圈及隔圈材料;钛合金则因其较低刚度和较大的热膨胀系数,更适用于镜座材料。系统结构设计模型如图5所示。

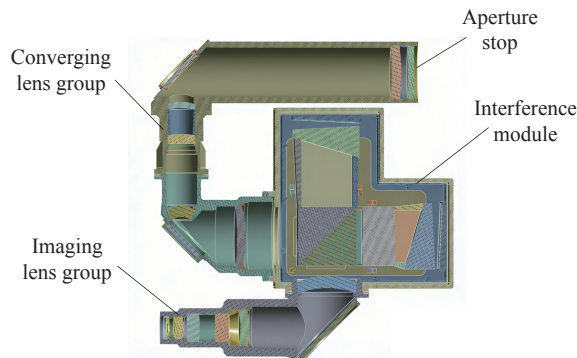


图5 系统结构设计

Fig. 5 System Structure Design

3 光机热集成分析

3.1 光机热集成分析原理

光机系统作为典型的跨学科综合系统,涉及光学、力学、热学等多个领域,尤其适合采用集成分析技术进行设计,以快速、有效地评估系统在不同工况下的性能。

光机热集成分析的一般流程如下:首先,在各自的设计软件中完成光学设计与结构设计;随后,利用有限元软件计算各热工况或力学工况下光学镜片表面节点的位移,并将获得的离散数据拟合为连续曲面;最后,将拟合后的曲面结果导入光学设计分析软件,以分析和评估光学系统在各工况下的性能指标^[17]。在光机热集成分析中,准确拟合镜片表面节点位移数据是关键环节。为定量描述和分析像差,当前常采用 Zernike 多项式进行表征。在极坐标系中,用 r 表示极轴, θ 表示极角,单位圆内定义的 Zernike 多项式和多项式的系数可以表示为:

$$Z_i = \begin{cases} \sqrt{2(n+1)}R_n^m(r)\cos(m\theta), & m \neq 0, i \text{ is even} \\ \sqrt{2(n+1)}R_n^m(r)\sin(m\theta), & m \neq 0, i \text{ is odd} \\ \sqrt{n+1}R_n^0(r), & m = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

$$a_i = \int W(r, \theta) Z_i(r, \theta) \varphi(r, \theta) dr d\theta, \quad (5)$$

$$W(r, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{\pi}, & |r| \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $W(r, \theta)$ 为加权函数, $R_n^m(r)$ 为径向多项式, 其定义为:

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left[\frac{n+m}{2} - s \right]! \left[\frac{n-m}{2} - s \right]!} r^{(n-2s)}, \quad (7)$$

式中, n 是径向级次, m 是方位角频率, 两者都是正整数, 且满足 $m < n$, $n-m$ 为偶数; 当径向级次 n 给定, 具有较低方位角频率 m 的模式排在前; 当两个多项式具有相同的 m 、 n , 奇数对应的是正弦模式, 偶数对应的是余弦模式^[18]。

3.2 光机热集成分析模型建立

有限元模型如图 6 所示。模型采用四面体与六面体实体网格, 其中干涉模块壳体采用四面体网格, 镜框及光学镜片等采用六面体网格。光学镜片与支撑结构之间设置名义厚度为 0.30 mm 的 RTV566 硅橡胶胶层, 胶层与光学镜片及镜框之间均采用绑定约束, 以模拟胶层完全固化后的胶接状态。系统有限元模型共有 2824173 个节点和 1525371 个单元, 所用材料参数见表 1。

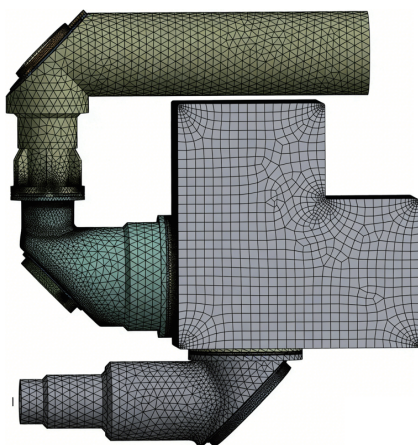


图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite Element Model

本文主要分析系统达到低温热平衡后的稳态热致变形。模型以装配环境温度 20 °C 作为无应力参考温度, 并对全部结构及胶层施加 -113 °C 的均匀稳态温度载荷, 即假设各零部件在工作状态下具有相同温度, 未考虑降温过程中的瞬态温度变化和空间温度梯度。

RTV566 胶层的热收缩通过其线膨胀系数和温度变化进行等效计算, 因此模型考虑了胶层与

镜片、镜框之间热膨胀系数不匹配所产生的热变形。考虑到本文重点研究低温面形变化及其向干涉相位误差的传递规律, 未进一步考虑胶层在极低温下的结晶效应、材料非线性以及弹性模量随温度和低温保持时间的变化。

表 1 有限元模型材料参数

Tab.1 Material Parameters of the Finite Element Model

Materials,	Density/ (g·cm ⁻³)	Elastic Modulus/ (Gpa)	Poisson's Ratio(u)	Coefficient of thermal expansion/ (×10 ⁻⁶ ·C ⁻¹)
Silicon	2.329	130	0.28	2.6
Irg202	4.6	19	0.3	20
Irg204	4.7	18	0.3	22
Znse	5.27	70	0.28	7.3
Tc4	4.44	109	0.29	8.8
4j32	8.1	150	0.29	0.5
RTV566	1.49	0.005	0.49	200

文中 0 ATM 用于表示仪器所处的外部真空工作环境。由于系统内外均处于相同真空状态且不存在密闭承压腔体, 结构表面不承受明显压力差, 因此有限元结构分析中未施加额外压力载荷。本文所得结果主要反映 20 °C 至 -113 °C 均匀稳态降温引起的热致变形。

3.3 工作温度干涉仪系统变化分析结果

初始温度设为装配环境温度 20 °C, 加载温度为 -113 °C, 并提交软件进行系统热变形计算。图 7 给出了干涉仪系统在 -113 °C 工况下的变形云图, 其中最大膨胀变形量为 0.008 14 mm。

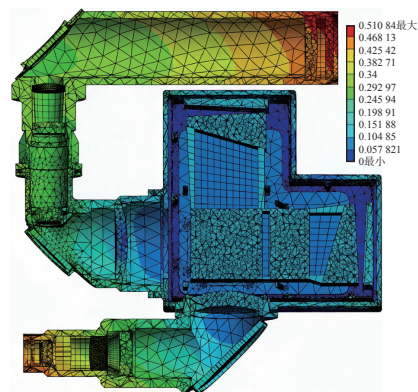


图 7 -113 °C 均匀稳态温度载荷下干涉仪系统变形云图

Fig. 7 Deformation contour of the interferometer system under a uniform steady-state temperature load of -113 °C

提取各光学镜片表面节点的坐标及变形位移数据,并利用有限元分析软件进行镜片表面面形 Zernike 多项式拟合,拟合波长为 $8.8227\mu\text{m}$,拟合镜片形变。表 2 给出了系统在 -113°C 工况下各光学镜片的 RMS 和 PV 变化量。各镜片 RMS、PV 的变化均为 mm 量级。

表 2 -113°C 下各光学镜片 RMS、PV 变化

Tab. 2 RMS and PV Variations of Optical Lenses at -113°C

表面	RMS	P-V	表面	RMS	P-V
S1a	4.86E-05	1.68E-04	S6a	6.47E-05	2.19E-04
S1b	2.66E-05	8.75E-05	S6b	5.42E-05	1.83E-04
S2a	2.05E-05	8.35E-05	S7a	1.62E-05	5.89E-05
S2b	2.63E-06	9.97E-06	S7b	9.96E-06	3.34E-05
S3a	4.80E-05	1.02E-04	S8a	1.02E-06	3.71E-06
S3b	3.10E-05	1.09E-04	S8b	7.20E-06	3.24E-05
S4a	3.20E-05	1.22E-04	S9a	3.14E-05	9.86E-05
S4b	3.60E-05	4.10E-05	S9b	3.77E-05	1.19E-04
S5a	3.20E-05	1.66E-04	S10a	3.46E-06	1.97E-05
S5b	4.80E-05	1.08E-04	S10b	1.73E-06	6.08E-06

注: a 为前表面; b 为后表面。

4 分析形变像差影响并消除

4.1 面形变化定量分析

为定量分析低温热变形所引入的像差对干涉条纹特性的影响机理,本节选取成像光学系统中形变量最大的四个光学表面作为研究对象,即

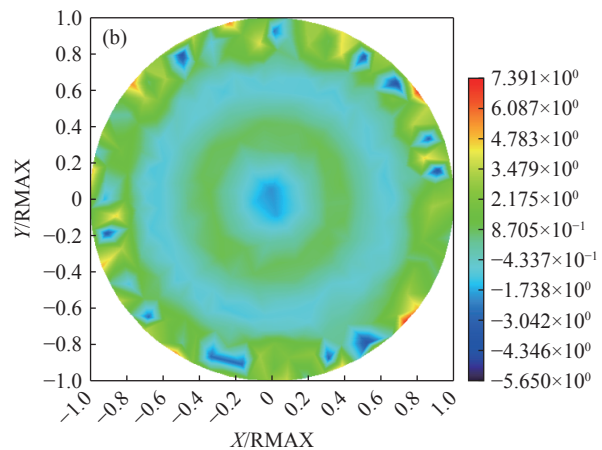
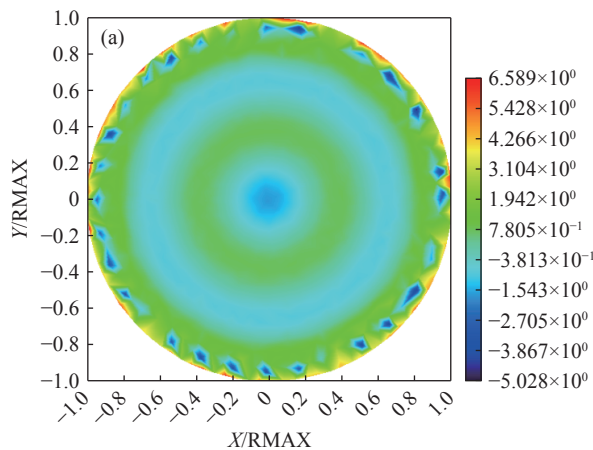
S6a、S6b、S9a 和 S9b,对其面形变化进行重点分析。

利用有限元分析得到各光学表面的节点位移数据,并基于 Zernike 多项式对离散的面形数据进行拟合重构,拟合结果如图 8 所示。理想光学表面应为连续光滑曲面,而有限元仿真输出的面形数据通常以离散节点形式给出,因此需通过函数拟合方法将其转换为连续面形描述。该过程本质上是将离散采样数据在单位圆域内展开为一组正交基函数的线性组合,从而实现面形误差的解析表达。

在具体实现中,选取 Zernike 多项式前 43 项对各光学表面进行拟合。结果表明,该阶数能够较好地表征低温热变形引起的主要像差成分,同时兼顾计算效率与拟合精度要求,满足本文干涉仪系统仿真与误差分析的精度需求。

需要指出的是,本文有限元分析采用均匀稳态温度场的等效材料参数,主要用于研究整体低温收缩引起的光学表面面形变化及其向干涉相位误差的传递规律。实际降温过程中可能存在的空间温度梯度,以及 RTV566 胶层在极低温环境下的结晶效应和参数温度依赖性,可能进一步影响局部应力和镜面面形,其影响有待结合低温材料测试和热真空试验进一步研究。

由图 9 可知,面形变化贡献较大的主要为 Zernike 第 4 项和第 11 项,分别对应球差和像散成分,表明低温热变形在系统中引入了显著的低阶像差,从而对干涉条纹空间分布产生直接影响。具体表现为干涉条纹出现明显弯曲,同时伴随一定离焦效应,导致条纹弯曲、对比度降低,进而对后续相位提取及风速反演精度产生不利影响。



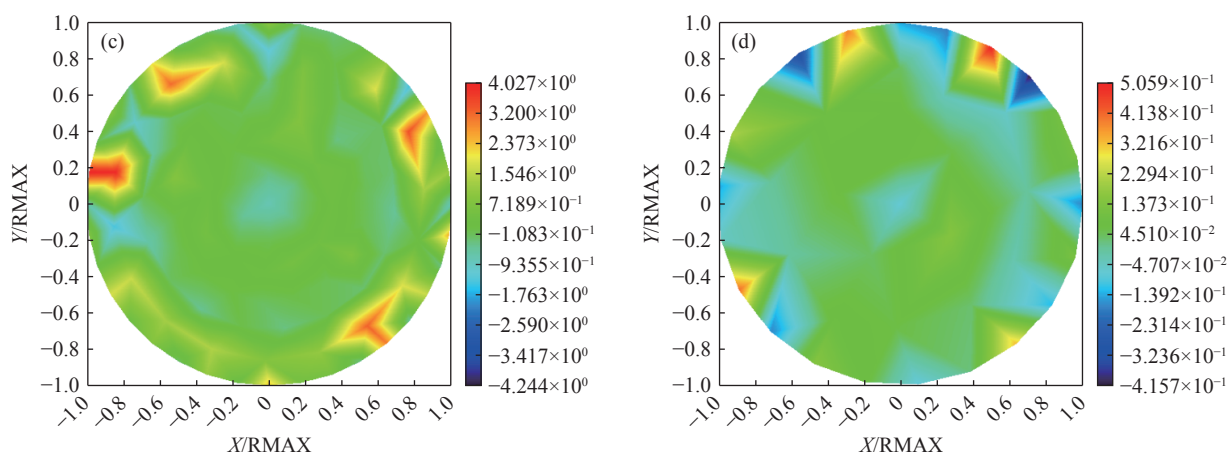


图 8 $-113\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均匀稳态温度载荷下透镜表面 S6a、S6b、S9a 和 S9b 的面形变化。(a)6a;(b)6b;(c)9a;(d)9b

Fig. 8 Surface deformations of lens surfaces S6a, S6b, S9a, and S9b under a uniform steady-state temperature load of $-113\text{ }^{\circ}\text{C}$

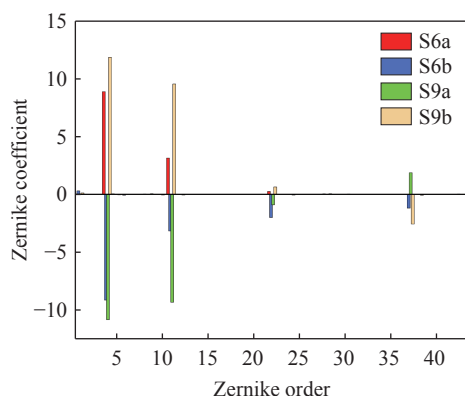


图 9 Zernike 系数柱状图

Fig. 9 Bar chart of Zernike coefficients

4.2 面形变化对干涉条纹的影响仿真验证

在上述分析基础上,将得到的 Zernike 多项式系数加载至光学设计软件中,并在非序列模式下建立包含实际面型误差的光学系统模型。通过光线追迹与干涉计算,分析低温工作环境 ($-113.15\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下面型变化对系统波前分布及干涉条纹特性的影响。重点评估面型误差引入的附加光程差及相位畸变对干涉条纹空间频率、对比度及条纹位置的调制作用。

仿真过程中,入射光波长设定为 $8.82275\text{ }\mu\text{m}$,环境温度为 $-113.15\text{ }^{\circ}\text{C}$,分析光线数为 1×10^7 ,入射能量为 1000 W 。探测器采用相干辐照度模式,结果以反灰度形式输出。基于上述参数进行光线追迹计算,获得低温条件下的干涉条纹图。

4.2.1 干涉条纹相位提取与风速反演方法

对于 DASH 干涉仪,探测器接收到的干涉图本质上是带有空间载频的调制信号,其相位分布

对应于入射谱线的多普勒频移信息。因此,在获得低温条件下的干涉条纹图后,需首先进行相位提取,再依据 DASH 干涉仪中风速与相位变化之间的关系完成风速反演。

本文采用基于傅里叶变换的条纹相位提取方法。首先,对探测器输出的干涉条纹图 $I(x,y)$ 进行傅里叶变换,将条纹信息由空间域转换至频率域:

$$F(u,v) = FFT\{I(x,y)\} \quad (8)$$

并采用带通滤波抑制零频背景项及高频噪声。对滤波后的频谱进行傅里叶逆变换,可获得对应的复数解析信号 $I_c(x,y)$,进而得到相位分布:

$$\varphi_w(x,y) = arg\{I_c(x,y)\} \quad (9)$$

考虑到包裹相位中存在 2π 周期跳变,进一步采用相位展开方法获得连续相位分布 $\varphi(x,y)$ 。在得到连续相位后,以零风速(入射波长 $8.8227\text{ }\mu\text{m}$)情况下的参考相位为基准,计算低温工况下的相位变化量 $\delta\varphi$ 。最后根据公式(3)可得到对应风速。

基于图 10 所示干涉条纹进行风速反演计算,结果如图 11 所示。反演过程中入射波长范围为 $8.822694\text{ }\mu\text{m}$ – $8.8226976\text{ }\mu\text{m}$,对应风速范围为 $20\text{--}80\text{ m/s}$ 。未进行像差校正时,反演风速在理想风速附近呈现上下波动,存在一定系统误差。

上述结果表明,低温面型形变对干涉条纹相位分布及风速反演精度具有显著影响,为后续像差补偿方法的建立及风速反演误差定量评估提供了理论依据。



图 10 工作温度-113.15 °C 干涉条纹

Fig. 10 Interference fringes at an operating temperature of -113.15 °C

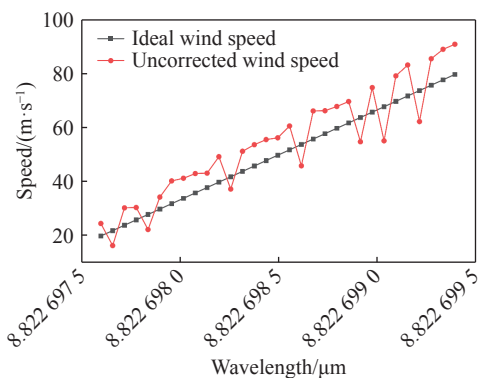


图 11 工作温度-113.15 °C 干涉条纹风速反演

Fig. 11 Wind velocity retrieval from interference fringes at an operating temperature of -113.15 °C

4.3 像差校正方法

为消除热致面型形变引入的像差影响,本节基于 Zernike 多项式构建像差相位模型。将各阶像差系数映射为对应的相位误差分布,从而得到面形误差引入的附加相位项。

$$\varphi_a(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i Z_i \left(\sqrt{x^2 + y^2}, \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \right) \quad (10)$$

其中 a_i 为第 i 项 Zernike 系数。实际计算中,取前 43 项即可有效表征低温面型变化引入的像差相位。

像差校正的核心在于相位域补偿,即从原始干涉相位中扣除由面形误差引入的像差相位,实现对真实干涉相位的恢复。与传统图像域处理方法相比,该方法直接作用于相位信息,能够有效避免条纹结构信息的损失。

$$\varphi_c(x, y) = \varphi_w(x, y) - \varphi_a(x, y) \quad (11)$$

其中 $\varphi_w(x, y)$ 为原始干涉相位。

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \cos \varphi_c(x, y)] \quad (12)$$

基于校正后的相位分布对干涉条纹进行重构,结果如图 12 所示。



图 12 校正后干涉条纹

Fig. 12 Corrected interference fringes

为定量评估相位补偿后干涉条纹质量的改善效果,采用条纹对比度作为评价指标,其定义为

$$V = \frac{(I_{max} - I_{min})}{(I_{max} + I_{min})} \quad (13)$$

其中, I_{max} 和 I_{min} 分别为条纹灰度的最大值和最小值。分别选取校正前后干涉图中心行的条纹灰度分布进行分析,结果表明,校正前条纹对比度为 $V_w = 0.556$,校正后提升至 $V_c = 0.806$,提升幅度为 44.9%。这说明相位补偿有效增强了条纹明暗调制深度。与此同时,低温面型形变引起的条纹弯曲会导致相位偏离理想分布,进而导致较大的风速反演误差。经补偿后条纹弯曲程度减弱,对应的风速反演结果如图 13 所示。

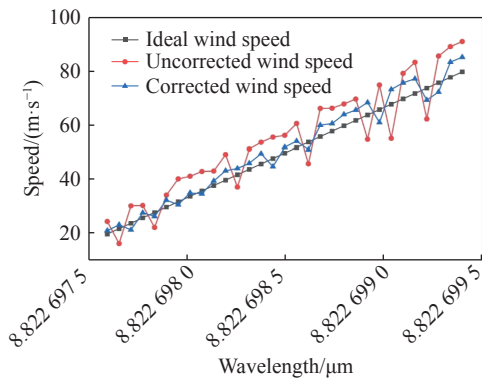


图 13 风速对比

Fig. 13 Wind speed comparison

进一步利用校正后的干涉条纹开展风速反演计算, 结果如图 13 所示。反演过程中入射波长范围为 $8.822694\mu\text{m}$ – $8.8226976\mu\text{m}$, 对应风速范围为 $20\text{--}80\text{ m/s}$ 。与原始干涉图相比, 校正后反演风速的偏差显著降低。

风速误差对比如图 14 所示。未校正干涉图的平均风速误差为 8 m/s , 经像差校正后平均风速误差降低至 3 m/s , 误差降幅约为 62.5% 。结果表明, 所提出的像差校正方法能够有效抑制热致面型形变引入的像差对干涉条纹的影响, 从而提高风速反演精度。

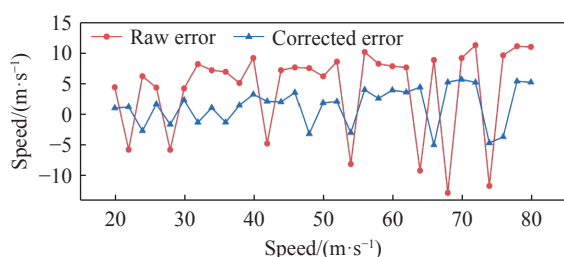


图 14 误差分析

Fig. 14 Error analysis

综上所述, 热致面型形变主要引入以球差和像散为主的低阶像差, 导致干涉相位分布发生变化, 进而影响风速反演精度。本文提出的基于 Zernike 多项式的相位补偿方法能够有效恢复干涉条纹空间特性, 显著降低反演误差, 为极端低温环境下干涉仪系统性能优化提供了可行的技术途径。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] SHEPHERD G G, SOLHEIM B H, BROWN S, *et al.*. Integration of spatial heterodyne spectroscopy with the stratospheric wind interferometer for transport studies (SWIFT)[J]. *Canadian Aeronautics and Space Journal*, 2012, 58(2): 115-121.
- [4] SOLHEIM B, BROWN S, SIORIS C, *et al.*. SWIFT-DASH: spatial heterodyne spectroscopy approach to stratospheric wind and ozone measurement[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2015, 53(1): 50-57.
- [5] 牛子孺, 江伦, 张旭, 等. 倾斜条纹对 557.03 nm 地基多普勒空间外差干涉仪标定影响[J]. *光学学报*, 2025, 45(22): 2212001.
- [6] NIU Z R, JIANG L, ZHANG X, *et al.*. Impact of tilted fringes on calibration of 557.03 nm ground-based Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(22): 2212001. (in Chinese).
- [6] 刘子维, 江伦, 贺欣桐, 等. 557.7 nm 波段星载探测风场的多普勒非对称差分干涉仪杂散光分析与抑制[J]. *中国光*

5 结 论

本文针对星载长波红外多普勒非对称空间外差干涉仪 (LWIR DASH) 在低温真空环境下的镜面形变及其引起的像差对干涉条纹特性和风速反演精度的影响进行了系统研究。结果表明, 低温条件下光学元件面形变化主要产生以球差和像散为主的低阶像差, 其中 Zernike 第 4 项和第 11 项贡献最为显著, 是系统波前畸变的主要来源。这些像差通过引入附加光程差, 使干涉相位分布发生畸变, 表现为条纹弯曲、对比度下降及空间分布不均匀, 从而降低相位提取精度并影响风速反演的准确性。在此基础上, 提出了一种基于 Zernike 多项式的相位补偿方法, 对干涉相位进行校正。仿真结果显示, 该方法能够有效恢复干涉条纹的空间特性, 风速反演误差从 8 m/s 降低至 3 m/s , 降幅约为 62.5% , 从而抑制热致面型形变对系统性能的影响。本研究不仅揭示了热致面型形变对干涉条纹与风速反演精度的影响机理, 而且建立了面型误差向相位误差传递的定量模型, 并提出有效的相位域补偿方法。该方法显著提升了系统在极端低温环境下的测风精度, 为我国星载长波红外干涉测风载荷的工程应用与在轨稳定运行提供了重要技术支撑, 同时为未来开展在轨自适应像差补偿与高精度干涉测量系统设计奠定了理论基础。

- 学 (中英文), 2025, 18(5): 1066-1075.
- LIU Z W, JIANG L, HE X T, *et al.*. Analysis and suppression of stray light in Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer for spaceborne wind field detection at 557.7 nm band[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1066-1075. (in Chinese).
- [7] 李明白, 江伦, 张旭, 等. 基于自适应阈值调控的星载多普勒非对称空间外差干涉仪图像增强方法[J]. *光学学报*, 2025, 45(16): 1610001.
- LI M B, JIANG L, ZHANG X, *et al.*. Enhancement method for spaceborne Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer images based on adaptive threshold regulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(16): 1610001. (in Chinese).
- [8] 韩斌. 长波红外多普勒差分干涉仪关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学 (中国科学院西安光学精密机械研究所), 2023.
- HAN B. *Research on the key technologies of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy for long-wave infrared*[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2023. (in Chinese).
- [9] 王锦疆, 江伦, 佟首峰, 等. 多普勒外差干涉仪的光机热集成分析[J]. *中国光学 (中英文)*, 2024, 17(6): 1489-1511.
- WANG J J, JIANG L, TONG SH F, *et al.*. Opto-mechanical-thermal integration analysis of Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1489-1511. (in Chinese).
- [10] 傅頔, 畅晨光, 孙剑, 等. 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[J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1801003.
- FU D, CHANG CH G, SUN J, *et al.*. Separating and testing method for influencing factors of phase stability of Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer for atmospheric wind-field detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 1801003. (in Chinese).
- [11] 张亚飞, 冯玉涛, 傅頔, 等. 基于分段边缘拟合的测风多普勒差分干涉仪成像热漂移监测方法[J]. *物理学报*, 2022, 71(8): 084201.
- ZHANG Y F, FENG Y T, FU D, *et al.*. Thermal imaging drift monitoring of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy for wind measurement based on segmented edge fitting[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(8): 084201. (in Chinese).
- [12] 韩斌, 冯玉涛, 王劲松, 等. 中高层大气风场探测光学干涉仪载荷发展综述 (特邀)[J]. *光学学报*, 2024, 44(18): 1800008.
- HAN B, FENG Y T, WANG J S, *et al.*. Overview of optical interferometer payloads for detecting wind fields in middle and upper atmosphere (invited)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(18): 1800008. (in Chinese).
- [13] HARLANDER J M. *Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning*[D]. Madison: University of Wisconsin, 1991.
- [14] 张亚飞, 冯玉涛, 傅頔, 等. 基于分段边缘拟合的测风多普勒差分干涉仪成像热漂移监测方法[J]. *物理学报*, 2022, 71(8): 084201. (查阅网上资料, 本条文献与第 11 条文献重复, 请确认).
- ZHANG Y F, FENG Y T, FU D, *et al.*. Thermal imaging drift monitoring of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy for wind measurement based on segmented edge fitting[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(8): 084201. (in Chinese).
- [15] 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.
- [16] 肖旻, 冯玉涛, 文镇清, 等. 中高层大气风场探测多普勒差分干涉技术 (特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(8): 0851516.
- XIAO Y, FENG Y T, WEN ZH Q, *et al.*. Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometry for wind measurement in middle and upper atmosphere (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(8): 0851516. (in Chinese).
- [17] ZENG CH F, OUYANG Y G. Research on optical axis stability of optical system based on thermal-structural-optical integrated analysis[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2021, 19(6): 50-56.
- [18] 唐瑶. 针对第 3-4 阶高阶像差的热驱动变形镜拟合性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- TANG Y. *Study on the correction performance of thermo deformable mirror for 3rd- to 4th-order higher-order aberrations*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2025. (in Chinese).

作者简介:

龙泉豪(2002—), 男硕士, 主要从事空间光学设计方面的研究。E-mail: 1275403504@qq.com

王慧月(2002—), 男, 硕士, 主要从事空间光学设计方面的研究。E-mail: 522867986@qq.com