

空间外差光谱仪相位误差修正

施海亮 熊 伟 李志伟 罗海燕

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 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 针对新型超分辨空间外差光谱技术特点,研究了其相位误差形成机理,采用连续可调单色光计算仪器各波长实际相位,用频率定标方式获取理论相位,在频谱域进行卷积从而剔除相位误差。利用光谱仪实测的连续光源、大气 CO₂ 吸收干涉图进行相位误差校正实验,结果表明,该算法能够达到很好的空间外差光谱仪相位误差修正效果。

关键词 光谱学;空间外差;相位误差;频率定标;数据修正

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0330003

Phase Error Correction of Spatial Heterodyne Spectrometer

Shi Hailiang Xiong Wei Li Zhiwei Luo Haiyan

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Aiming at the characteristics of novel spatial heterodyne spectroscopy (SHS), the phase error mechanism is studied, and the actual phase of each wavelength is calculated using tunable lasers and the theoretical phase is acquired by frequency calibration, and the phase error is eliminated according to convolution in the frequency domain. Using measured interferogram of continuous light source by spectrometer and atmospheric absorption of CO₂ interferogram, a phase error correction experiment is carried out. The experiment, correcting the phase error of continuous light source and atmospheric absorption of CO₂ interferogram measured by spatial heterodyne spectrometer, shows that the phase error correction algorithm can achieve perfect result for spatial heterodyne spectrometer.

Key words spectroscopy; spatial heterodyne; phase error; frequency calibration; data correction

OCIS codes 010.0280; 300.6300; 070.6120

1 引 言

光谱仪是指能将混合光按照不同的波长分成谱的光学仪器,为分析判断目标的属性提供了更好的依据。光谱仪根据分光方式的不同,可以分为:滤光片型、色散型和干涉型(傅里叶变换型)。空间外差光谱技术(SHS)是一种新型超分辨空间干涉型光谱技术^[1~3],采用两衍射光栅代替迈克耳孙干涉仪中的两个平面反射镜,利用面阵探测器进行干涉条纹数据采集,在不需要扫描动镜摆动的情况下就可以

在较窄的波段范围内获取超高的光谱分辨能力。空间外差光谱仪的基本原理是两束光的空间相干,系统基频波数形成零空间频率干涉条纹,保证了探测器各像元的充分利用。

由于 SHS 分光原理和方法区别于传统的色散型光谱仪与干涉型光谱仪,干涉数据在外差频率调制过程易受多种因素的影响,造成二维干涉图像各种形式的畸变及失真。因此,SHS 干涉数据的误差修正过程复杂且运算量大,其中 SHS 的相位误差是

收稿日期: 2012-10-22; **收到修改稿日期**: 2012-11-29

基金项目: 中科院合肥物质科学研究院青年人才专项(Y03RC21123)、国家自然科学基金(4175037/D0503)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY2011060405-1)资助课题。

作者简介: 施海亮(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事超光谱遥感探测技术方面的研究。

E-mail: hlshi@aiofm.ac.cn

一项不可忽略的重要误差,影响到复原光谱的分辨率及信噪比。SHS 相位误差形成因素较多,大小与光程差、入射光频率和空间位置等均非线性相关。传统的 Mertz、Forman 等相位校正算法采用低频率相位误差插值到高频相位误差来进行校正^[4],对于不随光程差和入射光频率缓变的非线性相位误差的校正残差较大,因此,对于 SHS 相位误差校正效果不是十分理想。本文在分析 SHS 相位误差形成机理的基础之上,研究了专门针对该类型光谱仪的相位校正算法。

2 相位误差机理

传统的傅里叶变换光谱学(FTS)光谱仪(迈克耳孙类型)利用动镜的摆动产生光程差,采用单元探测器记录时域干涉信号。因此,当通过光学系统的入射光聚焦在探测器像元上时,此时像元对应着整个光学系统透过光信息。SHS 与传统的 FTS 光谱仪的一个主要的区别是:SHS 产生的干涉图数据都同时记录在面阵探测器阵列上,获取的是空域干涉信号。因此,对于 SHS 而言,当通过光学系统的入射光形成干涉图时,成像到整个探测器面上,探测器的每个像元对应着干涉仪[光栅、分束器(BS)、扩视场棱镜和隔片]、成像光学系统的一小部分,如图 1 虚线所示。因此,空间外差光谱仪干涉数据的相位误差影响因素较多,相位误差形成原因复杂,修正量比传统 FTS 光谱仪要大^[5,6]。

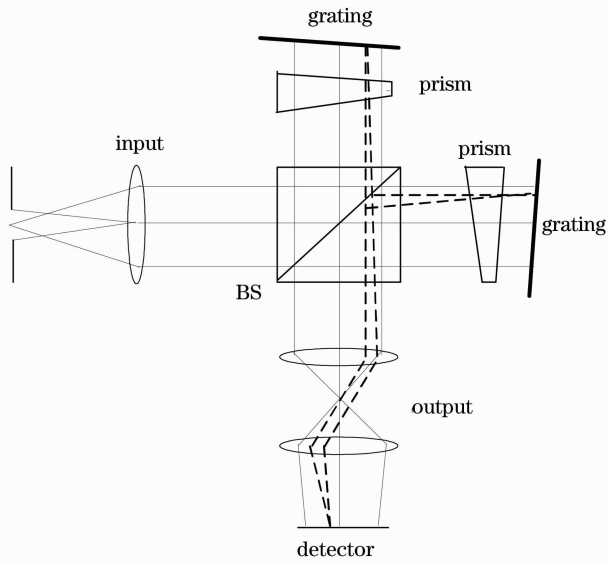


图 1 SHS 干涉条纹成像关系

Fig. 1 Imaging relationship of SHS interference fringes

对于 SHS 而言,影响 SHS 干涉图相位失真的因素较多,主要存在以下几方面:

- 1) 系统光学元器件不均匀性(如光栅刻划的不均匀性,分束器折射率的不均匀性)导致的相位色散,电子学器件(如放大器、滤波器)等导致频率变化引起相位的延迟;
- 2) 干涉仪胶合过程中,两臂光栅可能会存在小角度的倾斜,导致干涉条纹的相位变化;
- 3) 成像光学系统的成像不一致性,从而导致的干涉图相位失真;
- 4) 探测器像元尺寸大小的不一致性,导致干涉图采样间隔的不均匀;
- 5) 干涉图的零光程点(主极大值)的采样定位不精确从而引入的相位误差。

这些相位误差最终会导致干涉条纹产生扭曲,而且空间分布不均匀,使得光程差成为波长的慢变函数,从而零光程差点也成为波长的函数,最终影响到干涉数据的调制效率以及光谱数据的信噪比。

由 SHS 相位误差形成机理可知,相位误差 ϕ 不仅跟入射光的外差波数 $k(\delta\sigma)$ 相关,存在相位漂移 $\phi(k)$; ϕ 还与光程差 x (光谱维方向像元位置)以及空间维方向像元位置 y 相关,存在空间相位误差 $\phi(x, y)$ 。对于相位漂移 $\phi(k)$ 而言,只是空间频率 k (或波数)的函数,与光程差点位置以及空间维点位置无关,其产生原因主要是分束器未补偿或者采样时干涉图没有包含真正的零光程差点。在理想情况下,零光程差点两侧的干涉图是完全对称的,但由于 $\phi(k)$ 误差的存在,使得两侧的干涉图产生不对称。对于相位漂移 $\phi(k)$ 的校正,已开展的研究较多,其与传统 FTS 光谱仪的相位校正方法基本类似。对于与干涉图空间频率无关而只与像元位置相关的相位误差 $\phi(x, y)$,其产生的原因在于光栅缺陷以及干涉仪光学系统非对称性,该类相位误差是窄带 SHS 特有的。

因此,对于 SHS 系统相位误差而言,包含了上述两类相位误差项,可以表示为 $\phi(k, x, y)$,此时,SHS 干涉图一般性函数表达式(只考虑调制项)如下:

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(k) \cos\{2\pi[kx + \phi(k, x, y)]\} dk. \quad (1)$$

采用指数函数形式,其表达式为

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(k) \{ \exp\{i[kx + \phi(k, x, y)]\} + \exp\{-i[kx + \phi(k, x, y)]\} \} dk. \quad (2)$$

相位误差是仪器的固有特征,是完全可以通过在后续的数据处理中加以测量和校正的,校正后使得光谱数据的信噪比损失不大。

3 相位误差校正算法

SHS 相位误差校正采用单色光源(可调谐激光)实现,假设入射单色光外差波数为 k_0 ,探测器单行对应干涉图的调制项 $I_{k_0}(x)$ 为

$$I_{k_0}(x) = B(k_0) \{ \exp\{i[k_0x + \phi(k_0, x)]\} + \exp\{-i[k_0x + \phi(k_0, x)]\} \}. \quad (3)$$

对 $I_{k_0}(x)$ 进行傅里叶变换得到 $F(I_{k_0})$,在光谱域内存在两个能量项(若干涉图未剔除直流分量项,则还有一个能量项对应直流分量),分别位于 k_0 与 $-k_0$ 处附近,与(3)式右边的两个对数项分别对应。用一窗函数对 $F(I_{k_0})$ 进行滤波,除去其在 $-k_0$ 处的非零值,仅保留 k_0 处信号。对滤波后的 $F(I_{k_0})$ 进行逆傅里叶变换,得到

$$I'_{k_0}(x) = B(k_0) \exp\{i[k_0x + \phi(k_0, x)]\}, \quad (4)$$

式中已经剔除了第二对数项,此时可以获取干涉图的实际相位,为

$$k_0x + \phi(k_0, x) = \arctan[\operatorname{Re} I'_{k_0}(x) / \operatorname{Im} I'_{k_0}(x)]. \quad (5)$$

若计算相位误差项 $\phi(k_0, x)$,需对 SHS 系统开展干涉频率定标获取 k_0x 。对于 SHS, k_0x 的表达式如下:

$$k_0x = 4(\sigma - \sigma_0)x \tan \theta, \quad (6)$$

式中 σ 为入射光波数, σ_0 为系统基频, θ 为 Littrow 角。SHS 系统的 σ_0 与 θ 实际值需通过干涉频率定标获取,若入射两单色光 λ_1 与 λ_2 对应的干涉条纹数为 f_1 与 f_2 ,光栅刻线周期为 d ,则 σ_0 与 θ 的计算公式如下:

$$\lambda_0 = \frac{f_2 - f_1}{(f_2/\lambda_1) - (f_1/\lambda_2)}, \quad \sigma_0 = (1 \times 10^7) / \lambda_0, \\ \theta = \arcsin\left(\frac{\lambda_0 d}{2}\right). \quad (7)$$

完成了上述计算后,可以求得 SHS 的相位误差:

$$\phi(k_0, x) = \arctan[\operatorname{Re} I'_{k_0}(x) / \operatorname{Im} I'_{k_0}(x)] - k_0x. \quad (8)$$

将 $\phi(k_0, x)$ 与未校正的干涉图 $I_{k_0}(x)$ 相乘,得到

$$I''_{k_0}(x) = B(k_0) \{ \exp[i(k_0x)] + \exp\{-i[k_0x + 2\phi(k_0, x)]\} \}, \quad (9)$$

式中右边的第一项已不包含相位误差项,它的傅里叶变换结果就是真实的光谱 $B(k_0)$ 信息。右边的第

二项则包含了 2 倍的相位误差,其傅里叶变换结果是 $B(k_0)$ ($k_0 < 0$) 与 $\exp\{-i[2\phi(k_0, x)]\}$ 傅里叶变换的卷积,若 $\exp\{-i[2\phi(k_0, x)]\}$ 随 x 缓变,那么其傅里叶变换值就有可能限制在低频范围内,因此,(9)式第二对数项对 $I''_{k_0}(x)$ 傅里叶变换的 $k_0 > 0$ 部分影响很小。于是就可以认为 $I''_{k_0}(x)$ 傅里叶变换的 $k_0 > 0$ 部分包含了完整的、无相位误差的光谱, $k_0 < 0$ 部分可以忽略。对 $k_0 > 0$ 部分光谱进行逆傅里叶变换就可以得到相位误差校正后的干涉图。

测量连续光源干涉图的相位误差 $\phi(k, x)$,只需改变单色光波数并重复上述测量与数据处理过程即可。对每个与频率相关的相位误差,分别对 $\exp[-i\phi(k, x)]$ 进行傅里叶变换,然后与未校正干涉图复原后的光谱 $B_u(k)$ 进行卷积运算,获得校正后的光谱 $B_c(k)$,如下式所示:

$$B_c(k) = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} B_u(k) F\{\exp[i\phi(k, x)]\} dk. \quad (10)$$

若相位误差 $\phi(k, x)$ 随 k 与 x 变化缓慢时,实际应用时可以通过选择有限个外差波数获取相位误差,然后进行拟合得到 $\phi(k, x)$ 函数。SHS 相位测量不仅可以利用可调谐激光实现,还可以采用特征多线空心阴极灯干涉图完成,不过在光谱域对各单线光谱滤波时易受到附近谱线的干扰,造成相位校正精度不高。

4 相位误差校正实验

中国科学院安徽光学精密机械研究所是国内最早开展空间外差光谱技术研究的单位之一,并致力于该技术在大气主要温室气体的遥感探测应用研究,目前已成功研制了超高光谱分辨率的空间外差光谱仪^[7~9]。针对本所研制的空间外差光谱仪开展相位误差校正实验,该仪器主要用于大气 CO₂ 精细吸收光谱的探测,仪器的基本性能指标设计值为

- 1) 光谱范围:6313~6378 cm⁻¹ (1568~1584 nm);
- 2) 光谱分辨率:0.4 cm⁻¹ (平均波长分辨率为 0.1 nm);
- 3) 视场:6°。

4.1 相位误差计算

相位误差校正实验中,利用可调谐激光器在 1570~1580 nm 光谱范围内选择每隔 1 nm 测量一组单色光干涉图,用 11 组不同外差频率 k 的干涉数据来计算空间外差光谱仪的各波长的相位误差。

在相位误差实验前,首先需根据连续光源干涉

图的干涉主极大获得干涉图的零光程差点所在像元的位置,根据该位置数据来计算每组单色光的理论相位与实际相位,从而求得各单色光的实际相位误差。实际计算中,由于每行(光谱维)干涉数据的相位误差大小均可能不一致,因此,需分别求得干涉图每行数据的相位误差曲线。图2与图3分别为不同波长单色光干涉图第200行的实际相位与理论相位。

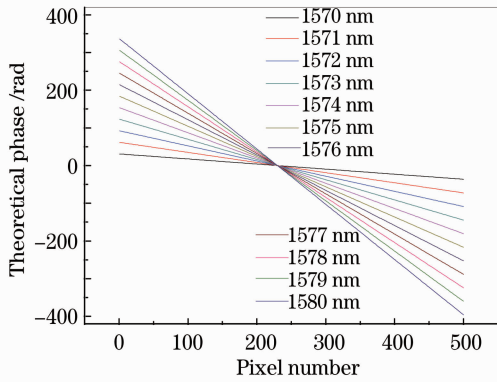


图2 各波长理论相位(第150行)

Fig. 2 Theoretical phase of each wavelength (the 150th row)

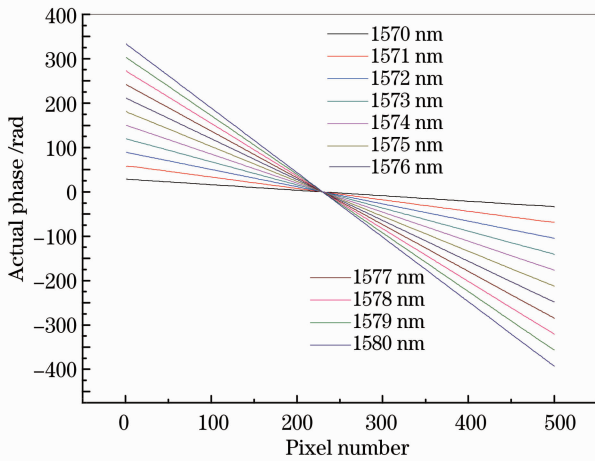


图3 各波长实际相位(第150行)

Fig. 3 Actual phase of each wavelength (the 150th row)

通过测量和计算获得实际相位与理论相位,就可以计算干涉图对不同波长入射光的相位误差大小,如图4所示。

从图4的结果可以看出,相位误差随不同波长在光程差 x 方向呈缓变曲线,且趋势基本相同。因此,对各波长的单色光相位误差进行多项式拟合获取干涉图的综合相位误差项,拟合后的结果如图5所示。

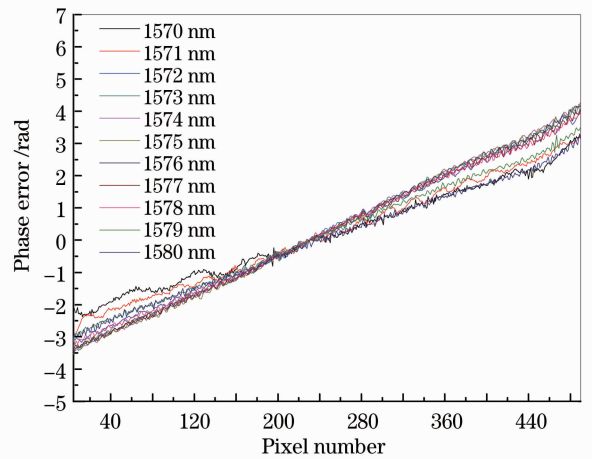


图4 各波长相位误差(第150行)

Fig. 4 Phase error of each wavelength (the 150th row)

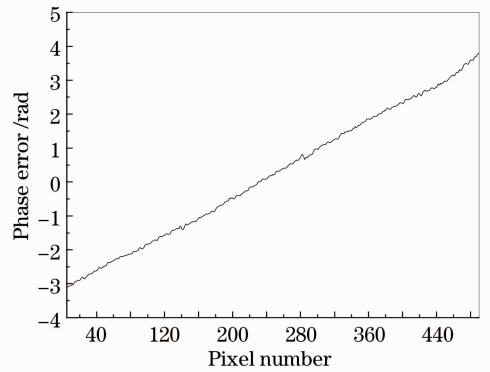


图5 各波长拟合后相位误差(第150行)

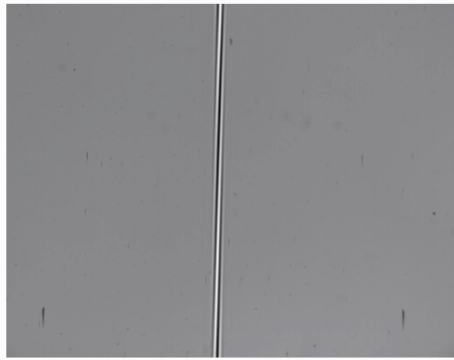
Fig. 5 Fitted phase error of each wavelength (the 150th row)

4.2 相位误差校正

将实验测得的综合相位误差曲线分别代入连续光源(积分球辐射源)干涉图、大气 CO_2 吸收信号干涉图进行频谱域卷积运算(在相位误差校正前已对干涉图进行了去直流、切趾和去盲元等预处理)^[10~12],从而剔除相位误差对干涉图的影响,实验结果分别如图6和图7所示。

分别采用传统的 Mertz、Forman 方法对 SHS 干涉图(大气 CO_2 吸收信号干涉图)进行校正,与本算法校正效果对比如图8所示,分别取单行干涉数据的零光程附近约40个干涉点进行对比。

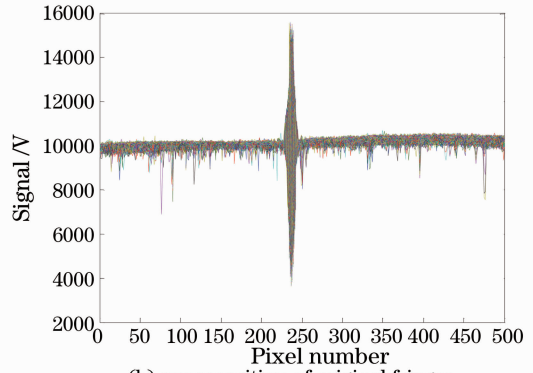
相位误差校正算法实验结果以及与传统相位误差校正效果对比实验表明 SHS 干涉图经校正后,分别剔除了与光程差、空间位置与波数等相关的相位误差,干涉图中各行干涉条纹一致且均关于零光程差点左右对称,将会大大提高光谱复原精度。



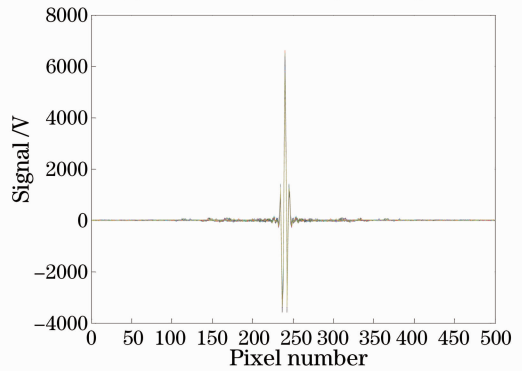
(a) raw interferogram



(c) corrected interferogram



(b) superposition of original fringes



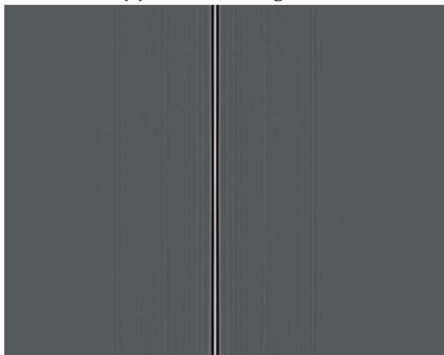
(d) superposition of corrected fringes

图 6 连续光源干涉图相位误差校正

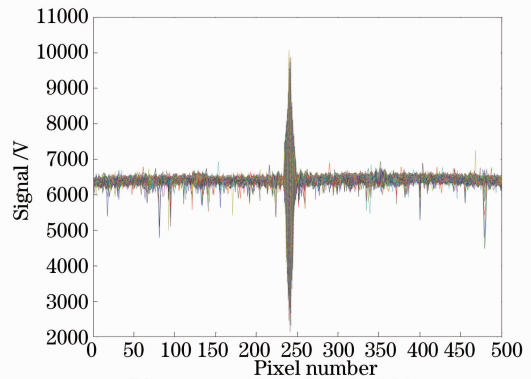
Fig. 6 Phase error correction of continuous light source interferogram



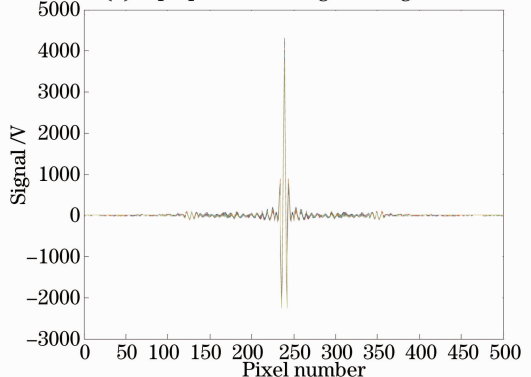
(a) raw interferogram



(c) corrected interferogram



(b) superposition of original fringes



(d) superposition of corrected fringes

图 7 大气 CO₂ 吸收干涉图相位误差校正

Fig. 7 Phase error correction of absorption of CO₂ interferogram

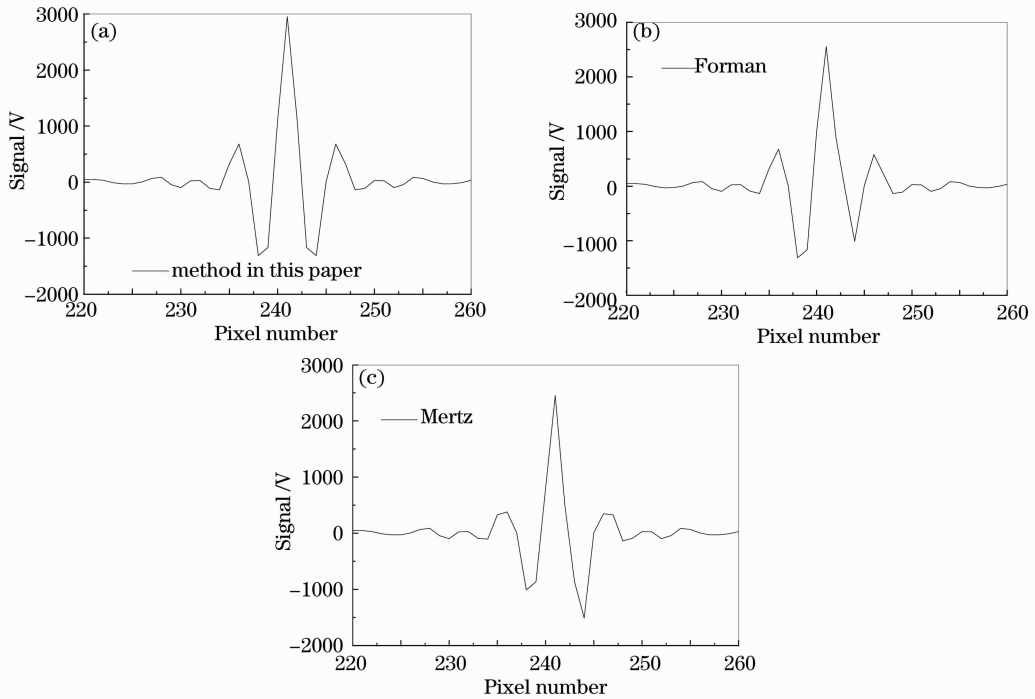


图 8 传统相位误差校正方法

Fig. 8 Traditional method of phase error correction

5 结 论

空间外差光谱仪是近年来得以迅速发展的新型空间干涉光谱技术,具有诸多技术优点,在星载超光谱遥感探测方面具备很好的应用前景^[12]。与传统的傅里叶变换光谱仪的调制方式不同,空间外差光谱仪获取干涉图的方式为外差调制,且利用面阵探测器进行信号采集,干涉条纹易受多种因素影响,且干扰信号的精细谱线亦可被同时探测到,最终造成干涉条纹的相位失真,导致光谱畸变,信噪比下降。深入分析了空间外差光谱仪相位误差产生的机理,开展了相位误差校正算法的研究,利用可调谐激光实验获取了仪器实际的相位误差曲线,并利用实测干涉图对误差校正效果进行了验证,结果表明相位误差剔除效果十分理想。

参 考 文 献

- 1 J. Harlander. Spatial Heterodyne Spectroscopy: Interferometric Performance at Any Wavelength Without Scanning [D]. Madison: University of Wisconsin, 1991
- 2 J. M. Harlander, F. L. Roesler, J. G. Cardon *et al.*. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of earth's middle atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(7): 1343~1352
- 3 Yunlong Lin, G. Shepherd, B. Solheim *et al.*. Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development [C]. ITSC-X Proceedings Beijing (Poster), 2005
- 4 Wu Jinguang. The Modern Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Its Application (Scroller) [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1994. 3~12

吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用(上卷) [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994. 3~12

- 5 J. Harlander, H. T. Tran, F. L. Roesler *et al.*. Field-widened spatial heterodyne spectroscopy: correcting for optical defects and new vacuum ultraviolet performance tests [C]. *SPIE*, 1994, **2280**: 310~319
- 6 C. R. Englert, J. M. Harlander. Flat-fielding in spatial heterodyne spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(19): 4583~4590
- 7 Ye Song. Research on Spatial Heterodyne Spectroscopy [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- 叶松. 空间外差光谱技术研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2007
- 8 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Xiong Wei *et al.*. Spatial heterodyne spectroscopy and application in atmospheric remote sensing [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, **5**(6): 463~468
- 施海亮, 方勇华, 熊伟等. 空间外差光谱技术及其在大气遥感探测中的应用[J]. *大气环境与光学学报*, 2010, **5**(6): 463~468
- 9 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun *et al.*. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1511~1515
- 熊伟, 施海亮, 汪元钧等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1511~1515
- 10 Christoph R. Englert, Michael H. Stevens, David E. Siskind *et al.*. Spatial heterodyne imager for mesospheric radicals on STPSat-1 [J]. *J. Geophysical Research*, 2010, **115** (D20): D20306
- 11 Ye Song, Xiong Wei, Qiao Yanli *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
- 12 Liu Yong, Wu Jiandong, Zhu Ling *et al.*. Spectral recovery in fiber Fourier transform spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 855~858
- 刘勇, 巫建东, 朱灵等. 光纤傅里叶变换光谱仪光谱复原技术研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 855~858

栏目编辑: 何卓铭