

一种新型的空间外差光谱仪平场校正方法

丁毅^{1,2,3}, 罗海燕^{1,2,3*}, 施海亮^{1,2,3}, 李志伟^{1,3}, 韩云飞^{1,2,3}, 熊伟^{1,2,3}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 针对已完成光栅胶合的一体化干涉仪组件, 提出了一种利用平场校正滤光片形成高频外差干涉调制数据进而进行系统级平场校正的方法。依据空间外差光谱技术干涉调制的原理, 给出了平场校正所需的外差干涉频率范围(即平场校正滤光片的光谱范围)的计算方法。通过理论和仿真分析确定了平场校正滤光片的主要技术参数, 并进行了实验验证。实验结果表明, 该平场校正方法使复原光谱的平均信噪比提升了 115.7%, 复原光谱的固定频率噪声和高频段光谱失真的抑制效果尤为显著。

关键词 光谱学; 空间外差光谱仪; 平场校正; 干涉调制; 滤光片; 复原光谱

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1930002

New Flat-Field Correction Method for Spatial Heterodyne Spectrometer

Ding Yi^{1,2,3}, Luo Haiyan^{1,2,3*}, Shi Hailiang^{1,2,3}, Li Zhiwei^{1,3},

Han Yunfei^{1,2,3}, Xiong Wei^{1,2,3}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Aiming at the integrated interferometer components with glued grating, this paper proposes a system-level flat-field correction method based on high frequency heterodyne interference modulation data formed by flat-field correction filter. A calculation method for the frequency range of heterodyne interference required for the flat-field correction (i. e., the spectrum range of flat-field correction filter) is given based on the principle of interference modulation of spatial heterodyne spectroscopy. The main technical specifications of the flat-field correction filter are determined by theoretical and numerical analyses, and are subsequently verified by experiments. The experimental results show that the average signal-to-noise ratio of the recovery spectrum is increased by 115.7%, and the suppression of fixed frequency noise and high-frequency spectrum distortion are particularly notable.

Key words spectroscopy; spatial heterodyne spectrometer; flat-field correction; interference modulation; filter; recovery spectrum

OCIS codes 300.6300; 010.0280; 120.0280

1 引 言

空间外差光谱技术起源于 20 世纪 70 年代, 在 20 世纪 90 年代后飞速发展^[1]。目前, 该技术已被广泛应用于大气温度^[2]、风场^[3]、温室气体^[4]、OH 自由基^[5]以及拉曼光谱^[6]等机载、星载遥感探测领

域, 并实现了大背景、弱目标成分的定量探测。光学元件制造瑕疵、不同位置点对应的光学系统效率不同、光栅污染, 以及探测器响应非均匀性等导致干涉数据各采样点的响应出现差异^[7], 进而影响了干涉数据的质量和复原光谱的精度。随着科学技术的进步, 对原始干涉数据质量的要求也日益提高。因而,

收稿日期: 2020-05-18; 修回日期: 2020-06-16; 录用日期: 2020-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(61975212, 41975033)

* E-mail: luohaiyan@aiofm.ac.cn

有必要针对高集成度的空间外差光谱仪器开展系统级相对辐射(又称“平场”)一致性校正研究。

空间外差光谱仪(SHS)的平场校正方法主要分为器件级^[8-9]和系统级^[10-11]平场校正方法。器件级平场校正的对象为探测器,即通过积分球输出的均匀目标对探测器本身进行非均匀性校正,该方法并未涉及到光学系统内存在的非理想因素。系统级平场校正的对象包括探测器、光学系统等。Englert等^[10]和施海亮等^[11]采用挡光臂法对空间外差光谱仪进行了准系统级平场校正研究,较好地解决了探测器、光学组件的非均匀性问题。然而,该方法仅适用于两臂光栅未胶合的状态,且平场校正数据仍需复杂的平场系数配准等过程;同时,在后续光栅胶合和焦面装调过程中也极易引入新的表面污染脏点;光栅一旦胶合完成,上述平场校正方法的开展也会受限。针对上述问题,本研究团队提出了一种新型的适用于一体化干涉组件的空间外差光谱仪系统级平场校正方法。

在分析空间外差干涉调制原理的基础上,针对已胶合光栅的一体化干涉仪组件,本研究团队利用

高频外差干涉数据形成准平场干涉图,提出了一种新型的系统级平场校正方法。本文从理论上分析了平场校正滤光片参数的计算方法,结合已有原理样机的主要技术参数,设计并选取了合适的平场校正滤光片,然后开展了相关实验验证和数据结果分析等工作。结果表明,仿真计算结果与实验数据具有良好的一致性,所提方法对于空间外差干涉光谱技术在机载、星载遥感探测领域的应用具有重要意义。

2 空间外差光谱仪平场原理

空间外差光谱仪(SHS)用闪耀光栅代替Michelson干涉仪中的两个平面反射镜。具有一定立体角的入射光线经透镜L1准直后进入分束器,分束器将入射光线分为强度相等的两束相干光,如图1(a)所示。其中的一束相干光经分束器反射到达光栅G1,由光栅G1衍射后到达分束器;另一束透过分束器后到达光栅G2,经G2衍射后到达分束器。两束相干光在出射波面形成干涉条纹,然后经成像镜头进行比例缩放,最终成像在探测器面上。图1(b)为已胶合的一体化集成干涉仪组件。

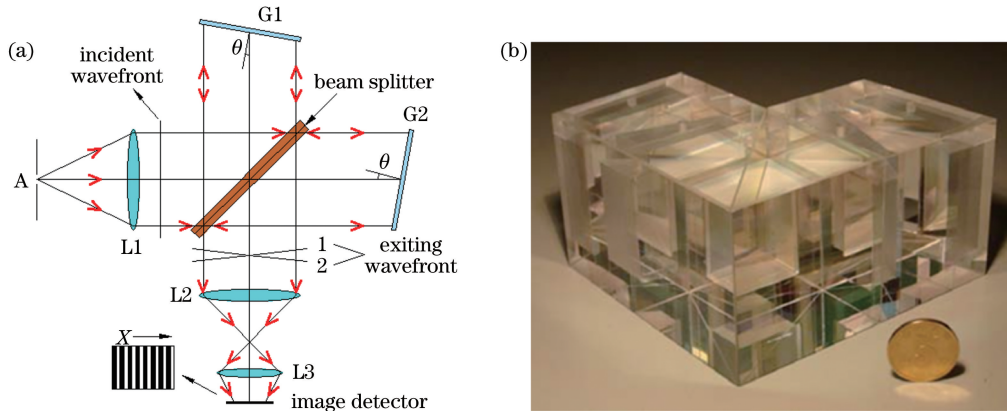


图1 空间外差光谱仪。(a)光路图;(b)一体化干涉仪组件

Fig. 1 Spatial heterodyne spectrometer. (a) Schematic of optical path; (b) monolithic SHS interferometer

入射光谱 $B(\sigma)$ 产生的干涉条纹在探测器 x 方向(光栅衍射方向)上的空间频率和干涉强度分别为

$$k = 2\sigma \sin \gamma \approx 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta, \quad (1)$$

$$I(x) = \int_0^{+\infty} R(k)B(k)[1 + \cos(2\pi kx)]dk, \quad (2)$$

式中: k 为空间频率; σ 为入射光的波数; σ_0 为系统的 Littrow 波数; θ 为光栅的 Littrow 角; $I(x)$ 为干涉强度; $B(k)$ 为光谱强度; $R(k)$ 为探测器的光谱响应; 2γ 为两束相干光在出射波面的夹角。由(2)式可知,理论干涉强度的表达式包含有非调制项和调制项;而且,在理想情况下, x 方向上不同像元点对

应的非调制项为一个常数。然而,光栅、探测器的表面污染以及光学系统的非均匀性照明等非理想因素,都会导致非调制项在不同像元处的响应值发生变化,这是影响复原光谱质量的主要因素。考虑到各组件在不同光程差点处表现出的非理想透过因素,(2)式可表述为

$$I(x) = \int_0^{+\infty} R(k)B(k)[t_A^2(x) + t_B^2(x) + 2t_A(x)t_B(x)\cos(2\pi kx)]dk. \quad (3)$$

(3)式中的前两项为低频成分,不包含光谱信息;第三项为调制项,包含了与光程差点相关的非理

想透过因素 $t_A(x)t_B(x)$ 。为了解决这一问题,需要标定调制项中各光程差点处的相对辐射校正系数 $u(x)$ (或平场校正系数)。

本文旨在探索一种产生上述平场干涉数据的方法,即所需干涉图像的调制度在任意点上都应近似为 0。理论上,空间外差光谱仪的干涉图依赖于外差频率。由(1)式可知,干涉条纹的空间频率正比于外差波数,零外差波数即可形成零空间频率的条纹。然而,由于空间外差光谱仪的光谱分辨能力为 10^5 量级,获取单色光的平场干涉数据需要稳定、准确的单色光输入,对单色光硬件设备的要求极高。此外,干涉仪组件本身受周围环境的变化会导致光谱仪的基频 σ_0 发生变化,进而也会导致零空间频率条纹不稳定。可见,利用零空间频率平场干涉数据进行平场校正的方法受硬件条件和周围环境的约束,目前尚未见相关研究报道。

在空间调制干涉光谱仪中,影响干涉图调制度的因素有光学系统像差、光栅衍射效率、探测器采样像元大小等,其中探测器采样像元大小的影响无法消除^[12-13]。在理想条件下,干涉条纹接收面上应是无限小单元的连续采样,实际干涉图像调制度应是关于探测器像元尺寸的函数。设探测器像元大小为 $t = x_1 - x_2$,成像系统的缩放比为 1,则在色散方向上探测器相邻两像元对应的光程差为

$$\Delta = 4(x_1 - x_2) \tan \theta. \quad (4)$$

假设单色光(波数为 σ)入射至光谱仪,两臂在探测器单个采样单元内接收的干涉条纹的强

度为

$$I(x) = \int_0^{+\infty} R(k)B(k) \{t_A^2(x) + t_B^2(x) + 2t_A(x)t_B(x) \operatorname{sinc}[\Delta(\sigma - \sigma_0)] \cos(2\pi kx)\} dk. \quad (5)$$

探测器尺寸单元越小,其对应的干涉调制度越高,但像元尺寸越小,对光学系统的要求就会相应提高。因此,探测器像元尺寸是在光学系统、探测器性能参数和干涉系统之间权衡优化后最终决定的。仅考虑探测器像元大小对干涉调制度影响时,干涉调制度的表达式为

$$M_t = \operatorname{sinc}[4t(\sigma - \sigma_0) \tan \theta]. \quad (6)$$

由(6)式可知,干涉调制度是关于探测器像元尺寸的 sinc 函数。对于入射的单色光,干涉频率越高,调制度越低。因此,当干涉条纹频率足够高且欠采样程度满足一定条件时,可能存在所需的准平场干涉校正数据。平场数据的表达式为

$$I_c(x) = \int_0^{+\infty} R(k)B(k) [t_A^2(x) + t_B^2(x)] dk. \quad (7)$$

假设上述 $I_c(x)$ 为测量出的已知量,联立(5)式和(7)式可以得到相对辐射校正系数 $u(x)$,如(9)式所示。通常情况下,采用多项式拟合法扣除(5)式中的非调制项,同时将调制项除以平场校正系数 $u(x)$,即可得到平场校正后的干涉数据 $I'(x)$ 。平场校正后的干涉数据调制项中有效消除了光学系统瑕疵、照明非均匀性等因素;最后对(10)式进行傅里叶变换即可得到复原光谱。

$$\frac{I(x)}{I_c(x)} = 1 + \int_0^{+\infty} \left[\frac{2t_A(x)t_B(x)}{I_c(x)} R(k)B(k) \operatorname{sinc}[\Delta(\sigma - \sigma_0)] \cos(2\pi kx) \right] dk, \quad (8)$$

$$u(x) = \frac{t_A(x)t_B(x)}{I_c(x)}, \quad (9)$$

$$I'(x) = \int_0^{+\infty} [2R(k)B(k) \operatorname{sinc}[\Delta(\sigma - \sigma_0)] \cos(2\pi kx)] dk. \quad (10)$$

3 平场数据仿真与实验验证

3.1 平场数据的仿真分析

由上述空间外差干涉平场原理可知,对于一定尺寸的探测器采样像元,远离基频波长的单色光可以产生高频空间干涉条纹,其任意光程差点处的干涉调制度皆为 0。本节将依据本研究团队现有的 CO₂ 空间外差光谱仪原理样机参数进行仿真实验,

研究产生平场干涉校正数据所需校正滤光片的主要技术参数。

CO₂ 空间外差光谱仪原理样机的主要参数如表 1 所示。

探测器像元大小为 20 μm ,考虑到成像系统的缩放比,在光栅面处对应的采样点大小约为 63 μm ,对应的奈奎斯特频率为 79.25 line/cm。依据光谱分辨率和光栅刻线密度可知,光栅在色散方向上的

表 1 CO₂ 空间外差光谱仪的主要技术参数
Table 1 Main parameters of CO₂ spatial heterodyne spectrometer

Parameter	Value
Littrow wavelength / μm	1.567
(Wave number / cm^{-1})	(6381.6)
Spectral range /nm	1568–1583
(Wave number / cm^{-1})	(6317–6377)
Grating density /($\text{line} \cdot \text{mm}^{-1}$)	250
Spectral resolution /nm	0.1
Magnification of imaging system	-0.317:1
Grating size /cm	3.134
Pixel size-20 μm	640×512

尺寸为 3.134 cm。而且,原理样机干涉仪组件两臂的厚度一致,零光程差点位于光轴上,因此,干涉强度在色散方向上的变化范围为(-1.567 cm, 1.567 cm)。

由(1)式可知,空间外差干涉条纹频率与入射光谱外差波数 $\sigma - \sigma_0$ 之间呈线性关系,其比例系数为 $4 \tan \theta$,则上述原理样机受探测器奈奎斯特频率的限制,所能探测的外差波数范围为(0 cm^{-1} , 99.34 cm^{-1})或(-99.34 cm^{-1} , 0 cm^{-1}),对应的光谱范围分别为($1.567 \mu\text{m}$, $1.592 \mu\text{m}$)或($1.543 \mu\text{m}$, $1.567 \mu\text{m}$)。外差波数范围和对应的光谱范围取决于原理样机采用的光谱范围以及工作波段滤光片的参数。

仅考虑探测器像元对单色光干涉图调制度的影响,根据(5)式,仿真分析得到了不同输入波长下对应的空间干涉强度在色散方向上的变化,如图 2 所示。可见,当输入波长分别为 1568,1583,1592 nm (对应空间外差干涉条纹的频率分别为 3.25, 51.52,80.05 line/cm)时,受采样像元尺寸影响的干涉条纹的调制度分别为 1.00、0.67 和 0.27。

在有效工作波段(即工作波段)光谱范围内,单色光干涉条纹的调制度大于 0.64。随着空间干涉外差频率增大,干涉条纹的调制度呈 sinc 函数趋势下降。本文进一步分析了在较大光谱范围条件下,干涉条纹的调制度与波数的关系,如图 3 所示。由于干涉条纹调制度不可能存在负值,因此,对于 sinc 函数理论计算为负值的取其绝对值。

由图 3 可知:当光谱仪系统的输入波长在工作光谱范围之外时,探测器表面将接收到空间频率极高的干涉条纹;当输入波数与基频波数相差约

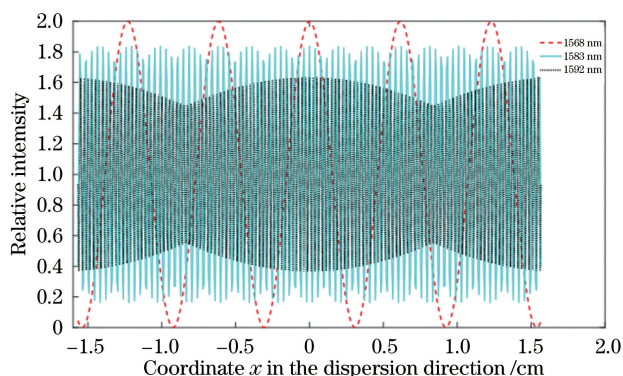


图 2 不同输入波长下空间干涉强度在色散方向上的变化
Fig. 2 Variation of interference intensity in the direction of dispersion at different wavelengths

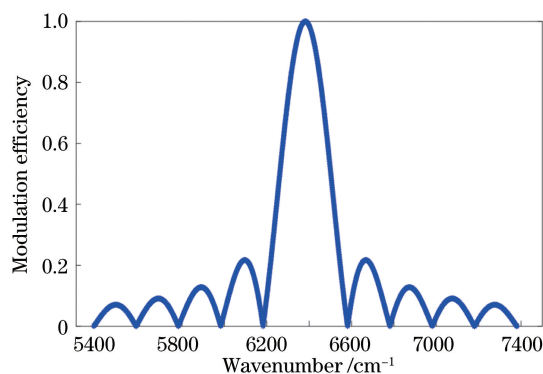


图 3 波数与调制度的关系

Fig. 3 Relationship between wavenumber and modulation
200 cm^{-1} 时,对应干涉调制度的 sinc 函数第一次为 0。在实际情况下,受探测器噪声、光栅衍射效率等的影响,当干涉调制度低于 0.2 时,复原光谱的信噪比已接近 0。

根据上述分析,以外差波数需满足 3 倍探测器欠采样条件为平场校正滤光片参数的选取原则,计算公式为

$$|4 \tan \theta (\sigma - \sigma_0)| \geq 3 f_{\text{det}}, \quad (11)$$

式中: f_{det} 为探测器的奈奎斯特频率,即 79.25 line/cm。那么,满足该条件的波数差的最小值为 298.0 cm^{-1} 。依据空间外差干涉原理,外差波数可以选取基频长波或短波的任意一侧,本文选取短波侧进行验证。通过(11)式计算可知,输入光短波侧的波长应小于 1497.1 nm。

理论上,外差波数越大,带宽越宽,平场校正数据质量越好,但校正光谱范围距离工作波段越远,光谱仪内的系统响应差异就越大。因此,在满足准平场干涉数据的条件下,校正光谱范围需尽可能接近系统的有效工作波段。选取 1470~1500 nm 波段的入射光,并假设其光谱形状为矩形窄带滤光片线

型,结合表 1 所示的原理样机的主要技术参数,仿真得到了平场校正滤光片参数所对应输入光谱干涉图的相对强度分布,如图 4 所示。

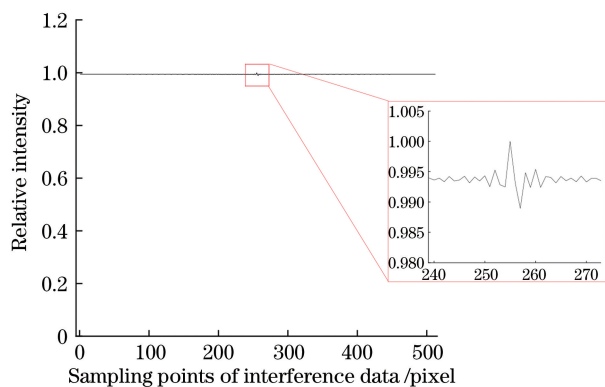


图 4 仿真计算结果

Fig. 4 Simulation results

由图 4 可知,干涉数据强度的均值近似为 1,中心主极大附近干涉强度波动的极大值和极小值分别为 1.000 和 0.989。可见,通过仿真获得了较为理想的平场干涉数据。

通常情况下,可见/近红外光谱仪滤光片位于镜头组件的首位或末位。假设可以将原理样机工作波段滤光片替换为带外平场校正的滤光片,在最大程度保留光学系统非均匀性照明特征的前提下,使其复色光干涉图在各光程差点处的干涉调制接近 0,则该干涉图像即为符合空间外差光谱仪系统级平场校正的数据。

3.2 平场数据的实验验证

平场数据实验以本研究团队现有的 CO₂ 空间外差原理样机为对象展开,该原理样机是由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的。在工作波段,该原理样机的滤光片位于前置镜头孔径光阑处,方便拆卸和更换。实验采用 XEVA-FPA-1.7-640 型探测器,其像元数为 512 行×640 列(干涉数据的有效像元数为 400 行×500 列),响应波段为 0.9~1.7 μm,像元尺寸为 20 μm。

由上述分析可知,产生平场校正数据的外差波数应大于 298 cm⁻¹,即输入带外谱线的波长应小于 1497.1 nm(或高于 1643.7 nm)。本文选取的平场校正滤光片为爱特蒙特货架产品(编号#87845),其中心波长为 1500 nm,带宽为 25 nm,对应的外差波数变化范围为(230.0 cm⁻¹,341.1 cm⁻¹),光谱透过率如图 5 所示。该滤光片的带外截止深度与工作波段滤光片带外截止深度相当,均为 OD4。

平场校正实验现场如图 6 所示。拆除准直镜头

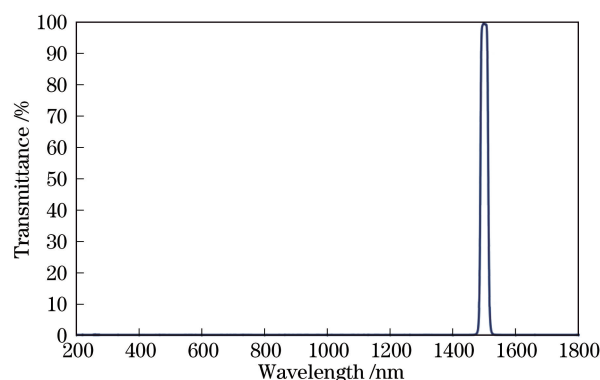


图 5 平场校正滤光片的光谱透过率曲线

Fig. 5 Transmittance curve of the flat-field correction filter

前的工作波段滤光片,将平场校正滤光片放置于积分球光源出口与准直镜头入口之间。积分球为本单位自研设备,其在 1450~1600 nm 光谱波段内的面均匀性、角度非均匀性和角度非稳定性分别为 0.06%、0.91%和 0.20%。

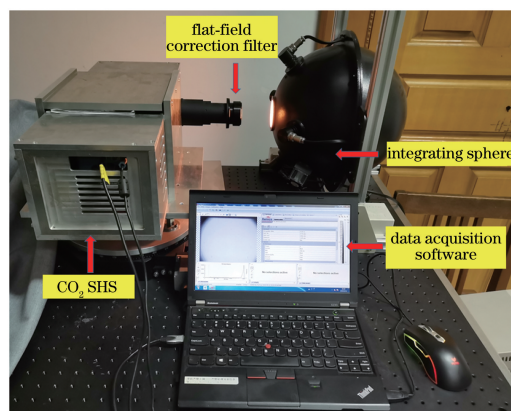


图 6 实验平台布局

Fig. 6 Layout of experimental breadboard

成像系统在不同特征波长下的相对照明曲线如图 7 所示,可见:工作特征波长(1575 nm)与平场校正滤光片中心波长(1500 nm)下的照明一致性优于 99.99%。这说明本文获取的平场校正数据完全保留了光学系统照明非均匀性的特征。

利用平场校正滤光片获取的平场干涉数据如图 8(a)所示,利用工作波段滤光片获取的工作波段的干涉数据如图 8(b)所示。对比图 8(a)和图 8(b)可知,采用平场校正滤光片获取的平场干涉校正数据已消除了零光程差点处的干涉强度变化,同时保留了光学系统的非均匀照明、光学系统瑕疵和探测器坏点等情况。

理论上,干涉图零光程差点为主极大值,由于干涉仪组件两臂光栅的刻线方向存在非一致性误差等,因此实际获取的干涉数据存在相位误差,与理想

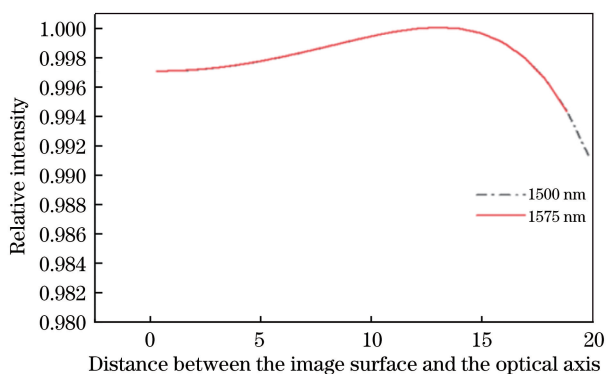


图 7 系统的相对照明曲线(选取工作特征波长为 1575 nm,平场校正特征波长为 1500 nm)

Fig. 7 Relative illumination curve of the system(selected characteristic wavelengths of the interference working filter and flat-field filter are 1575 nm and 1500 nm, respectively)

的干涉数据形状存在差别,如图 8(b)所示,后续需通过干涉预处理进行相位校正。

图 9 为平场干涉数据和工作波段第 120 行干涉数据的对比。从图 9 中可以看出,平场干涉数据零光程差点的干涉主极大与其他光程差点的干涉强度相当,且平场干涉数据和工作波段干涉数据在除零光程差点附近以外的各光程差点处的干涉强度相当。本文获取的有效的平场校正干涉数据在一定程度上证明了平场校正方法的有效性。

4 平场校正数据分析

4.1 干涉数据分析

在进行平场校正前,首先对平场干涉数据和工作波段干涉数据进行预处理,包括扣除暗电流、剔除探测器坏像元;然后将工作波段获取的干涉数据

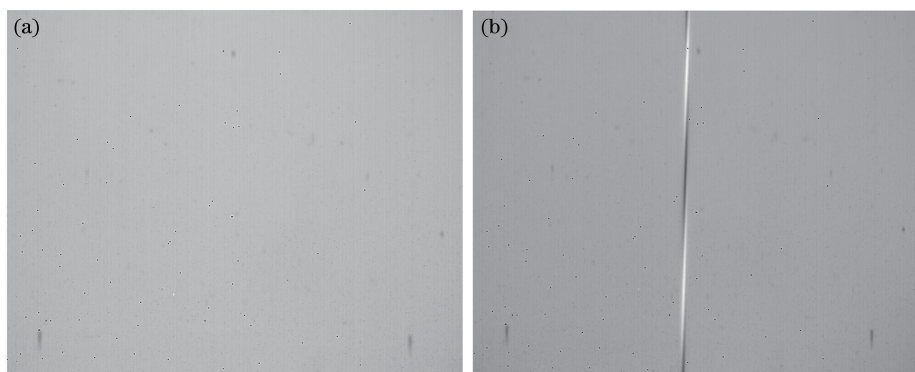


图 8 实验结果。(a)平场干涉图;(b)工作波段干涉图

Fig. 8 Experimental results. (a) Interferogram of flat-field filter; (b) interferogram of working filter

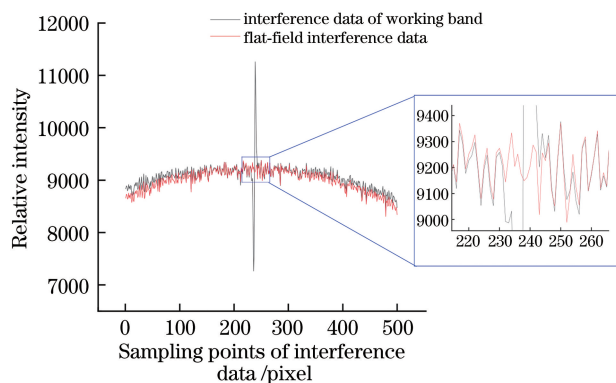


图 9 单行平场实验数据和工作波段干涉数据的对比

Fig. 9 Comparison between single-row flat-field data and interference data

$I(x)$ 进行多项式拟合,以扣除非干涉成分项^[14-15];最后除以平场校正系数 $u(x)$,完成系统平场的校正。干涉图校正前后的对比如图 10 所示。对比图 10(a)、(b)可知,光学系统的照明非均匀性、光学系

统瑕疵、探测器的坏点以及探测器表面的污染均得到了良好的校正。

图 11 给出干涉图中第 120 行干涉数据在平场校正前后的对比。从图 11 中的局部放大图中可以看出,远离主极大附近的干涉数据经系统平场校正后,系统噪声得到了有效抑制。可见,本文提出的平场校正方法可以保证测试过程中各功能组件位置不变,即平场数据与干涉数据之间完全匹配。相比较挡光臂法,本文所提方法无需进行图像配准,避免了由图像配准偏差(如像元平移、旋转和缩放等偏差)导致的复原光谱失真的情况。

4.2 光谱数据分析

对系统平场校正前后的干涉数据进行相位校正和傅里叶变换即可得到复原光谱^[16]。本文对未进行平场校正的干涉数据以及经本文平场校正流程处理后的干涉数据进行相位校正和傅里叶变换,得到了平场校正前后的复原光谱,如图 12 所示。

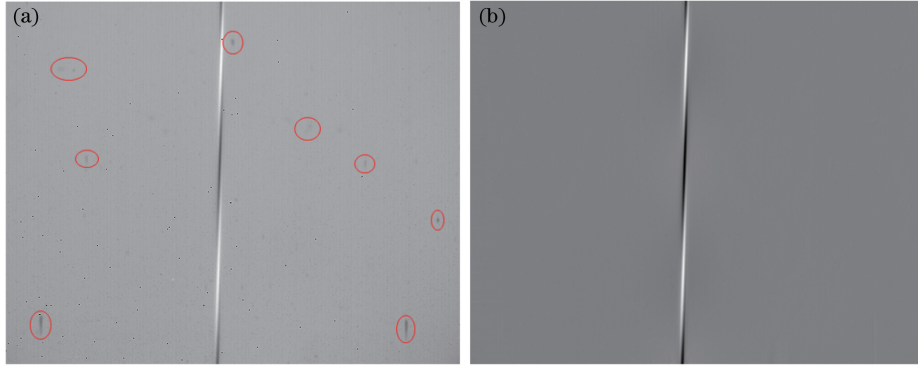


图 10 平场校正效果的对比。(a)平场校正前的干涉图;(b)平场校正后的干涉图

Fig. 10 Comparison of flat-field correction effect. (a) Interferogram before flat-field correction; (b) interferogram after flat-field correction

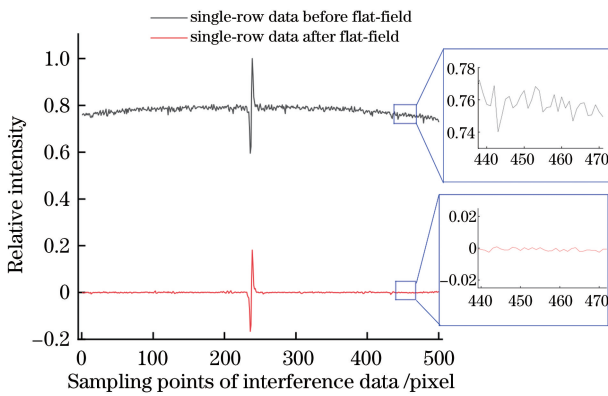


图 11 平场校正前后单行干涉数据的对比

Fig. 11 Comparison of single-row interference data before and after flat-field correction

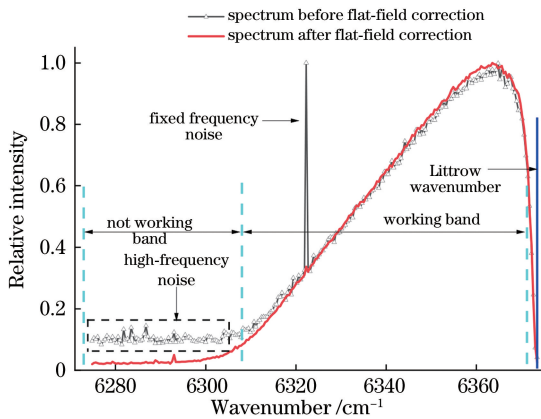


图 12 平场校正对复原光谱的影响

Fig. 12 Effect of flat-field correction on recovery spectrum

原理样机的基频波数为 6373 cm^{-1} ,由图 12 可以得到以下结论:

1) 外差低频波段(即有效光谱范围)内光谱的平均信噪比提升。复原光谱的信噪比(r_{SNR})指系统中信号与噪声的比值。复原光谱工作带内平均信噪比的计算公式为

$$\bar{r}_{\text{SNR}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{\text{SNR}}(\sigma_i), \quad (12)$$

其中,

$$r_{\text{SNR}}(\sigma_i) = \frac{B(\sigma_i)}{\epsilon(\sigma_i)}, \quad (13)$$

式中: \bar{r}_{SNR} 为复原光谱的平均信噪比; $r_{\text{SNR}}(\sigma_i)$ 表示波数为 σ_i 时光谱的信噪比; $B(\sigma_i)$ 为复原光谱第 i 个光谱通道的光谱强度; $\epsilon(\sigma_i)$ 为第 i 个光谱通道的噪声标准差; N 光谱采样点数。

通过(12)式可以计算得到平场校正前复原光谱的平均信噪比为 35.1,平场校正后的平均信噪比为 75.7,相比平场校正前提升了 115.7%。

2) 外差高频波段光谱失真度下降。在平场校正前后的归一化复原光谱中,外差高频波段的相对强度由 10.0%降低为 1.6%。平场校正后的复原光谱接近原理样机的理论光谱形状(主要由窄带滤光片的线型决定)。

3) 探测器固定频率噪声得到了有效抑制。平场校正前系统的复原光谱在 6323 cm^{-1} 附近存在一个固有频率噪声,该噪声由探测器产生,且在系统工作过程中一直存在,导致了探测器像元响应的不一致性。经系统平场校正后,该噪声得到了有效抑制。

系统的平场校正效果如表 2 所示。

5 结 论

空间外差光谱技术是一种新型的干涉光谱技术。光学系统和探测器等器件的非理想响应会极大地影响复原光谱的质量。根据空间外差光谱仪干涉数据的调制原理,本研究团队提出了利用带外光谱对整机系统进行平场校正的方法,即:采用高频外差

表 2 平场校正效果
Table 2 Effects of flat-field correction

Parameter	Before flat-field correction	After flat-field correction
\bar{r}_{SNR}	35.1	75.7
Relative intensity of high-frequency /%	10.0	1.6
Fixed frequency noise	Non-corrected	Corrected

滤光片采集的平场干涉数据进行校正,进而获取系统的平场校正系数,利用平场校正系数完成系统的平场校正。采用本文平场校正方法获取的复原光谱的质量,在光谱信噪比提升、固定频率噪声抑制和高频外差波段噪声抑制方面效果显著,可有效避免传统挡光臂法中由两臂干涉图像配准误差导致的复原光谱的失真问题。

目前,本文所讨论的平场校正方法建立在平场校正滤光片和工作波段滤光片的输入光谱在原理样机中的响应相同的前提下,未考虑探测器像元在不同波段的量子效应不同、带外光谱带宽不同以及更换滤光片导致的平场校正系数差异等问题。本研发团队将继续进行研究,以达到进一步优化系统平场校正方法的目的。

参 考 文 献

- [1] Harlander J M. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning [J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1318: 234-243.
- [2] Doe R A, Watchorn S. Climate-monitoring CubeSat mission (CM2): a project for global mesopause temperature sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8153: 81530Q.
- [3] Englert C R, Harlander J M, Brown C M, et al. The Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): wind and temperature observations from the ionospheric connection explorer (ICON) [C]//Imaging and Applied Optics. Arlington: OSA, 2013: FW1D.3.
- [4] Xiong W. Greenhouse gases monitoring instrument (GMI) on GF-5 satellite (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(3): 0303002.
熊伟. “高分五号”卫星大气主要温室气体监测仪(特邀) [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3): 0303002.
- [5] Luo H Y, Fang X J, Hu G X, et al. Hyper-resolution spatial heterodyne spectrometer for hydroxyl radical OH [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0630003.
罗海燕, 方雪静, 胡广骁, 等. 中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪 [J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0630003.
- [6] Hu G X, Xiong W, Luo H Y, et al. Raman spectroscopic detection for simulants of chemical warfare agents using a spatial heterodyne spectrometer [J]. Applied Spectroscopy, 2017, 72(1): 151-158.
- [7] Li Z W. Key techniques of spectral reconstruction applied for spatial heterodyne spectrometer [D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2006: 63-72.
李志伟. 空间外差光谱仪光谱重构关键技术研究 [D]. 合肥: 中国科学院大学, 2015.
- [8] Li Z W, Xiong W, Shi H L, et al. Correction of detector response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0530001.
李志伟, 熊伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正 [J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0530001.
- [9] Wang X Q, Zhang L J, Xiong W, et al. Study on inhomogeneous correction of interference pattern of spatial heterodyne spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(4): 1274-1278.
王新强, 张丽娟, 熊伟, 等. 空间外差光谱仪干涉图非均匀性校正研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(4): 1274-1278.
- [10] Englert C R, Harlander J M. Flatfielding in spatial heterodyne spectroscopy [J]. Applied Optics, 2006, 45(19): 4583-4590.
- [11] Shi H L, Li Z W, Luo H Y, et al. The research of flatfielding correction method for spatial heterodyne spectrometer at systematic level [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(3): 933-938.
施海亮, 李志伟, 罗海燕, 等. 空间外差光谱仪系统级平场校正方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(3): 933-938.
- [12] Luo H Y, Ye Q H, Xiong W, et al. Study on the interferogram modulation efficiency of spatial heterodyne spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0712003.
罗海燕, 叶擎昊, 熊伟, 等. 空间外差光谱仪干涉条纹调制度影响分析 [J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0712003.

- [13] Tao R. Theoretical study of the modulation depth of the Fourier transform imaging spectrometer [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, 2006: 32-43.
陶然. 干涉成像光谱仪调制度理论研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2006: 32-43.
- [14] Ye S, Xiong W, Qiao Y L, et al. Data processing for interferogram of spatial heterodyne spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(3): 848-852.
叶松, 熊伟, 乔延利, 等. 空间外差光谱仪干涉图数据处理[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 848-852.
- [15] Zhang W L, Tian F C, Zhao Z Z, et al. Interferogram correction of spatial heterodyne spectrometer [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(5): 488-497.
张文理, 田逢春, 赵贞贞, 等. 空间外差光谱仪的干涉图校正[J]. 光电工程, 2017, 44(5): 488-497.
- [16] Yang Y, Xiong W, Ye Q H, et al. Experiments of flat-field wavelength calibration of spatial heterodyne spectrometer and its data processing[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2508-2512.
杨勇, 熊伟, 叶擎昊, 等. 空间外差光谱仪的平场波长定标实验与数据处理[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2508-2512.