

O₃ 辐射源星载干涉仪测风不确定度分析

何微微¹, 武魁军², 冯玉涛³, 王后茂⁴, 傅 頔³, 刘秋新¹, 鄢小虎¹

- (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: 星载气辉成像干涉仪采用临边观测模式, 可以获取全球范围内大气风场的空间分布信息及时间演化信息, 是国际卫星遥感领域的研究热点。基于 O₃ 辐射源的 Michelson 星载成像干涉仪在红外波段工作, 能够全天时探测平流层区域的大气风场, 却存在更为复杂的测风不确定度。鉴于此, 在临边观测正演仿真的基础上, 开展了仪器热背景辐射研究及测量噪声分析, 给出了大气信号测量噪声及仪器热背景噪声引起的大气风场速度误差数值, 并通过表观量仿真及信噪比分析, 得到了视向风的误差廓线。不确定度分析表明, 基于 O₃ 辐射源的 Michelson 成像干涉仪在星载条件下可全天时探测 15~45 km 范围内的大气风场, 反演精度优于 1~2 m/s。该研究为基于红外辐射源的大气风场测量提供了重要的理论指导。同时对红外 Michelson 成像干涉仪的研制具有重大的工程意义和实践价值。

关键词: 大气风场; Michelson 干涉仪; 噪声; 误差

中图分类号: P407.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0813001

Wind uncertainty analysis of onboard interferometer based on O₃ radiation source

He Weiwei¹, Wu Kuijun², Feng Yutao³, Wang Houmao⁴, Fu Di³, Liu Qiuxin¹, Yan Xiaohu¹

- (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)

Abstract: The onboard airglow imaging interferometer can obtain the spatial distribution and temporal evolution information of the global atmospheric wind by using the limb-viewing mode, which makes it a research hotspot in the field of international satellite remote sensing. The O₃ radiation source based Michelson onboard imaging interferometer can detect the atmospheric wind field in the stratosphere region

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(61705253); 中科院光谱成像技术重点实验室开放基金(LSIT201701D); 院级重点科研项目(2017CYZDKY001)

作者简介: 何微微(1987-), 女, 讲师, 博士, 主要从事星载测风方面的研究。Email: heww1987@126.com

导师简介: 武魁军(1988-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事红外光谱成像遥感及星载风温探测技术方面的研究。

Email: wukuijun@wipm.ac.cn

through all-day. But there is more complex wind uncertainty because of working in the infrared band. Therefore, on the basis of limb-viewing forward simulation, the instrumental thermal background signal was studied, the measurement noise was analyzed, the atmospheric wind error caused by the measurement noise of atmospheric signal and the instrument thermal background noise was given, and error profile of line-of-sight wind was obtained by apparent quantities simulation and signal-to-noise ratio analysis. The uncertainty analysis shows that the O_3 radiation source based Michelson imaging interferometer can detect atmospheric wind in the range of 15–45 km onboard through all-day, and the inversion accuracy is better than 1–2 m/s. This research provides important theoretical guidance for atmospheric wind measurement based on infrared radiation source. At the same time, it has great engineering significance and practical value for the development of infrared Michelson imaging interferometer.

Key words: atmospheric wind; Michelson interferometer; noise; errors

0 引言

大气风场信息是临近空间的极为重要的物理参数,精确探测大气风场对保障航空航天、发展中长期天气预报、促进大气动力学研究等方面具有十分重要的意义^[1-2]。星载气辉成像干涉仪是实现全球尺度风场探测的有效手段。通过采用临边观测模式,星载气辉成像干涉仪可以获取全球范围内的大气风场的空间分布信息及时间演化信息,是国际卫星遥感领域的研究热点^[3-4]。目前,多种机理的光学干涉技术被广泛研究^[5-7],并试图应用于卫星遥感气辉测风,包括 Michelson 干涉仪^[8]、Fabry-Perot 干涉仪^[9-10],以及 DASH(Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne)干涉仪^[11]。

1991 年搭载于 URAS 卫星上有两台被动测风干涉仪:风场成像干涉仪(WINDII)^[8]和高分辨多普勒成像仪(HRDI)^[9]。其中 WINDII 采用宽视场 Michelson 干涉仪,可以探测 80~300 km 风场,测风精度 5 m/s; HRDI 采用 3 个串联 Fabry-Perot 干涉仪,可以在白天与夜间进行风场探测:白天可探测平流层、中间层、低热层(10~40 km 与 50~120 km)风场,夜间可测量低热层 95 km 风场,测风精度 5 m/s。2001 年搭载于 TIMED 卫星上的多普勒干涉仪(TIDI)采用单个 Fabry-Perot 干涉仪对 60~300 km 的中高层大气进行风场探测,精度可达 3 m/s^[10]。其中,WINDII 和 HRDI 分别于 1997 年及 2005 年停止工作,TIDI 是目前唯一仍在轨运行并正常服役的中高层大气风场

测量载荷。

由于 WINDII 在测风方面取得的巨大成功,国际上一些顶级科研机构陆续提出多种基于 Michelson 干涉仪的星载测风方案,并在辐射源选择及工程实现形式上进行了优化与改进。加拿大 StaSci 计划部署的 Mesospheric Imaging Michelson (MIMI) 以及 NASA 的 MIDEX 计划支持的 Waves Michelson Interferometer(WAMI)均采用 O_2 分子近红外大气带(1.27 μm)的强、弱两组气辉谱线(每组三条),利用 Michelson 干涉仪探测 45~85 km 的大气风场信息^[3]。加拿大 York 大学提出的 Stratospheric Wind Interferometer For Transport Studies(SWIFT)星载测风方案,以 O_3 分子在 8.823 μm 附近的辐射谱线为探测目标源,利用红外 Michelson 干涉成像仪探测目标谱线的多普勒频移量,能够观测平流层区域(15~45 km)的大气风场^[12]。

SWIFT 是具有全天时平流层风场探测能力的载荷。SWIFT 将目标辐射源的波长选择范围定在中远红外波段,既能有效避开太阳辐射对气辉谱线探测的影响以探测更低空域的风场信息,又能充分利用 O_3 分子的热辐射效应以实现全天时探测,是探测平流层区域大气风场的不二之选。但是,由于 SWIFT 的 Michelson 干涉成像仪需工作中远红外波段,必然会面对更为复杂的仪器热背景辐射^[13]、探测器热噪声等诸多干扰因素^[14],这些干扰因素必然对 SWIFT 的测风精度产生重要影响。

然而,目前关于测风干涉仪的误差分析与影响因素的研究主要局限在平场校正、相位漂移及大气

散射等方面。美国海军实验室 ENGLERT 团队通过平场校正解决了探测器元件和光学器件的非均匀性对风场探测的影响^[15]；中国科学院安徽学精密机械研究所通过对多普勒外差测风干涉仪进行绝对相位漂移分析及校正将风速反演误差控制在 3.5 m/s 范围内^[16]；中国科学院西安光学精密机械研究所的冯玉涛等人提出了基于 $O_2(a^1\Delta_g)O_{19}P_{18}$ 发射谱线的平流层、中间层大气风场星载探测方案，并详细研究了大气散射光谱对星载测风精度的影响^[17]。但所有这些研究都是针对可见光或近红外气辉干涉仪的误差分析，无需考虑仪器热背景辐射对测风精度的影响。

文中在基于 O_3 辐射源的 Michelson 测风成像干涉仪临边观测正演仿真的基础上，开展了仪器热背景辐射计算及测量噪声分析，并通过大气信号反演，对视向风测风不确定度进行了详细研究，评估了基于 O_3 辐射源的 Michelson 成像干涉仪星载测风能力，及其可行性与优越性。

1 纯大气信号成像

基于 O_3 的 8.823 μm 的辐射线，SWIFT 采用扩视场 Michelson 测风成像干涉仪，对平流层风场和臭氧输运进行探测。其光学系统设计如图 1 所示。文中借鉴 SWIFT 的仪器设计参数^[18]对 Michelson 测风成像干涉仪的正演仿真的不确定度进行分析。

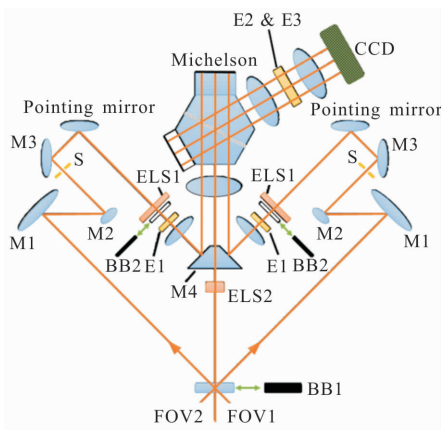


图 1 SWIFT 光学系统原理图

Fig.1 Schematic of optical system of SWIFT

SWIFT 中红外焦平面上成像的纯大气信号可表示为：

$$N_{jk}(\Delta, i_{ij}) = \frac{A\Omega t}{hc\nu_0 \cdot Q_{ADU}} \cdot \int_{\nu_1}^{\nu_2} q(\nu, \nu_{\text{cutoff}}) \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot \tau_{\text{optics}} \cdot$$

$$f_{ij}(\nu, \nu_{ij}) \cdot L_i(\nu) \cdot [1 + U \cos(2\pi\nu_0\Delta_0 + \varphi_{jk}(i_{ij}))] \cdot d\nu \quad (1)$$

式中： $N_{jk}(\Delta, i_{ij})$ 为纯大气信号 $L_i(\nu)$ 经系统在红外焦平面上第 l 行第 j 列像素成像的信号强度，单位是 counts/pixel； $L_i(\nu)$ 为大气光谱辐射； $f_{ij}(\nu, \nu_{ij})$ 为相对总滤波函数； U 为仪器可见度，取值 0.94； Δ_0 是仪器固有光程差； $\varphi_{jk}(i_{ij})$ 是干涉仪在第 k 次步进时对应的相位。公式(1)中涉及的参数取值如表 1 所示。

表 1 仪器参数

Tab.1 Instrument parameters

Parameter	Value
Pixel étendu $A\Omega/\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$	2×10^{-14}
Exposure time t/s	0.1
Filter total transmittance τ_{filter}	0.445 5
Non-filter total transmittance τ_{optics}	0.278 2
Quantum efficiency q	0.75
Analog-to-digital unit $Q_{ADU}/\text{electron} \cdot \text{count}^{-1}$	85
Reference wavenumber ν_0/cm^{-1}	1 133.433 5
Optical path difference for normal incident Δ_0/cm	18

当干涉仪进行 4 次步进时，SWIFT 的红外焦平面可依次探测到 4 个相邻相位采样点的相位差为 $\pi/2$ 的干涉图像，如图 2 所示。每张图像的曝光时间为 0.1 s，步进相位分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 。纯大气信号的成像与总滤波函数、步进相位、离轴效应、临边观测高度有关。

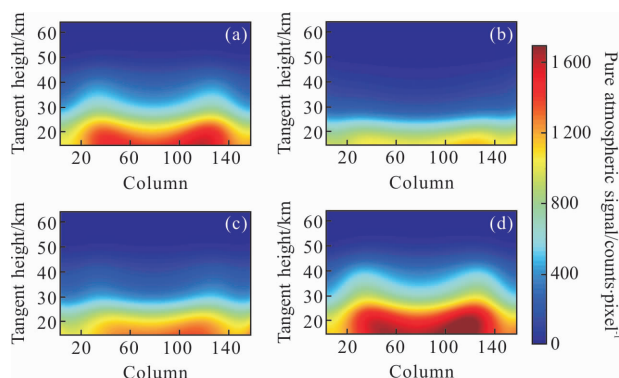


图 2 纯大气信号四步进成像。(a)~(d)步进相位分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$

Fig.2 Four phase-step imaging of pure atmospheric signal.

The phase steps of (a)–(d) are $0, \pi/2, \pi,$

$3\pi/2$ respectively

2 仪器热背景

红外焦平面接收到的信号不仅包括纯大气辐射信号,还包括仪器背景信号,以及各种仪器噪声。仪器背景信号的来源主要有两方面:探测器暗电流与光学元器件自身产生的热辐射。一方面,红外探测器光敏元件表面涂有逸出功较小的低功函数材料 HgCdTe,受热易释放光子,因此暗计数相对较高,当工作温度为 55 K 时,暗电流为 $20 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。另一方面,光学元件辐射的红外光谱并没有遮挡,最终会成像在红外焦平面上。光学元件的热辐射是根据黑体辐射和体辐射率计算的。例如,第 g 个元件在红外焦平面上第 l 行第 j 列成像的热背景强度可以表示为:

$$N_{ljk}^b(\Delta, i_{lj}) = \frac{A\Omega t}{hc\nu_0 \cdot Q_{\text{ADU}}} \cdot \int_{\nu_1}^{\nu_2} q(\nu) \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot \tau_{\text{optics}} \cdot \varepsilon_g \cdot f_{ljg}(\nu, i_{lj}) \cdot L^b(\nu, T_g) \cdot [1 + U \cos(2\pi\nu_0\Delta_0 + \varphi_{ljk}(i_{lj}))] \cdot d\nu \quad (2)$$

式中: $N_{ljk}^b(\Delta, i_{lj})$ 代表元件热背景信号,单位为 counts/pixel; ε_g 代表元件辐射率,具体数据如表 2 所示; $L^b(\nu, T_g)$ 为黑体辐射光谱,单位 $\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot (\text{cm}^{-1})^{-1}$; T_g 为元件温度,单位 K。

仪器热背景的主要来源有望远镜、窄带滤波器、干涉仪输入光学系统、Michelson 干涉仪、宽带滤波器、中带滤波器、相机、探测器等。各仪器元件的辐射率及工作温度等信息由表 2 给出。

表 2 仪器元件工作温度与辐射率

Tab.2 Operating temperature and emissivity of instrument components

Component	Radiance	Working temperature/K
Telescope	0.14	240
Narrow F-P etalon	0.03	190
Michelson input optical system	0.1	190
Michelson interferometer	0.11	180
Wide F-P etalon	0.03	100
Medium F-P etalon	0.03	150
Camera	0.02	90
Detector	0.1	55

图 3 是根据公式(2)及表 2 计算得到的第一次步进时仪器在红外焦平面上成的背景图像,该图像同

时包含了探测器暗电流的贡献,单位为 counts/pixel。通过图 3 与图 2 的比较,可见仪器热背景信号比纯大气信号高出 4~5 倍。显然仪器热背景对红外焦平面信号强度的贡献是不可忽略的。

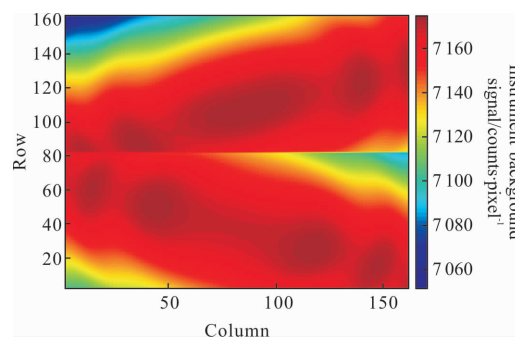


图 3 仪器热背景信号在红外焦平面上的成像

Fig.3 Image of the instrumental thermal background signal on the infrared focal plane

虽然在积分范围内每个元件的辐射率都是常数,但是仪器热辐射也会因干涉仪步进而受到调制。仪器背景调制引起的相位称为仪器背景相位。仪器背景相位与滤波器的带宽、以及滤波器透过率有关。望远镜的热辐射经过窄带滤波器成像为一条窄带辐射线,将产生相对较高的调制。窄带滤波器和 Michelson 输入光学系统的热辐射将会受到中带和宽带滤波器的调制,但调制强度比望远镜弱。由图 3 可知,仪器背景信号被滤波器调制的幅度不足 0.05%。

虽然仪器背景的调制幅度很小,但是对可见度的调制却不可忽略。热辐射调制是 Δ_0 选择的一项重要因素。一般情况下,最优固有光程差 Δ_0 通常是由条纹可见度和相位分辨率综合考虑决定。但是,从降低仪器热背景对可见度的调制方面考虑, Δ_0 应尽可能大些,而从消除滤波器对辐射线的影响方面考虑, Δ_0 不可以过大,因为 Δ_0 太大的情况下,辐射热背景的可见度测不到,将无法判断滤波器的位置,也就无法有效消除滤波器对辐射线的影响。

3 测量噪声分析

对于红外成像探测系统,测量噪声来源主要由三部分组成:散粒噪声、读出噪声和数字化噪声。

散粒噪声也叫光子噪声,是由光子的统计特征引起的噪声,表现为输出信号的准确值的不确定性。即使一个非常完美的恒定辐射源,在给定时间探测

到的光子数量也是不同的,这是因为光子有随机到达率。到达光子数的分布可近似为泊松分布,当泊松分布的平均值很大时,泊松分布可近似为高斯分布。在这种情况下,高斯分布的方差可认为等于平均值,此时光子噪声也叫高斯噪声:

$$\text{噪声} = C_{S-N} \sqrt{\text{信号}} \quad (3)$$

式中:噪声、信号的单位都是 electron。转换因子 C_{S-N} 的单位为 $\text{electron}^{1/2}$ 。高斯噪声可以用于组合信号(纯大气信号和仪器热背景信号)以及仪器热背景信号。

读出噪声是通过传感器读取信号时产生的噪声,是由于放大器和传感器运行的不确定性引起的。而数字化噪声由模/数转换电路是由电子数转换为计数时产生的噪声。因此由于读出噪声和数字化噪声的存在,相同的像素、相同的电荷不一定给出绝对相同的计数。对于 SWIFT 系统,读出噪声方差 σ_d^2 约为 $4 \times 10^4 \text{ e}^2/\text{pixel}$ 。

因此,探测系统总噪声可以表示为:

$$\sigma_N^2 = \frac{N}{\text{ADU}} + \frac{\sigma_d^2}{\text{ADU}^2} + \frac{1}{12} \dots \quad (4)$$

式中:第一项代表随机散粒噪声方差;第二项代表探测器读出噪声方差;第三项代表数字化噪声方差。其中数字化噪声是通过在 ± 0.5 的均方根宽度上积分得到。噪声选用随机高斯分布。需要指出的是,对于当前的统计率,高斯分布不显著偏离泊松分布,但对于较低的计数率,高斯分布将偏离泊松分布。

考虑噪声时的信号 S_n 可以表示为:

$$S_n = S_{\text{mean}} + \sigma \times \text{RGN} \quad (5)$$

式中: S_{mean} 是 S_n 的平均值,是没有噪声的信号;RGN 是随机高斯数,RGN 服从标准正态分布,标准偏差是 1.00,平均值是 0。

当仪器视场面向深空时,SWIFT 探测系统采集到的信号为仪器热背景,图 4(a)所示为第一次步进时仪

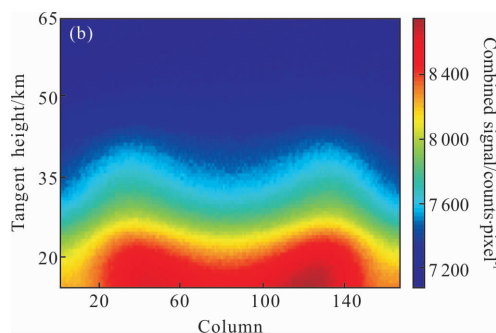


图 4 (a) 第一视场第一次步进时添加噪声的仪器热背景信号; (b) 第一视场第一次步进时添加噪声的组合信号(纯大气信号和仪器热背景信号的和)

Fig.4 (a) Instrumental thermal background signal with noise of FOV1 for the first step; (b) The combined signal (the sum of pure atmospheric signal and instrumental thermal background signal) with noise of FOV1 for the first step

器热背景添加噪声的红外图像。当仪器临边观测大气时,SWIFT 探测系统采集到的图像为仪器与大气的组合信号,图 4(b)所示为第一次步进时组合信号添加噪声的红外图像。对比两幅图像可以发现,对于红外仪器,其组合信号主要由仪器背景信号贡献。

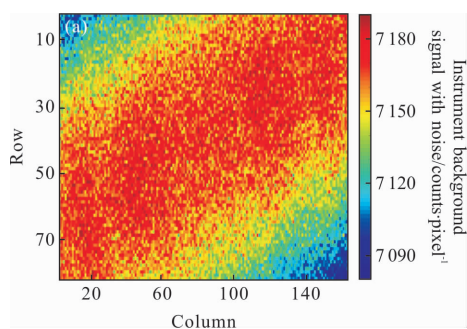
4 测风精度分析

视向风是沿着每个像素的视线的加权平均风,通过随机误差计算,可以对视向风测风精度进行了定量分析。研究思路是首先对大气反演信号进行仿真并分析信噪比,然后对视向风进行反演,最后分析得到视向风的误差廓线。

4.1 大气反演信号

在 SWIFT 获取数据时,首先需要进行仪器热背景校准,使指向镜旋转以指向大气发射基本为零的深空间,获得仪器热背景图像(图 4(a))。然后从综合信号(图 4(b))中去除仪器背景,以获得反演大气信号图像(图 5)。由图 4 和图 5 可见,组合信号的主体部分由仪器背景信号贡献:仪器热背景数值高达 7000 (图 4(a)),而大气信号只有 1500 左右(图 5)。虽然仪器热背景信号数值上较大,但是整体数据起伏较小,因此组合信号的整体变化由仪器信号决定,即组合信号的图样变化与大气信号相仿。

图 5 中反演大气信号包含纯大气信号与噪声。需要指出的是,在扣除仪器背景的时候,仪器热噪声



并未随之消失,反而在叠加,因此噪声包含两部分:其一来源于大气信号产生的噪声,另一部分来源于仪器热背景产生的噪声。反演大气信号噪声 σ_A 可以表示为两部分噪声的叠加:

$$\sigma_A = \sqrt{(\sigma_B^2 + \sigma_C^2)} \quad (6)$$

式中: σ_B 为仪器热背景噪声; σ_C 为大气信号噪声。由于仪器热背景数值较大,产生的噪声也较大,因此由仪器热背景引起的噪声将会对测风精度产生影响。

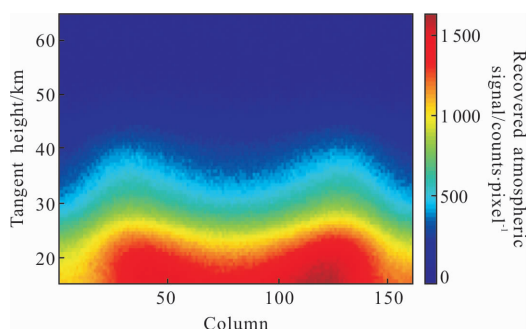


图 5 第一视场反演大气信号(包括纯大气信号与噪声)

Fig.5 Recovered atmospheric signals of FOV1 (including pure atmospheric signal and noise)

为提高信噪比,需进行 24 次独立的 4 步进测量。图 5 是第一视场用于反演的 4 次步进的复演大气信号。

由反演的大气信号和相应的噪声即可计算信噪比(SNR),即:

$$SNR = \frac{A}{\sigma_A} \quad (7)$$

式中: A 为反演大气信号。

图 6(a)为第一视场第一次步进时的信噪比。对于大多数像素,反演信号噪声的方差通常在每像素 9.4~9.9 个平方计数之间。图 6(b)是与图 6(a)中相同的反演大气信号的每个海拔高度的最大 SNR。海拔高的地方信噪比非常小,这是由于海拔高的区域信

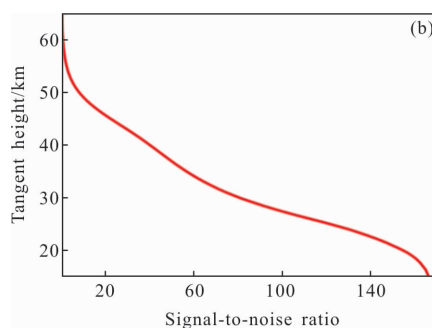
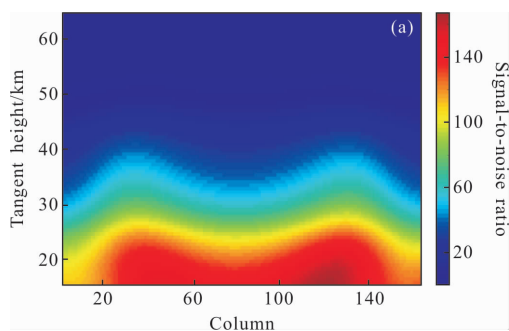


图 6 第一视场第一次步进的复演大气信号信噪比

Fig.6 Signal-to-noise ratio from the recovered atmospheric signals of FOV1 for the first step

号很弱引起的。由图 6(b)可见,在 15~45 km 的切点高度范围内,反演大气信号的单次曝光的 SNR 在 60~160 之间。

4.2 表观量

采用四步进算法反演风速的精度受限于 $\pi/2$ 相位步进的精度。在实际工程中,干涉仪很难产生精确的 $\pi/2$ 步进相位。为了提高测量精度,采用 N 次测量,每次步进相同相位。

第 k 次步进的红外焦平面上第 l 行第 j 列的像素的干涉图 $I_{klj}(\Delta)$ 可以利用仪器可见度 U_{lj} 、条纹对比度 V_{lj} 、平均值 I_{mij} 、总相位 φ_{ij} 和步进相位 φ_{klj} 来描述^[12]:

$$I_{klj}(\Delta) = I_{mij} [1 + U_{lj} \times V_{lj}(\Delta) \cos(\varphi_{ij} + \varphi_{klj})] \quad (8)$$

对于星载测风,大气辐射源和仪器的相对速度由地球自转、航天器运动、辐射源的运动(也就是风)共同决定。这三者中任何一个都会引起相位差,因此除了仪器固有相位差 φ_i 之外,还有地球自转引起的相位差 φ_e ,卫星速度引起的相位差 φ_s ,待测风速引起的相位差 φ_w ,即 $\varphi_i = \varphi_i + \varphi_e + \varphi_s + \varphi_w$ 。仪器的分辨率 U 是通过定标测定的系数。通常仪器对主要条纹的分辨率 U 大约为 0.9(理想情况为 1.0)。

将公式(8)展开可得:

$$I_{klj}(\Delta) = I_{mij} + I_{mij} U_{lj} V_{lj}(\Delta) \cos \varphi_{ij} \cos \varphi_{klj} - I_{mij} U_{lj} V_{lj}(\Delta) \sin \varphi_{ij} \sin \varphi_{klj} \quad (9)$$

叠加所有的测量相位得到:

$$\sum_{k=1}^n I_{klj}(\Delta) = n I_{mij} + I_{mij} U_{lj} V_{lj}(\Delta) \cos \varphi_{ij} \sum_{k=1}^n \cos \varphi_{klj} - I_{mij} U_{lj} V_{lj}(\Delta) \sin \varphi_{ij} \sum_{k=1}^n \sin \varphi_{klj} \quad (10)$$

因此:

$$\begin{cases} I_{mj} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^n I_{mj}(\Delta) \\ I_{mj}UV\cos\varphi_i = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^n I_{mj}(\Delta)\cos(2\pi nq) \\ I_{mj}UV\sin\varphi_i = -\frac{2}{N} \sum_{n=1}^n I_{mj}(\Delta)\sin(2\pi nq) \end{cases} \quad (11)$$

表观量 J_1 、 J_2 、 J_3 可以定义为:

$$J_1 = I_{mj} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^n I_{mj} \quad (12)$$

$$J_2 = I_{mj}V\cos\varphi_i = \frac{1}{U} \cdot \frac{2}{N} \sum_{n=1}^n I_{mj}\cos(2\pi nq) \quad (13)$$

$$J_3 = I_{mj}V\sin\varphi_i = -\frac{1}{U} \cdot \frac{2}{N} \sum_{n=1}^n I_{mj}\sin(2\pi nq) \quad (14)$$

计算得到的 J_1 、 J_2 、 J_3 的图像如图 7 所示。其中, J_1 等于干涉图的平均值, 其绝对强度等于相位步进

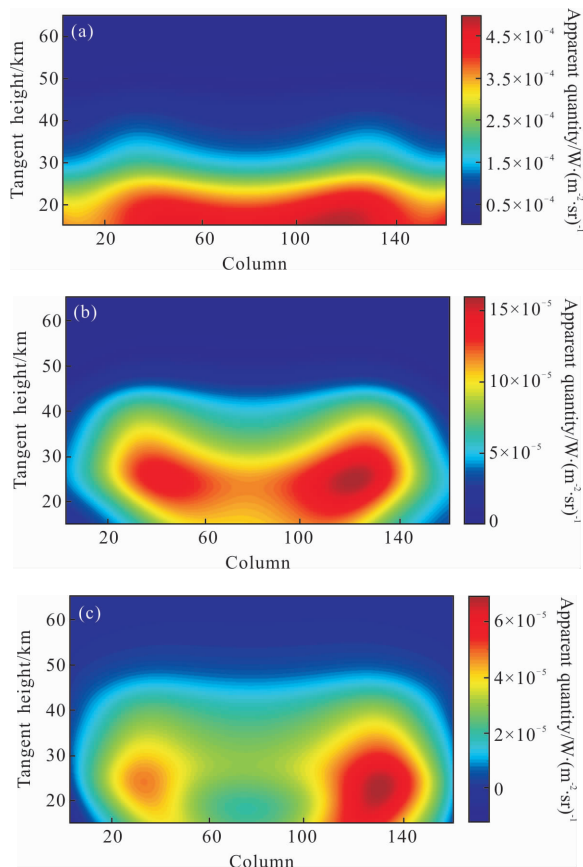


图 7 J_1 、 J_2 、 J_3 辐射图像(单位: $W \cdot (m^2 \cdot sr)^{-1}$)

Fig.7 J_1 , J_2 , J_3 radiance image(Unit: $W \cdot (m^2 \cdot sr)^{-1}$)

中辐射积分的平均值, 因此可以用来反演得到 O_3 分子的体辐射率, 进而得到 O_3 分子在大气中的浓度分布。而 J_2 及 J_3 均与干涉仪总相位 φ_i 有关, 利用比值

法可以得到 φ_i 的表达式, 即:

$$\varphi_i = \arctan \frac{J_3}{J_2} \quad (15)$$

4.3 误差分析

从干涉图的总相位中去除地球自转相位 φ_e 、卫星相位 φ_s 和仪器相位 φ_i , 即可得到风产生的相位 φ_w 。风相位 φ_w 与视向风速 v_w 的关系可以表示为:

$$v_{wj} = \frac{\varphi_{wj}c}{2\pi \times v_0 \Delta_{ij}^{eff}} \quad (16)$$

考虑到大气反演信号 I_{mj} 本身携带的探测噪声会使得表观量 J_1 、 J_2 、 J_3 引入一定量的不确定度, 而表观量的不确定会导致总相位 φ_i , 进而视向风速 v_w 产生测量误差。风速随机误差方差 σ_v^2 的计算公式可以表示为^[18]:

$$\sigma_v^2 = c^2 (2\pi v_0 \Delta^{eff})^{-2} (J_2^2 \sigma_{J_1}^2 + J_3^2 \sigma_{J_2}^2) (J_2^2 + J_3^2)^{-2} \quad (17)$$

式中: c 为真空光速; Δ^{eff} 为有效光程差; v_0 为中心线的波数; σ_{J_i} 为表观量的随机误差标准偏差。

假设沿着每行的临边观测切点高度恒定, 对视向风的像素图的列进行统计平均, 可以得到合成的视线风廓线, 进而可以获得相应的噪声水平曲线。图 8

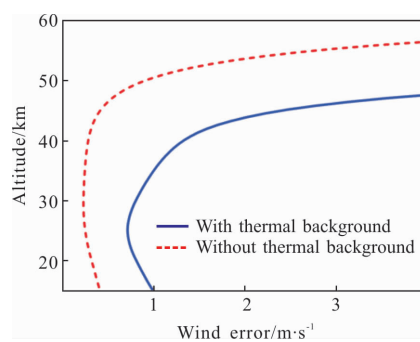


图 8 考虑仪器热背景(蓝线)与忽略仪器热背景(红线)时视向风的随机误差标准偏差廓线

Fig.8 Profile of random error standard deviation of line-of-sight wind with thermal background of the instrument (blue line) and without thermal background of the instrument (red line)

是考虑仪器热背景(蓝线)与忽略仪器热背景(红线)时视向风的随机误差标准偏差廓线。由图可见, 临边切点高度在 15~45 km 范围内, 考虑热背景时, 视向风的随机误差水平在 1~2 m/s 的范围内, 而不考虑热背景时, 视向风的随机误差水平只有 0.4 m/s, 与实际情况偏差较大。切点高度 > 45 km 处, 由于信噪比低的缘故, 误差值也相对较高。因此由于干涉仪工

作在 $8.823\ \mu\text{m}$, 红外波段, 仪器热背景会对测风产生较大的影响, 因此需要对仪器热背景进行研究, 估算出背景噪声, 从而提高测风精度。

5 结 论

基于 O_3 辐射源的 Michelson 成像干涉仪能够全天时探测平流层区域的大气风场, 文中借助 SWIFT 的设计参数, 对测风不确定度进行了分析。由于以 O_3 分子在 $8.823\ \mu\text{m}$ 附近的辐射谱线为探测目标源, 容易受到同样处于红外波段的仪器热背景干扰, 且测量噪声相对较高。文中在临边观测正演仿真的基础上, 开展了仪器热背景辐射研究及测量噪声分析, 给出了大气信号测量噪声及仪器热背景噪声引起的大气风场速度误差数值, 并通过表观量仿真及信噪比分析, 得到了视向风的误差廓线。数据仿真结果表明, 在 $15\sim 45\ \text{km}$ 的切点高度范围内, 大气信号的单次曝光的信噪比为 $60\sim 160$, 反演视向风速的精度为 $1\sim 2\ \text{m/s}$ 。该研究可以为基于红外辐射源的大气风场测量提供重要的理论指导, 同时对于红外 Michelson 成像干涉仪的研制均也有重大的工程意义和实践价值。

参考文献:

- [1] Zheng Jun, Sun Dongsong, Dou Xiankang, et al. 60 km Rayleigh Doppler lidar and wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10):1030002. (in Chinese)
- [2] Gao Duorui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese)
- [3] Feng Yutao, Li Juan, Zhao Zengliang, et al. Development of interferometric spectroscopy for atmosphere wing observation based on satellite [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34 (D8): 14-26. (in Chinese)
- [4] Hu Weidong, Ji Jinjia, Liu Ruiting, et al. Terahertz atmosphere remote sensing [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 656-665. (in Chinese)
- [5] Zhao Zhiliang, Chen Lihua, Zhao Zijia, et al. Fabrication and application of dual-wavelength infrared transmission-type interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(11): 2639-2646. (in Chinese)
- [6] Yao Dong, Li Yupeng, Zhao Ya, et al. Tolerance assurance of interferometer for optical HCB process [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1945-1953. (in Chinese)
- [7] Zhang Fang, Gao Jiaobo, Wang Nan, et al. LWIR imaging spectrometer employing a variable gap Fabry-Perot interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (3): 0318001. (in Chinese)
- [8] Shepherd G G. WINDII on UARS in the context of SCISAT and Odin [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2017, 186: 40-51.
- [9] Skinner W R, Gell D A, Marshall A R, et al. High-resolution Doppler imager: instrument performance from late 1991 to mid-1999 [C]//SPIE, 1999, 3756: 304-316.
- [10] Killeen T L, Wu Q, Solomon S C, et al. TIMED Doppler interferometer: Overview and recent results [J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2006, 111 (A10): A10S01.
- [11] 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 (1-2): 585-600.
- [12] Scott A. Simulation and optimization of the SWIFT stratospheric wind interferometer for transport studies on GCOM-A1 [C]//SPIE, 2017, 10313: 103130Q.
- [13] Liang Jian'an, Zhao Wanli, Wang Xia, et al. Effect of the background clutter on the operating range of infrared polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1004003. (in Chinese)
- [14] Yu Fei, Ren Qifeng, Li Sujun, et al. Analysis of noise for infrared focal plane array in low temperature background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (3): 0304003. (in Chinese)
- [15] Marr K D, Englert C R, Harlander J M. Flat-fields in DASH interferometry [J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9535-9544.
- [16] Shen Jing, Xiong Wei, Shi Hailiang, et al. Phase detection and drift correction for doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46 (9): 0901003. (in Chinese)
- [17] Wu Kuijun, Fu Di, Feng Yutao, et al. Simulation and application of the emission line O_3P_{10} of O_2 ($\lambda^1\Delta_g$) dayglow near $1.27\ \mu\text{m}$ for wind observations from limb-viewing satellites [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16984-16999.
- [18] Rahnama P, Rochon Y J, McDade I C, et al. Satellite measurement of stratospheric winds and ozone using Doppler Michelson interferometry. Part I: Instrument model and measurement simulation [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, 23 (6): 753-769.