

“西光所建所六十周年暨《光子学报》创刊五十周年”专辑

引用格式: XIAO Yang, FENG Yutao, WEN Zhenqing, et al. Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometry for Wind Measurement in Middle and Upper Atmosphere (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(8):0851516

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

# 中高层大气风场探测多普勒差分干涉技术 (特邀)

肖旻<sup>1,2</sup>,冯玉涛<sup>1</sup>,文镇清<sup>1,2</sup>,傅頔<sup>1,2</sup>

(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,西安 710119)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

**摘 要:**大气风场是理解地球大气系统动力学、热力学特性的重要参数,是气象预报、空间环境监测、气候学研究等必须的基础数据。基于测风干涉仪的被动光学遥感是中高层大气风场测量的主要技术手段。多普勒差分干涉测风技术是一种新型行星大气风场探测技术,该技术通过对干涉图相位的反演来探测大气气辉辐射谱线的多普勒频移,从而实现大气风场探测。经过近二十年的时间,多普勒差分干涉仪的基础理论、干涉仪设计、系统研制工艺、数据处理与风速反演等方面取得了一系列研究成果。本文回顾了大气风场探测多普勒差分干涉仪技术的国内外研究进展,讨论其技术特点和应用潜力,为未来大气风场被动光学遥感探测技术发展和我国大气风场探测领域任务规划提供参考。

**关键词:**大气风场探测;光学干涉仪;多普勒差分干涉;精细光谱

中图分类号:TH744

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225108.0851516

## 0 引言

风场作为表征中高层大气动力学特征的重要参数,是认识高层大气的物理现象和过程、揭示基本规律及其变化、研究与下层大气之间动量、能量和成分输运、建立预报预测模型所不可或缺的基础数据<sup>[1]</sup>。同时也对理解当前地球科学研究中广泛关注的日-地系统的天气和气候变化及能量收支平衡、地球系统的气候变化和环流变迁及预测等重大科学问题有重要帮助。高层大气风场还对电离层预报模式的精度具有不可忽略的影响,进而影响无线电传输及通讯<sup>[2]</sup>。在应用领域,中高层大气风场还是航天器发射、运行和返回过程的安全保障、亚轨道飞行器和临近空间平台的运行控制、无线电通信等领域的重要环境保障要素。因此中高层大气风场观测技术也一直是大气探测和空间环境监测领域的重要研究方向。

地基被动光学遥感是获取中高层大气风场直接观测数据的重要手段,20世纪60年代国际上开始利用地基光学干涉仪开展高层大气风场探测,并同步开展地基中高层大气风场探测干涉仪载荷技术试验研究。先后基于法布里-珀罗(Fabry-Pérot interferometer, FP)干涉仪、广角迈克尔逊(Wide Angle Michelson Interferometer, WAM)干涉仪两种体制发展出了一系列代表性科学仪器和卫星载荷。据MERIWETHER JW统计截止2006年全世界至少有10个天文台拥有有效工作的地基中高层大气风场测量Fabry-Perot干涉仪和广角迈克尔逊干涉仪,这些天文台观测得到的数据帮助人们理解中间层和热层过去三十年不同地区包括赤道、中纬度、极地区域的动力学特征<sup>[3]</sup>。随着国家重大科技基础设施—空间环境地基综合监测网“子午工程”和国家气象局空间天气监测预警中心监测网的建设推进,国内也已有近十个台站安装了地基高层大

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 41005019),中国科学院西部青年学者(No. XAB 2016A07),陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2019JQ-931),中国科学院西部之光交叉团队(No. E1294301),中国科学院科研仪器设备研制项目(No. YJKYYQ20210021)

**第一作者:**肖旻(1984—),女,博士研究生,主要研究方向为光谱成像技术。Email: xiaoyangopt@163.com

**导师(通讯作者):**冯玉涛(1980—),男,研究员,博士,主要研究方向为光谱成像及精细光谱探测。Email: fyciom@126.com

**收稿日期:**2022-05-17; **录用日期:**2022-08-11

<http://www.photon.ac.cn>

气风场探测仪器,以引进的美国研制 Fabry-Perot 干涉仪为主<sup>[4]</sup>。

天基中高层大气风场探测不受地理和气象条件限制,可提供全球尺度的空间覆盖,对建立全球尺度大气风场高分辨率高效率探测具有更加重要的意义。1969年发射的轨道地球物理观测台6号(Orbiting Geophysical Observatory-6,OGO-6)卫星上的 Fabry-Perot 干涉仪是第一个星载高层大气温度探测的 F-P 干涉仪,也是唯一一台星载球面标准具 F-P 干涉仪<sup>[5]</sup>。1982年发射的动力学探测2号(Dynamics Explorer-2,DE-2)卫星上的动力学探测者 F-P 干涉仪(Dynamics Explorer-Fabry Perot Interferometer,DE-FPI),它首次实现了高层大气风场的卫星测量<sup>[6]</sup>。1991年高层大气研究卫星(Upper Atmosphere Research Satellite,URAS)上搭载的高分辨率多普勒成像仪(The High-Resolution Doppler Imager,HRDI)第一次直接测量了同温层、中间层和低热层地球大气的水平风场<sup>[7]</sup>。2001年搭载于电离层中层能量学和动力学(Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics,TIMED)卫星上的多普勒干涉仪(TIMED Doppler Interferometer,TIDI),它是在 DE-FPI 和 HRDI 成功应用的基础上,进一步开发研制的新一代高分辨率 F-P 干涉式光谱成像仪。TIDI 首次实现了对与卫星速度方向成 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 135^\circ$ 四个方向同时探测,第一次使用环转线成像光学系统和高量子效率低噪声 CCD<sup>[8]</sup>。由于系统方案过于激进,杂散光未得到有效抑制导致风速测量精度较低,风场观测数据未得到广泛应用。1991年搭载在美国宇航局 UARS 上的风场成像干涉仪(Wind Imaging Interferometer,WINDII)是第一个发射升空的用于上层大气风场被动探测的迈克尔逊干涉仪,该载荷由加拿大空间署和法国国家空间研究中心联合发起研制,主要任务是探测中高层大气(80~300 km)风速、温度、气辉体发射率<sup>[9]</sup>。

F-P 干涉测风技术具有精度高、光程差对温度依赖性小以及结构简单的优点,但是视场较小难以展宽,而且标准具对制造工艺要求极高。迈克尔逊干涉仪克服了 F-P 干涉仪对制造工艺的高要求,可以通过扩视场技术提高光通量,提高信噪比,但迈克尔逊干涉仪依赖四步相位法的原理,需要获得相位不同的四幅干涉图进行反演计算,对机械结构和镀膜工艺的要求较高,导致结构复杂,装配难度变高,成本提升。

多普勒差分(Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne,DASH)干涉技术是2006年由美国海军实验室 ENGLERT C R 研究团队提出的一种全新的大气风场探测技术。该技术实质为一种非对称形式空间外差干涉仪,其通过差频干涉获得高光谱分辨率,通过两臂非对称设计产生大基础光程差实现高相位灵敏度,其利用干涉图和入射光谱之间的完善傅里叶变换关系,通过计算复数干涉图相位来反演入射光谱的多普勒频移。2010年,HARLANDER J M 设计了地基多普勒差分干涉光谱仪(Redline DASH Demonstration Instrument,REDDI),成功对250 km 高度附近的热层风速和风向进行了测量,测量结果与法布里-珀罗干涉仪技术观测到的风速总体上一致<sup>[10]</sup>。2012年 ENGLERT C R 团队公布了 DASH 地基单波段(630 nm 气辉源)原理样机对250 km 高度热层风场的观测结果,并与成熟商品化 Fabry-Perot 干涉仪进行对比,观测结果优异<sup>[11]</sup>。2013年加拿大约克大学 GORDON G S 教授团队将同温层输运研究风场干涉仪(Stratospheric Wind Interferometer for Transport studies,SWIFT)技术体制由基于广角迈克尔逊干涉体制调整为基于多普勒差分干涉体制(Stratospheric Wind Interferometer for Transport studies-Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne,SWIFT-DASH),拟通过观测臭氧分子 8.822 7  $\mu\text{m}$  发射谱线测量平流层、中间层的风场和臭氧浓度<sup>[12]</sup>。2013年全球高分辨率热层成像干涉仪(Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging,MIGHTI)入选 NASA 电离层连接探测项目(Ionospheric Connection,ICON),该载荷通过观察 557.7,630 nm 氧原子绿线和红线的多普勒频移,对80~300 km 的高度区域进行全球风场探测<sup>[13]</sup>。

国内中科院西安光机所提出了双波段多普勒差分干涉仪技术方案<sup>[14]</sup>和高时间分辨率地基多普勒差分干涉仪方案,并研制了分别以氧原子 630 nm 和氧分子 867 nm 气辉辐射线为目标源的单通道 DASHI 原理样机<sup>[15-16]</sup>。中科院空间中心、安徽光机所、成都光电所等团队在多普勒差分干涉仪技术原理、数据反演、相位分析、系统仿真等方面也取得了一系列研究成果<sup>[17-20]</sup>。

与 Fabry-Perot 干涉仪和广角 Michelson 干涉仪相比,多普勒差分干涉仪具有以下优点:1)双光束等厚空间调制干涉,放宽了对元件光学指标的要求;2)干涉图一次采集不需要步进扫描;3)依靠干涉图与光谱图之间的傅里叶变换关系反演风速,不需要极窄带宽( $<1\text{ nm}$ )的滤光片分离单一线光谱;4)可实现同步定标,定标光源标准谱线和探测源目标谱线同时引入干涉仪系统实时监测干涉仪状态变化,进一步提高测量精度。

这些特点使多普勒差分干涉光谱技术被称为“行星风场探测的革新性概念”<sup>[21]</sup>。本文将系统回顾多普勒差分干涉仪的基础理论、干涉仪设计、系统研制工艺、数据处理与风速反演等方面取得了一系列研究进展,讨论其技术特点和应用潜力,为推动多普勒差分干涉测风技术进步和仪器装备天地基应用提供参考。

## 1 多普勒差分干涉测风技术原理

光学干涉仪探测大气风场的基本物理原理是测量大气成分光谱的多普勒效应,大气成分( $O_2$ , Na, O,  $O_3$ , OH等)的精细发射谱或吸收光谱会随着大气运动和温度变化产生多普勒频移和展宽,天基和地基测风干涉仪采用临边观测模式(图1(a))和方位扫描模式(图1(b)),获取大气目标源精细光谱的干涉图数据,通过干涉图的相位、对比度、幅值变化可获得大气光谱的多普勒频移、展宽和强度变化,进而反演出沿观测视线方向的风速、温度、辐射率等大气物理参数。对于天基大气探测还需要对应的迭代优化算法进一步从直接反演相位中解离出风场高度廓线,地基探测则需要利用四个倾斜观测方向上的视线速度合成出经向风和纬向风数据。

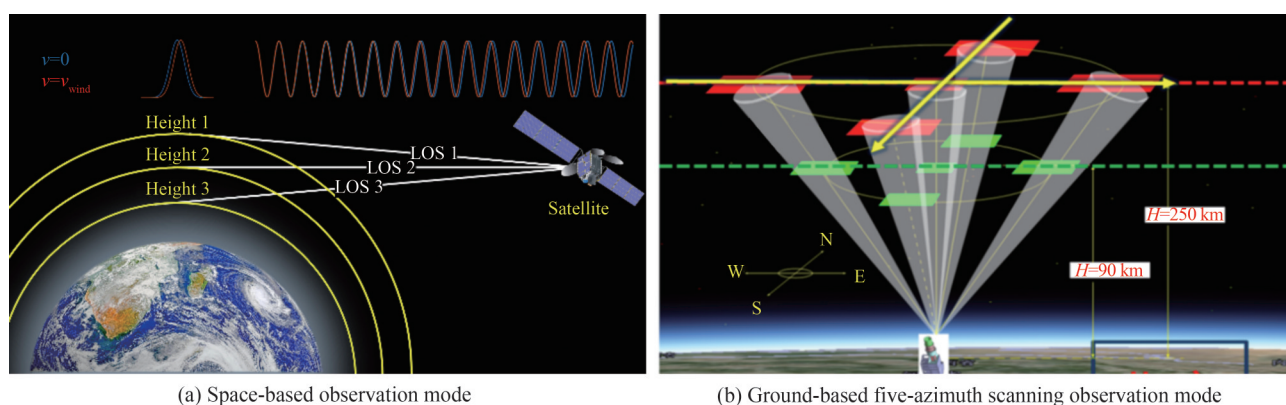


图1 天基和地基被动光学遥感大气风场探测观测模式

Fig.1 Space-based and ground-based passive optical remote sensing atmospheric wind field observation mode

多普勒差分干涉光谱技术是在广角迈克尔逊干涉仪和空间外差干涉光谱仪的基础上发展出来的。其基本结构与广角迈克尔逊干涉仪相似(如图2所示),两干涉臂相对分束元件呈非对称结构设置,从而为两臂相干光引入一个大的基础光程差,以实现高的相位灵敏度;但平面反射镜和玻璃平板分别用闪耀光栅和特

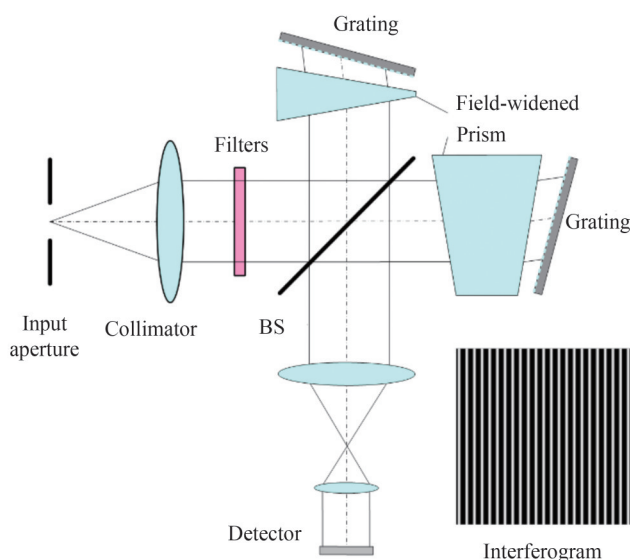


图2 多普勒差分干涉仪示意图<sup>[60]</sup>

Fig.2 Schematic of Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer<sup>[60]</sup>



定楔角棱镜替代,实现双光束等厚空间调制干涉,干涉图为平行干涉条纹<sup>[22]</sup>。

从干涉原理和傅里叶变换光谱学基础理论角度讲,其与广角迈克尔逊干涉仪和空间外差干涉仪在理论上存在显著差异。首先与测风广角迈克尔逊干涉仪相比,多普勒差分干涉仪的干涉图采集是以基础光程差为中心的完整光程差采样点序列,不是“四步法”对应的四个光程差采样。仍满足光谱复原的最大光程差采样要求,因此对干涉图进行逆傅里叶变换后,在光谱维可以高光谱分辨率区分目标源谱线和临近非目标谱线,这是广角迈克尔逊干涉仪无法做到的。所以多普勒差分干涉仪可以降低对工作波段滤光片带宽的要求,且能够实现同步相位定标。

与空间外差干涉光谱技术相比,由于多普勒差分干涉仪引入一个大基础光程差,复原光谱会存在十分巨大的相位误差,由傅里叶变换光谱学理论可知,这将导致复原光谱幅值错误,因此无法像空间外差光谱仪那样进行连续光谱辐射的正确测量(如图3所示)。在相同 Littrow 波数、相同光谱分辨率条件下,对于相同入射光谱辐射曲线,空间外差干涉光谱仪可以反演出完全相同形状的复原光谱曲线,而多普勒差分干涉仪复原光谱谱形是完全错误的。

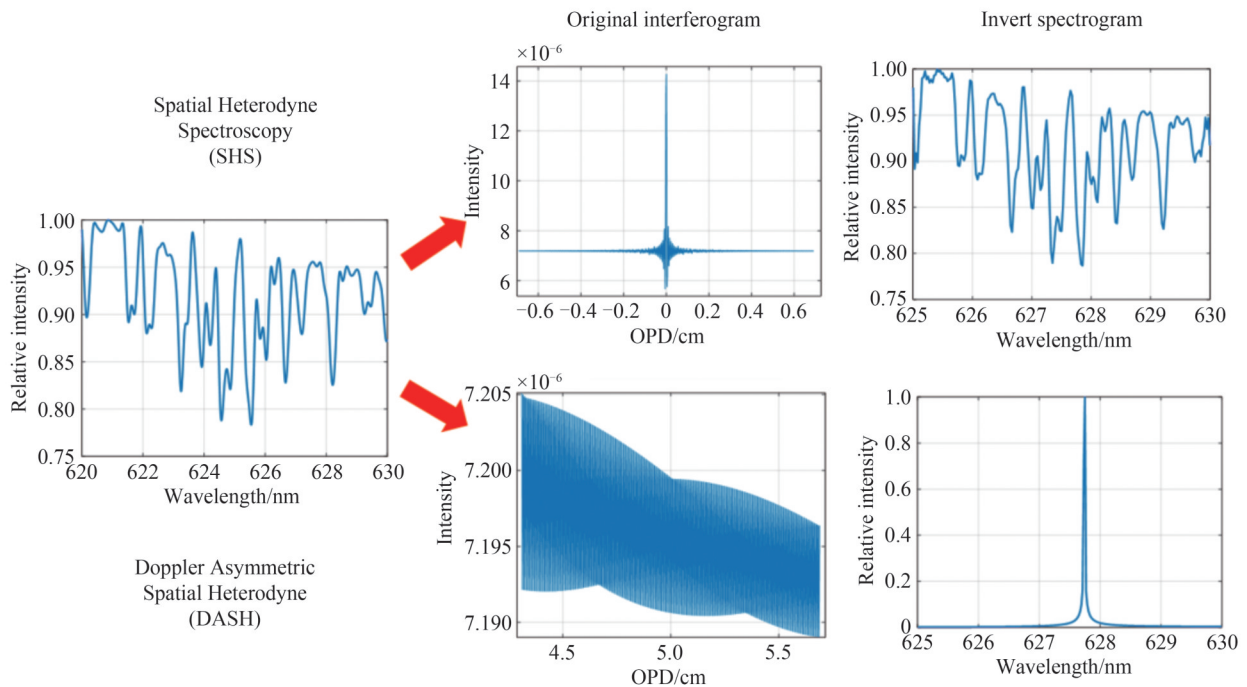


图3 SHS与DASH光谱反演能力比对

Fig.3 Comparison of spectral inversion capabilities between SHS and DASH

反之,空间外差干涉技术面向精细光谱辐射曲线准确探测,双边采样情况下理想干涉图采样中心点光程差为零;工程实践中,干涉仪追求两臂相对分束元件尽量对称以减小零光程差采样点的相位误差,且光谱复原过程中需要采用校正算法消除相位误差对光谱谱型的影响。所以,空间外差光谱仪对入射光谱多普勒频移的相位响应灵敏度极低,不能用于基于相位反演的目标光谱多普勒效应测量。如图4所示在相同 Littrow 波数、相同光谱分辨率条件下,对于相同的频移量  $0.0529 \text{ cm}^{-1}$ ,空间外差光谱仪最大相位变化量仅为  $0.18 \text{ rad}$ ,多普勒差分干涉仪的相位变化量达到  $1.5 \text{ rad}$ 。

多普勒差分干涉技术与空间外差干涉技术分别面向高灵敏度相位测量及高精度光谱测量的差异化应用场景,具备不同的仪器特点。由于多普勒差分干涉技术需要在较大的光程差下实现极高的相位灵敏度,其要求干涉仪具有极高的自身稳定性,且非对称结构的干涉效率保持、干涉仪热补偿设计及工程实施均更有挑战性,而空间外差干涉仪不面临上述技术问题。

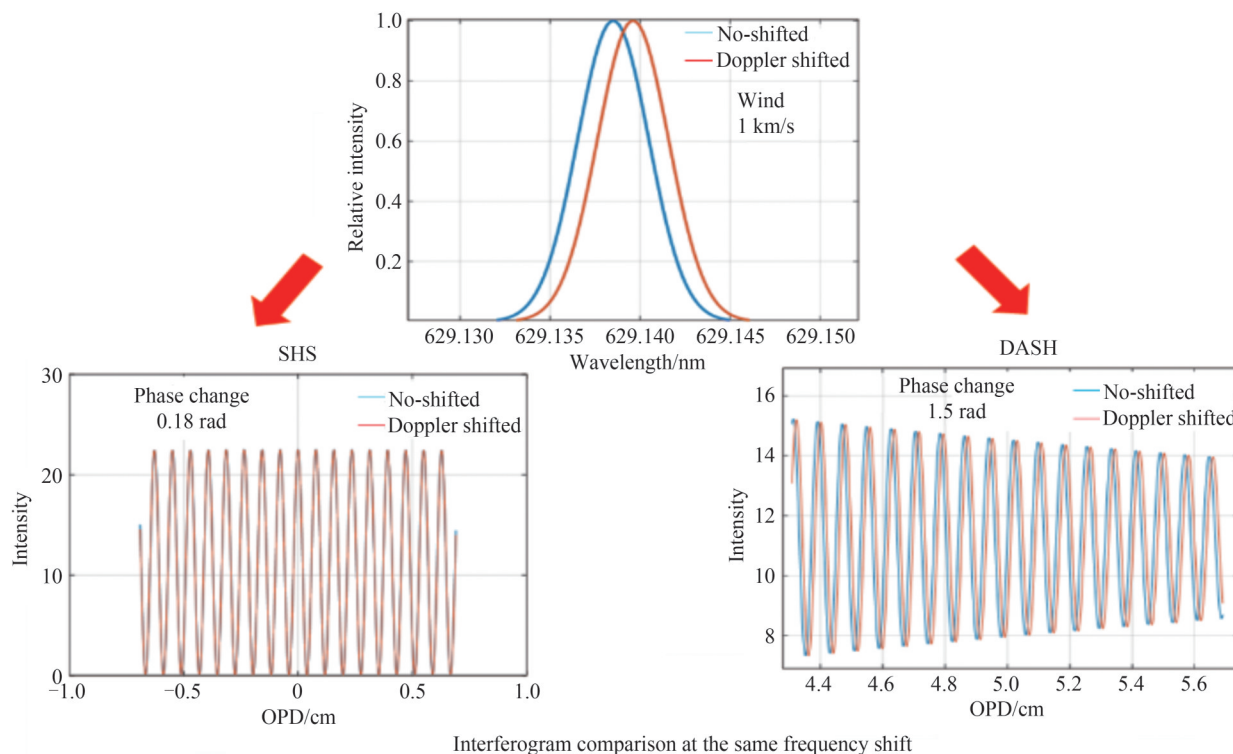


图4 SHS与DASH多普勒频移灵敏度比对

Fig.4 Comparison of Doppler shift sensitivity between SHS and DASH

## 2 多普勒差分干涉仪理论研究进展

2006年ENGLERT C R提出多普勒差分干涉光谱技术,国内外大气探测和精细光谱探测领域多家研究机构随即跟进研究。理论研究方面,在干涉图相位解析表达、直接相位反演方法、干涉图缺陷及预处理方法、干涉图质量与相位反演不确定度的理论关系、热补偿设计理论、基准相位定标理论、星载观测风廓线反演方法等方面均取得了系统性进展。

### 2.1 干涉图解析表达及相位反演理论

ENGLERT C R基于空间外差干涉光谱技术和傅里叶变换光谱学理论给出了多普勒差分干涉公式的解析表达,如式(1)所示,该表达式数学形式规整,但不能准确反应基础光程差变化对相位稳定性影响的敏感性<sup>[22]</sup>。ZHANG Yafei提出了多普勒差分干涉仪相位精确表达式(2),并通过实验证明基础光程差变化带来的相位变化与目标光谱波数成正比<sup>[23]</sup>。

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

$$I = I_0 \left\{ 1 + \cos \left\{ 2\pi \left[ 4(\sigma - \sigma_L) \tan \theta_L \cdot x + 2\sigma \cdot \Delta d \right] \right\} \right\} \quad (2)$$

ENGLERT C R给出基于傅里叶变换光谱学理论的复干涉图虚部与实部比值反正切计算多普勒差分干涉仪相位反演方法,并指出多谱线同步探测下采用窗函数提取单一谱线,再通过复干涉图反演相位的理论方法,确立了多普勒差分干涉仪最核心的数理模型<sup>[22-24]</sup>。基于上述理论框架,国内外学者进一步对影响相位反演精度的因素进行了理论分析。ENGLERT C R给出了干涉图噪声向反演相位传递的理论关系,指出反演相位噪声与干涉图信噪比成反比、与干涉图采样点和窗函数宽度的平方根成正比。SUN Chen进一步指出上述信噪比为有效信噪比,等于干涉图直接信噪比和干涉图条纹对比度的乘积<sup>[15-16]</sup>。沈静、陈洁婧等讨论了窗函数类型对相位反演精度的影响,得出通常情况下汉宁窗为单线提取的最优选择<sup>[25-26]</sup>。

LIU Jilin等提出一种基于Hilbert变换的干涉图相位反演方法,主体思路是将零风速和有风速两组干涉数据去基线之后的余弦信号  $y_i(x) = A(x) \cos(\omega x + \varphi_i)$  进行Hilbert变换得到共轭信号  $\hat{y}_i(x)$ ,再计算得到

两组干涉数据的相位差。这种反演方法的优点在于省略了傅里叶方法分别求两组数据各自相位再求相位的中间过程,避免了一些算法自身带来的误差,基于Hilbert变换的方法相较传统的傅里叶方法在数据低信噪比时有精度优势<sup>[27]</sup>。

多普勒差分干涉仪通过计算相位变化反演入射光谱的多普勒频移,基准相位标定是计算相位变化的基础,ENGLERT C R研究了稳频线谱标准灯相位与大气气辉光谱基准相位传递的理论关系,并指出多普勒差分干涉仪同步定标的技术优势。面向天基应用,MIGHTI载荷提出采用卫星机动前后两个方向观测同一大气区域进行零风速相位定标的技术方案<sup>[22,28-29]</sup>。

## 2.2 干涉仪设计及热补偿理论

相比于空间外差光谱仪,多普勒差分干涉仪设计还需解决在大光程差采样情况下干涉效率优化和保持基准相位稳定性的热补偿问题。多普勒差分干涉仪基础光程差由两臂视场棱镜尺寸及视场棱镜与分光棱镜间距共同确定,两臂呈现明显非对称性,HARLANDER J M从几何光学角度指出干涉仪两臂光栅像垂直于光轴且相互重合时干涉仪干涉效率最优<sup>[30]</sup>。另外提出了视场棱镜材料折射率温度系数与光栅基底热膨胀系数之间的匹配关系,并参考广角迈克尔逊干涉仪热补偿设计方法,提出实体化多普勒差分干涉仪间隔支撑元件材料与视场棱镜材料热膨胀系数的匹配关系<sup>[10]</sup>。另外,为拓展多普勒差分干涉仪的探测能力,借鉴宽谱段空间外差光谱谱段拓展方法,国内外提出了多种多普勒差分干涉仪设计方案,包括基于中阶梯光栅多级衍射<sup>[10,31]</sup>、双通道分色共用分光棱镜<sup>[32-33]</sup>、光栅堆叠共用分光棱镜等<sup>[34]</sup>。并提出了适用于宽谱段干涉仪的视场展宽棱镜设计方法<sup>[35]</sup>,多通道干涉图同步获取方法,如分色条纹成像系统<sup>[36]</sup>,视场耦合前置系统等<sup>[37-38]</sup>。形成了四类有代表性的干涉仪结构形式,如图5。

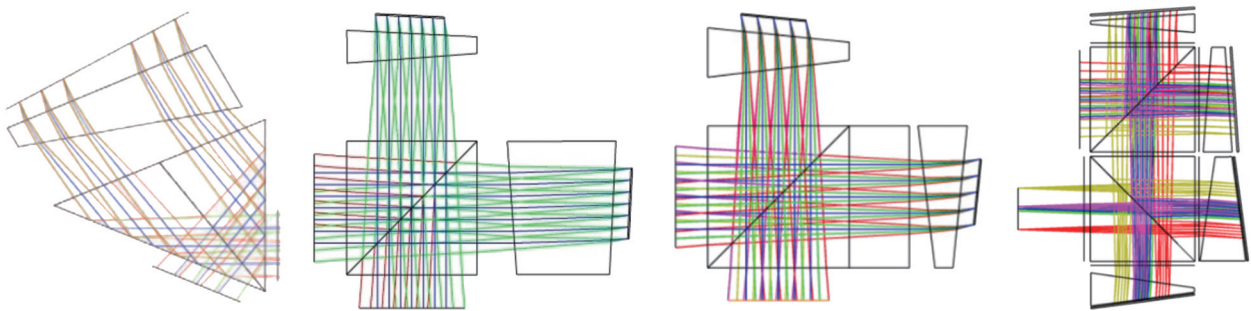


图5 多普勒差分干涉仪四种典型结构形式(Zemax图)

Fig.5 Four typical structural forms of DASH (Zemax diagram)

第一种是HARLANDER J M等提出的基于Koster棱镜的准共路多普勒差分干涉仪<sup>[10]</sup>,这种形式干涉仪两臂共用同一视场棱镜和光栅的不同部分,有利于热补偿和干涉仪集成误差控制,但相同指标下干涉仪尺寸较大。第二种是与广角迈克尔逊干涉仪完全相同的结构形式,采用 $90^\circ$ 或 $120^\circ$ 的分束元件,两干涉臂采用不同厚度的视场棱镜和不同材料的间隔元件实现基础光程差和热补偿,这种形式的干涉仪应用最为普遍<sup>[10]</sup>。第三种形式是在第二种形式的基础上将长臂视场棱镜差分成一个平行平板和一个与短臂视场棱镜相同的楔形棱镜,平行平板可单独集成到干涉仪光路中,例如GORDON G S报道的SWIFT-DASH<sup>[12]</sup>,也可以和分光棱镜做成一体,例如WEI Dakang报道的DASH<sup>[39]</sup>,这种结构可以解决红外材料尺寸受限的问题,但会增加干涉仪元件加工和组件集成的难度。第四种结构是HARLANDER J M等提出的实条纹多普勒差分干涉仪结构<sup>[40]</sup>,采用偏振分束元件、波片和不同色散率的光栅组成第二种形式的差分干涉仪,再将两套分辨率不同的干涉仪组合使干涉图定域面转移到干涉仪出口之外,从而可以在不增加其他二次成像镜组的情况下,直接可以用探测器接收到干涉图,这种干涉仪结构紧凑,但能量利用率低、杂散光大和集成复杂,未见实际应用。

## 2.3 干涉图预处理理论及方法

多普勒差分干涉仪与其他傅里叶变换光谱仪类似,在实践应用中原始干涉图数据质量会受到光学元件、光电传感器、光学系统的各种误差或缺陷的影响,进而会降低相位反演精度,因此自该技术提出以来,干涉图预处理方法的研究一直是相位反演技术研究的重要环节。由于多普勒差分干涉仪是由空间外差干涉



光谱技术衍生而来,国内外学者首先研究了干涉图平场对相位反演不确定度的影响,平场主要是为了消除干涉仪两臂元件光学性能不一致性或不均一性、探测器响应非均匀性引起的干涉图对比度降低或局部相位畸变<sup>[41-42]</sup>。对于天基多普勒差分干涉仪系统临边高度方向的数据反演要求仪器响应与观测临边高度无关,平场可修正垂直方向响应不均匀;水平方向干涉图相位反演受像元响应变化的影响,平场可修正水平方向像元响应不均匀,提高相位反演精度。于婷婷等分析了宇宙射线和探测器热像元形成的干涉图冲击噪声对相位反演精度的影响及近邻插值处理方法<sup>[43]</sup>。多普勒差分干涉仪的干涉图定域面与光电探测器感光面互为物像共轭关系,干涉图投射到面阵探测器上的成像位置的变化会导致反演相位的漂移,KENNETH D M提出在光栅面上刻蚀周期标尺图案并用拟合算法监测光栅与探测器之间共轭成像位置关系的变化,用以修正由于成像位置变化导致的相位漂移<sup>[44-45]</sup>。周冠系统分析了干涉图相位畸变来源及畸变对反演相位的影响,指出局部相位畸变对相位反演精度影响有限<sup>[46]</sup>。

#### 2.4 风廓线反演算法

面向天基临边观测模式,HARDING B J提出了基于“剥洋葱”思想的风场廓线反演方法<sup>[47-48]</sup>。基于临边观测模式及多层大气模型,进入仪器视场的光谱辐射信号包含了沿观测视线所穿过的所有大气光谱信号的累加,基于多层大气模型可将连续辐射积分干涉信号转化为不同大气区域干涉信号的累加,表示为

$$H_m(x) = \sum_{n=0}^m I_n(x) e^{i\Delta\phi_n \cos\alpha_{mn}} \omega_{mn} \quad (3)$$

其中各层大气区域干涉信号可表示为

$$I_n(x) = \frac{1}{2} \int_0^\infty B_n(\sigma) e^{i(2\pi\kappa x + \phi)} d\sigma \quad (4)$$

式中, $\Phi_n$ 为第 $n$ 层大气风速引起的相位变化量, $\alpha_{mn}$ 为观测第 $m$ 层大气时的观测视线方向与第 $n$ 层大气水平方向的夹角, $\Phi_n \cos\alpha_{mn}$ 表示观测第 $m$ 层大气时第 $n$ 层大气风速引起的相位变化量在观测方向的投影值。 $\omega_{mn}$ 为观测第 $m$ 层大气时第 $n$ 层大气信号所占的权重。

基于多层大气模型,观测每层大气所获取的干涉图均受到该层大气以上的各层大气的影,每层大气风速均会对该层大气以下的大气观测结果造成影响。根据上述多层大气模型,采用“洋葱剥皮”的多层大气修正方法。首先反演0层大气(顶层),再根据顶层大气风速反演结果,逐层向底层反演,即能获取各高度大气切点区域干涉信号,表示为

$$I_m(x) = \frac{1}{\omega_{mm}} (H_m(x) - \sum_{n=0}^{m-1} I_n(x) e^{i\Delta\phi_n \cos\alpha_{mn}} \omega_{mn}) \quad (5)$$

基于上述目标层干涉图求解流程,首先剥离目标层干涉图,再利用相位风速反演方法获取各层各切点区域对应视线风速信息。

### 3 多普勒差分干涉仪仪器研究进展

自2006年多普勒差分干涉测风技术被提出以来,美国海军实验室、空间实验室、加拿大约克大学、德国于利希研究所、中科院西安光机所等国内外多家研究机构相继开展硬件设计及研制工艺研究。2010年HARLANDER J M报道了基于Koster棱镜的氧原子红线(630 nm气辉源)多普勒差分干涉仪原理仪器(REDDI)设计及实验室测试结果,通过测试干涉图对比度与干涉光束孔径角、谱线半宽的关系验证了干涉仪设计<sup>[10]</sup>,通过温度拉偏测试验证了干涉仪热补偿效果,并指出干涉仪组件0.1℃的主动温控要求<sup>[10]</sup>,见图6。2012年公布了红线多普勒差分干涉仪(REDDI)在北卡莱罗那州皮斯加天文研究所对250 km高度热层风场的观测结果,并与成熟商品化Fabry-Perot干涉仪进行对比,观测结果符合良好<sup>[11]</sup>。

在美国空军实验室小型商业创新研究计划第一、二阶段项目支持下,面向天基中间层低热层/电离层(Mesosphere, Lower Thermosphere and lower Ionosphere, MLTI)大气风场探测发展了航天多普勒差分干涉仪原型样机的设计和研制,命名为多普勒风场大气红线干涉仪(Atmospheric Redline Interferometer for Doppler Winds, ARROW)<sup>[49]</sup>,见图7。ARROW原型样机以氧原子红线630 nm谱线为观测目标源,采用双视场共用一台Koster棱镜分光的多普勒差分干涉仪的系统方案,该样机经实验室多普勒源测试,结果显示速度反演精度优于2 m/s。为开展地基外场试验,样机前置系统更改为三视场拼接方式,在佛罗里达州托

纳比奇由安博瑞德航空大学研究团队与地基 Fabry-Perot 干涉仪开展为期一周的对比观测试验, 但仅公开报道了原始干涉图数据。

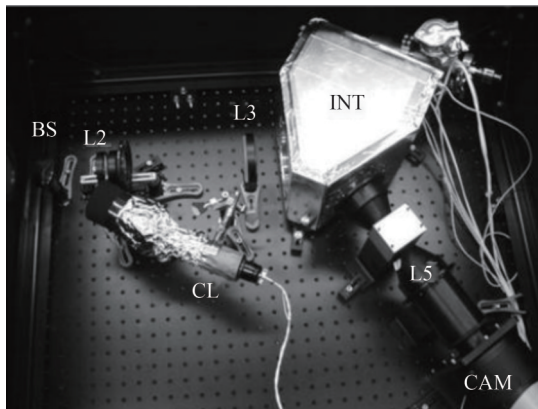


图6 地基多普勒差分干涉仪<sup>[10]</sup>  
Fig.6 The redline DASH demonstration instrument<sup>[10]</sup>

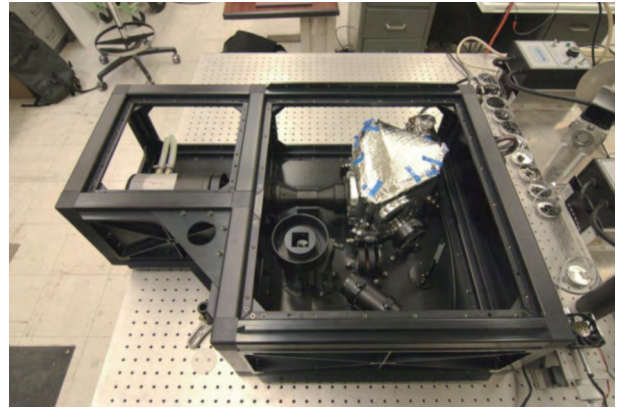


图7 多普勒风场大气红线干涉仪<sup>[49]</sup>  
Fig.7 The atmospheric redline interferometer for Doppler winds<sup>[49]</sup>

加拿大约克大学 SHEPHERD G G 教授团队将同温层输运研究风场干涉仪 (SWIFT) 技术体制由基于广角迈克尔逊干涉体制调整为基于多普勒差分干涉体制 (SWIFT-DASH), 拟通过观测臭氧分子  $8.8227\ \mu\text{m}$  发射谱线测量平流层、中间层的风场和臭氧浓度, 并研制了国际上首台长波红外多普勒差分干涉仪样机, 光谱分辨率达到  $0.029\ \text{cm}^{-1}$ , 干涉仪采用全玻璃和晶体一体化胶合集成工艺<sup>[50]</sup>, 见图 8。

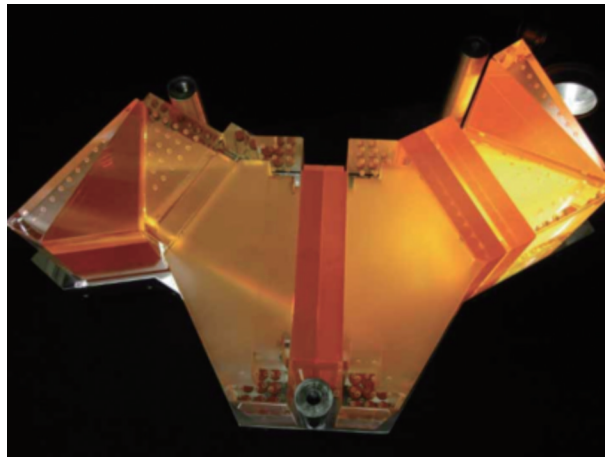


图8 同温层输运研究多普勒差分干涉 (SWIFT-DASH)<sup>[50]</sup>  
Fig.8 Stratospheric wind interferometer for transport studies—Doppler asymmetric spatial heterodyne<sup>[50]</sup>

2011~2015年西安光机所开展宽谱段多普勒差分干涉光谱技术研究。针对以氧原子  $557.7\ \text{nm}$  和  $630\ \text{nm}$  发射谱线为目标源进行中高层大气风场地基观测, 开展宽谱段多普勒差分干涉仪中阶梯光栅参数优化、消色差视场展宽设计、视线风速反演等理论研究。基于刻线密度为  $46.1\ \text{gr}/\text{mm}$  的中阶梯光栅、K9-BaF8消色差视场棱镜和  $120^\circ$  分光棱镜的宽谱段多普勒差分干涉仪研制了地基原理样机 (如图 9), 光谱分辨率  $0.29\ \text{cm}^{-1}$ , 基础光程差  $31\ \text{mm}$ , 氧原子绿线和红线对应衍射级次分别为 35 级和 31 级。在实验室采用 Kr 灯、Na 灯、Ne 灯对原理样机宽谱段干涉特性实现了验证。2016 年 1 月原理样机在云南丽江天文观测站进行了外场观测试验, 成功获取到氧原子  $630\ \text{nm}$  和  $557.7\ \text{nm}$  气辉外场观测干涉图, 见图 10。

2016 年开始, 西安光机所将研究重点由多普勒差分干涉仪技术研究转向工程关键技术和核心工艺攻关。在中科院西部青年学者项目支持下开展多普勒差分干涉仪热稳定性工艺研究, 着重研究实体化多普勒差分干涉仪热补偿方法、干涉仪玻璃元件成型方法、干涉仪组件胶合集成工艺、干涉仪支撑结构组件设计及集成工艺等<sup>[47-48]</sup>。研制了以氧原子红线  $630\ \text{nm}$  气辉为观测目标源的多普勒差分干涉仪稳定性工艺试验件,



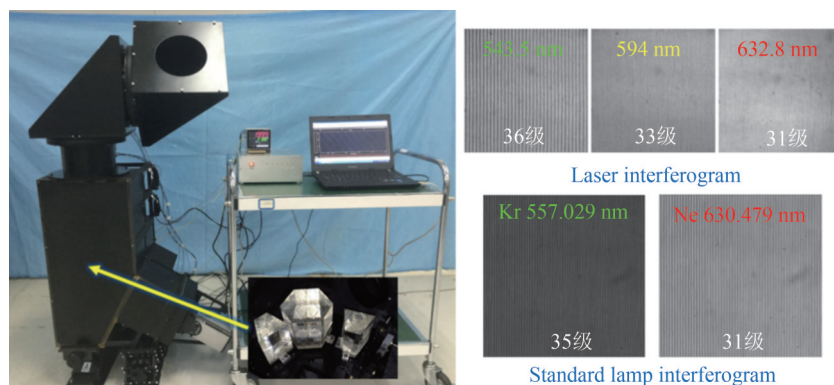


图9 宽波段多普勒差分干涉仪原理样机及标准光源干涉图

Fig.9 Prototype of broad-band Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer and interferogram of standard source

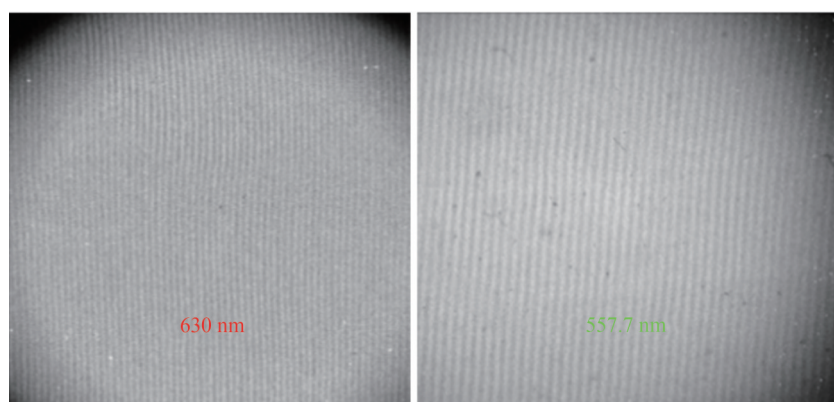


图10 外场试验采集到的630 nm和557.7 nm气辉的干涉图

Fig.10 Interferogram of the airglow 630 nm and 557.7 nm

利用稳频精度为2 MHz的He-Ne激光器测试干涉仪组件长期相位稳定性优于5 mrad,已达到工程实用化要求,标志着多普勒差分干涉仪核心干涉仪组件设计和研制工艺得到了系统性的突破<sup>[51]</sup>,见图11。

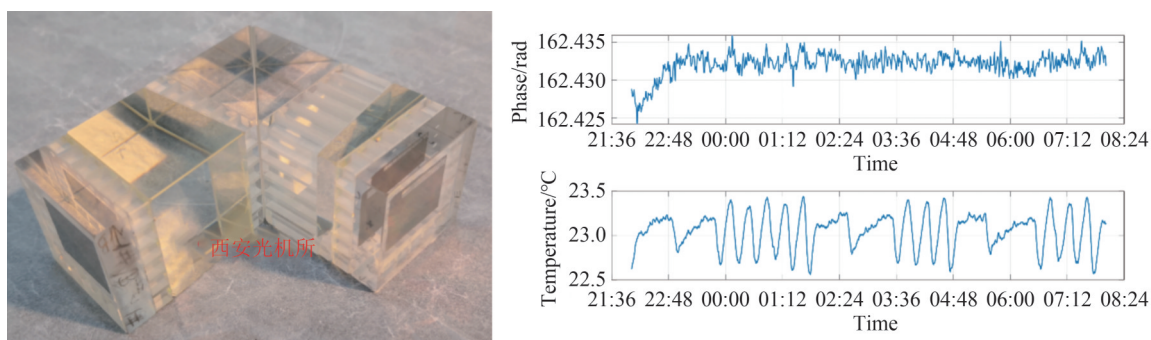


图11 多普勒差分干涉仪结构及稳定性测试结果

Fig.11 DASH structure and result of the phase stability experiment

德国 Jülich 研究中心(2020年)针对多普勒差分干涉仪的干涉仪设计和热稳定性等关键问题取得了多项研究成果,并研制了以630 nm气辉辐射线(发射光谱)为探测源的地基单波段多普勒差分干涉仪原理样机<sup>[39]</sup>。该干涉仪采用第三种干涉仪结构形式,并将长臂视场棱镜拆分出来的平行平板与分光棱镜做成一体。干涉仪实验室测试相位稳定性为0.469 rad/°C,也获得了外场观测的原始干涉图<sup>[52]</sup>,见图12。

基于多普勒差分干涉仪(DASH)技术体制的全球高分辨率热层成像干涉仪(MIGHTI)2013年入选NASA电离层连接探测项目(ICON),MIGHTI由美国海军实验室主导研制。载荷由两台正交安装(与卫星飞行方向45°和135°)的单机组成,载荷功能是测量全球尺度90~300 km水平大气风场矢量高度廓线和90~

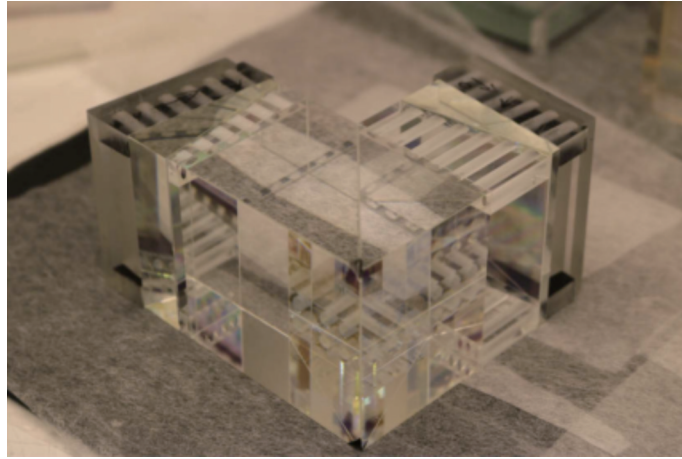


图12 Jülich研究中心研制的多普勒差分干涉仪<sup>[39]</sup>  
Fig.12 DASH developed by Jülich Research Center<sup>[39]</sup>

140 km 大气温度廓线。载荷的垂直空间分辨率为 5 km, 水平空间分辨率为 500 km。目标是为研究电离层强烈的扰动、底层大气与外层空间的能量和动量传输以及太阳风和磁场效应改变大气-空间系统相互作用的机制提供动力学和热力学基础观测数据<sup>[13]</sup>。该载荷采用中阶梯光栅谱段展宽、星上同步定标、双色分光条纹成像系统方案, 可同时测量 557.7 nm 和 630 nm 两个波段目标光谱和相应的定标谱线的干涉图(2020)<sup>[54-55]</sup>, ICON 卫星 2019 年 8 月发射, 使得 MIGHTI 成为国际上首台在轨应用的多普勒差分测风干涉仪载荷, 经与地基 FPI 测风干涉仪和流星雷达交叉检验(2021 年), 结果显示数据一致性良好, 首次证明了 DASH 天基应用潜力<sup>[56-57]</sup>, 见图 13。HARLANDER J M 等进一步将 MIGHTI 干涉仪组件改造成用于微纳卫星的小型化测风载荷, 由于卫星姿态控制精度和星上资源条件的限制, 载荷的空间分辨率和风速测量精度均会存在不同程度的降低<sup>[58]</sup>, 见图 14。

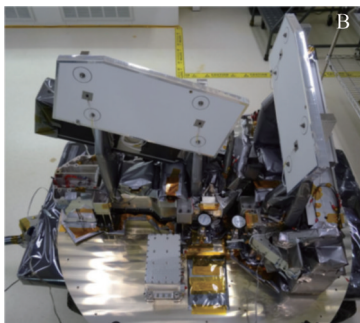


图13 MIGHTI 仪器图<sup>[29]</sup>  
Fig.13 Instrument diagram of MIGHTI<sup>[29]</sup>

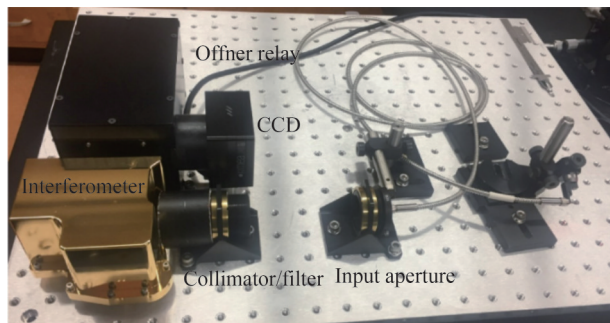


图14 mini-MIGHTI 实验室测试图<sup>[58]</sup>  
Fig.14 Laboratory test diagram of mini-MIGHTI<sup>[58]</sup>

2017 年至 2020 年, 中科院西安光机所牵头联合中科院空间中心、武汉物数所、北京应用气象研究所、中国地质大学等单位开展了星载宽谱段多普勒差分干涉仪关键技术研究工作, 见图 15。面向全球尺度平流层、中间层、热层大气风场探测, 突破了星载中高层大气风场探测总体技术、临边观测双视场耦合技术、星载可见光宽谱段多普勒差分干涉仪技术和长波红外多普勒差分干涉仪设计技术、星载高热稳定干涉仪技术、多普勒差分干涉仪高精度相位定标、中高层大气风场数据反演与质量控制等关键技术。实现了基于反射棱镜的双视场拼接和分色成像系统方案的验证; 实现了可见光双波段和近红外单波段实体多普勒差分干涉仪的成功研制, 并通过了航天环境适应性试验验证<sup>[59]</sup>, 见图 16。

2020 年受中科院空间中心委托研制“子午工程”II 期—地基高层大气风场探测干涉仪 630 nm 通道多普勒差分干涉仪核心模块, 见图 17。标志着研究所地基高层大气风场探测多普勒差分干涉仪步入应用阶段, 今年 630 nm 通道装备将投入外场观测应用, 通过与科学研究团队联合推进, 未来有望替代进口同类科学观测仪器。



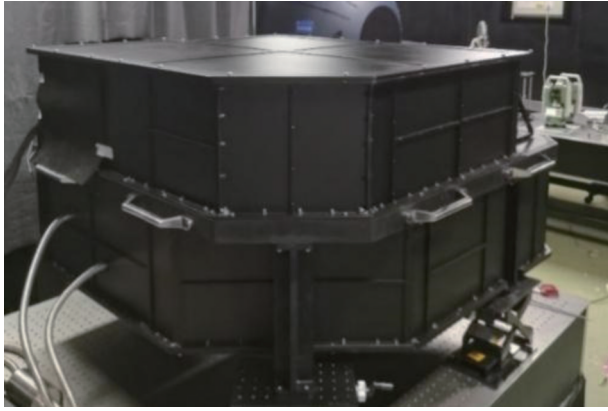


图15 星载宽谱段多普勒差分干涉仪工程样机  
Fig.15 Prototype of space-borne broad-band Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

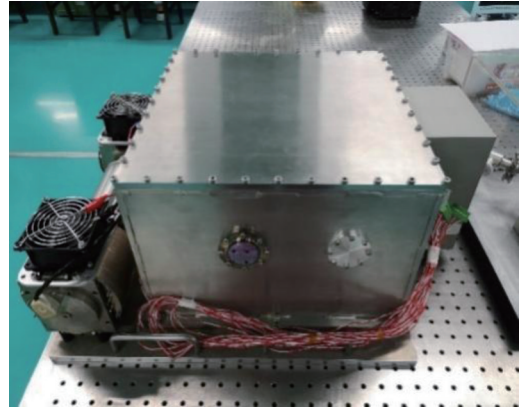


图16 长波红外差分干涉仪原理样机  
Fig.16 Prototype of long-wave infrared spatial heterodyne spectroscopy



图17 地基多普勒差分测风干涉仪  
Fig.17 Ground-based Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

## 4 结论

经过近二十年的发展,多普勒差分干涉测风技术已经形成建立了探测技术原理、干涉仪优化设计、风场温度场数据反演等方面的系统理论基础,国际上多家研究机构开展了干涉仪核心组件研制工艺探索,成功研制出了覆盖从可见光到长波红外多个波段的多普勒差分干涉仪样机,地基仪器和天基载荷也已经发展到应用推广阶段。多普勒差分干涉仪具有元件光学指标要求相对宽松、干涉图一次采集不需要步进扫描、反演过程中依靠算法提取目标谱线从而降低了工作通道滤光片极窄带宽要求、可实现与观测同步定标等原理性特点,且均已通过实验证明。这使得该技术成为中高层大气风场探测领域的研究热点,未来该技术将在



地基、天基中高层大气风场探测领域获得广泛应用,也将为中高层大气风场探测仪器水平带来新的提升。

国内对该技术的研究始于2010年前后,经过十余年研究积累,在天地基大气风场探测多普勒差分干涉仪总体技术、核心干涉仪设计与研制、风场数据反演理论与算法等方面均取得了长足进步。尤其,系统掌握了测风多普勒差分干涉仪的谱段拓展、视场展宽、热补偿设计、风廓线反演、相位标定等关键技术,以及高灵敏度、高稳定干涉仪组件的核心制造工艺,使得地基大气高层大气风场探测多普勒差分干涉仪已步入应用推广阶段,也已具备面向星载应用的多普勒差分干涉仪研发能力,为我国天、地基大气及空间环境参数遥感探测奠定了坚实基础。

#### 参考文献

- [1] ENGLERT C R, BROWN C M, DROB D P. Wind at the top of the atmosphere[C]. *NRL Review*, 2012, 132-140.
- [2] SHEPHERD G G. Development of wind measurement systems for future space missions[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 115: 206-217.
- [3] 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.
- [4] YUAN Wei, XU Jiyao, MA Ruiping, et al. First observation of mesospheric and thermospheric winds by a Fabry-Perot interferometer in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 55(35): 3378-3383.  
袁韡, 徐寄遥, 马瑞平, 等. 我国光学干涉仪对中高层大气风场的首次观测[J]. *科学通报*, 2010, 55(35): 3378-3383.
- [5] THUILLIER G, FALIN J L, WACHTEL C. Experimental global model of the exospheric temperature based on measurements from the Fabry-Perot interferometer on board the OGO-6 satellite—discussion of the data and properties of the model[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1977, 39(4): 399-414.
- [6] HAYS P B, KILLEEN T L, KENNEDY B C. The Fabry-Perot interferometer on dynamics explorer[J]. *Space Science Instrumentation*, 1981, 5: 395-416.
- [7] SKINNER W R, HAYS P B, GRASSL H J, et al. High-resolution doppler imager on the upper atmosphere research satellite[C]. *Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research*, SPIE, 1994, 2266: 281-293.
- [8] KILLEEN T L, SKINNER W R, JOHNSON R M, et al. TIMED doppler interferometer (TIDI) [C]. *Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III*, SPIE, 1999, 3756: 289-301.
- [9] 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.
- [10] ENGLERT C R, HARLANDER J M 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.
- [11] ENGLERT C R, HARLANDER J M J M, BROWN C M, et al. Coincident thermospheric wind measurements using ground-based Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne (DASH) and Fabry-Perot Interferometer (FPI) instruments[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*, 2012, 86: 92-98.
- [12] SHEPHERD G G. Doppler michelson interferometry and spatial heterodyne spectroscopy: an approach to stratospheric wind measurement[C]. *Fourier Transform Spectroscopy*. Optica Publishing Group, 2013: FW1D. 1.
- [13] ENGLERT C R, BROWN C M, MARR K D, et al. As-built specifications of MIGHTI-The thermospheric wind and temperature instrument for the NASA ICON mission[C]. *Fourier Transform Spectroscopy*, Optica Publishing Group, 2016: FTh4B. 2.
- [14] FENG Yutao, YAN Peng, BAI Qinglan. Dual-channel Doppler heterodyne interferometer: China, 201210566372.1[P]. 2014.08.27.  
冯玉涛, 闫鹏, 白清兰. 双通道多普勒外差干涉仪: 中国, 201210566372.1[P]. 2014.08.27.
- [15] SUN Chen, FENG Yutao, FU Di, et al. The phase uncertainty from the fringe contrast of interferogram in Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Journal of Optics*, 2021, 23(11): 115703-115711.
- [16] SUN Chen, FENG Yutao, FU Di, et al. A propagation of interferogram signal-to-noise (SNR) and phase uncertainty in Doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(1): 240-247.  
孙晨, 冯玉涛, 傅嶝, 等. 多普勒差分干涉仪干涉图信噪比对相位不确定度研究[J]. *物理学报*, 2020, 69(1): 240-247.
- [17] WU Kuijun, FU Di, FENG Yutao. Simulation and application of the emission line O19P18 of O<sub>2</sub>(a<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub>) day glow near 1.27 μm for wind observation from limb-viewing satellites[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16984-16999.
- [18] LIU Jilin, WEI Daikang, ZHU Yajun. Effective wind and temperature retrieval from Doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer interferograms[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 8829-8836.
- [19] SHEN Jing, XIONG Wei, SHI Hailiang. Absolute phase drift analysis and correction of asymmetric spatial heterodyne interferometer for wind detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0430003.

- 沈静,熊伟,施海亮. 测风非对称空间外差干涉仪绝对相位漂移分析及校正[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0430003.
- [20] KUANG Yinli, FANG Liang, PENG Xiang. Simulation of Doppler velocity measurement based on Doppler asymmetric space heterodyne spectroscopy[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(14): 111-118.  
况银丽,方亮,鹏翔. 基于多普勒非对称空间外差光谱技术的多普勒测速仿真[J]. 物理学报, 2018, 67(14): 111-118.
- [21] ENGLERT C R, HARLANDER J M J M, BABCOCK D D, et al. Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne spectroscopy (DASH): an innovative concept for measuring winds in planetary atmospheres[C]. Atmospheric Optical Modeling Measurement and Simulation II, SPIE, 2006, 6303: 272-279.
- [22] ENGLERT C R, BABCOCK D D, HARLANDER J M J M. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): concept and experimental demonstration[J]. Applied Optics, 2007, 46(29): 7297-7307.
- [23] HARLANDER J M J M, ENGLERT C R, MARR K D, et al. On the uncertainties in determining fringe phase in Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy[J]. Applied Optics, 2019, 58(13): 3613-3619.
- [24] HARLANDER J M, ENGLERT C R. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy: U.S, Patent 7, 773, 229 [P]. 2010-8-10.
- [25] SHEN Jing, XIONG Wei, SHI Hailiang, et al. Data processing method of asymmetric spatial heterodyne interferogram for wind measurement[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(9): 3014-3019.  
沈静,熊伟,施海亮,等. 用于风场探测的非对称空间外差干涉数据处理方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(9): 3014-3019.
- [26] CHEN Jiejing, FENG Yutao, HU Bingliang, et al. Window function optimization in atmospheric wind velocity retrieval with Doppler difference interference spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 92-98.  
陈洁婧,冯玉涛,胡炳樑,等. 多普勒差分干涉光谱仪大气风速反演过程中窗函数优化[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 92-98.
- [27] LIU J, WEI D, ZHU Y, et al. Effective wind and temperature retrieval from Doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer interferograms[J]. Applied Optics, 2018, 57(30): 8829-8835.
- [28] MARR K D, MORROW W H, BROWN C M, et al. Calibration lamp design, characterization, and implementation for the Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging instrument on the ionospheric connection satellite[J]. Optical Engineering, 2019, 58(5): 054104.
- [29] ENGLERT C R, HARLANDER J M 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): 553-584.
- [30] SMITH B W, LAUBSCHER B E, COOKE B J, et al. IRISHS: the infrared imaging spatial heterodyne spectrometer: a new pushbroom Fourier transform ultraspectral imager with no moving parts[C]. Infrared Technology and Applications XXV, SPIE, 1999, 3698: 501-509.
- [31] ENGLERT C R, BROWN C M, BACH B, et al. High-efficiency echelle gratings for MIGHTI, the spatial heterodyne interferometers for the ICON mission[J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2090-2098.
- [32] FENG Yutao, YAN Peng, SUN Jian, et al. Static two-channel Doppler heterodyne interferometer: China, 201220719849.0[P]. 2013-06-19.  
冯玉涛,闫鹏,孙剑,等. 静态双通道多普勒外差干涉仪:中国,201220719849.0[P]. 2013-06-19.
- [33] FENG Yutao, BAI Qinglan, SUN Jian, et al. Dual-channel Doppler heterodyne interferometer: China, 201210566372.1 [P]. 2014-08-27.  
冯玉涛,白清兰,孙剑,等. 双通道多普勒外差干涉仪:中国,201210566372.1[P]. 2014-08-27.
- [34] ENGLERT C R, STEVENS M H, SISKIND D E. Basic principle of Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Spectroscopy (DASH): An innovative concept for measuring winds in planetary atmospheres [J]. Fourier Transform Spectroscopy/ Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment, OSA Technical Digest Series (CD), 2007, F4hA3.
- [35] FENG Yutao, BAI Qinglan, WANG Yongmei, et al. Theory and method for designing field-widened prism of spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 272-277.  
冯玉涛,白清兰,王咏梅,等. 空间外差光谱仪视场展宽棱镜设计理论与方法[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 272-277.
- [36] ENGLERT C R. Spatial heterodyne spectroscopy: an emerging optical technique for heliophysics and beyond [C]. Concept Paper for NRC Space Studies Board, 2010.
- [37] FEI Xiaoyun, FENG Yutao, BAI Qinglan, et al. Dual field Doppler heterodyne interferometer: China, 201410216341.2 [P]. 2015-12-09.  
费小云,冯玉涛,白清兰,等. 双视场多普勒外差干涉仪:中国,201410216341.2[P]. 2015-12-09.
- [38] FEI Xiaoyun. Basic study on a co-path doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy interferometer with two fields of view for atmospheric wind vector observation from satellite platforms [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2015.

- 费小云. 星载测风双视场准共路多普勒外差干涉仪基础问题研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2015.
- [39] WEI D, ZHU Y, LIU J, et al. Thermally stable monolithic Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer: optical design and laboratory performance[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 19887-19900.
- [40] HARLANDER J M J M, ENGLERT C R. Design of a real-fringe DASH interferometer for observations of thermospheric winds from a small satellite [C]. *Fourier Transform Spectroscopy*. Optical Society of America, 2013: FW1D. 2.
- [41] ENGLERT C R, HARLANDER J M J M. Flatfielding in spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(19): 4583-4590.
- [42] MARR K D, ENGLERT C R, HARLANDER J M J M. Flat-fields in DASH interferometry[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9535-9544.
- [43] YU Tingting, FENG Yutao, FU Di, et al. Analysis of influence of spike on phase retrieval accuracy of doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer and correction method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12): 1230001.  
于婷婷, 冯玉涛, 傅頔, 等. 冲击噪声对多普勒差分干涉仪相位反演精度影响分析及校正方法[J]. *光子学报*, 2020, 49(12): 1230001.
- [44] MARR K D, THAYER A S, ENGLERT C R, et al. Determining the thermomechanical image shift for the MIGHTI instrument on the NASA-ICON satellite[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(1): 013102.
- [45] ZHANG Yafei, FENG Yutao, FU Di, 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): 120-129.  
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): 120-129.
- [46] ZHOU Guan, LI Libo, FU Di, et al. Analysis of influence of Doppler asymmetric spatial heterodyne interferogram distortion on phase inversion accuracy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(6): 0601001.  
周冠, 李立波, 傅頔, 等. 多普勒差分干涉仪干涉图畸变对相位反演精度影响分析[J]. *光子学报*, 2022, 51(6): 0601001.
- [47] 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): 585-600.
- [48] WU J J, HARDING B J, TRIPLETT C C, et al. Errors from asymmetric emission rate in spaceborne, limb sounding Doppler interferometry: a correction algorithm with application to ICON/MIGHTI[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(10): e2020EA001164.
- [49] BABCOCK D D. Development of a space flight prototype Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne (DASH) spectrometer for the measurement of upper atmospheric winds[R]. ELLICOTT: ARTEP INC, 2011.
- [50] 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.
- [51] FU Di, ZHANG Zhinan, ZHANG Zhaohui, et al. Analysis and experiment of synchronized calibration of doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH) [J]. *Third International Conference on Photonics and Optical Engineering*, SPIE, 2019, 11052: 297-303.
- [52] WEI Dakang. Development of an optical instrument for the observation of neutral winds in Earth's upper atmosphere[D]. Bergischen Universität Wuppertal, 2020.
- [53] RIDER K, IMMEL T, TAYLOR E, et al. ICON: Where earth's weather meets space weather [C]. 2015 IEEE Aerospace Conference, IEEE, 2015: 1-10.
- [54] HARLANDER J M 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): 601-613.
- [55] HARLANDER J M J M, ENGLERT C R, BROWN C M, et al. The as-built performance of the MIGHTI interferometers[C]. *Fourier Transform Spectroscopy*, Optical Society of America, 2016: FTh4B. 3.
- [56] MAKELA J J, BAUGHMAN M, NAVARRO L A, et al. Validation of ICON - MIGHTI thermospheric wind observations: 1. Nighttime red-line ground-based fabry-perot interferometers[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, 126(2): e2020JA028726.
- [57] HARDING B J, CHAU J L, HE M, et al. Validation of ICON-MIGHTI thermospheric wind observations: 2. Green-line comparisons to specular meteor radars [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, 126(3): e2020JA028947.
- [58] HARLANDER J M 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.



- [59] HAN Bing, FENG Yutao. Effect of pupil matching of cold shield on the fringe contrast of long-wave infrared spatial heterodyne spectroscopy[J]. Applied Optics, 2021, 60(29): 9241-9248.
- [60] FENG Yutao, LI Juan, ZHAO Zengliang, et al. Review of progress in spaceborne interferometric spectroscopy for atmospheric wind detection [J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(3): 14-26.  
冯玉涛, 李娟, 赵增亮, 等. 大气风场探测星载干涉光谱技术进展综述[J]. 上海航天, 2017, 34(3): 14-26.

## Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometry for Wind Measurement in Middle and Upper Atmosphere (Invited)

XIAO Yang<sup>1,2</sup>, FENG Yutao<sup>1</sup>, WEN Zhenqing<sup>1,2</sup>, FU Di<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics Precision Mechanic of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

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

**Abstract:** Atmospheric wind field is an important parameter to understand the dynamics and thermodynamic characteristics of the Earth's atmospheric system, and it is the basic data for weather forecasting, space environment monitoring, and climatology research. Passive optical remote sensing based on Optical interferometer is the main technical means of wind field measurement in the middle and upper atmosphere. In the 1960s, foreign research institutions began to use optical interferometers to detect upper atmospheric wind fields. and carried out the experimental research on interferometer payload technology simultaneously, and successively developed a series of representative scientific instruments and satellite payloads based on the Fabry-Pérot interferometer and the Wide Angle Michelson interferometer. In 2006, the ENGLERT C R research team of the U.S. Naval Research Laboratory proposed a new planetary atmospheric wind detection technology, called Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne wind measurement technology, this technology detects the Doppler frequency shift of the atmospheric airglow spectrum by inverting the phase of the interferogram, thereby realizing the detection of the atmospheric wind field. Compared with the Fabry-Perot interferometer and the Wide-Angle Michelson interferometer, the Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne interferometer has the following advantages: 1) Two-beam equivalent thickness spatial modulation interference, which relaxes the requirements for the optical index of the element; 2) Interferometer does not need Step-by-step scanning; 3) Wind speed inversion is based on the Fourier transform relationship between interferogram and spectrogram, so it does not need extremely narrow bandwidth ( $<1$  nm) filters to separate single-line spectra; 4) Synchronous calibration can be achieved, the standard spectral line of the calibration light source and the target spectral line of the detection source are simultaneously introduced into the interferometer system to monitor the state change of the interferometer in real time, therefore, the measurement accuracy can be further improved. After nearly two decades, a series of research results have been achieved in basic theory, interferometer design, instrument development technology, data processing and wind speed retrieval of Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer. In terms of theoretical research progress, domestic and foreign scholars have theoretically analyzed the factors that affect the accuracy of interferometer phase inversion; In order to expand the detection capability of the Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer, four structural design schemes are proposed by referring to the spectral expansion method of the wide-spectrum Spatial Heterodyne Spectroscopy; A series of interferogram preprocessing methods are proposed to eliminate the errors of the original interferogram caused by various defects of optical components, photoelectric sensors and optical systems. Foreign scholars put forward a wind field profile inversion method named "peeling onions". In terms of instrument research progress, since the Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer wind measurement technology was proposed in 2006, many international research institutions have carried out research on the development process of the core components of the interferometer, and successfully developed a variety of interferometer prototypes covering from visible light to long-wave infrared, such as Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging (MIGHTI), Stratospheric Wind Interferometer for Transport studies-Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne (SWIFT-DASH), and Redline DASH Demonstration

Instrument (REDDI). Ground-based instruments and space-based payloads have also been developed to the stage of application and promotion. The main domestic research institute is the Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, the institute focuses on the study of the interferometer thermal compensation method, the interferometer glass component design method, the interferometer component gluing and integration process, the interferometer support structure component design and integration process, and proposed a dual-band Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne interferometer technology and a high-time-resolution ground-based Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne interferometer technology, and developed a single-channel DASH principle prototype with oxygen atom 630 nm and oxygen molecule 867 nm airglow radiation as the target source. This paper reviews the domestic and foreign research progress of Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne technology for atmospheric wind field detection, discusses its technical characteristics and application potential, and provides reference for the future development of atmospheric wind field passive optical remote sensing detection technology and mission planning in the field of atmospheric wind field detection in our country.

**Key words:** Atmospheric wind field measurement; Optical interferometer; Doppler asymmetric spatial heterodyne; Fine structure spectrum

**OCIS Codes:** 290.2648; 290.2745; 290.1310

---

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 41005019), West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences (No. XAB 2016A07), Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (No. 2019JQ-931), West Light Cross-Disciplinary Innovation team of Chinese Academy of Sciences (No. E1294301), Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (No. YJKYYQ20210021)