



临近空间风温遥感干涉仪设计及正演

何微微, 武魁军, 傅頔, 王后茂, 李娟

引用本文:

何微微, 武魁军, 傅, 等. 临近空间风温遥感干涉仪设计及正演[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1678–1689.

HE Wei-wei, WU Kui-jun, FU Di, et al. Instrument design and forward modeling of near-space wind and temperature sensing interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1678–1689.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202808.1678>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间差分干涉的光纤分布式水下声波测量

Measurement of underwater acoustic wave using optical distributed acoustic sensing based on space difference
光学精密工程. 2017, 25(9): 2317–2323 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172509.2317>

红外高光谱干涉仪辐射定标误差敏感性因子的仿真分析

Simulation analysis of error sensitivity factors in radiometric calibration of infrared hyperspectral interferometer
光学精密工程. 2020, 28(4): 867–877 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0867>

空间分离式外差二自由度平面光栅干涉仪

Spatially separated heterodyne grating interferometer for in-plane displacement measurement
光学精密工程. 2019, 27(8): 1727–1736 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192708.1727>

适用于光黏工艺的干涉仪公差保证方法

Tolerance assurance of interferometer for optical HCB process
光学精密工程. 2018, 26(8): 1945–1953 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182608.1945>

双视场多通道成像仪的光机结构

Opto-mechanical structure of imager with two field of views and multiple channels
光学精密工程. 2015, 23(10): 2870–2876 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152310.2870>

文章编号 1004-924X(2020)08-1678-12

临近空间风温遥感干涉仪设计及正演

何微微¹, 武魁军^{2*}, 傅 颀³, 王后茂⁴, 李 娟³

- (1. 武汉科技大学 城市学院, 湖北 武汉 430083;
2. 中国科学院 武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
4. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要:临近空间(20~100 km)风温探测对于大气物理和空间科学的发展具有重要的学术意义和应用价值。以 $1.27\ \mu\text{m}$ 附近的 $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta_g)$ 气辉为辐射源, 采用广角迈克尔逊干涉仪进行临边观测, 能够实现平流层、中间层及低热层区域(40~80 km)大气风场和温度场的同时探测。本文设计了临近空间风温遥感干涉仪, 并对该仪器进行了仪器建模及正演仿真。根据气辉临边辐射光谱特性及谱线选取的原则, 提出了采用两组强度不同的谱线进行风温遥感, 弱线用于低空探测, 以避免自吸收效应对测量结果的影响; 强线用于高空探测, 以期实现高的测量精度。建立了由大气辐射传输模块, 迈克尔逊干涉仪模块, 滤波器模块, 以及光学系统、传感器阵列、红外焦平面等设备的系统参数组成的正演模型。通过正演模型获得了临边观测图像, 并对风速及温度的测量不确定度进行了计算。数值模拟结果表明, 在 40~80 km 的高度内, 风测量精度为 1~3 m/s, 温度测量精度为 1~3 K, 满足临近空间风温探测精度的要求。

关键词:卫星遥感; 临近空间; 风温探测; Michelson 干涉仪

中图分类号: P407.6 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20202808.1678

Instrument design and forward modeling of near-space wind and temperature sensing interferometer

HE Wei-wei¹, WU Kui-jun^{2*}, FU Di³, WANG Hou-mao⁴, LI Juan³

- (1. *City College, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430083, China;*
- 2. Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;*
- 3. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;*
- 4. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)*

* *Corresponding author, E-mail: wukuijun@wipm.ac.cn*

Abstract: Wind and temperature measurements in near-space (20-100 km) play a prominent part in the development of atmospheric physics and space science, which are of considerable academic and application value. The atmospheric wind and temperature fields in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere (40-80 km) can be simultaneously detected using the wide-angle Michelson interferome-

收稿日期: 2019-11-04; 修订日期: 2020-01-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41975039, No. 61705253)

ter with the radiation source observation of the limb-viewing $O_2(a_1\Delta_g)$ airglow near $1.27\ \mu\text{m}$. Hence, a near-space wind and temperature sensing interferometer was designed in this study, and its modeling and forward simulation were conducted. Based on the characteristics of the radiation spectrum and principle of spectral line selection, two sets of different intensity lines were employed for wind and temperature detection. The weak group was used for low altitude measurement to avoid the influence of self absorption on the measurement results; the strong line was used for high altitude detection to achieve high measurement accuracy. The forward model was composed of the system parameters of atmosphere radiation transmission module, Michelson interferometer module, filter module, optical system, sensor array, and infrared focal plane. Through forward modeling, the limb-viewing image was obtained, and the uncertainty of wind velocity and temperature measurement was analyzed. The numerical simulation results show that the wind measurement accuracy is 1-3 m/s and temperature measurement accuracy is 1-3 K in the height range of 40-80 km, which meet the requirements of wind temperature detection accuracy in adjacent space.

Key words: satellite remote sensing; near-space; wind and temperature sensing; Michelson interferometer

1 引 言

临近空间通常指高度介于 20~100 km 的大气层区域^[1]。临近空间风温探测对于大气物理和空间科学的发展具有重要的学术意义。精确的风场与温度场探测对于研究中层大气的半年振荡^[2]、大气潮汐结构的季节变化^[3]、全球大气动量和能量的传播,以及球面大气中行星波的激发具有重要的科学意义^[4-5]。此外,大气风场温度场的精准探测,对于提高卫星发射的成功率、保障航空航天安全性、提高中长期天气预报的准确率具有十分重要的应用价值。

临近空间的探测设备非常丰富,但由于技术限制,大气风场、温度场的探测主要局限在地基遥感探测技术,如流星雷达^[6]、拉曼测温激光雷达^[7]、多普勒测风激光雷达^[8]、气辉成像干涉仪^[9]等。随着空间技术的不断发展,提出了具有全球观测尺度的星载风温探测手段。星载气辉成像干涉仪采用临边观测模式,具有垂直分辨率高、光谱分辨率高、相位灵敏度高的优势,已成为卫星遥感领域的前沿课题^[10]。

星载成像干涉仪技术通常采用多普勒频移法获得风速,采用多普勒展宽法获得温度,即通过干涉图的相位变化获取气辉的多普勒频移信息以反演风速,通过干涉图对比度的变化获取气辉多普勒展宽信息以反演温度。由于干涉图的相位变化

与对比度变化相比更敏感,风场反演精度高于温度场反演精度。然而,对处于热力学平衡态的双原子或多原子分子,可以采用双线比率法(即两条分离的辐射线的相对强度)确定大气温度。双线比率法可提高温度测量精度(约 1~3 K)。1991 年,搭载于上层大气研究卫星 UARS 的风场探测干涉仪-风成像干涉仪(WIND Imaging Interferometer, WINDII)与高分辨力多普勒成像仪(High Resolution Doppler Imager, HRDI)分别采用了多普勒展宽法、双线比率法两种测温方式。WINDII 利用 O 原子的红线(630.0 nm)和绿线(557.7 nm),测量了海拔 75~320 km 的风速(精度 5~8 m/s)和温度(精度 20~75 K)^[11]。HRDI 利用 O_2 分子电子态跃迁的(0,0),(1,0),(2,0)3 个振动带的吸收及辐射光谱^[12],获得了平流层(10~40 km)到中间层与低热层(50~120 km)的大气风场(精度为 5 m/s)和温度场(精度为 7 K)^[13]。

WINDII 和 HRDI 取得成功之后,星载风温探测吸引了越来越多的关注,其发展趋势是将探测高度向较低海拔区域推进以获得更广泛的高度覆盖范围。加拿大 York 大学研制的同温层风场输运干涉仪(Stratospheric Wind Interferometer for Transport studies, SWIFT)采用 Michelson 干涉成像仪探测 O_3 位于 $1\ 133.433\ 5\ \text{cm}^{-1}$ 附近的振转光谱目标谱线^[14]。2015 年,Shepherd 团队提出了 SWIFT-DASH 的改进方案,采用多普

勒外差干涉仪(Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne, DASH)替代 Michelson 干涉仪^[15]。多普勒调制型分子滤光器(Doppler Wind and Temperature Sounder, DWTS)采用分子滤光技术,可同时获取多普勒频移和辐射线宽信息,从而实现 25~250 km 的连续风温探测^[16-17]。由于目标谱线均采用了中波红外(Mid-wavelength Infrared, MWIR)和长波红外(Long-wavelength Infrared, LWIR)辐射线的设计策略,SWIFT 和 DWTS 的优势具备全天时风温探测的能力。然而,工作在 MWIR 或 LWIR 波段的星载红外遥感器系统通常会受到来自光学元件热背景的强烈干扰,测量不确定性较大。鉴于此,红外遥感系统平台需要较低的制冷温度,因此增加了平台成本,但 SWIFT 的温度测量能力依旧相对较低。此外, DWTS 的模拟结果表明,在 50~100 km 的高度内, DWTS 无法获得垂直轨道方向的风速分量; 100~250 km 高度内,虽然可以获得垂直轨道方向分量的风速,但其不确定性是沿轨方向风速分量的 10 倍。

根据加拿大中层大气模型^[18],一项科学研究表明,为了改善天气预报系统中的数据同化分析精度,40~60 km 高度内,风速精度需达到 5~10 m/s,温度精度需达到 5~10 K^[19]。针对临近空间的探测需求,可利用 O₂ 分子的红外大气带(跃迁)1.27 μm 波段的气辉为目标谱线。鉴于 O₂ (a¹Δ_g)气辉的辐射强度相对较强、自吸收能力相对较弱,适用于 45~90 km 高度内的风温探测。加拿大 StaSci 计划部署的中间层成像迈克尔逊干涉仪(Mesospheric Imaging Michelson Interferometer, MIMI)以及 NASA 的 MIDEX 计划支持的波成像迈克尔逊干涉仪(Waves Michelson Interferometer, WAMI)均采用该谱带的强、弱两组气辉谱线(每组 3 条)进行风温探测^[20]。中国科学院武汉物理与数学研究所的武魁军等人利用 O₂ 分子 1.27 μm 近红外气辉对临近空间风温探测精度进行了研究^[21-23],并分析了氢氧气辉对 1.27 μm 气辉风温探测精度的影响^[24]。

本文提出了临近空间风温探测干涉仪(Near-space Wind and Temperature Sensing Interferometer, NWTSI)仪器模型,通过广角迈克尔逊干涉仪观察 1.27 μm 波段的 O₂ (a₁Δ_g)气辉,实现临近空间风场、温度场的星载遥感探测。与 WAMI

和 MIMI 类似, NWTSI 重点关注低海拔区域(40~80 km)。NWTSI 采用迈克尔逊干涉仪,由多普勒频移法获得风速,由双线比率法获得温度,具有较高的风温探测精度。本文介绍了 NWTSI 仪器模型,分析了大气临边辐射光谱的特性并对 NWTSI 进行了正演仿真模拟,最后讨论了风温探测的不确定度。

2 仪器模型

NWTSI 是一种基于广角迈克尔逊干涉仪的星载风温遥感探测载荷。它通过临边观测的方式,在两个相互正交的观测方向上交替观测。交替观测由指向镜将视场(Field of View, FOV)指向相应的观测方向实现,视场角为 1.5°,高度覆盖 20~120 km。NWTSI 前后两个视场可先后观测到相同的大气区域,在 410 km 的高度上观测间隔大约为 9 min。

图 1 为 NWTSI 仪器模型的光学系统示意图。该仪器参考了 WAMI 的仪器设计,由两个望远镜、一个迈克尔逊干涉仪、一个窄带滤光片、一个法布里-珀罗(F-P)标准具以及一个近红外焦平面组成。视场由望远镜 1(telescope 1)和视场光阑(FS1)决定。入射光由指向镜进入望远镜 1,然后入射到迈克尔逊干涉仪。望远镜 1 的角放大率为 2,则迈克尔逊干涉仪的视场为 3°×3°。迈克尔逊干涉仪长壁(LPA)的反射镜分为厚度不同的四等份,每一分区较上一分区光程差(Optical Path Difference, OPD)增加 λ/4,则四分区之间的阶跃光程差为 λ/4, λ/2 和 3λ/4。四分区的设计可实现 4 个干涉图样的同时采集,与 WINDII 的顺序采集相比,该方法有效避免了测量过程中强度变化引起的误差。迈克尔逊干涉仪短壁(SPA)的反射镜安装在电容式位置传感器控制的压电器件上,则干涉仪镜子也可以步进,用于实现飞行期间的校准。平面镜 M3 的作用是将光学元件折叠成紧凑的形状。入射光经视场光阑 FS2 后进入望远镜 2。望远镜 2 的角放大率为 0.5,因此,滤光系统的视场再次变为 1.5°×1.5°。迈克尔逊有视场展览的能力,受视场角影响小,而 F-P 干涉仪透射函数却受视场角的影响很大,该设计的主要意图是有效解决 F-P 干涉仪视场角受限的问题。F-P 标准具与干涉滤光片(F1 与 F2)共同作用实

现目标辐射线的分离,同时阻止散射太阳光的进入。望远镜 2 聚焦在 F-P 标准具后面的金字塔棱镜上。棱镜的边缘与迈克尔逊干涉仪长臂反射镜的边缘部分对齐,使得入射光投影到焦平面阵列

(Focal Plane Array,FPA)的不同区域,每个区域对应不同的阶跃相位。棱镜后设置有分束镜(BS),将光路分为两个通道:强线通道与弱线通道。表 1 为 NWTSI 仪器的系统参数。

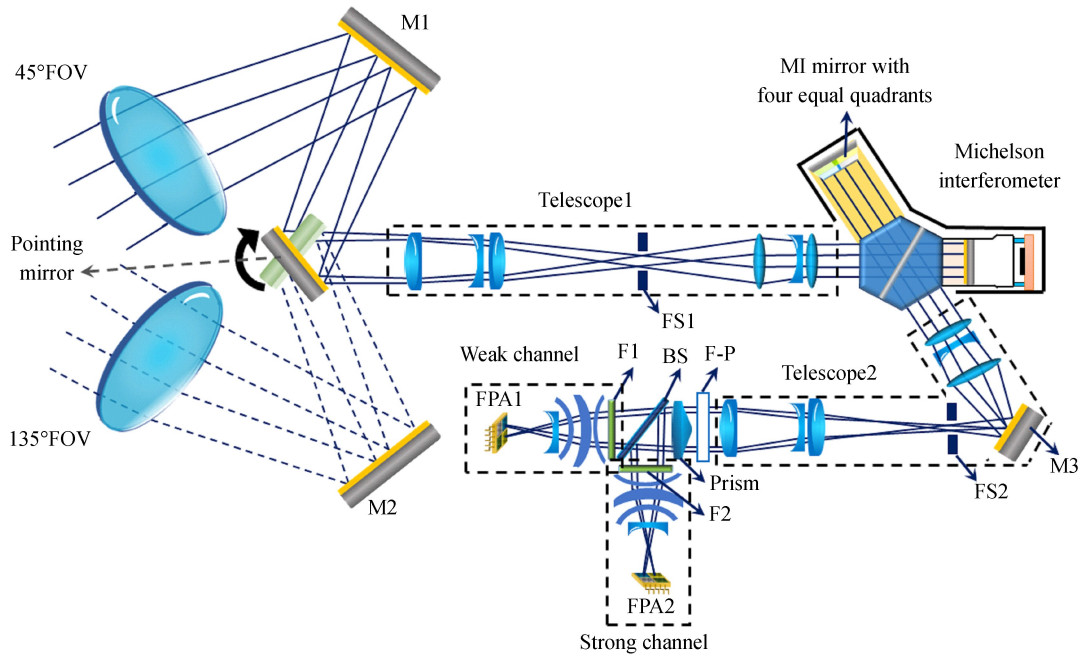


图 1 临近空间风温探测干涉仪的光学原理图

Fig. 1 Optical schematic of near-space wind and temperature sensing interferometer (NWTSI)

表 1 临近空间风温探测干涉仪的系统参数

Tab. 1 System parameters of NWTSI instrument

Component	Parameter	Value and unit
Satellite	Nominal altitude	410 km
	Distance to limb	2 864 km
	Velocity	7 533 m/s
Michelson interferometer	OPD	7.35 cm
	Length of LPA	12.24 cm
	Length of the SPA	11.07 cm
	Index of refraction of LPA	1.660 5 (LaKN12)
Fabry-Perot etalon	Index of refraction of SPA	1.504 (BK7)
	Free spectral range	2.0 nm
	Finesse	20
Detector	Index of refraction	1.447 (fused silica)
	Format	256 × 256
	Pixel size	40 μm
	Quantum efficiency	0.75
	Dark current	55 electrons/(s · pixel)
Instrument responsivity	Readout noise	30 electrons
	Pixel étendue	5.25 × 10 ⁻¹⁰ m ² /sr
	Single exposure time	1 s
	Integration time	10 s

3 仿 真

正演仿真的目的是模拟仪器的功能和效果,产生预期的干涉图像。通过测量仿真可以实现仪器性能的独立分析,并可对仪器性能做出评估。正演模型包含大气辐射模块,迈克尔逊干涉仪模块,滤波器模块,以及光学系统、传感器阵列、红外焦平面等设备的系统参数。

3.1 正演仿真

3.1.1 大气辐射

1.27 μm 气辉具有辐射强度高、高度覆盖范围广的优势,是全球大气风温遥感的最佳目标谱线之一^[25]。1.27 μm 气辉主要来源于 O_2 第一激发态 $\text{O}_2(a_1\Delta_g)$ 到基态 $\text{O}_2(X_3\Sigma_g)$ 的跃迁。实际电子跃迁过程中,振动态和转动态的存在,使得 1.27 μm 氧气辉成为包含约 150 条辐射线的光谱带。

$\text{O}_2(a_1\Delta_g)$ 气辉临边辐射光谱由沿视向的路径积分计算获得。积分过程中大气被分成许多离散的薄层,每一层都被视为是均匀的,逐层计算的辐射传输方程表示为:

$$L(\nu)_l = L(\nu)_{l-1} \exp\left(-\sum \alpha(\nu)_{l,i} u_l\right) + \frac{\sum_i J(\nu)_{l,i} \alpha(\nu)_{l,i} u_l}{\sum_i \alpha(\nu)_{l,i} u_l} \left[1 - \exp\left(-\sum_i \alpha(\nu)_{l,i} u_l\right)\right], \quad (1)$$

其中: $J(\nu)_{l,i}$ 与 $\alpha(\nu)_{l,i}$ 分别是第 i 条临边观测路径、第 l 层大气的辐射源函数与吸收系数; $u_l = n_l(Z_U - Z_L)$ 是第 l 层大气的 O_2 分子的分子柱密度; Z_U 与 Z_L 是第 l 层大气上、下边界的临边切点高度。

图 2 描述了临边切点高度为 40 km 和 60 km,不考虑大气风场与卫星速度时 $\text{O}_2(a_1\Delta_g)$ 红外大气带的临边辐射和透射光谱。图中红线代表临边辐射光谱,蓝线代表临边透射光谱(彩图见期刊电子版)。可见,处于大气带中心位置的辐射光谱具有较强的辐射强度,但两翼位置处的辐射光谱自吸收效应较弱,并且辐射强度与吸收系数均随切点高度的变化而变化。因此,两翼位置处的辐射光谱适合低海拔区域的风温探测,而中间区

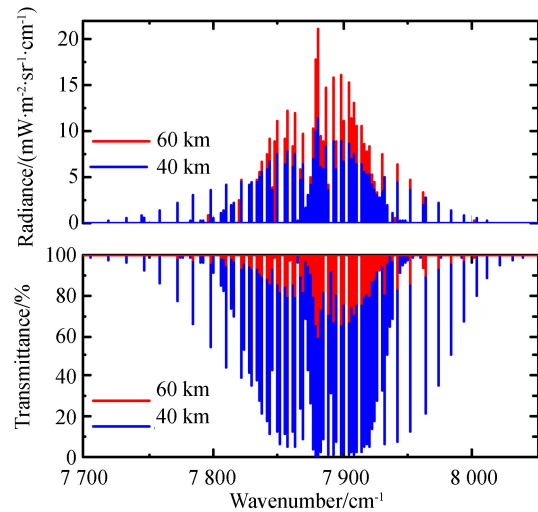


图 2 O_2 红外大气波段在 40,60 km 切点高度上的辐射光谱与透射谱

Fig. 2 Limb radiance and transmittance spectra of O_2 infrared atmospheric band at tangent heights of 40 km and 60 km

域的辐射光谱适合高海拔区域。

在众多的辐射光谱中选择最佳的目标谱线是星载风温成像干涉仪研制的关键之一。Ward 等人提出了系统的选线标准^[21],即目标谱线的选取需遵循三个原则:温度灵敏度高,谱线分离性好和高度覆盖范围广。NWTSI 目标谱线的选取参考了 WAMI 与 MIMI 的选线方案,选用强线组与弱线组共 6 条谱线,每组包含 3 条谱线。强线组谱线波数分别为:7 908. 973 6 cm^{-1} , 7 909. 653 5 cm^{-1} , 7 911. 013 3 cm^{-1} ;弱线组谱线为:7 821. 110 5 cm^{-1} , 7 822. 221 6 cm^{-1} , 7 822. 952 5 cm^{-1} 。20~60 km 的低空区域存在较强的自吸收现象,选用弱线来减少自吸收对反演的影响;60~120 km 的高空区域体辐射率相对较低,信号也相对较弱,但高空的自吸收效应几乎不存在,可选用强线探测,增大信噪比,提高测风精度。强、弱线的联合使用能够覆盖 20~120 km 的临近空间区域,既避免了低空自吸收效应对风温探测带来的影响,又保证了高空风温探测的精度。

3.1.2 滤波器

O_2 分子的 1.27 μm 辐射带包含数量众多并且分布十分密集的谱线。为了实现目标谱线的分

离,滤光系统需要有大约 0.1 nm 的带宽。因此,需将 F-P 标准具与窄带滤波器联合使用。此外,窄带滤波器还具备降低背景光亮度、提高条纹对比度的作用。

NWTSI 的滤波系统由 F-P 标准具和窄带滤波器(F1 和 F2)组成。系统的总滤波函数由二者共同决定。F-P 标准具的带通滤波函数采用 Airy 函数模型,如式(2)所示,设计参数如表 1 所示。

$$t(\sigma, \theta) = \frac{(1-r)^2}{1+r^2-2r\cos[\sigma(4\pi n_{\text{etal}}d\cos\theta)]}, \quad (2)$$

其中: σ 是入射光的波数, r 是标准具的反射率, n_{etal} 是标准具材料的折射率, d 是标准具材料的厚度, θ 是标准具腔内的折射角。

采用双线比率法获得温度信息,NWTSI 要在同一视场中同时观察 3 条谱线。为了降低成本,只使用一个标准具,其后利用分束镜将光线分离为弱线、强线两个通道。图 3 给出了强线组与

弱线组的最佳透射率函数。图中 $S_1: 7\,908.97\text{ cm}^{-1}$, $S_2: 7\,909.65\text{ cm}^{-1}$, $S_3: 7\,911.01\text{ cm}^{-1}$; $W_1: 7\,821.11\text{ cm}^{-1}$, $W_2: 7\,822.22\text{ cm}^{-1}$, $W_3: 7\,822.95\text{ cm}^{-1}$ 。

3.1.3 迈克尔逊干涉仪

迈克尔逊干涉仪的光程差随离轴角的变化如下^[25]:

$$\Delta(i) \cong 2(n_L t_L - n_S t_S) - \left(\frac{t_S}{n_S} - \frac{t_L}{n_L}\right) \sin^2 i - \left(\frac{t_S}{n_S^3} - \frac{t_L}{n_L^3}\right) \frac{\sin^4 i}{4} - \left(\frac{t_S}{n_S^5} - \frac{t_L}{n_L^5}\right) \frac{\sin^6 i}{8}, \quad (3)$$

其中: n_L 与 n_S 分别是迈克尔逊干涉仪长臂和短臂的折射率; i 是像素离轴角; t_L 与 t_S 分别是干涉仪长臂和短臂的长度。迈克尔逊干涉仪的光学参数如表 1 所示。将式(3)应用于每个像素,可得光程差的像素分布如图 4 所示。

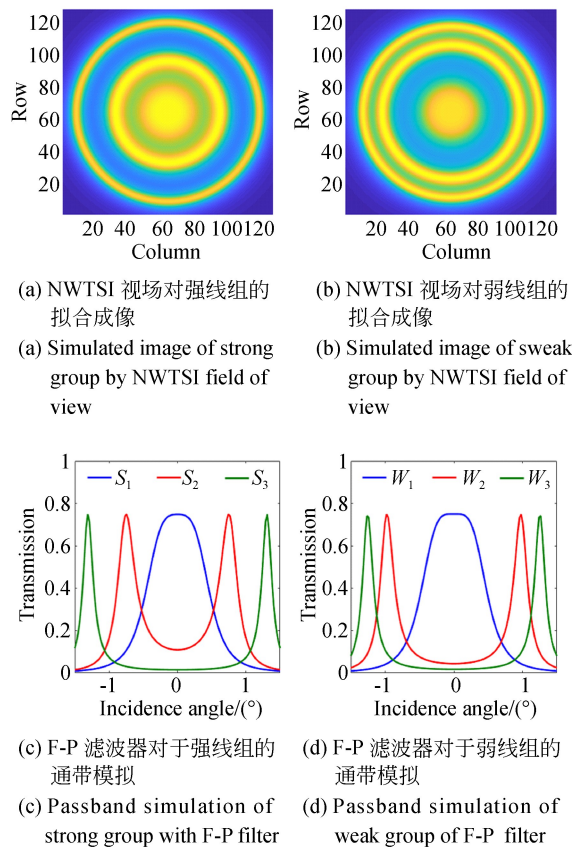


图 3 弱线组与强线组的最佳透射函数

Fig. 3 Optimal transmittance functions of weak group and strong group

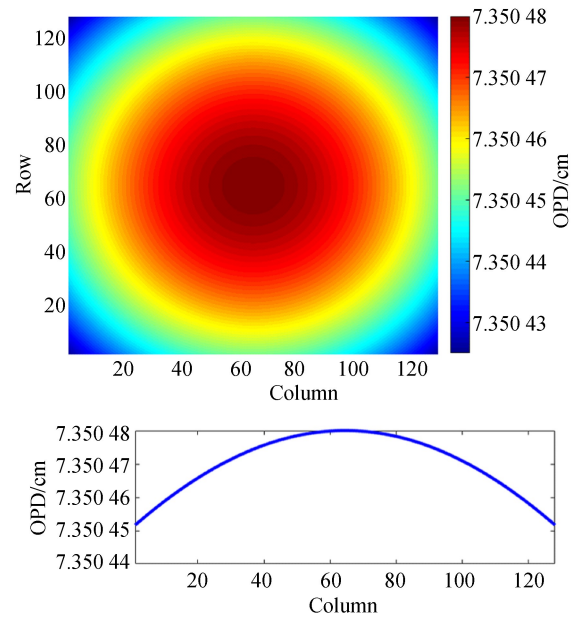


图 4 迈克尔逊干涉仪的光程差像素分布

Fig. 4 Pixel distribution of optical path difference of Michelson interferometer

步进相位 $(k-1)/2\pi$, ($k=1, 2, 3, 4$), 通常指的是视场几何中心位置处的步进相位。每个像素第 k 次步进的相位可表示为:

$$\varphi_k(i) = (k-1) \times 4\pi \times \left[\frac{\pi/2}{4\pi d v_0} \right] d \times v_0 \cos i, \quad (4)$$

其中 d 是迈克尔逊干涉仪的步进尺寸。

利用迈克尔逊干涉仪的相位,以及滤波器的带通滤波函数,结合图 2 中的临边光谱辐射特性,即可获得 NWTSI 的干涉图像。

3.2 测量仿真

图像的像素值由大气辐射传输方程(式(1))干涉图决定。给定像素的干涉图可表示为^[25]:

$$I_{klj} = R_{lj} \int_{\nu_1}^{\nu_2} f_{lj}(\nu) \cdot L_{lj}(\nu) \cdot [1 + U_{lj} \cos(2\pi\nu\Delta_{lj} + \varphi_{klj})] d\nu, \quad (5)$$

其中: I_{klj} 为第 l 行第 j 列第 k 次步进的干涉图, $f_{lj}(\nu)$ 是相对总滤波函数, U_{lj} 是仪器可见度, Δ_{lj} 是光程差, φ_{klj} 是迈克尔逊干涉仪第 k 次的步进相位, ν 是波数, R_{lj} 是仪器响应度。 R_{lj} 可定义为^[22]:

$$R_{lj} = \frac{A\Omega t\tau q}{hc\nu_0}, \quad (6)$$

其中: $A\Omega$ 是光学系统的光学扩展量, t 是干涉时间, q 是探测器的量子效率, h 是普朗克常量, c 是真空光速, τ 是滤波器与光学系统的透过率, ν_0 是 O_2 辐射线的中心波长。

大气风场的精准测量需要较大的视场,从而获得较大的响应度。增加入射光立体角 Ω 的尺寸可以增大响应度,但这会使得光程差增加,引起条纹对比度的降低。因此,传统仪器在立体角的扩大上有一定的局限性。NWTSI 仪器临边观测视场为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$,第一台望远镜的角放大率为 2,则迈克尔逊干涉仪的视场为 $3^\circ \times 3^\circ$ 。根据视场展宽原理,迈克尔逊干涉仪可以保证在大光学扩展量的情况下实现高分辨率。然而,F-P 标准具的立体角则受限于:

$$\Omega_{FP} = 2\pi n^2 / R_{FP}, \quad (7)$$

其中 $R_{FP} = \sigma_0 / \delta\sigma_{FP}$,为 F-P 标准具的分辨率。因此,望远镜 2 的角度放大率设计为 0.5,则 F-P 标准具的视场再次变为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 。

WINDII 的测量方式采用逐像素测量的四点采样法,即通过比较四步进所得的干涉图像获得多普勒风引起的干涉图相移,最终反演得到风速。NWTSI 的四分区设计则可以实现 4 个干涉图样的同时采集,并通过金字塔形棱镜同时成像在 FPA 的 4 个不同区域。通过比较 FPA 不同区域干涉图的相移即可实现大气风场的探测。

图 5 所示为强线组与弱线组 4 个阶跃相位的干涉图像的正演仿真。如图 5 所示,干涉图样与像素位置、阶跃相位、滤波透过函数在视场上的变化、以及临边辐射光谱随切点高度的变化均有相关性。干涉图样中的每个像素代表对应空间区域临边辐射光谱的积分强度。NWTSI 对应的空间区域尺寸约为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。像素间干涉图样的差异主要来自于临边观测气辉强度随切点高度的变化,以及光学系统对干涉图样的调制。正演仿真过程中,气辉光谱辐射只考虑垂直方向的变化,忽略视场相对于地平线的倾斜以及地球的曲率,并假设仪器可见度和响应度对所有像素均相同。

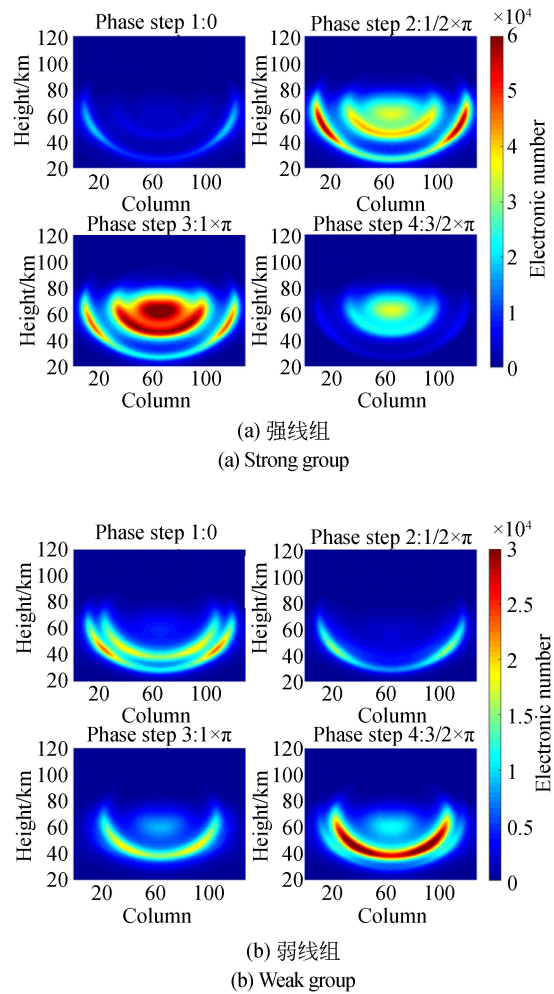


图 5 四个阶跃相位的正演仿真干涉图像

Fig. 5 Forward simulation of interference images for four phase steps

探测器第 l 行第 j 列像素的干涉图总相位可以通过四点采样法得到。总相位减去地球自转相位、卫星运动相位以及仪器相位即可得到风场引起的相位。与地基观测技术相比,临边观测仪器的光学扩展量要小的多,然而,由于临边观测具有较长的积分路径,使得临边辐射谱的强度远大于地基观测的强度。

大气风场、温度场测量的精度受到信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 和临边观测权重的共同影响。在干涉图像的模拟中考虑了 3 种主要的噪声源,即散粒噪声、读出噪声以及探测器暗噪声(相关数据如表 1 所示)。强线组与弱线组的 SNR 和临边观测权重随高度的变化如图 6 所示。由图可见,强线组的 SNR 峰值位于 40~45 km 处,在该区域外缓慢下降,且在小于 40 km 区域下降得更快。强线组的 SNR 在较高的海拔区域(约 60 km)达到峰值。低海拔区域 $O_2(a^1\Delta_g)$ 态的碰撞淬灭作用,导致态密度衰减,从而使得临边观测权重随切点高度的减小而减小。

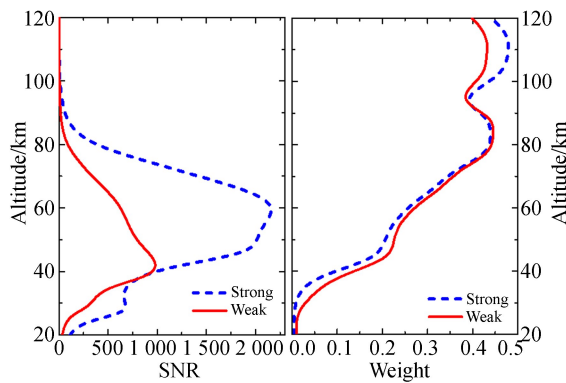


图 6 信噪比与临边观测权重随高度的变化
Fig. 6 Signal-to-noise ratio (SNR) and limb-view weight as functions of altitude

4 误差分析

依据光程差的变化,像素干涉图可以表示为截断傅里叶级数。傅里叶系数 J_1, J_2 和 J_3 (也称为表观量)与干涉图相关^[26]。风和温度的测量不确定度可以通过误差传递来确定。风和温度可以

由表观量 J_1, J_2 和 J_3 导出。视向风可由 J_2 和 J_3 计算得到,大气温度由 J_1 确定。

$$J_1 = I_{\text{mean}} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 I_k$$

$$J_2 = \frac{1}{2U} \sum_{k=1}^4 I_k \cos(\varphi_{klj}). \quad (8)$$

$$J_3 = \frac{1}{2U} \sum_{k=1}^4 I_k \sin(\varphi_{klj})$$

4.1 风速误差

风速 v_w 可以由干涉图的相移 $\delta\varphi$ 获得^[25]:

$$v_w = \frac{c}{2\pi\Delta v_0} \delta\varphi, \quad (9)$$

其中: c 代表真空光速,相位 φ 可以式(10)计算^[22]:

$$\varphi_r = \arctan\left(\frac{J_3}{J_2}\right). \quad (10)$$

每一个像素都可以计算得到视向风以及随机误差。视向风的随机方差为^[26]:

$$\sigma_v^2 = c^2 (2\pi v_0 \Delta)^{-2} (J_2^2 \sigma_{J_3}^2 + J_3^2 \sigma_{J_2}^2) (J_2^2 + J_3^2)^{-2}, \quad (11)$$

式中: J_2 和 J_3 是傅里叶系数, $\sigma_{J_2}^2$ 和 $\sigma_{J_3}^2$ 表示傅里叶系数的随机方差。

图 7 所示为强线组与弱线组两组辐射线风速测量的随机误差标准差(彩图见期刊电子版)。由图可见,对于低海拔区域(低于 42 km)的风速探测,使用弱辐射线更加精确,而高海拔区域使用强

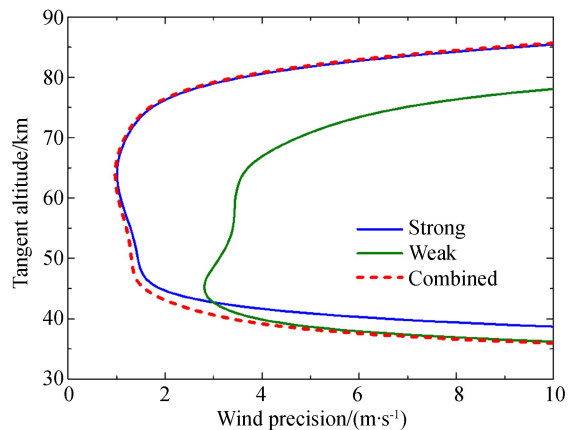


图 7 强线组(蓝线)、弱线组(绿线)辐射线以及联合谱线(红线)多普勒风测量的随机误差标准差
Fig. 7 Random error standard deviation of Doppler wind by strong (blue line) and weak groups (green line) and combined lines (red line)

线更有优势。这是由于强辐射线在低空具有强烈的自吸收效应(如图 1 所示)。

4.2 温度误差

大气温度由温度敏感性不同的两条独立辐射线的吸收率的比值决定^[27], 即有:

$$T = \frac{\frac{hc}{k_B}(E''_2 - E''_1)}{\ln \frac{A_1}{A_2} + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc}{k_B} \frac{(E''_2 - E''_1)}{T_0}}, \quad (12)$$

式中: E'' 是跃迁的低态能级的能量; $S_0(T)$ 为参考温度 $T_0 = 296$ K 时的线强度, A 是辐射线的吸收率积分, h 与 k_B 分别是普朗克常量与玻尔兹曼常量。

温度的不确定度由线强度和吸收率积分的不确定度决定, 可表示为^[28]:

$$\sigma_T = \frac{\Delta T}{T} = \frac{R_A}{T} \frac{dT}{dR_A} \sqrt{\sigma_{s_1}^2 + \sigma_{s_2}^2 + \sigma_{A_1}^2 + \sigma_{A_2}^2}, \quad (13)$$

式中: σ_s^2 与 σ_A^2 分别为线强度和吸收率积分的随机方差; $R_A = A_1/A_2$ 是两条独立发射线的测量积分吸收率之比。

吸收率积分的不确定度主要来自干涉图平均值 J_1 的信噪比。线强度不确定度是由固有不确定度 $\Delta S(T_0)$ 与温度相关的不确定度 $\Delta S_T(T)$ 的传递引起的。 $\Delta S(T_0)$ 可以由数据库获得^[28], $\Delta S_T(T)$ 与线强度成正比:

$$\Delta S_T^2(T) = S^2(T_0) \Delta T^2 \left[-\frac{dQ(T)}{dT} \frac{1}{Q(T)} - \frac{1}{T} + \frac{hcE''}{k_B T^2} + \frac{hcv_0}{k_B T^2} \left(\frac{\exp(-hcv_0/k_B T)}{1 - \exp(-hcv_0/k_B T)} \right) \right], \quad (14)$$

式中 $Q(T)$ 是分子配分函数。

图 8 所示为强线组与弱线组温度探测的随机误差标准偏差分布(彩图见期刊电子版)。由图可见, 弱线组在切点高度 40~75 km 区域的随机误差水平为 1.5~2 K, 强线组的误差约为 2~3 K。高海拔区域由于信号较弱, 误差水平较大。测温精度除了受信噪比影响以外, 还与跃迁的低态能级的能量差有关, 弱线组测温精度高于强线组的原因在于它的低态能级的能量差比强线组大。

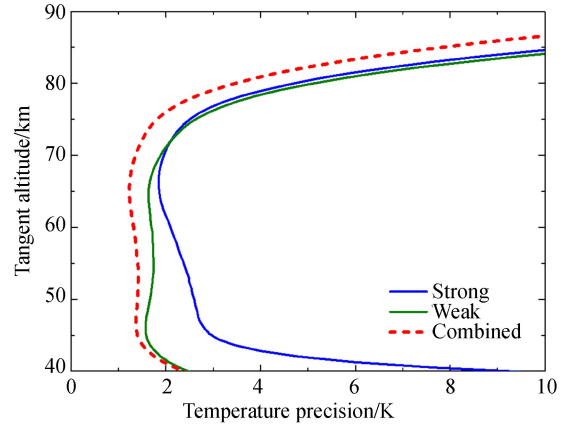


图 8 强线组(蓝线)与弱线组以及联合谱线(绿线)以及联合谱线(红线)温度探测的随机误差标准偏差分布

Fig. 8 Temperature error profiles by using three emission lines in strong (blue line) and weak groups (green line) and combined lines (red line)

5 结 论

本文设计了临近空间风温遥感干涉仪, 以 $1.27 \mu\text{m}$ 附近的 $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ 气辉为目标源, 采用广角迈克尔逊干涉仪, 实现了临近空间区域风场、温度场的同时探测。首先通过逐行积分算法, 并结合最新光化学反应模型(包含光谱参数、速率常数和太阳通量), 开发了 $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ 气辉临边辐射光谱的辐射传输模型。与 WINDII 和 HRDI 等其他风温干涉仪不同, NWTSI 利用两组强度不同的目标谱线, 仅对临近空间区域进行风温探测。按照谱线选取的原则选择了 $7\,820 \sim 7\,824 \text{ cm}^{-1}$ 内的 3 条谱线组成弱线组, $7\,908 \sim 7\,912 \text{ cm}^{-1}$ 内的 3 条谱线组成强线组。弱线用于低空探测, 以避免自吸收效应对测量结果的影响; 强线用于高空探测, 以实现高的测量精度。此外, 建立了由大气辐射传输模块, 迈克尔逊干涉仪模块, 滤波器模块, 以及光学系统、传感器阵列、红外焦平面等设备的系统参数组成的正演模型, 并计算得到了强线组与弱线组的正演仿真干涉图。通过正演模型获得了临边观测图像, 并对风速及温度的测量不确定度进行了计算分析。

风温探测的精度受到了信噪比和临边观测权重的共同作用。由于低海拔区域 $O_2(a^1\Delta_g)$ 态的碰撞淬灭效应,临边观测权重随高度的降低而降低,导致低海拔区域探测精确度的降低。模拟

结果表明,风速测量精度为 $1\sim 3$ m/s,温度测量精度为 $1\sim 3$ K,水平分辨率沿视线约 350 km,在 $40\sim 80$ km 高度内沿轨道约 170 km,满足临近空间风温探测精度的要求。

参考文献:

- [1] 荆楠,李创,钟培峰,等. 光度数据反演临近空间低速点目标形状尺寸信息[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1738-1747.
JING N, LI CH, ZHONG P F, *et al.*. Inversion of low dynamic vehicle shape and dimension information using non-resolved photometric data in near space[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(7): 1738-1747. (in Chinese)
- [2] 陆其峰,周方,漆成莉,等. FY-3D 星红外高光谱大气探测仪(HIRAS)在轨光谱精度评估[J]. 光学精密工程, 2019, 27(10): 2105-2115.
LU Q F, ZHOU F, QI CH L, *et al.*. Spectral performance evaluation of high-spectral resolution infrared atmospheric sounder onboard FY-3D [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(10): 2105-2115. (in Chinese)
- [3] 李娜,陈金松,丁宗华,等. 临近空间大气扰动风场的探测与分析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(7): 35-40.
LI N, CHEN J S, DING Z H, *et al.*. Wind-oscillation measurement and study in near space[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(7): 35-40. (in Chinese)
- [4] 向磊,陈纯毅,姚海峰,等. 双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性测量[J]. 中国光学, 2019, 12(5): 1100-1108.
XIANG L, CHEN CH Y, YAO H F, *et al.*. Measurement of instantaneous-fading correlation in bidirectional optical channels through atmospheric turbulence[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1100-1108. (in Chinese)
- [5] 张轶尧,盛崢,石汉青,等. 基于中国岢岚地区法布里-珀罗干涉仪的风场及行星波观测特征[J]. 空间科学学报, 2018, 38(4):482-491.
ZHANG Y Y, SHENG ZH, SHI H Q, *et al.*. Characteristics of wind and planetary waves based on FPI over Kelan of China [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, 38(4): 482-491. (in Chinese)
- [6] STOBER G, CHAU J L, VIERINEN J, *et al.*. Retrieving horizontally resolved wind fields using multi-static meteor radar observations[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(8): 4891-4907.
- [7] 刘盼,张天舒,范广强,等. 气体受激拉曼散射系统的分析与优化[J]. 光学精密工程, 2019, 27(12): 2509-2516.
LIU P, HANG T SH, FAN G Q, *et al.*. Analysis and optimization of gas stimulated Raman scattering system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(12): 2509-2516. (in Chinese)
- [8] 陈星,李贞,庄子波,等. 测风激光雷达修正 F 因子的小尺度风切变检测算法[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 927-935.
CHEN X, LI ZH, ZHUANG Z B, *et al.*. A small scale wind shear detection algorithm of modified F-factor for wind-profiling lidar[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 927-935. (in Chinese)
- [9] 漆成莉,周方,吴春强,等. 风云三号红外高光谱探测仪的光谱定标[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 747-755.
QI CH L, ZHOU F, WU CH Q, *et al.*. Spectral calibration of Fengyun-3 satellite high-spectral resolution infrared sounder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 747-755. (in Chinese)
- [10] 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.
FENG Y T, LI J, ZHAO Z L, *et al.*. Development of interferometric spectroscopy for atmosphere wind observations based on satellite [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(3): 14-26. (in Chinese)
- [11] SHEPHERD G G, THUILLIER G, CHO Y M, *et al.*. The Wind Imaging Interferometer (WIND-II) on the Upper Atmosphere Research Satellite: a 20 year perspective[J]. *Reviews of Geophysics*,

- 2012, 50(2):RG2007.
- [12] HAYS P B, ABREU V J, DOBBS M E, *et al.*. The high-resolution Doppler imager on the Upper Atmosphere Research Satellite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 10713-10723.
- [13] ORTLAND D, HAYS P B, SKINNER W R, *et al.*. Remote sensing of mesospheric temperature and O₂(1Σ) band volume emission rates with the high-resolution Doppler imager[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 1821-1835.
- [14] SHEPHERD G G, MCDADE I C, GAULT W A, *et al.*. The stratospheric wind interferometer for transport studies (swift)[J]. *Advances in Space Research*, 2001, 27(6/7): 1071-1079.
- [15] 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.
- [16] GORDLEY L L, MARSHALL B T. Doppler wind and temperature sounder: new approach using gas filter radiometry[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5(1): 053570.
- [17] 武魁军, 何微微, 于光保, 等. 分子滤光红外成像技术及其在光电探测中的应用(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 402003.
- WU K J, HE W W, YU G B, *et al.*. Molecular filter infrared imaging technology and its application in photoelectric detection (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 402003. (in Chinese)
- [18] TURNER D S, ROCHON Y J. On the feasibility of a fast forward model for Doppler interferometry in the infrared[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138(663): 483-499.
- [19] RAHNAMA P, GAULT W A, MCDADE I C, *et al.*. Scientific assessment of the SWIFT instrument design[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(9): 2081-2094.
- [20] WARD W E, GAULT W A, SHEPHERD G G, *et al.*. Waves Michelson Interferometer: a visible/near-IR interferometer for observing middle atmosphere dynamics and constituents[C]. *International Symposium on Remote Sensing. Proc SPIE* 4540, *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites V, Toulouse, France*, 2001, 4540: 100-111.
- [21] WU K J, FU D, FENG Y T, *et al.*. Simulation and application of the emission line O_{19P18} of O₂ (a₁Δ_g) dayglow near 127 μm for wind observations from limb-viewing satellites[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16984.
- [22] HE W W, WU K J, FENG Y T, *et al.*. The near-space wind and temperature sensing interferometer: forward model and measurement simulation[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 914.
- [23] 何微微, 武魁军, 王姝娜, 等. 1.27 μm 气辉的星载成像干涉仪风温探测技术[J]. *光学与光电技术*, 2019, 17(2): 72-78.
- HE W W, WU K J, WANG SH N, *et al.*. Observation technology of wind and temperature by onboard imaging interferometer with 1.27 μm air glow[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 17(2): 72-78. (in Chinese)
- [24] WU K J, HE W W, FENG Y T, *et al.*. Effect of OH radiance on the temperature and wind measurements derived from limb viewing observations of the 1.27 μm O₂ dayglow [J]. *Atmospheric Measurement Technique Discussions*, 2020, 13: 1817-1824.
- [25] 何微微, 武魁军, 冯玉涛, 等. O₃ 辐射源 Michelson 测风成像干涉仪临边观测正演仿真[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0512005.
- HE W W, WU K J, FENG Y T, *et al.*. Forward simulation of limb-viewing Michelson wind imaging interferometer based on O₃ radiation source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0512005. (in Chinese)
- [26] 何微微, 武魁军, 冯玉涛, 等. O₃ 辐射源星载干涉仪测风不确定度分析[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(8): 117-124.
- HE W W, WU K J, FENG Y T, *et al.*. Wind uncertainty analysis of onboard interferometer based on O₃ radiation source[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 117-124. (in Chinese)
- [27] WU K J, LI F Q, CHENG X W, *et al.*. Sensitive detection of CO₂ concentration and temperature for hot gases using quantum-cascade laser absorption

spectroscopy near $4.2 \mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(2): 659-666.

[28] LIU X, JEFFRIES J B, HANSON R K, *et al.*.

Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature [J]. *Applied Physics B*, 2006, 82(3): 469-478.

作者简介:



何微微(1987—),女,山东淄博人,博士,副教授,2010年于鲁东大学获得学士学位,2015年于中国科学院固体物理所获得博士学位,主要从事星载测风方面的研究。E-mail: heweiwei@wipm.ac.cn

通讯作者:



武魁军(1988—),男,山东泰安人,博士,副研究员,2010年于鲁东大学获得学士学位,2015年于中国科学院武汉物理与数学研究所获得博士学位,主要从事星载测风方面的研究。E-mail: wukuijun@wipm.ac.cn