

引用格式: LIU Huan, FENG Yutao, FU Di, et al. Analysis of Key Parameters of Passive Tropospheric Wind Field Detection Based on Oxygen A-band Absorption Line[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(12):1201001

刘欢,冯玉涛,傅頔,等. 基于氧气 A 带吸收线的被动式对流层风场探测关键参数分析[J]. 光子学报, 2023, 52(12):1201001

基于氧气 A 带吸收线的被动式对流层风场探测 关键参数分析

刘欢^{1,2}, 冯玉涛¹, 傅頔^{1,2}, 赵珩翔¹, 孔亮¹, 郝雄波¹, 畅晨光^{1,2}, 韩斌^{1,2},
王素凤^{1,2}

(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:为了探索基于氧气 A 带吸收谱线利用多普勒差分干涉仪实现对流层大气风场探测的技术可行性,建立了从大气吸收谱线入瞳临边辐射到干涉曲线的仪器响应函数数理模型,仿真分析干涉仪光学参数、滤光片参数、系统噪声、仪器稳定性和标准具离轴效应等对视线风速反演结果的影响,确定光学系统参数的最优取值范围。结果表明,对中心波长位于 769 nm 的氧气吸收线,当干涉仪非对称量取值 6.5~6.7 mm,光谱分辨率取值 0.49~0.51 cm^{-1} ,带通滤光片半波带宽取值 0.12~0.21 nm,标准具间距取值 0.8~1.4 mm,精细度系数取值 30~100,标准具离轴角小于 0.2°,标准具透射峰偏移小于 0.018 cm^{-1} ,干涉图信噪比大于 40 倍时,风速反演精度优于 8 m/s,研究结果可为被动式对流层风场探测以及相关仪器设计提供理论参考。

关键词:对流层风场;遥感探测;氧气 A 吸收带;多普勒差分干涉仪;风速反演

中图分类号: TH744

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20235212.1201001

0 引言

风场信息是表征大气动力学的重要参数,也是影响大气物质、能量分布以及时空变化的重要因素。实时高精度的风场数据在提高天气预报精度、保障航天器起降安全、大气污染物追踪、无线电声波探测等方面发挥着重要作用^[1-3]。对流层与人类的生产生活密切相关,但其大气环境复杂多变,使得风场探测较为困难^[4]。

大气风场探测包括原位探测和遥感探测两种方式,其中遥感探测又分为主动遥感和被动遥感两种。探空气球和风速计是常用的原位探测仪器,可以快速获得风场信息,但无法实现大空间尺度的连续观测。雷达、激光雷达、微波雷达等是常用的主动遥感探测仪器,拥有时空分辨率和探测精度高的优点,但在仪器设计上较为复杂,费用较高。被动遥感只需设计一套接收系统,结构简单,成本较低,可实现全球或区域大范围连续观测,且探测精度较高,应用前景十分广阔^[5-6]。

氧气作为地球大气层中的主要成分之一,含量稳定,在可见光、近红外和微波波段均有特征吸收谱,在可见光和近红外波段,有三个因氧气分子吸收而形成的吸收带,分别是氧气 γ 带,氧气 B 带和氧气 A 带, A 带的吸收强度比 γ 带和 B 带都大,且无其他气体干扰,是理想的对流层风速大气探测源,而 γ 带和 B 带主要用于平流层风场探测^[7-9]。1991 年,搭载于高层大气研究卫星上(Upper Atmosphere Research Satellite, UARS)

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:刘欢, 1415399017@qq.com

通讯作者:冯玉涛, fytciom@126.com

收稿日期:2023-04-11; **录用日期:**2023-06-26

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

的高分辨率多普勒成像仪(The High-Resolution Doppler Imager, HRDI)利用氧气B带和 γ 带吸收线的多普勒频移实现了对流层上层和平流层的风场探测,其光学结构采用三个依次排列的法布里-珀罗(Fabry-Pérot)标准具,对加工精度要求很高^[10-11]。2004年,美国宇航局通过了一项被动氧气A带测风仪(Passive A-Band Wind Sounder, PAWS)计划,PAWS使用等厚干涉的Michelson干涉仪,采用临边观测模式观察大气风场,利用氧气A带吸收线的多普勒频移测量0~20 km大气高度的对流层风速,将来自大气柱每1 km的大气信息同时成像在探测器上。在对流层风场探测中,干涉仪和滤光片的参数对风速测量有较大影响,因此合理设置相关参数对于提高探测精度十分重要^[12-13]。

本文基于氧气A带吸收线测风原理,探索利用多普勒差分干涉仪(Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne, DASH)实现对流层风场探测的可行性,参考仪器工程设计理论建立了星载临边观测正演理论模型并进行风速反演理论模拟,分析了干涉仪非对称量、光谱分辨率、带通滤光片带宽、Fabry-Pérot标准具两板间距及精细度系数变化、干涉图噪声、仪器稳定性和标准具离轴效应对风速测量精度的影响。

1 风场探测原理

多普勒差分干涉仪通过探测氧气A带吸收线的多普勒频移反演对流层风速。根据多普勒效应,所探测的光谱吸收线随大气风速产生频移,频移之后的谱线中心波数 σ_v 为

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

式中, σ_0 表示无频移的谱线中心波数, v 表示仪器视线方向风速, c 表示光速。对流层风速引起的谱线中心波数的频移量极小,直接测量非常困难。因此,采用干涉光谱的方法,利用干涉图的相位变化 $\delta\varphi$ 与风速 v 的定量关系计算风速,即

$$\delta\varphi = 2\pi\tau\sigma_0 \frac{v}{c} \quad (2)$$

式中, τ 表示干涉仪采样光程差。

氧气A带谱线由氧气分子磁偶极矩转动跃迁形成,表现为分布规则的双峰结构,如图1(a)所示。为了精确测量大气风速引起的多普勒频移,需要选择独立性好、吸收强度适中的谱线作为仪器输入,以便于进行滤光片设计、仪器信噪比优化。故选择中心波数在 $12\,999.957\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收线作为目标谱线,如图1(b)所示。令吸收谱线函数表达式为

$$S(\sigma - \sigma_s) = [1 - A_s(\sigma - \sigma_s)] S_0 \quad (3)$$

式中, σ 表示入射光波数, σ_s 表示入射光谱中心波数, A_s 表示吸收率, S_0 表示入射光谱线最大辐射光强。

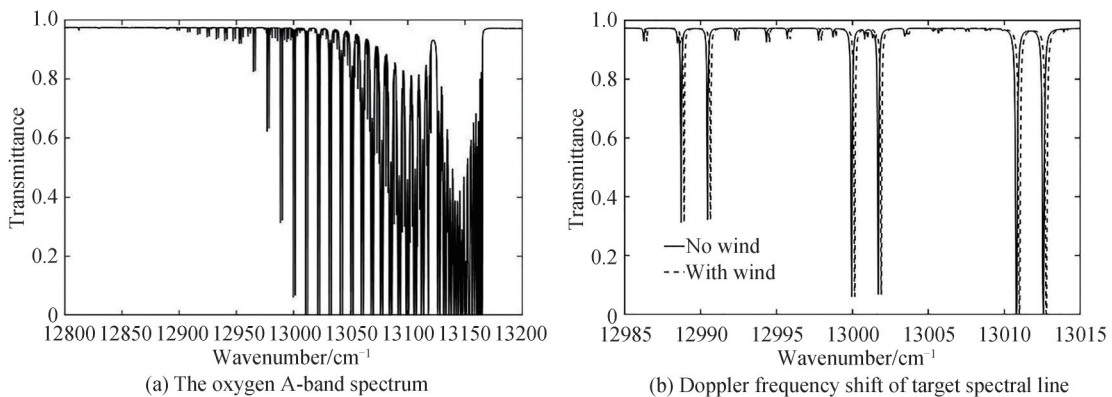


图1 测风目标谱线的选择

Fig. 1 Target spectrum selection of wind measurement

星载多普勒差分干涉仪位于地球近地轨道,其轨道高度为580 km,轨道倾角为 57° ,采用临边观测模式对0~20 km大气风场进行观测,如图2所示。仪器沿切线方向进行切片式探测,视线路径距地表最近高度为切线高度,在一次扫描结束后调整切高,进行下次扫描,如此反复直到切线最高处,拥有很高的垂直分辨率^[14-15]。

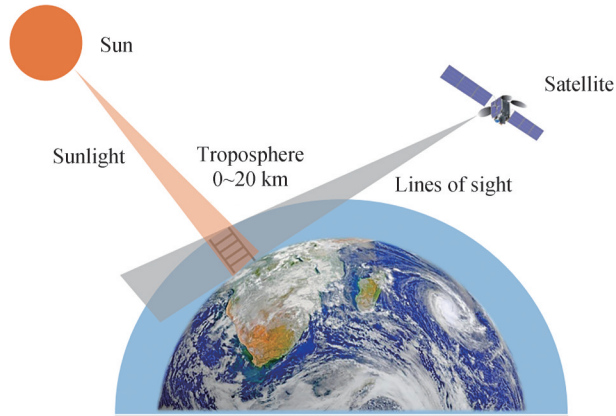


图2 临边观测示意图
Fig. 2 Schematic diagram of limb viewing

基于多普勒差分干涉仪的对流层风场探测仪器示意图如图3所示,整个光学系统由望远系统、滤波系统、干涉仪组件三部分组成。大气中散射的光经望远系统收集,通过滤波系统获得目标谱线,之后光经分束镜进入到两臂光路内,再经各自所在光路光栅衍射后返回,在定域面处形成Fizeau干涉条纹,最后通过条纹成像镜将干涉条纹成像到探测器上。

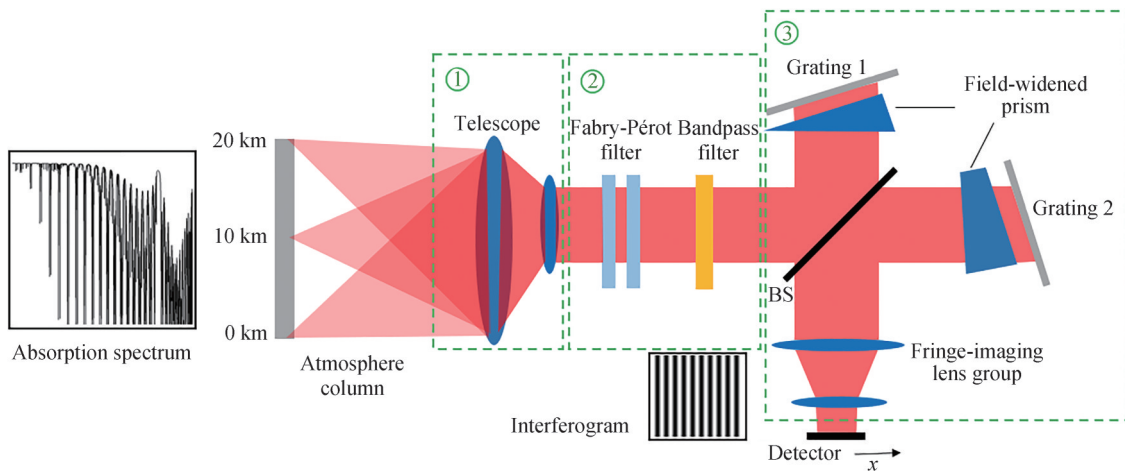


图3 基于多普勒差分干涉仪的风场探测仪器示意图
Fig. 3 Schematic diagram of wind field detection instrument based on DASH

干涉仪采用多普勒差分干涉仪,结构与Michelson干涉仪相似,差异在于其将两臂的反射镜替换为与光轴有一定夹角的闪耀光栅,同时在其中一臂光路中增加非对称量使两臂到分束镜间距离不等,从而引入一个大的基础光程差,提高了相位灵敏度^[16-17]。多普勒差分干涉仪的干涉条纹表达式为^[18]

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

式中, $B(\sigma)$ 表示入射到干涉仪内的光谱函数, Δd 表示单臂非对称量, σ_L 和 θ_L 分别表示 Littrow 波数和 Littrow 角, x 表示探测器的位置坐标, $x=0$ 表示探测器的中心位置。

2 正演和反演数理基础

在大气光学遥感中,正演模型是描述仪器光学成像过程的数值模拟模型,通过将大气和光源的物理化学性质、仪器参数等代入模型中,经过模拟计算得到预期的原始数据。反演理论采用一个能描述系统行为的理论模型去拟合系统本身的观测,从采集到的原始数据中提取大气物理或化学参量信息。对流层风速的准确探测需要建立基于多普勒差分干涉仪的全链路正演理论模型,并在此基础上进行反演模拟,确保风速

测量的准确性。

2.1 全链路正演理论模型

大气辐射传输链路框图如图4所示,入射到地球大气层中的太阳光经氧气分子吸收、散射后沿临边观测路径入射到系统入瞳,然后经过Fabry-Pérot滤光片和带通滤光片滤波,最后通过多普勒差分干涉仪在探测器上形成干涉条纹。由图1可见,氧气A带的吸收谱线十分密集,12 999.957 cm^{-1} 处目标谱线与周围最邻近谱线的距离仅为2 cm^{-1} ,将目标谱线从复杂的光谱中提取出来是风场探测的重要前提。Fabry-Pérot滤光片因其滤波函数的尖锐性,适合对谱线进行精细滤波,但同时因为Fabry-Pérot滤波函数的图像是一个梳状结构,所以在滤波过程中,除了获得所需部分的窄带谱线外,其他梳齿部分也会对目标谱线区域外进行滤波,获得其所在波数区域的窄带谱线,从而引入杂光。为消除这一影响,增加带通滤光片进行联合滤波,将目标谱线周围的其他梳齿部分滤掉,从而确保滤波后的谱线仅保留目标谱线部分。

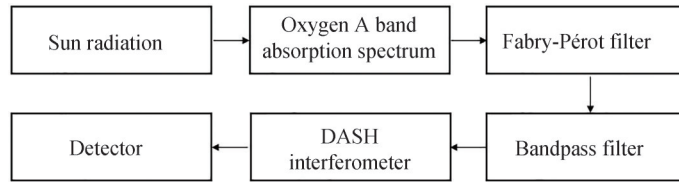


图4 辐射传输链路框图

Fig. 4 The flow chart of atmospheric radiative transfer

Fabry-Pérot标准具通常用于研究谱线精细结构,具有很高的分辨率,可以产生十分细而亮的等倾干涉条纹。当用作滤光片时,主要利用平行平板的多光束干涉原理,不考虑滤光片缺陷因子,Fabry-Pérot滤波函数 $f_{\text{FP}}(\sigma - \sigma_{\text{F}})$ 为

$$f_{\text{FP}}(\sigma - \sigma_{\text{F}}) = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)} = \frac{1}{1 + F \sin^2[2\pi n h (\sigma - \sigma_{\text{F}}) \cos \theta]} \quad (5)$$

式中, F 表示精细度系数,与标准具两平板间的反射率有关,影响到条纹的尖锐度和对比度, n 表示两板间折射率, h 表示两板间距离, σ_{F} 表示谱线中心波数, θ 表示光在两板间反射时的夹角, δ 表示相邻两光束光程差引起的相位差,当 $\delta = 2m\pi (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时,函数会出现峰值。即可以通过设定Fabry-Pérot标准具两板间的距离或者调整两板间反射率等改变Fabry-Pérot滤波函数的滤波特性。

单一Fabry-Pérot滤光片的滤波函数具有周期性,其探测谱线会受到自由光谱区的限制。HRDI采用三个分辨率不同的标准具依次排列来消除这一影响,从而起到消除杂波的作用,但这种设计对滤光片的加工精度要求较高。本文在单一Fabry-Pérot滤光片的基础上添加带通滤光片进行联合滤波,使带通滤波函数的带宽与Fabry-Pérot滤波函数的自由光谱范围大小相当,可以在实现滤波作用的同时降低加工难度。

带通滤波函数 $G(\sigma - \sigma_{\text{G}})$ 通常使用高斯函数表示,即

$$G(\sigma - \sigma_{\text{G}}) = \frac{-4 \ln 2 (\sigma - \sigma_{\text{G}})^2}{\text{FWHM}^2} \quad (6)$$

式中, σ_{G} 表示高斯谱线中心波数,FWHM表示谱线半波带宽。

Fabry-Pérot滤光片和带通滤光片的参数如表1所示。对于氧气A带吸收线的滤波过程如图5所示,其中黑色实线和虚线分别代表施加风速前后的氧气A带谱线,蓝色线表示Fabry-Pérot滤波函数,绿色线表示带通滤波函数,为了清楚表示滤波过程,图中施加的频移量很大,远大于对流层风速引起的谱线频移。滤波结果如图6所示,黑色实线和红色虚线分别代表施加风速前后谱线滤波的结果。

在不考虑噪声的情况下,采用图6所示的滤波后的光谱以及表2所示的多普勒差分干涉仪参数,对施加风速前后的理想干涉图进行模拟,干涉图表达式为

$$I(x) = \int_0^{\infty} S(\sigma - \sigma_{\text{S}}) f_{\text{FP}}(\sigma - \sigma_{\text{F}}) G(\sigma - \sigma_{\text{G}}) \left\{ 1 + \cos[2\pi(f_x x + 2\sigma \Delta d)] \right\} d\sigma \quad (7)$$

式中, $f_x = 4(\sigma - \sigma_{\text{L}}) \tan \theta_{\text{L}} / \beta$,表示探测器上的条纹空间频率, β 表示条纹成像镜的放大倍率。模拟结果如图7

表1 滤光片设计参数
Table 1 Filter design parameters

Parameters	Value
Etalon finesse	64.463
Etalon spacing	0.1 cm
Bandpass filter center wavenumber	12 999.957 cm^{-1}
Bandpass filter FWHM	0.163 nm

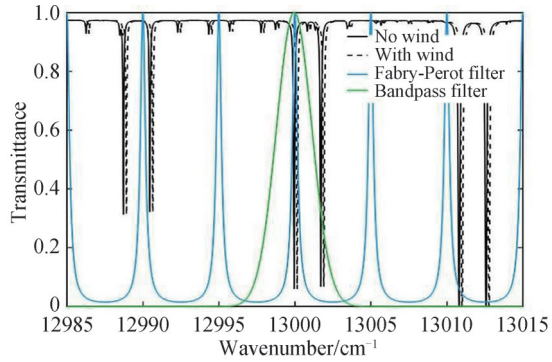


图5 滤波过程模拟

Fig. 5 Simulation of the filtering process

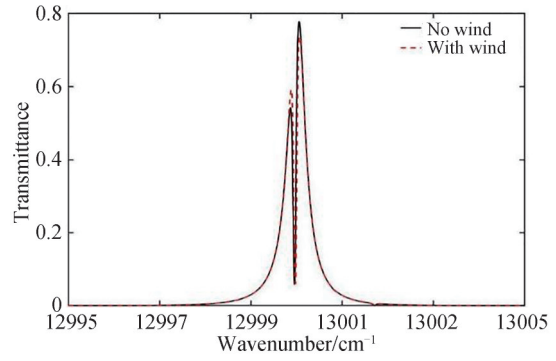


图6 通过滤光片获得的窄带吸收光谱

Fig. 6 Narrow-band absorption spectrum obtained through the filters

表2 多普勒差分干涉仪主要参数
Table 2 Principle parameters of DASH

Parameters	Value
Littrow wavenumber	12 980 cm^{-1}
Littrow angle	11.1°
Grating density	500 gr/mm
OPD offset	6.6 mm
Spectral resolution	0.5 cm^{-1}
Detector resolution	2 048×2 048
Pixel size	11 μm

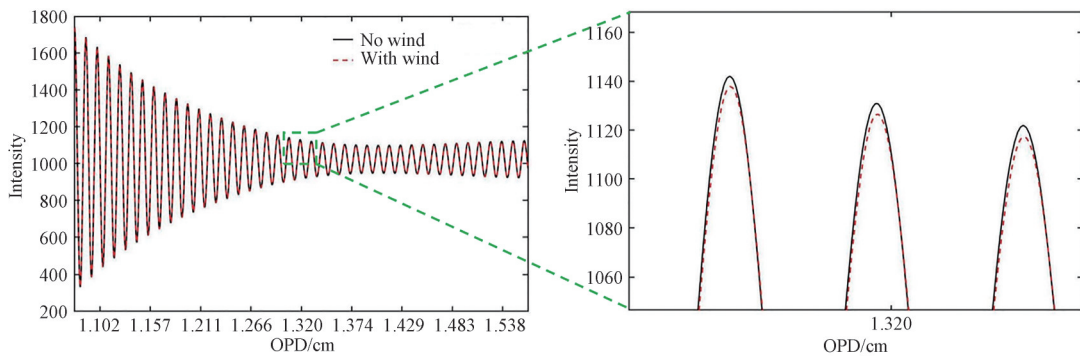


图7 干涉图的相位移动

Fig. 7 Phase shift of interferogram

所示,黑色实线和红色虚线分别代表施加风速前后的干涉图,因为对流层风速较小,为清楚表示风速引起的干涉图相位变化,对干涉图做局部放大显示。

2.2 风速反演理论模型

目标谱线经大气传输后在多普勒差分干涉仪的探测器上形成干涉图,通过干涉图的相位变化可获得大气光谱的多普勒频移,进而反演出沿观测视线方向的风速。对于吸收光谱的风速反演,除了分析吸收光谱性质外,还要考虑滤波函数 $f_{FP}(\sigma - \sigma_F)G(\sigma - \sigma_G)$ 的叠加,这与发射光谱在风速反演上存在不同。基于发射光谱的常规大气风速反演过程主要包括傅里叶变换、单边谱线提取、傅里叶逆变换、实虚部比值求相位。对于吸收谱线,如果采用常规反演方法,单边提取的吸收峰所对应的谱线能量微弱,不利于进行风速反演。

使用与干涉图频率相同的两个正交谐波进行相位解调,该方法不需要进行傅里叶变换,可直接通过对干涉图数据进行处理获得施加风速前后干涉图相位差,从而求解出风速,同时该算法只需要进行一次乘法计算,可以快速实现风速反演。干涉图干涉项为

$$I = A \cos(2\pi kx + \Phi) \quad (8)$$

式中, A 表示干涉强度, k 表示干涉图空间频率, Φ 表示相对相位。取与干涉图频率相同的两个正交谐波信号,用于相位解调,即

$$\begin{cases} M^c = B \cos(2\pi kx) \\ M^s = B \sin(2\pi kx) \end{cases} \quad (9)$$

式中, M^c 和 M^s 表示空间频率相同的余弦信号和正弦信号, B 表示两束输入信号的振幅,将两信号与干涉图数据通过乘法器相乘,并从中提取相位项,运算过程为

$$\begin{cases} I \times M^c = AB \cos(2\pi kx + \Phi) \cos(2\pi kx) = \frac{AB}{2} [\cos(4\pi kx + \Phi) + \cos\Phi] \\ I \times M^s = AB \cos(2\pi kx + \Phi) \sin(2\pi kx) = \frac{AB}{2} [\sin(4\pi kx + \Phi) - \sin\Phi] \end{cases} \quad (10)$$

考虑到余弦函数在整数个周期或无穷区间内的积分结果为0,可以通过选择整数个周期的探测器像元数令式(10)结果中的第一项为0,仅保留相位项,据此求得相位大小为

$$\tan\Phi = -\left(\frac{\sum_{j=1}^N I_j M_j^s}{\sum_{j=1}^N I_j M_j^c}\right) \quad (11)$$

式中, N 表示取余弦函数整数个周期时的像元数, I_j 表示探测器第 j 个像元处记录的信号强度, M_j^s 和 M_j^c 表示探测器第 j 个像元处记录的谐波信号强度。依次求得相位 φ_0 和 φ_v ,将两者作差得到 $\delta\varphi$,表示由风速引起的相位变化,即

$$\delta\varphi = \varphi_v - \varphi_0 \quad (12)$$

探测器上条纹空间频率 f_x 与探测波数、光栅 Littrow 波数和 Littrow 角、条纹成像镜放大倍率有关,光栅和探测器参数、条纹成像镜放大倍率在仪器设计中已经确定,此时主要影响因素是探测波数。如图6所示,探测谱线光谱范围为 $12\,995 \sim 13\,005 \text{ cm}^{-1}$,谱段范围很窄,故选择目标谱线波数 $12\,999.957 \text{ cm}^{-1}$ 所对应的条纹空间频率作为两谐波信号的空间频率。此时探测器上条纹周期数为39.91,当选择探测器像元数为1488个时,正好对应29个整数周期。

基于理想仪器模型和1976年美国标准廓线,太阳天顶角取值为 40° ,不考虑云雨、气溶胶、地表反射等的影响。对于对流层中60 m/s以内的风速反演进行模拟,结果如表3所示,表中施加风速大小通过谱线数值

表3 风速反演结果
Table 3 Wind speed retrieval results

Wind speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Inversion of wind speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Relative error
10	9.98	0.19%
20	19.98	0.09%
30	30.01	0.02%
40	40.05	0.12%
50	50.11	0.23%
60	60.20	0.33%

模拟获得,将其与通过干涉图反演的风速数值相比较,可得风速反演误差在0.2 m/s以内,该算法所带来的误差相对较小。

3 风速测量精度影响因素分析

基于吸收线测风理论,利用多普勒差分干涉仪进行对流层风场探测的测量精度主要受到干涉仪光学参数、滤波参数、系统噪声、仪器稳定性和标准具离轴效应几方面的影响。首先基于风速反演原理分析了多普勒差分干涉仪的非对称量和光谱分辨率对风速测量精度的影响,其次根据吸收线与滤波函数的相互作用关系分析了不同的滤波参数对风速测量精度的影响,最后模拟了不同噪声条件、仪器稳定性和标准具离轴效应对风速测量精度的影响。

3.1 干涉仪非对称量和光谱分辨率

由式(2)可知,干涉仪非对称量 Δd 越大,干涉图相位对于被测风速的变化越敏感,同时由于谱线展宽会造成干涉图对比度的降低,因此需要合理确定干涉仪的非对称量。对流层内谱线同时受到温度和压强展宽作用的影响,难以通过解析函数确定谱线最优非对称量,此处通过数值模拟的方法确定非对称量大致范围,并在非对称量取6~7 mm范围内时,对风速反演结果带来的影响进行分析,结果如图8所示。从图8中可以看出,风速反演的相对误差随着非对称量的增加先减小后增大。为获取准确的风速反演结果,干涉仪非对称量选取6.5~6.7 mm时,风速反演的相对误差小于2%。

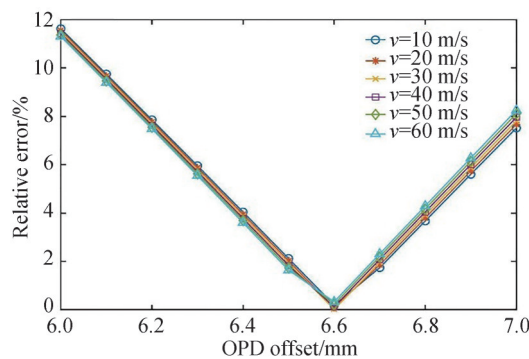


图8 风速反演的相对误差随非对称量变化的规律

Fig. 8 Relative error of wind speed retrieval as a function of the optical path difference

干涉仪光谱分辨率与条纹成像镜的放大倍率、光栅有效宽度有关,当选定探测器时,光谱分辨率不同,会导致探测器上的条纹空间频率不同,因此会对风速反演的结果造成一定影响,图9中模拟了干涉仪光谱分辨率变化时的风速反演结果,在光谱分辨率取 $0.49\sim 0.51\text{ cm}^{-1}$ 时,风速反演相对误差小于2%,可见对于仪器光谱分辨率要求较高。

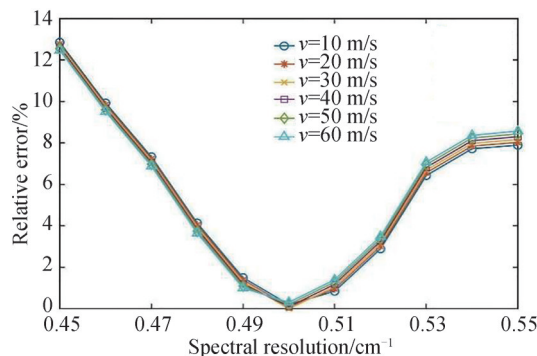


图9 风速反演的相对误差随光谱分辨率变化的规律

Fig. 9 Relative error of wind speed retrieval as a function of the spectral resolution

3.2 滤光片参数对风速反演精度影响分析

系统滤光片参数的变化会导致滤波函数带宽发生变化,从而导致滤波后的谱线线形发生变化,影响风速反演精度。当带宽较窄时,产生多普勒频移后的谱线可能不在滤波函数范围内,当带宽较大时,可能会引入杂波的影响。基于3.1节优化结果,分析系统滤光片参数变化对风速反演结果的影响,图10~12中显示了系统带通滤光片参数以及Fabry-Pérot滤光片参数变化对风速反演结果的影响。

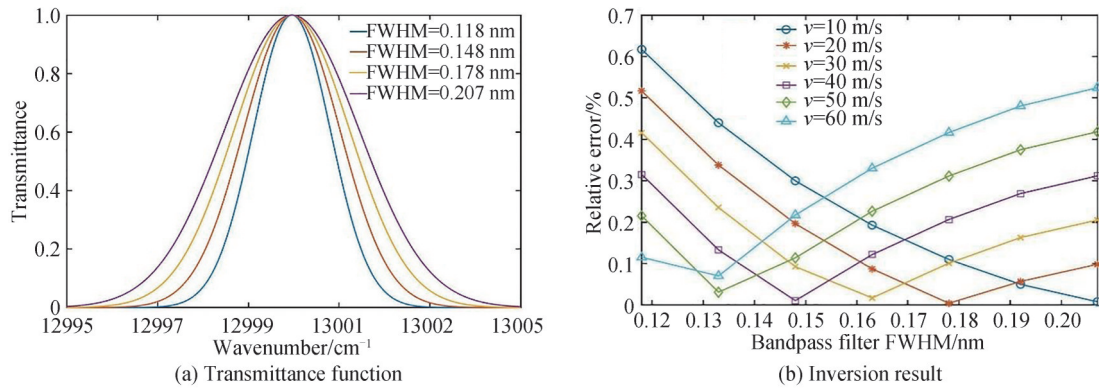


图10 风速反演的相对误差随带通滤光片半波带宽变化的规律

Fig. 10 Relative error of wind speed retrieval as a function of the bandpass filter FWHM

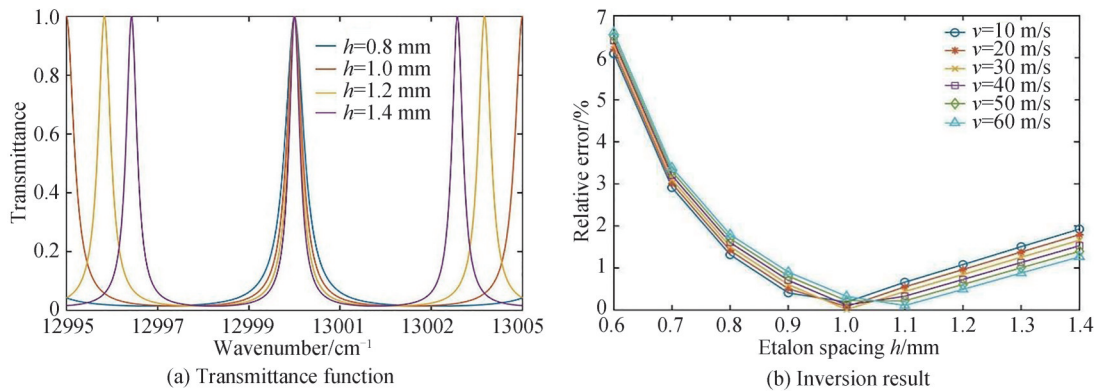


图11 风速反演的相对误差随标准具间距变化的规律

Fig. 11 Relative error of wind speed retrieval as a function of the etalon spacing

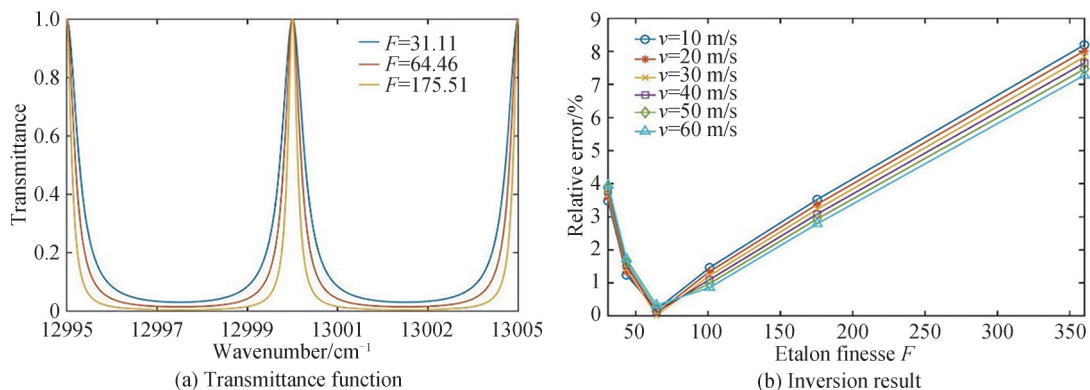


图12 风速反演的相对误差随标准具精细度系数变化的规律

Fig. 12 Relative error of wind speed retrieval as a function of the etalon finesse

图10(a)表示不同带宽下的带通滤光片透过率函数,图10(b)表示带通滤光片带宽对风速测量精度的影响。可见风速测量相对误差随着带宽的增加先减小后增大。考虑到吸收线的谱线展宽,当带通滤波函数带宽较小时,产生多普勒频移后的吸收线光谱范围会超出滤波函数滤波范围,从而降低风速测量精度;当带通

滤波函数带宽较大时,引入的杂波会导致风速反演结果不准确。结果表明,带宽取值 $0.12\sim 0.21\text{ nm}$ 时,风速反演的相对误差在 0.6% 以内。

图 11(a)表示不同标准具间距下的 Fabry-Pérot 滤光片透过率函数,图 11(b)表示标准具间距大小对风速测量精度的影响。可见风速测量相对误差随着标准具间距的增加先减小后增大。标准具间距的大小与滤波函数自由光谱范围和带宽有关,当标准具间距较小时,可能因为滤波函数带宽较大而引入杂波,从而影响测风精度;而当标准具间距较大时,滤波函数带宽较小,谱线频移后可能不在滤波函数范围内,导致风速反演结果不准确。结果表明,标准具间距取值 $0.8\sim 1.4\text{ mm}$ 时,风速反演的相对误差在 2% 以内。

图 12(a)表示不同标准具精细度系数下的 Fabry-Pérot 滤光片透过率函数,图 12(b)表示标准具精细度系数大小对风速测量精度的影响。可见风速测量相对误差随着精细度系数的增加先减小后增大。精细度系数代表滤波函数的尖锐程度,精细度系数越大,滤波函数线形越尖锐。当精细度系数较小时,滤波函数较宽,引入杂波会导致风速反演结果不准确;当精细度系数较大时,滤波函数尖锐,产生多普勒频移后的吸收线光谱范围会超出滤波函数范围,从而降低测风精度。结果表明,精细度系数取值 $30\sim 100$ 时,风速反演的相对误差在 2% 以内。

3.3 信噪比对风速反演精度影响分析

基于 3.1 节和 3.2 节优化结果,分析在多普勒差分干涉仪成像过程中的噪声影响。采用干涉图信号与噪声功率比值作为信噪比,假设原始干涉图以光子噪声(属于高斯白噪声)为主要噪声源,对干涉图施加 $10\sim 100$ 倍信噪比,并各自进行 $10\ 000$ 次风速反演模拟,计算 $10\ 000$ 次反演结果均值与施加风速大小的相对误差,如图 13 所示。结果表明,干涉图信噪比增大可以提高风速反演精度,在信噪比大于 40 倍时,风速反演最大误差优于 2 m/s 。

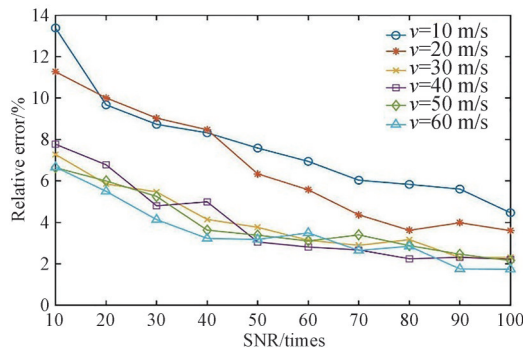


图 13 风速反演的相对误差随信噪比变化的规律

Fig. 13 Relative error of wind speed retrieval as a function of the SNR

3.4 仪器稳定性对风速反演精度影响分析

对于多普勒频移探测而言,仪器稳定性是精确测量的基础,此处对法布里-珀罗标准具和干涉仪的稳定性要求进行分析。

法布里-珀罗标准具对温度的变化比较敏感,由于材料热膨胀和折射率温度效应的影响,光程会随着温度发生变化,从而导致透射峰的波长随温度变化发生漂移,影响风速反演的准确性^[19]。图 14 模拟了透射峰偏移时风速反演的相对误差。结果表明,风速反演相对误差随着透射峰偏移量增大而增大,当透射峰偏移量小于 0.018 cm^{-1} 时,风速反演误差在 5 m/s 以内,可见对标准具稳定性具有很高的要求。

干涉仪基准相位的稳定性直接影响到风速测量精度,基准相位的漂移主要受到仪器光机系统热特性的影响,可分为相位斜率漂移、干涉图相位漂移和非对称量相位漂移三部分。相位斜率漂移指条纹空间频率和成像系统放大倍率随温度发生变化,通过计算干涉条纹相位随探测器采样位置变化的线性函数斜率可实现相位斜率漂移的获取。干涉图相位漂移由干涉仪和探测器在热环境下相对位置的变化引起,指干涉图像整体的漂移,通过监测连续两帧图像亚像元的位移量可实现干涉图相位漂移的获取。非对称量相位漂移是指干涉仪非对称量随温度发生变化,从而导致干涉仪基础光程差发生变化,通过在总体相位漂移中减去相位斜率漂移和干涉图相位漂移,可实现非对称量相位漂移的定量获取。通过对各相位热漂移进行定量计算,

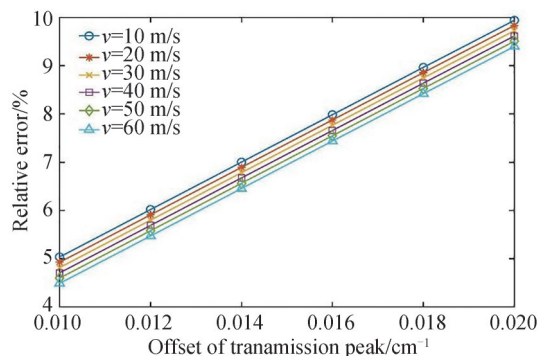


图14 风速反演的相对误差随透射峰偏移量变化的规律

Fig. 14 Relative error of wind speed retrieval as a function of the offset of transmission peak

可确保总体的稳定性,同时有利于开展硬件优化设计^[20]。

3.5 标准具离轴效应对风速反演精度影响分析

以上分析均基于轴上情况,实际标准具的透射函数与入射角 θ 有关,其入射角通常称为离轴角。在轴上风速反演最优的情况下,分析离轴角对风速反演的影响。滤波函数的带宽会随着离轴角的增大而增大,同时透过率会随着离轴角的增加而减小,因此在滤波过程中可能会引入杂波,从而影响风速反演结果^[21]。

卫星轨道高度为580 km,地球平均半径为6 371.393 km,计算得空间高度20 km处视线风所对应系统半视场角为 0.2° ,故分析 0.2° 以内离轴角对风速反演结果的影响。图15(a)表示不同离轴角下标准具的透过率函数,图15(b)表示离轴角对风速测量精度的影响,风速反演精度随着离轴角增大而逐渐降低。结果表明,当离轴角取值在 0.2° 以内时,风速反演最大误差优于8 m/s。

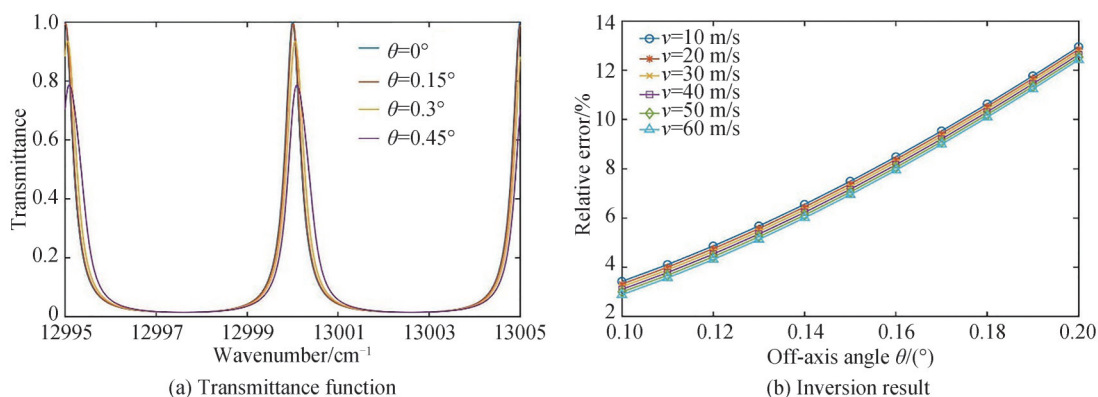


图15 风速反演的相对误差随离轴角变化的规律

Fig. 15 Relative error of wind speed retrieval as a function of the off-axis

4 结论

基于氧气A带吸收线测风理论,证明了基于多普勒差分干涉仪进行对流层风场探测的可行性。通过分析各影响因素对风速反演结果的影响,确定光学系统参数最优取值范围。结果表明,风速反演相对误差随干涉仪非对称量和光谱分辨率的增加先减小后增大,同时对干涉仪的稳定性具有很高的要求,风速反演相对误差随带通滤光片带宽、标准具两板间距和精细度系数的增加而先减小后增大,随标准具透射峰值偏移和离轴角的增加而减小,风速反演相对误差随信噪比的增加而减小。综合考虑各影响因素,风速反演结果在8 m/s以内。本文针对单一空间高度层目标谱线信息进行风速反演研究,但不同空间高度上目标谱线信息不同,仪器参数的最优取值范围也会略有不同,该问题将在后续工作中进一步研究。研究结果可为开展相关仪器的设计和研制提供理论依据。

参考文献

- [1] FENG Yutao, LI Juan, ZHAO Zengliang, et al. Development of interferometric spectroscopy for atmosphere wind

- observations based on satellite[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.
- [2] 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): 0851516.
- [3] JIANG Tong, SHI Hailiang, SHEN Jing, et al. Experimental study on wind field simulation of asymmetric spatial heterodyne spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(7): 0701001.
- 姜通,施海亮,沈静,等. 非对称空间外差光谱仪风场模拟探测实验研究[J]. *光子学报*, 2018, 47(7): 0701001.
- [4] FANG Zhiyuan, ZHAO Ming, YANG Hao, et al. Frequency tracking technology of direct wind lidar and observation of atmospheric wind field in troposphere and stratosphere[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 203-211.
- 方志远,赵明,杨昊,等. 直接测风激光雷达频率跟踪技术及对流层平流层大气风场观测[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(2): 203-211.
- [5] HE Weiwei, WU Kuijun, FENG Yutao, et al. Forward simulation of limb-viewing Michelson wind imaging interferometer based on O₃ radiation source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 197-205.
- 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): 197-205.
- [6] 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.
- [7] ZHU Y J, MARTIN K. Consistent nighttime atomic oxygen concentrations from O-2 A-band, O(S-1) green-line, and OH airglow measurements as performed by SCIAMACHY[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(14): 8536-8545.
- [8] ABREU V J, BUCHOLTZ A, HAYS P B, et al. Absorption and emission line shapes in the O₂ atmospheric bands: Theoretical model and limb viewing simulations[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(11): 2128-2137.
- [9] WANG Yuxuan, SUN Xiaobing, HUANG Honglian, et al. Study on influencing factors of the information content of satellite remote-sensing aerosol vertical profiles using oxygen A-band[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(4): 948.
- [10] 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(6): 10713-10723.
- [11] ABREU V J, HAYS P B, SKINNER W R, et al. The high resolution Doppler imager[J]. *Optics & Photonics News*, 1991, 2(10): 28-30.
- [12] MIECZNIK G, PIERCE R, HUANG P, et al. Passive A-band Wind Sounder (PAWS) for measuring tropospheric wind velocity profile[C]. *SPIE*, 2007, 6677: 66771C.
- [13] ROBERT M P, SHANE E R. Wind speed measurements of Doppler-shifted absorption lines using two-beam interferometry[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 1853-1864.
- [14] ZHANG Jing, WANG Shurong, HUANG Yu, et al. Status and development of limb imaging spectrometers[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 692-700.
- 张晶,王淑荣,黄煜,等. 临边成像光谱仪的发展现状与进展[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 692-700.
- [15] LI Junjie, SUN Jian, ZHAO Hengxiang, et al. Stray light characteristics and suppression in space-borne Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(11): 1130002.
- 李俊杰,孙剑,赵珩翔,等. 星载多普勒差分干涉仪杂散光特性与抑制[J]. *光子学报*, 2022, 51(11): 1130002.
- [16] ENGLERT C R, HARLANDER J M. On the uncertainties in determining fringe phase in doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(13): 3613-3619.
- [17] HU Bingliang. Review of the development of interferometric spectral imaging technology (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 0751401.
- 胡炳樑. 干涉光谱成像技术发展的回顾(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(7): 0751401.
- [18] ZHANG Yafei, FENG Yutao, FU Di, et al. Dependence of interferogram phase on incident wavenumber and phase stability of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(10): 104204.
- [19] SUN Jian, FENG Yutao, BAI Qinglan, et al. Design of thermal stable Fabry-Perot etalon for wind measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1167-1173.
- 孙剑,冯玉涛,白清兰,等. 高热稳定性测风Fabry-Perot干涉仪标准具的设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1167-1173.
- [20] FU Di, CHANG Chenguang, SUN Jian, et al. Separating and testing method for influencing factors of phase stability of Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer for atmospheric wind-field detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 26-33.
- 傅颀,畅晨光,孙剑,等. 大气风场探测多普勒差分干涉仪相位稳定性影响因素分离测试方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 26-33.
- [21] HERNANDEZ G. Analytical description of a Fabry-Perot spectrometer. 3: off-axis behavior and interference filters[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(11): 2654-2661.

Analysis of Key Parameters of Passive Tropospheric Wind Field Detection Based on Oxygen A-band Absorption Line

LIU Huan^{1,2}, FENG Yutao¹, FU Di^{1,2}, ZHAO Hengxiang¹, KONG Liang¹, HAO Xiongbo¹,
CHANG Chenguang^{1,2}, HAN Bin^{1,2}, WANG Sufeng^{1,2}

(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: Real-time and high-precision wind field data play an important role in improving the accuracy of weather forecasts, ensuring the safety of spacecraft take-off and landing, tracking atmospheric pollutants, and radio sound detection. In the visible light and near-infrared bands, there are three absorption bands formed by the absorption of oxygen molecules, namely the oxygen γ band, the oxygen B band and the oxygen A band. The absorption intensity of the A band is greater than that of the γ band and the B band, and without interference from other gases, it is an ideal atmospheric detection source for tropospheric wind speed. The Doppler asymmetric spatial heterodyne wind measurement technology is a technology based on the Fourier transform of the interferogram to realize the Doppler frequency shift detection of the wind, the tropospheric wind velocity can be retrieved by detecting the Doppler shift of the oxygen A-band absorption line. This paper explores the technical feasibility of using Doppler asymmetric spatial heterodyne to detect the tropospheric atmospheric wind field based on the oxygen A-band absorption line. Based on the ideal instrument model and the 1976 American standard profile, the solar zenith angle is taken as 40° , without considering the influence of clouds, rain, aerosol, and surface reflection. Through the analysis of the integral limb radiation characteristics of the absorption spectrum line observed in the single instantaneous field of view at the entrance pupil of the instrument, the paper simulates the forward simulation interference curve of a single space altitude layer, establishes a mathematical model of the instrument response function from the atmospheric absorption spectral line entrance pupil limb radiation to the interference curve, and two harmonics with the same spatial frequency as the interference curve are used for phase demodulation and wind speed inversion of line-of-sight wind. This method does not require Fourier transform, and can directly process the interferogram data to obtain the phase difference of the interferogram before and after the wind speed is applied, so as to solve the wind speed. At the same time, the algorithm only needs to perform a multiplication calculation, and can quickly realize the wind speed inversion. Based on the absorption line wind measurement theory, the measurement accuracy of tropospheric wind field detection using Doppler asymmetric spatial heterodyne is mainly affected by the interferometer optical parameters, filtering parameters, system noise, instrument stability and etalon off-axis effect. Through the simulation analysis of the influence of various instrument parameters on the results of line-of-sight wind speed retrieval, the optimal value range of the optical system parameters is determined. The results show that for the oxygen absorption line with the center wavelength at 769 nm, when the interferometer asymmetry value is 6.5~6.7 mm, the spectral resolution value is 0.49~0.51 cm^{-1} , the value of the etalon spacing is 0.8~1.4 mm, the fineness coefficient is 30~100, the off-axis angle of the etalon is less than 0.2° , and the transmission peak deviation of the etalon is less than 0.018 cm^{-1} , the signal-to-noise ratio of the interferogram is greater than 40 times, the wind speed retrieval accuracy is better than 8 m/s. The research results can provide a theoretical reference for passive tropospheric wind field detection and related instrument design.

Key words: Tropospheric wind field; Remote sensing; Oxygen A absorption band; Doppler asymmetric spatial heterodyne; Velocity inversion

OCIS Codes: 010.7030; 010.1030; 280.4991; 300.6300; 100.5070

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)