

地基双波段非对称空间外差测风干涉仪设计

崔勇 高亮 江伦 王锦疆 裴惠熠 方远翔

Design of ground-based dual-band asymmetric spatial heterodyne wind interferometer

CUI Yong, GAO Liang, JIANG Lun, WANG Jinjiang, PEI Huiyi, FANG Yuanxiang

引用本文:

崔勇, 高亮, 江伦, 等. 地基双波段非对称空间外差测风干涉仪设计[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 571–579. DOI: 10.5768/JAO202546.0301004

CUI Yong, GAO Liang, JIANG Lun, et al. Design of ground-based dual-band asymmetric spatial heterodyne wind interferometer[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 571–579. DOI: 10.5768/JAO202546.0301004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0301004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

变间隙法布里-珀罗干涉仪光程差线性分析

Linear analysis of optical path difference of variable-gap Fabry-Perot interferometer

应用光学. 2021, 42(3): 494–498 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0302007>

空间外差光谱仪光谱降噪方法研究

Denoising method for spectrum of spatial heterodyne spectrometer

应用光学. 2020, 41(3): 462–468 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0301005>

可见/中波双波段共口径光学系统设计

Optical design of VIS/MWIR dual-band common-aperture system

应用光学. 2020, 41(3): 435–440 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0301001>

双波段CCTV鱼镜头光学系统设计

Optical system design of dual band CCTV fish-eye lens

应用光学. 2021, 42(6): 1006–1010 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601009>

等光程干涉仪中参考镜楔角最优补偿方式研究

Optimal compensation methods of wedge angle of reference mirror in equal optical path interferometers

应用光学. 2022, 43(5): 950–958 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0503004>

大对称视场离轴三反系统设计

Design of off-axis three-mirror system with large symmetric field of view

应用光学. 2023, 44(5): 952–958 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0571-09

引用格式: 崔勇, 高亮, 江伦, 等. 地基双波段非对称空间外差测风干涉仪设计 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 571-579.

CUI Yong, GAO Liang, JIANG Lun, et al. Design of ground-based dual-band asymmetric spatial heterodyne wind interferometer [J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 571-579.



在线阅读

地基双波段非对称空间外差测风干涉仪设计

崔勇¹, 高亮^{1,2,3}, 江伦^{1,2,3}, 王锦疆¹, 裴惠熠¹, 方远翔¹

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林长春 130022; 2. 深圳鹏程实验室, 广东深圳 518000; 3. 长春理工大学空地激光通信技术国防基础科学重点实验室, 吉林长春 130022)

摘要: 根据中高层大气风场探测需求, 设计了一款可对 557.7 nm 氧原子绿线气辉及 630.0 nm 氧原子红线气辉同时进行探测的非对称空间外差测风干涉仪, 探测范围为 90 km~300 km。为实现对双波段的探测, 根据干涉条纹调制度与最优光程差的关系, 选择对双波段兼容的光程差。通过对扩视场棱镜的顶角及材料进行设计和选择, 提高了干涉仪的视场范围。为减少热偏差对测风精度的影响, 推导了热偏差与垫片材料、垫片厚度、干涉仪偏置量的关系式, 并通过该式计算出相应的参数。此外, 采用一种中阶梯光栅作为反射光栅, 实现双波段同时探测。根据地基探测的需要, 设计了前置镜组及后置镜组。最后对整体系统进行仿真并获取模拟条纹图, 验证系统是否满足双波段探测需要。仿真结果表明: 干涉仪的干涉模块在 557.7 nm 气辉波段的光程差的热偏差为 3.22×10^{-6} mm/°C, 相位热漂移为 0.03 rad/°C; 630 nm 气辉波段的光程差的热偏差为 9.45×10^{-7} mm/°C, 相位热漂移为 0.00942 rad/°C, 证明了该系统相较于早期的设计降低了热偏差对测量精度的影响, 满足 90 km~300 km 测风要求。

关键词: 中高层大气; 风速测量; 非对称空间外差; 干涉仪; 光学设计

中图分类号: TN202; TH744

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0301004

Design of ground-based dual-band asymmetric spatial heterodyne wind interferometer

CUI Yong¹, GAO Liang^{1,2,3}, JIANG Lun^{1,2,3}, WANG Jinjiang¹, PEI Huiyi¹, FANG Yuanxiang¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518000, China; 3. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: An asymmetric spatial aberration wind measurement interferometer was designed to simultaneously detect 557.7 nm oxygen-atom green-line airglow and 630.0 nm oxygen-atom red-line airglow in the detection range of 90 km~300 km according to the needs of wind field detection in the middle and upper atmosphere, and the optical range difference compatible with the two bands was selected according to the relationship between the interferometric fringe modulation regime and the optimal optical range difference for the detection of the two bands. The field of view of the interferometer was improved by designing and selecting the top angle and material of the expanded field of view prism. In order to reduce the influence of thermal deviation on

收稿日期: 2024-04-23; 修回日期: 2024-06-25

基金项目: 吉林省重点研发计划项目“星载中高层大气风场探测仪研制”(20230201006GX)

作者简介: 崔勇 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计和多普勒风速测量研究。E-mail: majorws0001@163.com

通信作者: 高亮 (1980—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事激光通信和光电跟踪瞄准等研究。

E-mail: gao_lianger@126.com

the accuracy of wind measurement, the relationship equations between thermal deviation and shim material, shim thickness, and interferometer bias were derived, and the corresponding parameters were calculated by this equation. In addition, a middle-step grating was adopted as the reflection grating to realize the simultaneous detection of dual-band. According to the needs of the foundation detection, the required front lens group and rear lens group were designed. Finally, the overall system was simulated and the simulated streak map was obtained to verify whether it met the needs of dual-band detection. The simulation results show that the thermal deviation of the optical range difference of the final interferometer in the 557.7 nm airglow band is 3.22×10^{-6} mm/°C, and the phase thermal drift is 0.03 rad/°C. The thermal deviation of the optical range difference in the 630 nm airglow band is 9.45×10^{-7} mm/°C, and the phase thermal drift is 0.009 42 rad/°C. The design results show that the system is suitable for dual-band detection. The design results show that the system meets the need for 90 km~300 km wind measurement and reduces the influence of thermal deviation on the measurement accuracy compared with the earlier design.

Key words: upper middle atmosphere; wind speed measurement; asymmetric spatial heterody; interferometer; optical design

引言

多普勒差分干涉光谱技术 (Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy, DASH) 是目前针对中高层大气风场探测的新型技术, 该技术基于空间外差光谱技术 (spatial heterodyne spectroscopy, SHS), 通过增大干涉仪一臂的偏置量, 提高相位灵敏度, 实现对大气风场的高精度测量。与传统的测风干涉仪, 如法布里-珀罗测风干涉仪 (Fabry-Perot interferometer, FPI)、迈克尔逊测风干涉仪 (Michelson interferometer, MI) 相比, DASH 型干涉仪具有视场大、机械稳定性好、制造工艺简单、仪器体积小、成本低、精度高等优点^[1-6]。该技术于 2006 年由 ENGLERT C R 和 HARLANDER J M 等人提出^[7], 并在 2007 年由美国海军实验室支持, 搭建出世界上第一台 DASH 干涉仪, 验证了该系统的可行性^[8]。基于该技术, 各主要技术强国对该领域进行了大量研究, 如美国的 REDDI (redline DASH demonstration instrument)^[9]、ARROW (atmospheric redline interferometer for Doppler winds)^[10]、MIGHTI (Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging)^[11-15]、mini-MIGHTI (mini-Michelson inerferometer for global high-resolution thermospheric imaging)^[16]; 加拿大的 SWIFTI-DASH (stationary wind interferometer for transport studies-DASH)^[17]; 中国西安光机所的双视场准共路多普勒外差干涉仪和宽谱段多普勒差分干涉仪^[19-21]、安徽光机所的 LODI (large offset DASH interferometer)^[22]; 中德联合研制的热稳定单片多普勒非对称空间外差干涉仪

等^[23]。其中 MIGHTI 是目前首个已投入运行的星载仪器, 已获得大量实验结果。该型干涉仪不仅完成了基础探测实验, 并且进行了与地基 FPI 测风干涉仪和流星雷达交叉检验, 结果表明, 该仪器所获取的数据与其他仪器的数据吻合良好, 证明了 MIGHTI 干涉仪具有良好的探测能力^[14]。

目前国内对 DASH 测风技术的研究尚处于实验室验证阶段, 设计的大部分系统探测波段为单一波段, 会受到目标源所在大气高度范围的影响, 且探测高度范围与传统测风干涉仪相比有明显劣势, 从而导致该型干涉仪的利用率不高。为解决上述问题, 本文设计了一种可对 557.7 nm O(S) 氧原子绿线与 630.0 nm O(D) 氧原子红线气辉进行探测的地基 DASH 干涉仪, 可对 90 km~300 km 高度的大气风速进行测量, 同时通过对干涉模块进行热补偿设计, 降低热偏差对测风精度的影响, 以适应高精度探测需求。

本文首先介绍了 DASH 测风干涉仪的测风原理, 然后根据双波段探测的需要对干涉仪参数进行设计, 为了提高测量精度, 通过热偏差方程的推导及干涉模块元件的设计, 对干涉模块进行热补偿设计, 并设计了与之匹配的前置镜组及后置镜组, 最后对干涉仪系统进行仿真分析, 验证了设计的系统满足双波段测风要求。

1 DASH 干涉仪测风原理

DASH 干涉仪是基于 SHS 干涉仪与 MI 干涉仪改进而来, 相较于 MI 干涉仪, DASH 干涉仪将 MI

的反射镜改成闪耀光栅,同时相较于 SHS 干涉仪增加了一臂的偏置量,提高了干涉仪的相位灵敏度,从而实现对风速的测量。DASH 干涉仪系统原理如图 1 所示。

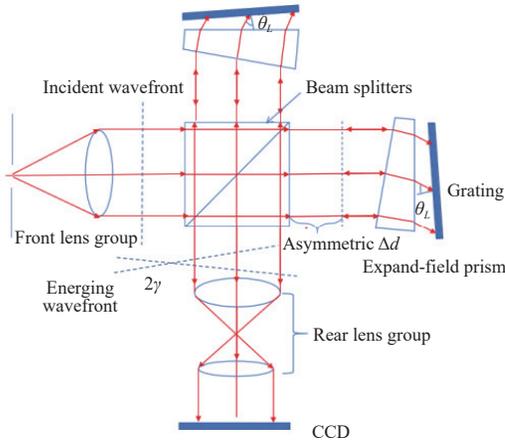


图 1 DASH 测风干涉仪系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DASH wind interferometer system

图 1 中产生频移的目标谱线,通过前置镜组入射到干涉模块中,被分束器分为两束强度相同、振动方向相同、相位差恒定的相干光束。这两束光通过两臂的扩视场棱镜后入射到光栅上,发生衍射并原路返回,在分束面处形成等厚干涉条纹,通过后置镜组投影到 CCD 上。最终产生的干涉图可由式 (1) 表示为

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

式中: $B(\sigma)$ 为入射光谱函数; σ 为探测波段内的任意波数; σ_L 为探测波段中仪器的 Littrow 基频波数; θ_L 为衍射光栅的 Littrow 角; x 为探测器的位置; Δd 为非对称量。在条纹形成过程中,两束光产生的光程差为 $2\Delta d$, 通过式 (1) 可看出,当 Δd 增加时,干涉相位的变化程度也随之增大,从而提高了测风灵敏度。

风速引起的干涉相位频移 $\delta\varphi$ 与探测目标的波数 σ_0 、干涉仪的非对称量 Δd 和风速 v , 在探测器 $x=0$ 处像元位置的关系为

$$\delta\varphi = 4\pi \cdot \Delta d \cdot \Delta\sigma = 4\pi \cdot \Delta d \cdot \sigma_0 \cdot \frac{v}{c} \quad (2)$$

式中探测到的谱线波数变化量 $\Delta\sigma$ 满足关系:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{v}{c} \quad (3)$$

式中: σ_0 为未发生频移的谱线波数; v 为探测的风速; c 为光速。由式 (2) 和式 (3) 可知,通过计算有

风速时干涉图相位与零风速相位之间的差值,即可反演出风速大小。

2 测风干涉仪设计

地基双波段测风干涉仪系统整体结构示意图如图 2 和图 3 所示。该系统由干涉模块、前置光学镜组、后置光学镜组及 CCD 组成。相较于传统的单波段干涉仪,该干涉仪探测谱段变宽,因此,需要对整体光学系统进行重新设计,以满足探测需要。干涉模块的设计将在下面进行详细叙述,表 1 为整体系统的参数。

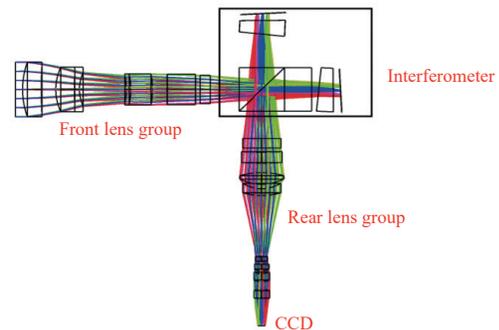


图 2 系统 2D 图

Fig. 2 2D diagram of system

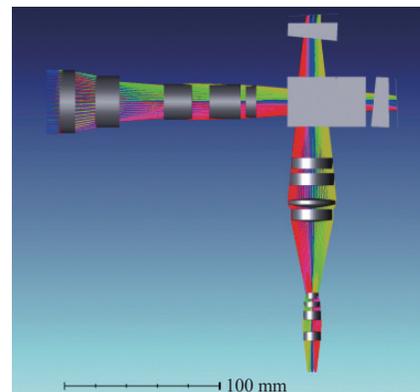


图 3 系统整体 3D 图

Fig. 3 3D diagram of system

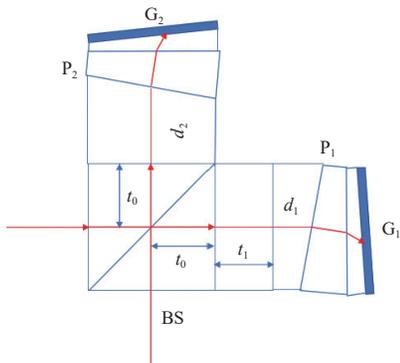
表 1 干涉仪整体系统参数

Table 1 Overall system parameters of interferometer

参数名称	参数值
F#	3.2
波长/nm	557.7 & 630.0
视场角/(°)	6.618(@557.7 nm)
	7.166(@630.0 nm)
入瞳直径/mm	40
CCD尺寸/mm	13.3×13.3
像元尺寸/μm	13.3×13.3

2.1 干涉模块设计

干涉模块为测风干涉仪的核心,由分束器、平行平板、垫片、扩视场棱镜及光栅构成,其结构如图4所示。干涉模块不仅要考虑对双波段探测的兼容,同时也要考虑探测时环境温度的影响,因此,干涉模块将基于上述要求进行设计。



BS: beam splitters; t_1 : asymmetric; d_1 : wedged spacers 1; d_2 : wedged spacers 2; P_1 : expand-field prism 1; P_2 : expand-field prism 2; G_1 : grating 1; G_2 : grating 2

图4 DASH干涉模块结构图

Fig. 4 DASH structure diagram of DASH interference module

2.1.1 最优光程差分析

由式(1)可知, Δd 越大, 相位灵敏度越高。由于干涉条纹对比度的影响, Δd 存在一个最优值, 并且此次设计的仪器探测的目标源为两种气辉, 故对应的 Δd 最优值也不同, 因此需要选取最优光程差。图5为不同光程差下, 0 m/s 风速与 150 m/s 风速下的干涉光强图。图5中方块点线代表 0 m/s 风速下干涉光强的变化, 圆点线为 150 m/s 风速下干涉光强的变化, 三角点线为两种风速下干涉光强差值。从图5中可以看出, 在较大风速下, 干涉谱线的移动相较于零风速时并不明显, 通过式(3)可计算出该频移变化的量级一般在 10^{-6} cm ~ 10^{-8} cm 范围内。从图5中还可以看出, 随着光程差的增大, 2个风速下的干涉光强会逐渐减弱, 但在 2 cm ~

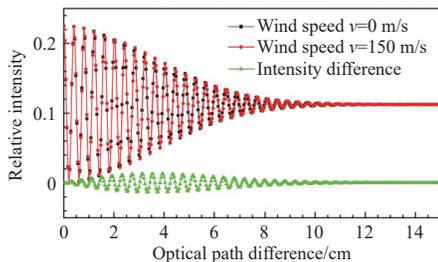


图5 不同光程差下的干涉图强度

Fig. 5 Interferometric light intensity at different optical range differences

6 cm 区间内 2 个风速下的干涉光强的差值较为明显, 当光程差大于 4 cm 后, 2 个风速的干涉光强的差值会逐渐减小, 当光程差大于 8 cm 后, 干涉光强的差值基本接近于零。这表明多普勒频移变得不再明显, 因此需要选择出一个最优光程差, 使得干涉谱线的频移比较明显。

干涉条纹对比度是表示干涉光强图的重要参数。理想情况下, 在任意光程差处单色光干涉条纹对比度可由干涉图的包络线函数^[22]表示为

$$E(L) = \exp(-2\pi^2 \sigma_D^2 L^2) \quad (4)$$

式中: σ_D 表示气辉谱线在大气温度与压力作用下产生的谱线展宽, 表达式为

$$\sigma_D = 7.16 \times 10^{-7} \sigma_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (5)$$

式中: T 为谱线所在层的特征温度; M 为氧原子的摩尔质量数。

由式(4)可知, 当光程差逐渐增大时, 干涉条纹对比度 $E(L)$ 将会逐渐降低, 从而影响测量灵敏度。为了获取较好的探测灵敏度, 在仅考虑温度引起谱线展宽的情况下, 最优光程差 L_{opt} 与谱线展宽 σ_D 的关系式为

$$L_{opt} = 2\Delta d = \frac{1}{2\pi \sigma_D} \quad (6)$$

通过式(6)可解算出 557.7 nm 波段的最优光程差为 3.5 cm, 630.0 nm 波段的最优光程差为 1.77 cm。双波段测风干涉仪在设计过程中, 最优光程差的选择主要是为了兼顾 557.7 nm 与 630.0 nm 波段可同时探测, 但 557.7 nm 绿线气辉除了在 95 km 附近存在强辐射峰外, 在 245 km 附近还存在一个弱辐射峰^[27], 因此通过选择适当的光程差, 将 245 km 处绿线波段的对比度变低。557.7 nm 气辉与 630.0 nm 气辉在不同光程差下的调制度与相位频移图如图6所示。从图6可以看出, 此次选择的光程差

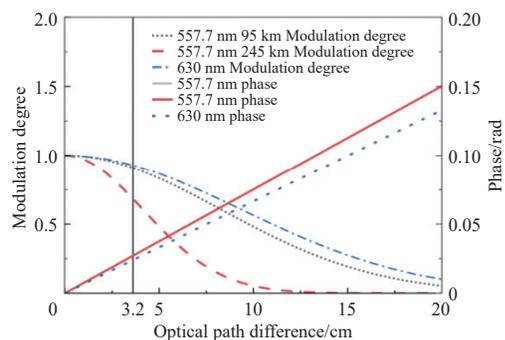


图6 调制度与相位频移图

Fig. 6 Modulation degree and phase shift diagram

为 3.2 cm, 在此光程差下在 245 km 处 557.7 nm 气辉的调制度较低, 630.0 nm 气辉的调制度较好, 可实现双波段下较好的风速测量。

2.1.2 扩视场棱镜设计

由于大气中的气辉谱线亮度较弱, 因此对探测此类目标仪器的光通量接收能力提出了较高要求。相较于传统的干涉仪, DASH 型干涉仪在分束器与光栅之间加入扩视场棱镜, 提高了系统光通量与信噪比。随着视场的增加, 条纹对比度也得到了极大地改善。除扩展视场外, 扩视场棱镜还起到消除轴外与轴上视场相位差的作用^[25]。本文设计的干涉仪探测波段为 630.0 nm 与 557.7 nm, 因此棱镜应选择对双波段色散效果比较好的材料。

当目标谱线光源通过前置镜组入射到棱镜前表面后, 根据斯涅耳定理, 棱镜顶角由式 (7) 得到:

$$n \sin(\alpha/2) = \sin(\eta) \quad (7)$$

为了减小轴外与轴上视场的相位差, 获得更大的视场容限, 可通过优化棱镜的顶角实现^[25], 即:

$$2(n^2 - 1) \tan \eta = n^2 \tan \theta \quad (8)$$

式中: n 为棱镜的折射率; θ 为光栅的 Littrow 角; η 为光线入射到棱镜前表面的角度; α 为棱镜顶角。

通过式 (7) 与式 (8) 联立计算, 在 630.0 nm 波段棱镜顶角 α 为 6.33°, 在 557.7 nm 波段棱镜顶角 α 为 6.26°。为了满足光学加工要求, 棱镜设计为等腰棱镜, 并以 630.0 nm 波段为主, 同时兼顾 557.7 nm 波段, 因此棱镜选取的角度为 6.28°。在该角度下, 这 2 个波段均可实现扩视场的需要。此次选择的棱镜材料为 H-ZF52, 在 2 个波段内折射率偏差不大, 同时满足双波段探测的色散要求。

非对称空间外差干涉仪的立体角 Ω 与光谱分辨能力 R 存在着制约关系^[25], 即:

$$\Omega_{\max} = \frac{2\pi}{R} \quad (9)$$

式中 R 可表示为

$$R = \frac{\sigma}{\delta\sigma} \quad (10)$$

630.0 nm 波段的光谱最小分辨率 $\delta\sigma$ 为 0.504 cm^{-1} (0.020 nm), 557.7 nm 波段的光谱最小分辨率 $\delta\sigma$ 为 1.093 cm^{-1} (0.034 nm), 则 630.0 nm 波段的光谱分辨能力为 7998.413, 557.7 nm 波段光谱分辨能力为 16400.610。在该型干涉仪中, 任意探测波段的半视场角可由式 (11) 得到:

$$\beta = \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{2}{R + 4\sigma\Delta d}} \quad (11)$$

由式 (11) 计算可得, 557.7 nm 气辉的半视场角为 3.309°, 630.0 nm 气辉的半视场角为 3.583°。

任意波段的立体角表达式为

$$\Omega = 2\pi [1 - \cos(\beta)] \quad (12)$$

由式 (12) 计算可得, 557.7 nm 气辉探测的立体角为 0.011 sr, 630.0 nm 气辉探测的立体角为 0.012 sr。

系统探测波段的集光度可由式 (13) 得到:

$$A\Omega = 4\pi \Omega \quad (13)$$

由式 (13) 计算可得 557.7 nm 气辉的集光度为 0.130 cm^2sr , 630 nm 气辉的集光度为 0.154 cm^2sr 。

2.1.3 热补偿设计

综上所述, 该型干涉仪的测风方法是基于干涉图相位反演, 因此对干涉仪的相位灵敏度及精度要求较高。在仪器使用过程中, 环境温度会使仪器产生一定量的热变化, 如干涉模块的热膨胀、模块各光学元件的折射率变化等, 从而影响获取的风速相位值, 进而影响风速测量精度。因此在干涉模块设计过程中, 需要对干涉模块进行热补偿设计。

热补偿设计主要是根据选取的光程差, 通过偏置量厚度设计、垫片厚度设计、垫片材料选取等方式组合实现。干涉模块结构图如图 4 所示。图 4 中 t_1 为分束器偏置量厚度, d_1 为偏置臂垫片厚度, d_2 为非偏置臂垫片厚度, P_1 与 P_2 为扩视场棱镜。两臂产生的光程差可由式 (14) 表示为

$$\Delta d_0(\omega) = nt_1 + d_1 - d_2 - \frac{\sin^2\omega}{2} \left(\frac{t_1}{n_1} + d_1 - d_2 \right) - O(\sin^4\omega) \quad (14)$$

为了进行视场拓展, 消除干涉仪视场角 ω 的影响, 二阶项应变为 0, 即:

$$\frac{t_1}{n_1} + d_1 - d_2 = 0 \quad (15)$$

干涉模块的分束器、棱镜和光栅的组合主要通过玻璃垫片进行连接, 但这些零件的热膨胀系数不同, 将会影响设计的光程差 Δd_0 , 从而影响获得的风速相位。热膨胀对光程差的影响可由式 (16) 表示为

$$\frac{d\Delta d_0}{dT} = \frac{dn_1}{dT} t_1 + \frac{dt_1}{dT} n_1 + \frac{dd_1}{dT} - \frac{dd_2}{dT} \quad (16)$$

式中热膨胀系数可表示为

$$\alpha = -\frac{d}{dT} \frac{1}{n} = \frac{dn}{dT} \frac{1}{n} \quad (17)$$

将式 (17) 带入式 (16) 中, 光程差随温度的变化可表示为

$$\frac{d\Delta d_0}{dT} = \frac{dn_1}{dT}t_1 + n_1\alpha_1t_1 + \alpha_2d_1 - \alpha_3d_2 \quad (18)$$

式中： n_1 为分束器折射率； t_1 为分束器的非对称厚度； d_1 、 d_2 为垫片1和垫片2的厚度； α_1 、 α_2 、 α_3 为分束器、垫片1和垫片2的热膨胀系数。为了消除热变化对光程差的影响，令式(18)的结果趋近于0。因此，需要选择受温度影响较小的材料作为分束器及垫片的材料，最终设计的干涉模块的参数如表2所示。

表2 干涉模块参数

Table 2 Interference module parameters

元件名称	参数名称	参数值
分束器	材料	H-K9LAGT
	偏置量/mm	18.714
	分光比	1 : 1
棱镜	材料	H-ZF52
	厚度/mm	10
	角度/(°)	6.28
楔形垫片	H-FK61垫片厚度 d_1 /mm	5.217
	熔融石英垫片厚度 d_2 /mm	17.5
	刻线密度line/mm	64.285
光栅	材料	熔融石英
	闪耀角/(°)	8.2
	衍射级次/阶	8(@557.7 nm) 7(@630.0 nm)
干涉仪	温度漂移/(rad/°C)	0.03(@557.7 nm) 0.00942(@630.0 nm)

通过式(18)可计算出本次设计的干涉仪在557.7 nm气辉下光程差的热偏差为 3.22×10^{-6} mm/°C，相位热漂移为0.03 rad/°C；在630.0 nm气辉下光程差的热偏差为 9.45×10^{-7} mm/°C，相位热漂移为0.00942 rad/°C。在这2个热补偿状态下，温度对各波段风速测量所产生的最大误差均小于2 m/s，同时与其他系统热漂移量4.29 rad/°C相比^[24]，本文设计的干涉仪热稳定效果明显提升。

2.1.4 光栅选择

此次光栅选取的是MIGHTI中阶梯光栅，该类光栅的刻线密度通常在几十lp/mm，通过多级衍射特性实现对多波段光源不同级次的衍射。该型光栅通过测试验证了在各级次的衍射效率，其结果满足双波段探测的需要^[18]。本次设计选取的中阶梯光栅的衍射公式为

$$2 \sin \theta_L = \frac{m\lambda}{d} \quad (19)$$

式中： θ_L 为光栅的Littrow角； λ 为入射光波长； m 为光栅的衍射级次， d 为光栅常数。此次选用的光栅刻线密度为64.285 line/mm，通过式(19)计算出557.7 nm绿线气辉的衍射级次为8阶，630 nm红线气辉的衍射级次为7阶。

2.2 前置镜组设计

前置光学镜组负责接收来自中高空的目标气辉光源，并投射到干涉模块上形成干涉条纹。为了保证条纹图案不随成像位置的变化而变化，前置镜组的光学结构为像方远心系统。最终设计的镜组见图2中的前置镜组所示，具体参数如表3所示。由于此次设计的仪器对成像精度要求较高，因此该镜头的MTF值接近衍射极限，最终设计的镜头的MTF曲线如图7所示。从图7可以看出，设计的镜头满足探测要求。

表3 前置镜组参数

Table 3 Front lens group parameters

参数名称	参数值
入瞳直径/mm	40
视场/(°)	7.5
$F^\#$	5.05
波长/nm	557.7 & 632.8
光学系统总长/mm	236.893
远心度	<0.005

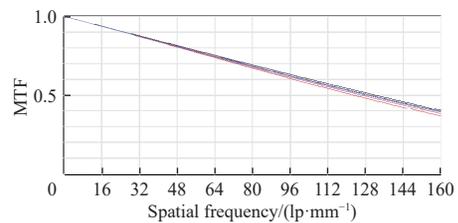


图7 前置镜组MTF曲线

Fig. 7 MTF curves of front lens group

2.3 后置镜组

后置光学镜组负责将干涉模块产生的条纹图缩放投影到CCD上。为了使该镜组的成像放大倍率不随物面和像面位置的变化而变化，该镜组采用双远心结构的投影镜组，同时可保证具有较大的景深^[26]。干涉仪形成的条纹尺寸为15 mm×15 mm，选取的CCD尺寸为13.3 mm×13.3 mm，最终设计的后置镜组的光路图如图2中的后置镜组所示，参数如表4所示，点列图和MTF曲线如图8、图9所示。从图8和图9中可以看出，光斑尺寸小于艾里

斑尺寸, MTF 值接近衍射极限, 表明该镜头设计效果良好, 满足探测要求。

表 4 后置镜头参数

Table 4 Parameters of rear group lens

参数名称	参数值
波长/nm	557.7 & 630.0
投影物面尺寸	15 mm×15 mm
投影倍率	-0.574
$F^\#$	9
后截距/mm	30
远心度	<0.007

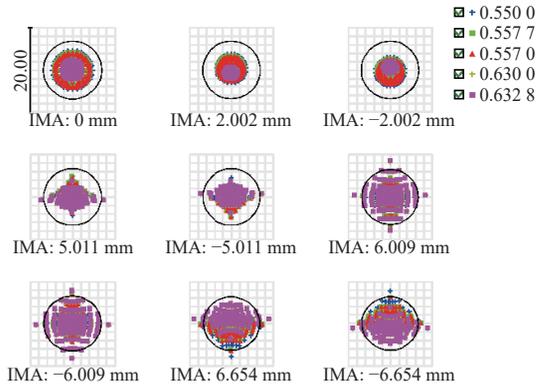


图 8 后置镜组点列图

Fig. 8 Point array diagram of rear lens group

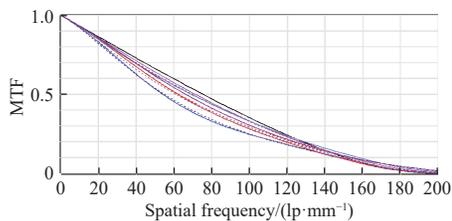


图 9 后置镜组 MTF 曲线

Fig. 9 MTF curves of rear lens group

3 仿真验证分析

为检验干涉仪是否满足对双波段的探测要求, 对其进行条纹空间频率的模拟验证。条纹空间频率可由式(20)表示为

$$f_x = 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta_L \quad (20)$$

式中: σ 为入射目标源波数; θ_L 为 Littrow 角; σ_0 为探测波段的 Littrow 波数。令条纹空间频率乘以像元尺寸, 即可得到对应探测器上不同波段的理论条纹数。由式(20)式计算可得 557.7 nm 气辉的理论条纹数为 24 条, 630.0 nm 气辉的理论条纹数为

45 条。系统在 557.7 nm 气辉和 630.0 nm 气辉的条纹模拟图如图 10、图 11 所示, 图 10 和图 11 中条纹数与理论条纹数相一致。通过理论条纹数与模拟条纹图对比可知, 该系统可实现 557.7 nm 气辉与 630.0 nm 气辉同时探测, 达到了系统设计的目的。

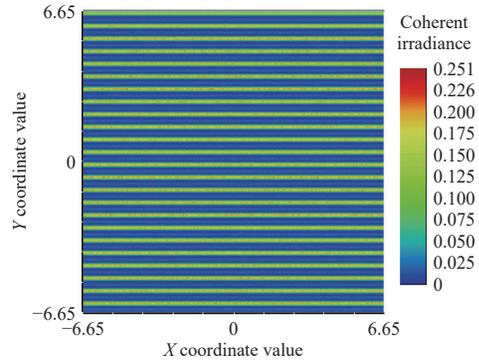


图 10 557.7 nm 模拟条纹图

Fig. 10 557.7 nm simulated fringe pattern

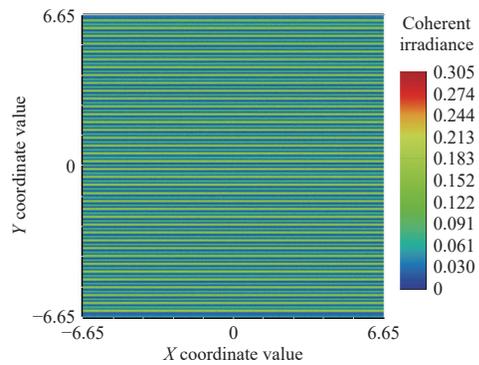


图 11 630.0 nm 模拟条纹图

Fig. 11 630 nm simulated fringe pattern

4 结论

本文根据中高层大气风场探测需要, 设计了一款对 557.7 nm 氧原子绿线气辉与 630.0 nm 氧原子红线气辉探测的地基测风干涉仪。通过对干涉模块参数及材料的选择, 实现了对 90 km~300 km 大气风场风速的探测。通过对干涉模块增加前置与后置镜组并进行消热差设计, 最终设计的干涉仪在 557.7 nm 气辉的热偏差为 3.22×10^{-6} mm/°C, 相位热漂移为 0.03 rad/°C, 在 630.0 nm 气辉的热偏差为 9.45×10^{-7} mm/°C, 相位热漂移为 0.00942 rad/°C, 温度对各波段风速测量产生的最大误差均小于 2 m/s。对设计的整体系统进行了仿真, 仿真结果表明, 557.7 nm 气辉下仿真干涉条纹数为 24 条, 630.0 nm 气辉下仿真干涉条纹数为 45 条, 仿真结

果与理论计算值相符合,验证了设计的干涉仪满足双波段探测需要。

参考文献:

- [1] 汪丽. 干涉法大气风场探测技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2007.
WANG Li. Study on wind measurement of atmosphere by interferometry technology[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [2] 唐远河, 张淳民. 卫星遥感被动探测高层大气风场[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
TANG Yuanhe, ZHANG Chunmin. Satellite remote sensing passive detection of upper atmosphere wind field[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [3] 唐远河, 张淳民, 陈光德, 等. 卫星遥感探测上层大气风场的关键技术研究进展[J]. 物理学进展, 2005, 25(2): 142-152.
TANG Yuanhe, ZHANG Chunmin, CHEN Guangde, et al. Research progress on key technologies for satellite remote sensing detection of wind fields in the upper atmosphere[J]. Progress in Physics, 2005, 25(2): 142-152.
- [4] 张淳民, 相里斌, 赵葆常, 等. 用 Fabry-Perot 干涉仪测量上层大气风场的速度和温度[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(4): 97-99.
ZHANG Chunmin, XIANG Libin, ZHAO Baochang, et al. Measurement of velocity and temperature of wind field in upper atmosphere by Fabry-Perot interferometer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(4): 97-99.
- [5] 张宣妮. 风成像迈克尔逊干涉仪的研究[J]. 价值工程, 2010, 29(26): 250-252.
ZHANG Xuanni. Research on Michelson interferometer for wind imaging[J]. Value Engineering, 2010, 29(26): 250-252.
- [6] 石大莲, 白清兰, 冯玉涛, 等. 大气风场和温度场星载探测光谱仪的星上定标技术[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 926-930.
SHI Dalian, BAI Qinglan, FENG Yutao, et al. On-board calibration technology of spaceborne detection spectrometer for atmospheric wind field and temperature field[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 926-930.
- [7] ENGLERT C R, HARLANDER J M, BABCOCK D D, et al. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): an innovative concept for measuring winds in planetary atmospheres[J]. SPIE: The International Society for Optical Engineering, 2007, 6303: 9.
- [8] ENGLERT C R, BABCOCK D D, HARLANDER J M, et al. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy(DASH): concept and experimental demonstration[J]. Applied Optics, 2007, 46(29): 7297-7307.
- [9] 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]. United States: Optics Express, 2010, 18(25): 26430-26440.
- [10] BABCOCK D D, HARLANDER J M, ENGLERT C R, et al. Doppler asymmetric spatial heterodyne (DASH) interferometer from flight concept to field campaign[C]// Fourier Transform Spectroscopy. Canada: Imaging and Applied Optics, 2011.
- [11] 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): 553-584.
- [12] HARLANDER 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(1/2): 601-613.
- [13] 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 connectionsatellite[J]. Optical Engineering, 2019, 58(5): 054104.
- [14] MAKELA J J, BAUGHMAN M, NAVARRO L A, et al. Validation of ICON-MIGHTI thermospheric wind observations: 1. nighttime red-line ground-based fabryperot interferometers[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2021, 126(2): e2020JA028726.
- [15] 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): e2020JA02894.
- [16] HARLANDER J M, ENGLERT C R. Laboratory demonstration of mini-MIGHTI: a prototype sensor for thermo-

- spheric red-line(630 nm) neutral wind measurements from a 6U CubeSat[J]. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 2020, 207: 10536
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 费小云, 冯玉涛, 白清兰, 等. 双视场准共路多普勒外差干涉仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 298-305.
- FEI Xiaoyun, FENG Yutao, BAI Qinglan, et al. Optical system design of a co-path Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer with two fields of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 298-305.
- [20] 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.
- 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: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [21] 肖旸, 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): 291-306.
- XIAO Yang, FENG Yutao, WEN Zhenqing, et al. Doppler differential interferometry technology for wind field detection in middle and upper atmosphere(Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(8): 291-306.
- [22] 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.
- SHEN Jing. Doppler asymmetric spatial heterodyne technique for wind detection in the upper atmosphere[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [23] 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.
- [24] MARR K D, ENGLERT C R, HARLANDER J M, et al. Thermal sensitivity of DASH interferometers: the role of thermal effects during the calibration of an echelle DASH interferometer[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(33): 8082-8088
- [25] 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.
- FENG Yutao, BAI Qinglan, WANG Yongmei, et al. Theory and method of design of field of view broadening prism for spatial heterodyne spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 272-277.
- [26] 陈智利, 刘雨昭, 费芒芒, 等. 大视场双远心工业镜头光学系统设计[J]. *西安工业大学学报*, 2018, 38(5): 444-450.
- CHEN Zhili, LIU Yuzhao, FEI Mangmang, et al. Design of industrial double telecentric optical lens with large field of view[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2018, 38(5): 444-450.
- [27] GUHARAY A, MONDAL S, SARKHEL S, et al. Signature of a mesospheric bore in 557.7 nm airglow emission using all-sky imager at Hanle (32.7oN, 78.9oE)[J]. *Advances in Space Research: The Official Journal of the Committee on Space Research(COSPAR)*, 2022(5): 69.