

ZHU Guangyi, ZHU Yajun, WANG Tiancai, YUAN Wei, LIU Weijun, XU Jiyao. Calibration Techniques for Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometers (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(6): 1542–1551. CSTR:32142.14.cjss.2024–0143. DOI:10.11728/cjss2025.06.2024–0143

非对称空间外差干涉仪标定技术*

朱光逸^{1,2} 朱亚军^{1,2} 王天才^{1,2}
袁 韦¹ 刘伟军¹ 徐寄遥^{1,2}

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 中高层大气风场探测对于大气模型构建、卫星轨道预测、通信导航保障和空间天气灾害预测具有重要的科学和应用价值. 光学干涉仪获取气辉辐射的多普勒频移是大气风场遥感最重要的方法之一. 标定光学干涉仪的测风性能对于确保探测精确度有重要意义. 通过研究非对称空间外差干涉仪的测风原理, 提出测风敏感系数的概念, 为仪器标定提供理论依据. 设计并实施了两种典型的标定系统, 用以对非对称空间外差干涉仪进行测风标定实验. 结合标定过程与结果对这两种标定系统的不确定度以及适用性进行综合评估. 声光移频测风标定系统具有优于 $\pm 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的不确定度, 并且结构紧凑、易于集成, 可作为传递标准, 用于地面测风网络的内部校准, 反射转盘式测风标定系统具有广泛的光源适用性. 该结果可为测风光学干涉仪的实验室和常规现场标定提供参考.

关键词 非对称空间外差干涉仪, 中高层大气风场, 被动光学探测, 标定技术

中图分类号 P356

Calibration Techniques for Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometers

ZHU Guangyi^{1,2} ZHU Yajun^{1,2} WANG Tiancai^{1,2}
YUAN Wei¹ LIU Weijun¹ XU Jiyao^{1,2}

1(State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The detection of wind in the middle and upper atmosphere has important scientific and practical value for the construction of atmospheric models, satellite orbit prediction, communication and navigation support, and space weather disaster prediction. The Doppler shift of airglow radiation ob-

* 国家重点研发计划项目 (2021YFE0110200), 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划项目 (YSBR-018), 国家自然科学基金项目 (41831073, 42174196, 42174212), 中国子午工程项目, 太阳活动与空间天气全国重点实验室专项基金资助项目和中国科学院国际科技合作计划项目 (183311KYSB20200003) 共同资助

2024-10-19 收到原稿, 2024-12-23 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

tained by optical interferometer is one of the most important methods for remote sensing of atmosphere wind. Ensuring the accuracy of these measurements necessitates the calibration of the wind measurement performance of optical interferometers. In this paper, we propose the concept of wind measurement sensitivity coefficient through studying the wind measurement principle of asymmetric spatial heterodyne interferometer, providing a solid theoretical foundation for instrument calibration. Two typical calibration systems are designed and implemented to calibrate an asymmetric spatial heterodyne interferometer. By examining both the calibration process and results, we conduct a comprehensive evaluation of the uncertainty and applicability of these two systems. The acousto-optic frequency shift calibration system boasts an uncertainty of less than $\pm 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, coupled with its compact design and ease of integration, making it an ideal transfer standard for internal calibration within ground wind measurement networks. On the other hand, the reflective wheel calibration system demonstrates wide applicability across various light sources. The findings presented in this paper can serve as a valuable reference for both laboratory and routine field calibration of wind-measuring optical interferometers.

Key words Asymmetric spatial heterodyne interferometers, Middle and upper atmosphere wind, Optical passive sounding, Calibration techniques

0 引言

中高层大气构成了航天器运行的主要轨道环境,其风场与温度的变化可能导致卫星轨道的偏差,从而影响卫星的服役周期.大气中性风场的变动能促使离子迁移,进而改变电离层的结构,诱发电离层的不稳定现象,对通信及导航系统带来安全隐患^[1-3].在人类空间活动日益频繁以及对保障通信的需求下,研究中高层大气测风技术具有重要的科学意义和实际应用价值^[4,5].

被动光学探测技术是长期获取高层大气中性风的主要手段,其基本原理是通过气辉发射线的多普勒频移反演风速.目前,已有多种类型的干涉仪研制成功,用于探测中高层大气中性风场,其中包括 Fabry-Perot 干涉仪、Michelson 干涉仪以及非对称空间外差干涉仪,这些高精度的测量设备在地基探测与天基探测领域均得到了广泛的应用^[6-10].其中,非对称空间外差干涉技术凭借其高通量、无需机械运动部件以及能够兼容多谱线同时探测的独特优势,在观测中高层大气气辉这类弱漫射发射现象时,展现出了极高的适应性和效能.

被动光学测风仪器开发和运行中最重要的任务之一是评估其测风能力并确定其精度,包括精度和系统误差.因此,需要一个可调和高精度的标定系统来模拟高层大气风.目前,有两种技术手段用来标定非对称空间外差干涉仪的测风能力,一种是利用机械系

统产生多普勒频移,例如 Englert 等^[11]利用稳频光源和电机驱动的反射转盘模拟大气中性风的多普勒频移,用于评价非对称空间外差干涉仪的测风表现. Wei 等^[12]也使用类似的反射转盘系统模拟多普勒速度,验证非对称空间外差型干涉仪的测风性能,发现了 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的统计误差.另一种技术是依靠光电系统产生多普勒频移,例如 Harlander 和 Englert^[13]利用声光调制器测试干涉仪对多普勒频移的响应,使 633 nm 的氦氖激光器出射光频率偏移 80 MHz,对应于 $50.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的多普勒速度. Zhu 等^[14]开发了基于声光移频器的标定系统,可以模拟 $63.3\sim 126.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的多普勒速度,通过对光拍频的检测验证了该系统的有效性.非对称空间外差干涉仪测风标定过程中,引入的误差会直接降低到仪器的测风精确度.然而,目前尚缺乏对标定概念的系统描述以及对这两种标定技术的对比分析,包括其性能表现、适用范围等.

本文从非对称空间外差干涉仪的测风原理出发,推导出测风敏感系数的概念,为该型仪器的标定提供理论依据.通过搭建上述两种标定系统,分别对非对称空间外差干涉仪进行标定,结合标定过程与结果对这两种标定系统的不确定度及适用性进行综合评估.

1 非对称空间外差干涉仪原理

非对称空间外差光谱技术是在空间外差技术和 Michelson 干涉技术基础上发展而来的.将 Michel-

son 干涉仪的反射镜替换为衍射光栅并以一定角度固定在干涉臂, 可以使干涉仪以固定的姿态在不同光程差处进行采样. 通过延长空间外差光谱仪的一条干涉臂, 获得大光程差, 使干涉仪对特定波长附近的微小频率变化非常敏感.

图 1 所示为非对称空间外差干涉仪的配置. 入射光首先通过光圈 A, 经由透镜 L1 形成平行光. 随后, 平行光被分束器 B 分为两路光束, 分别经过扩视场棱镜 P1 和 P2 后, 在光栅 G1 和 G2 的表面发生衍射并沿原路返回至分束器. 在分束器处, 两束光再次汇合并相互干涉. 由于一条干涉臂上存在偏置 Δd , 两束光的光程差为 $2\Delta d$. 两束光形成的 Fizeau 干涉条纹, 经过透镜 L2 和 L3 成像在探测器上.

在探测器上采样点 x 位置处的辐射强度可以表示为^[15]

$$I(x) = \frac{I_r}{2} \{1 + V_I(\sigma_c, x) \cos[2\pi(fx + 2\sigma_c \Delta d)] \exp(-2\pi^2 \sigma_D^2 L^2)\}. \quad (1)$$

其中, I_r 为输入辐射的强度, $V_I(\sigma_c, x)$ 为仪器的衬比度函数, σ_c 为入射光的中心波数, 干涉条纹的空间频率 $f = \tan\theta(\sigma_c - \sigma_L)$, θ 和 σ_L 分别为 Littrow 角和 Littrow 波数, L 是光程差, 多普勒展宽参数 $\sigma_D = \sigma_c \sqrt{\frac{kT}{mc^2}}$, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, m 为原子质量, c 为光速. 式 (1) 中的余弦项为干涉图的相位分布, 可表示为

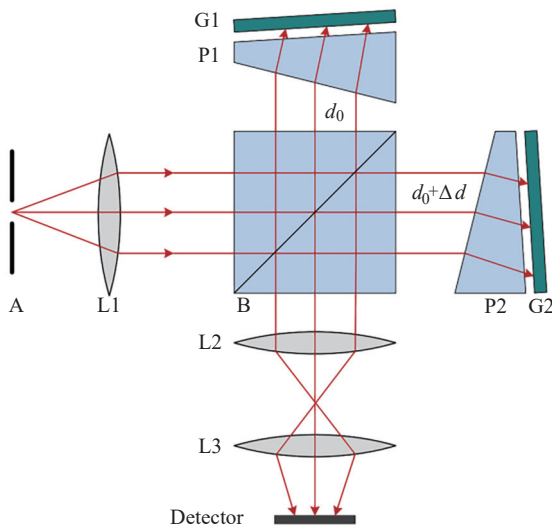


图 1 非对称空间外差干涉仪配置

Fig. 1 Schematic of an asymmetric spatial heterodyne interferometer configuration

$$\varphi = 2\pi(fx + 2\sigma_c \Delta d). \quad (2)$$

粒子在大气中随中性风运动时, 发出的气辉辐射发生多普勒频移. 当光源频率发生变化, 干涉图的相位也会随之改变. 对于中心波数为 σ_0 的光源, 发生多普勒频移后, 其中心波数可以表示为

$$\sigma_v = \sigma_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right). \quad (3)$$

其中, v 为多普勒速度. 根据式 (1)~(3), 可得干涉图之间的相位差 $\Delta\varphi$ 与光源波数的关系为

$$\Delta\varphi = 8\pi \tan\theta(\sigma_v - \sigma_0)x + 4\pi(\sigma_v \Delta d_v - \sigma_0 \Delta d_0). \quad (4)$$

其中, Δd_v 和 Δd_0 是考虑色散效应情况下的光程差偏置. 由于存在多普勒频移, 光源的波数发生变化, 进而导致相应的偏置 Δd 不同. 定义有效光程差偏置为

$$D = 2\Delta d_0 - \lambda_c \left[2 \frac{\partial(\Delta d)}{\partial \lambda}\right]. \quad (5)$$

其中, λ_c 为光源中心波长, Δd_0 为其中一条干涉臂的延长距离. 结合式 (3)~(5) 并应用色散关系的一阶近似, 可得相位差与多普勒速度的关系为^[16]

$$\Delta\varphi = 8\pi \tan\theta x \sigma_0 \frac{v}{c} + 2\pi D \sigma_0 \frac{v}{c}. \quad (6)$$

在非对称空间外差系统中, 任何细微的偏差都可能导致测风误差. 由于零件的制造公差和装配过程中引入的操作误差, 装配后的仪器表现可能会与预期表现出一定偏差. 在黏接过程中使用的 UV 固化黏合剂厚度不对称和不均匀也会引起 Littrow 角和光程差偏置偏离设计值, 根据式 (6), 其会直接导致在风速反演中引入系统误差. 因此, 在完成仪器组装流程后, 有必要对仪器的测风能力进行验证, 并将相位差对多普勒速度的灵敏度进行精确标定. 将式 (6) 重新整理可得

$$v = \frac{c}{2\pi \sigma_0 L} \Delta\varphi. \quad (7)$$

其中, 光程差 $L = 4 \tan\theta x + D$. 式 (7) 中, 相位差的系数 $\frac{c}{2\pi \sigma_0 L}$ 可以作为一个整体, 看成是仪器的测风敏感系数. 通过模拟多普勒频移并提取干涉图的相位差, 可以标定非对称空间外差干涉仪的测风敏感系数.

2 非对称空间外差干涉仪标定系统

2.1 反射转盘式测风标定系统

2.1.1 系统配置及原理

反射转盘式测风标定系统的配置如图 2 所示. 该

系统中, 632.8 nm 波长的稳频氦氖激光器作为模拟气辉的光源, 使用一套反射转盘式多普勒风速模拟器为光源提供多普勒频移. 圆盘由小型电机驱动, 固定在金属配重底座上. 圆盘表面覆盖着微棱镜反射膜, 其可以高效地将光线从各个方向反射回光源, 形成强烈的逆反射效果. 光线经过隔离器后聚焦在散射片转盘上以抑制激光的散斑效应. 随后光线经过准直, 通过分束器和透镜聚焦在圆盘上一点. 发生多普勒频移的反射光沿原路返回经过分束器和全息扩散片后进入干涉仪. 另一束同步校准光线由氖灯发出, 经过准直后, 通过一个窄带滤光片仅保留氖灯发出的 630.479 nm 波长的光线进入干涉仪. 该光线进入干涉仪形成的干涉图案用于监测仪器的漂移并进行同步校准.

图 3 给出的是利用反射转盘模拟多普勒风速的原理, O 点是圆盘中心, 光束聚焦在圆盘上的 A 点,

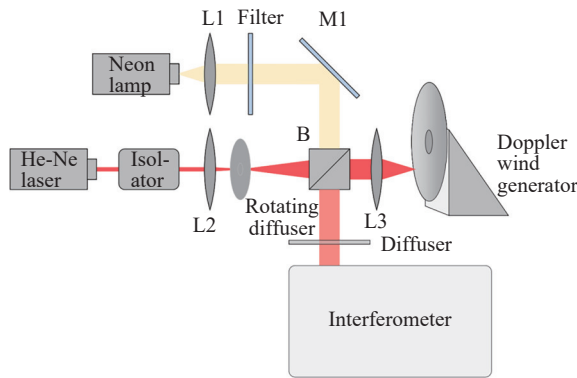


图 2 反射转盘式测风标定系统

Fig. 2 Wind measurement calibration system of reflection wheel

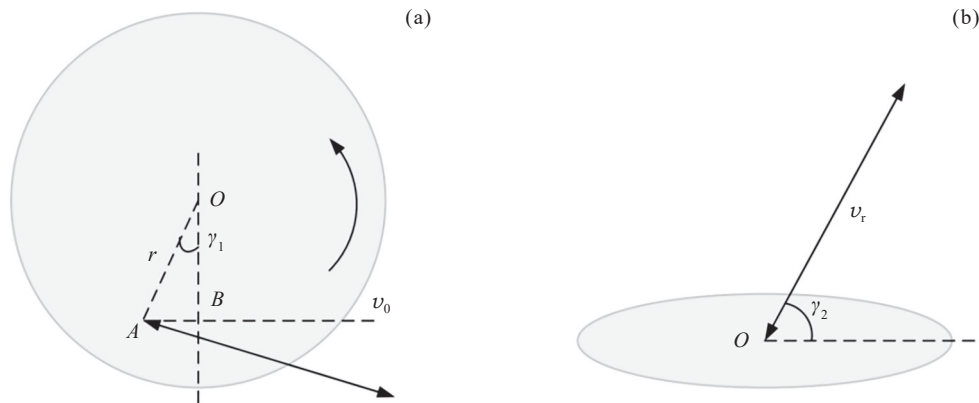


图 3 多普勒风速模拟器原理. 反射转盘的正 (a) 侧 (b) 视图

Fig. 3 Principle of the Doppler wind generator. Front view (a) and side view (b) of the reflection wheel

由于该点存在线速度 v_0 , 光线经过圆盘表面时存在相对运动, 进而赋予反射光多普勒频移, 多普勒速度的表达式为

$$v_r = 2v_0 \cos \gamma_1 \cos \gamma_2 = 4\pi N_s r \cos \gamma_1 \cos \gamma_2. \quad (8)$$

其中, γ_1 为图 3(a) 中 OA 与垂直方向 OB 的夹角, γ_2 为图 3(b) 中光束与圆盘之间的夹角, N_s 为电机转速, r 为 A 点到圆盘中心的距离.

表 1 给出了反射转盘式多普勒风速模拟器的关键参数. 该系统的电机能够达到的最大转速为 $6000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 在此转速下, 系统能够产生的最大多普勒速度为 $119.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 值得注意的是, 反射盘在静止状态下的反射效率显著低于其旋转状态. 为了确保测量过程中干涉图像的信噪比保持在同一水平, 必须保持圆盘的持续旋转, 即便在测量零风相位时也不例外. 在实验中, 采用 $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速采集的干涉图像来反演零风相位, 而其他转速的测量则以 $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时采集的相位作为零风参考标准.

2.1.2 不确定度分析

反射转盘式风速标定系统中不确定度主要来源于风速模拟器和光源. 根据式 (8), 确定系统产生的多普勒速度需要考虑圆盘转速、安装角度以及光斑在圆盘上的位置. 考虑其中各参量的误差时, 多普勒速度表示为

$$v_r + v_{r,e} = 4\pi (N_s + N_{s,e}) (r + r_e) \cos (\gamma_1 + \gamma_{1,e}) \cdot \cos (\gamma_2 + \gamma_{2,e}). \quad (9)$$

圆盘转速是通过控制器调节的电机转速, 本文使用的电机有最大 $10 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速误差, 因此圆盘转速的不确定度 $N_{s,e} = \pm 10 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$. 光斑到圆盘中心的

距离 r 通过直接测量得到, 考虑光斑的形状及尺寸 r_e 估计为 ± 0.2 cm. 两个角度 γ_1 和 γ_2 通过构建直角三角形并测量其边长计算得出, 其余弦值的不确定度根据角度和边长测量的不确定度 ± 0.05 cm 计算结果分别为 ± 0.020 和 ± 0.036 . 本文所使用的氦氖激光器在稳频模式下, 频率不确定度为 ± 1 MHz. 综上, 在表 2 中列出了反射转盘式多普勒风速模拟器的不确定度. 由于速度不确定度和反射盘转速相关, 所以表中给出了 4000 r·min⁻¹ 转速时的不确定度用于参考.

2.1.3 标定实验

实验中控制电机转速从 500 r·min⁻¹ 至 6000 r·min⁻¹ 逐渐增加, 间隔为 500 r·min⁻¹. 当每个转速稳定后连续采集十组数据, 以确保数据的准确性和可靠性, 单次曝光时间 10 s. 提取每幅干涉图的相位, 计算与第一幅干涉图的相位差. 如图 4 所示, 菱形标记是测量结果, 横坐标表示同一转速下采集的相位差的平均值, 纵坐标是根据式 (8) 计算的多普勒速度. 实线是利用最小二乘法对测量值的线性拟合, 拟合线的斜率是 913.7 ± 3.6 m·s⁻¹·rad⁻¹, 表示测风敏感系数的标定结果. 虚线表示预期值, 斜率是 932.5 m·s⁻¹·rad⁻¹, 表示根据设计参数计算的测风敏感系数. 说明标定前存

在系统误差, 当多普勒风速为 100 m·s⁻¹ 时, 该误差约为 2 m·s⁻¹. 分别将测风敏感系数的理论值与标定结果代入式 (7), 计算得到如图 5 所示的标定前后测量对比结果. 标定前测量值存在负偏差且随着多普勒速度增大, 最大误差超过 2 m·s⁻¹, 误差的均方根为 1.41 m·s⁻¹. 标定后最大误差约为 1 m·s⁻¹, 误差的均方根为 0.62 m·s⁻¹.

2.2 声光移频式测风标定系统

2.2.1 系统配置及原理

图 6 给出了声光移频式测风标定系统的装置图. 该系统主要由稳频的氦氖激光器、光隔离器、声光移频器、旋转式散射片、固定式扩散器、氖灯校准光源、窄带滤光片、反射镜以及 4 组透镜等部件构成. 系统通过声光移频器实现对激光频率在数百 MHz 范围内的精确调制.

系统中所采用的氦氖激光器发射波长为 632.8 nm 的光束. 激光输出后首先经过光隔离器, 以防止反射光反馈至激光器内部. 随后, 通过透镜 L1 将激光束聚焦于声光介质上, 旨在提升射频载波的调制效率并缩短光束的传输时间. 所选用的声光介质为布拉格衍射晶体, 当光束以布拉格角射入时, 可实现最高的衍射效率. 实验所用声光移频器的调制频率范围为 100~200 MHz, 能够模拟出 63.28~126.56 m·s⁻¹ 范围内的多普勒速度. 在声光介质后方放置一个可移动光阑, 使 0 级衍射光或 1 级衍射光通过. 透镜 L2 将光束聚焦到旋转散射片上以抑制激光散斑现象. 激光经过透镜 L3 准直后, 通过分束器和扩散器, 继而进入干涉仪. 实验中, 声光介质连接着驱动器, 通过改变驱动器的输入频率可以控制输出光的频移量. 该系统中同样配备了图 2 装置中的同步校准光源.

表 1 反射转盘式多普勒风速模拟器参数
Table 1 Parameters of Doppler wind generation system of reflection wheel

N_s	0~6000 r·min ⁻¹
r	13.8 cm
$\cos \gamma_1$	0.9629
$\cos \gamma_2$	0.6691
v_r	0~119.6 m·s ⁻¹

表 2 反射转盘式多普勒风速模拟器不确定度分析
Table 2 Uncertainty of Doppler wind generation system of reflection wheel

$N_s = 4000$ r·min ⁻¹ 时 不确定度来源	测量不确定度	$v_r = 79.76$ m·s ⁻¹ 时 引起的速度不确定度/(m·s ⁻¹)
N_s	± 10 r·min ⁻¹	± 0.19
r	± 0.2 cm	± 1.08
$\cos \gamma_1$	± 0.020	± 1.55
$\cos \gamma_2$	± 0.036	± 0.08
光源频率	± 1 MHz	± 0.63
v_r 的不确定度	—	± 2.00

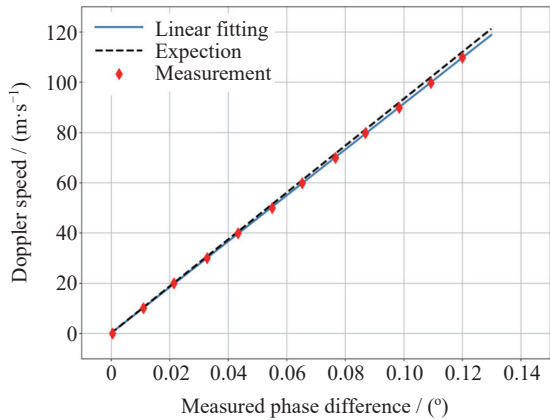


图 4 反射转盘式测风标定系统实验结果
Fig. 4 Experimental results of wind measurement calibration system of reflective wheel

2.2.2 不确定度分析

声光移频式测风标定系统中不确定度可能来自声光移频器的和光源. 氦氖激光器的频率稳定度控制在 $\pm 1\text{ MHz}$ 以内, 由此引入的速度不确定度约为 $\pm 0.63\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 利用光拍频法可以间接地检测声光移频器工作的频率误差, 实验装置如图 7 所示. 输出激光首先经过光隔离器, 随后由分束器 B1 将其分为两束光, 一束通过声光移频器成为频移光, 另一束保持原有频率不变. 然后, 再利用分束器 B2 将两束光混合在一起. 透镜 L3 将混合光聚焦照射至光电探测器 PDA, 这是一种硅放大探测器, 可以将光信号转换成电信号. 最后, 将光电探测器连接到一个示波器上, 以捕获光拍信号. 实验中使用的硅放大探测器的脉冲响

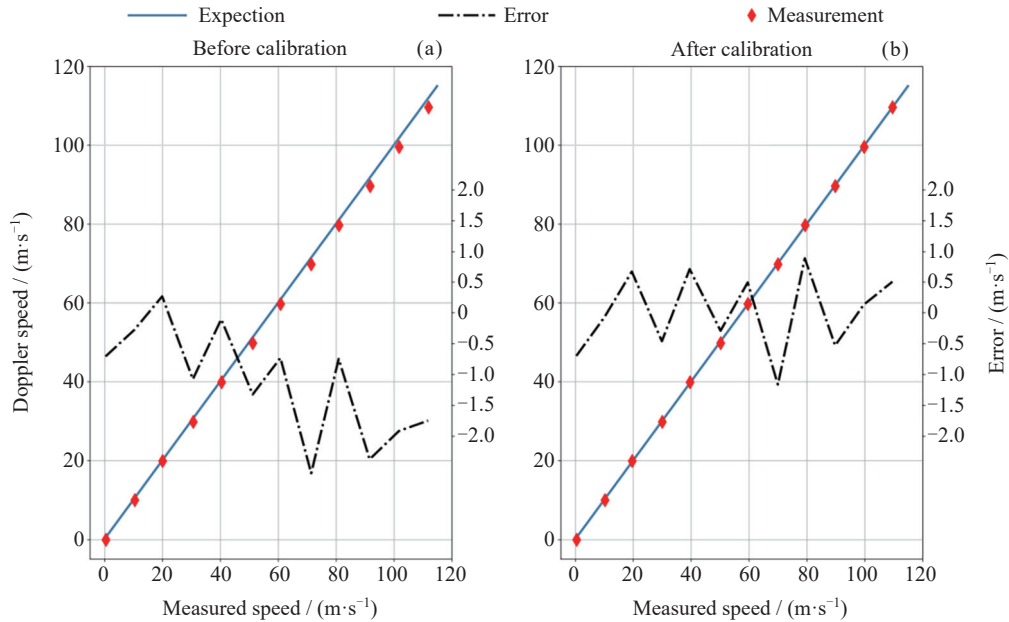


图 5 标定前后测量结果对比
Fig. 5 Comparison of measurement results before and after calibration

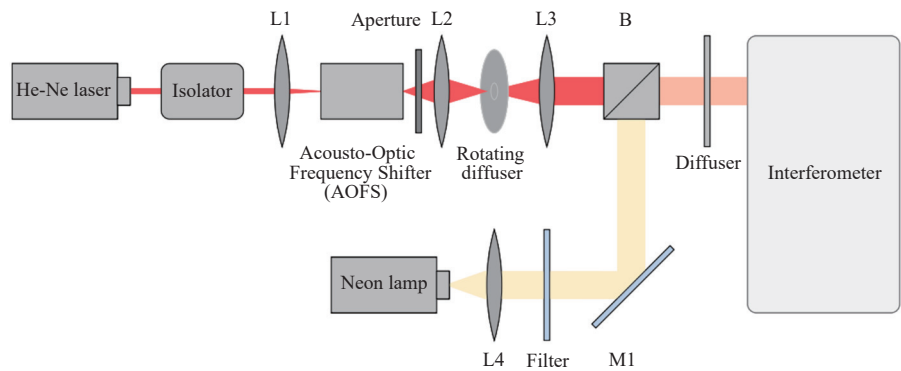


图 6 声光移频式测风标定系统
Fig. 6 Wind measurement calibration system of AOFS

应时间为 1 ns, 带宽为 380 MHz. 示波器的采样频率为 1.25 GHz, 足以检测到 100~200 MHz 的信号. 为了提高频域频谱的分辨率, 需要保证一定的采样时间, 即实验中每个样本的采样时间为 1.25 ms, 对应的频率分辨率为 0.8 kHz.

光拍频检测实验中, 设置声光移频器在 100~200 MHz 范围工作, 每次调整频移的步进值为 4 MHz. 对示波器捕获的信号振幅实施傅里叶变换, 可解析出光拍频信号的频率. 图 8 展示了采用光拍法测定多普勒频移的实验结果. 其中菱形标记点的纵坐标表示设定频率, 横坐标代表实际检测到的多普勒频率 (速度), 实线表示对测量数据点进行最小二乘法线性拟合的结果, 而虚线则表示光拍频率与设定频移之间的偏差, 注意单位为 kHz. 测量所得的误差的均方根为 1.6 kHz. 这一结果表明, 光源频率的不稳定性是该系统不确定度的主要来源, 而声光移频器引入的误

差十分微小, 不足以影响测风结果.

2.2.3 标定实验

利用图 6 所示装置标定非对称空间外差干涉仪的测风敏感系数. 首先, 放置光阑使 0 级衍射光通过, 此时采集的干涉图像未发生多普勒频移. 随后, 水平移动光阑, 使 1 级衍射光通过, 设置声光移频器的工作频率从 100 MHz 逐步调整至 200 MHz, 每次递增 4 MHz. 每个频率下采集 10 次, 单次曝光时间 1 s.

提取每幅干涉图的相位, 计算与第一幅干涉图的相位差. 如图 9 所示, 菱形标记是测量结果, 横坐标表示同一转速下采集的相位差的平均值, 纵坐标是根据频移量计算的多普勒速度. 实线是利用最小二乘法对测量值的线性拟合, 拟合线的斜率是 $(912.3 \pm 1.4) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$, 表示测风敏感系数的标定结果. 虚线表示预期值, 斜率是 $932.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$ 表示根据设计参数计算的测风敏感系数. 分别将测风敏感系数的理

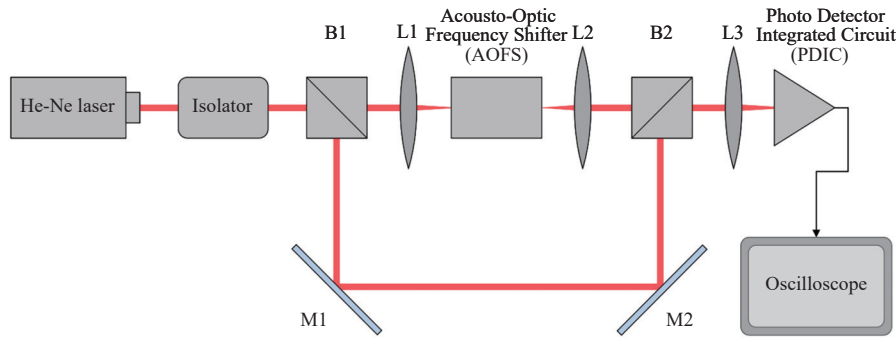


图 7 光拍频法测定多普勒频移实验装置

Fig. 7 Experimental setup for Doppler shift determination by light beat method

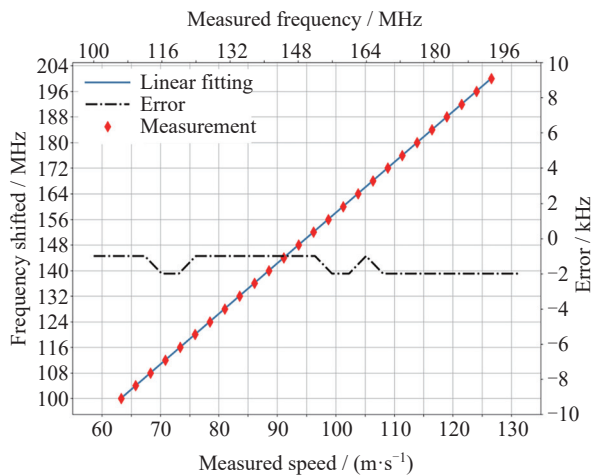


图 8 光拍频法测量结果

Fig. 8 Measurement results of the light beat method

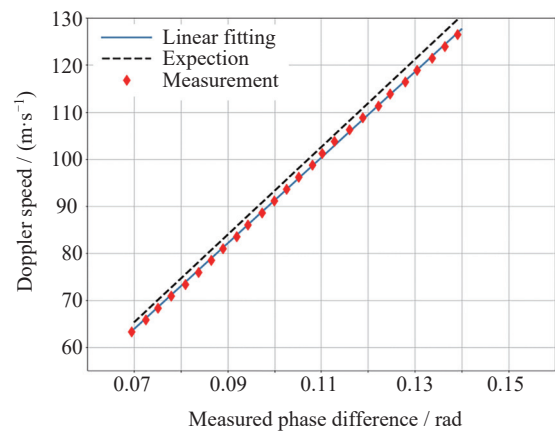


图 9 声光移频式测风标定系统实验结果

Fig. 9 Experimental results of wind measurement calibration system of AOFs

论值与标定结果代入式 (7), 计算得到如图 10 所示的标定前后测量对比结果. 标定前, 测量值的负偏差明显, 最大误差超过 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 误差的均方根为 $2.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 标定后, 最大误差约为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 误差的均方根为 $0.44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 不再有明显的系统偏差, 这一结果证明了仪器标定的重要性. 实验结果中出现的随机误差, 可能源自多个方面: 一是标定系统本身存在一定的不确定度; 二是图像传感器自身噪声引起的误差; 三是信号处理过程中窗函数、离散傅里叶变换以及逆变换引入的误差. 而声光移频式测风标定系统的随机误差比反射转盘式测风标定系统更小, 进一步说明该系统具有更高的稳定性.

2.3 测风敏感系数转换

标定系统中的光源与实际气辉辐射在波长上存在差异, 在光的色散效应的影响下, 实际测风过程中的敏感系数偏离实验室标定值. 因此, 为了确保测量结果的准确性, 必须对实验标定值进行适当换算, 以适应实际测量条件.

目标光源波数是 σ_1 和 σ_2 时, 仪器的测风敏感系数 C_1 和 C_2 分别表示为

$$C_1 = \frac{c}{2\pi L_1 \sigma_1}, \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{c}{2\pi L_2 \sigma_2}. \quad (11)$$

由此, 二者的换算关系为

$$C_2 = C_1 \frac{L_1 \sigma_1}{L_2 \sigma_2}. \quad (12)$$

其中, L_1 和 L_2 分别是光源波数为 σ_1 和 σ_2 时对应的光程差. 根据光程差的定义 $L = 4\tan\theta x + D$, 在考虑干涉图中央关于 $x = 0$ 对称区域的平均相位时, $L = D$. 因此, 式 (12) 可以改写为

$$C_2 = C_1 \frac{D_1 \sigma_1}{D_2 \sigma_2}. \quad (13)$$

根据式 (5) 分别计算光源波长对应的有效光程差, 即可得到测风敏感系数的换算关系.

3 结语

科学标定非对称空间外差干涉仪对于提升其测风精确度具有至关重要的意义, 这一流程不仅局限于仪器出厂前的校准, 对于长期部署于野外台站的观测设备而言, 定期执行标定同样不可或缺. 本文提出的测风敏感系数的概念, 为非对称空间外差干涉仪的标定提供理论依据, 系统地研究并对比了两种典型的标定技术, 为标定系统的选择提供参考.

在选择标定系统时, 应着重考虑精确性、稳定性及适用性几个关键方面. 首先, 精确性作为标定系统的首要考量因素, 通过精细的设计与精密的装配, 两

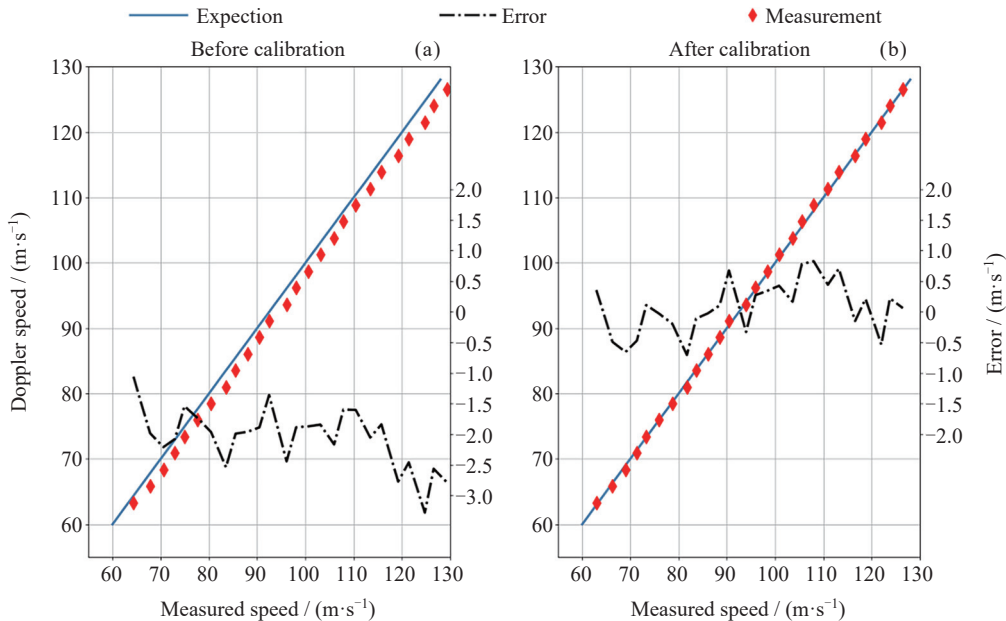


图 10 标定前后测量结果对比

Fig. 10 Comparison of measurement results before and after calibration

表 3 反射转盘式测风标定系统的精确度
Table 3 Precision of wind measurement calibration system of reflection wheel

反射转盘式测风标定系统	精确度/(m·s ⁻¹)
Babcock ^[17]	≪ 1
Shen ^[18]	2.92
Dötzer ^[19]	2
Kuang ^[20]	10.8
Wei等 ^[12]	≈ 3

种系统均能满足测风精度的需求. 然而相比反射转盘式测风标定系统, 声光移频式测风标定系统展现出更低的不确定度, 其误差已降至米每秒量级以下, 从而赋予干涉仪更高的测风精度. 在表 3 中列出了一些重要的采用反射转盘式测风标定系统的标定结果, 其误差也普遍高于 2 m·s⁻¹. 其次, 稳定性方面, 该系统依赖于电机的高速旋转, 这不仅增加了实验的安全隐患, 还可能影响整个系统的稳定性. 在标定过程中, 难以实时监测由旋转不稳定性引发的电机驱动系统相位漂移, 这可能会引入额外的误差源. 最后, 在适用性层面, 两个系统各具特色. 反射转盘式标定系统能够兼容几乎所有的标定光源, 展现出广泛的适用性; 而声光移频式测风标定系统则主要支持激光光源, 这一特性限制了其对于特定波长工作的非对称空间外差干涉仪的标定范围. 然而, 声光移频式测风标定系统凭借其小巧轻便的结构与便捷的使用方式, 易于集成至移动便携式设备中, 可作为传递标准, 用于地面测风网络的内部校准, 展现出独特的优势.

参考文献

[1] EMMERT J T. Thermospheric mass density: a review[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **56**(5): 773-824

[2] IMMEL T J, ENGLAND S L, MENDE S B, *et al.* The ionospheric connection explorer mission: mission goals and design[J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**(1): 13

[3] LIU Weining, BLANC M, WANG Chi, *et al.* Scientific challenges and instrumentation for the International Meridian Circle Program[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **64**(12): 2090-2097 (刘维宁, BLANC M, 王赤, 等. 国际子午圈计划的科学挑战和观测系统 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, **51**(12): 2056-2062)

[4] DHADLY M, SASSI F, EMMERT J, *et al.* Neutral winds

from mesosphere to thermosphere—past, present, and future outlook[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **9**: 1050586

[5] WANG Chi, WANG Yuming, TIAN Hui, *et al.* Strategic study for the development of space physics[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(1): 9-42 (王赤, 汪毓明, 田晖, 等. 空间物理学科发展战略研究 [J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(1): 9-42)

[6] SHEPHERD G G, THUILLIER G, GAULT W A, *et al.* WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, **98**(D6): 10725-10750

[7] 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

[8] MERIWETHER J W. Studies of thermospheric dynamics with a Fabry-Perot interferometer network: a review[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, **68**(13): 1576-1589

[9] ZHANG C M, WU Q M, MU T K. Influences of pyramid prism deflection on inversion of wind velocity and temperature in a novel static polarization wind imaging interferometer[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(32): 6134-6139

[10] 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

[11] 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

[12] WEI D K, GONG Q C, CHEN Q Y, *et al.* Modeling and correction of fringe patterns in Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometry[J]. *Applied Optics*, 2022, **61**(35): 10528-10537

[13] HARLANDER J M, ENGLERT C R. Laboratory demonstration of mini-MIGHTI: a prototype sensor for thermospheric red-line (630 nm) neutral wind measurements from a 6U CubeSat[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, **207**: 105363

[14] ZHU G Y, ZHU Y J, KAUFMANN M, *et al.* An efficient calibration system of optical interferometer for measuring middle and upper atmospheric wind[J]. *Remote Sensing*,

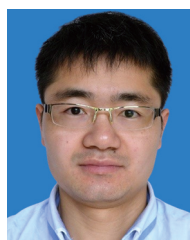
- 2023, **15**(7): 1898
- [15] WEI D G. Development of an Optical Instrument for the Observation of Neutral Winds in Earth's Upper Atmosphere[D]. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, 2020
- [16] LIU J L, WEI D K, ZHU Y J, *et al.* Effective wind and temperature retrieval from Doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer interferograms[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(30): 8829-8835
- [17] BABCOCK D D. Development of a Space Flight Prototype Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne (DASH) Spectrometer for the Measurement of Upper Atmospheric Winds[R]. Ohio: Air Force Research Laboratory, 2011
- [18] SHEN Jing. Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Technique for Wind Detection in the Upper Atmosphere[D]. Hebei: University of Science and Technology of China, 2017 (沈静. 中高层大气风场探测多普勒非对称空间外差技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017)
- [19] DÖTZER F. Calibration of a Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer for Atmospheric Wind Measurements[D]. Freistaat Bayern: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nuernberg, 2019
- [20] KUANG Yinli. Research on Radial Velocity Measurement Technology Based on Doppler Asymmetric Space Heterodyne Interferometer[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020 (况银丽. 基

于非对称空间外差干涉仪的多普勒测速技术研究 [D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2020)

作者简介



朱光逸 男, 1995 年 11 月出生于黑龙江省哈尔滨市, 中国科学院国家空间科学中心在读博士研究生, 主要研究方向为中高层大气风场探测与反演.
E-mail: gyzhu@swl.ac.cn



朱亚军 (通信作者) 男, 1985 年 8 月出生, 中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为中高层大气动力学、光化学以及辐射等物理过程和机制、中高层大气地基和卫星探测数据的分析和反演算法, 以及被动光学遥感探测仪器的研发工作.
E-mail: y.zhu@swl.ac.cn



徐寄遥 (通信作者) 男, 1959 年 1 月出生, 中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 主要研究方向为中高层大气光化学和动力学以及辐射过程, 中高层大气探测技术、信息处理以及分析方法, 空间物理学探测和实验方案的设计和研究.
E-mail: jyxu@spaceweather.ac.cn