

采用小波变换的空间外差光谱仪基线校正

叶松^{1,3}, 甘永莹^{1,3}, 熊伟², 张文涛^{1,3}, 汪杰君^{1,3}, 王新强^{1,3}

(1. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

3. 广西高校光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 空间外差光谱技术是应用于天文测量以及大气遥感等方面的一种超光谱分析技术。为消除应用过程中的基线漂移, 提出了改进的小波变换进行基线校正的方法。通过对不同小波函数以及分解层数对基线校正结果影响的分析, 对原始光谱信号进行小波分解得到细节系数和逼近系数, 将逼近系数置零以实现光谱信号的重构, 从而实现干涉图的基线校正。最后将小波校正结果与阈值拟合校正结果进行对比。结果显示: 两种方法校正光谱的相关系数为 0.999 9, 结果一致, 但小波变换的程序运算耗时缩短 10 余倍。说明利用小波变换进行空间外差干涉图基线校正是一种行之有效、省时、简便的方法。

关键词: 空间外差光谱仪; 干涉图; 小波变换; 基线校正

中图分类号: O433.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1117009

Baseline correction of spatial heterodyne spectrometer using wavelet transform

Ye Song^{1,3}, Gan Yongying^{1,3}, Xiong Wei², Zhang Wentao^{1,3}, Wang Jiejun^{1,3}, Wang Xinqiang^{1,3}

(1. Department of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guangxi Colleges and Universities, Guilin 541004, China)

Abstract: Spatial heterodyne spectroscopy (SHS) is a new spectroscopic technique which applies to astrometry and atmospheric remote sensing. A method of using wavelet transform to correct the baseline was proposed to eliminate the baseline drift during its application. Through the analysis of the influences of the different wavelet functions and decomposition layers on the results of baseline correction, the original spectrum was decomposed by wavelet transforms to get detail coefficients and approximate coefficients, and set the approximate coefficients to zero, the spectrum was reconstituted to realize the baseline correction. In the end, the results were compared with the results of the threshold fitting correction. The results show that the correlation coefficient of the two methods is 0.999 9 and the results are consistent, but the method of wavelet transform is more than ten times the time of the procedure. It

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(41201342, 41561079); 广西自然科学基金(2013GXNSFAA019328); 广西教育厅项目(KY2015YB108); 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ14101, YQ14115, YQ15111); 桂林电子科技大学创新团队项目

作者简介: 叶松(1979-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学遥感方面的研究。Email: yesongmail@sina.com

通讯作者: 王新强(1977-), 男, 高级实验师, 硕士, 主要从事光学测量和高光谱遥感等方面的研究。Email: xqwang2006@126.com

is proved that using wavelet transform to carry out the baseline correction of spatial heterodyne interferometry is an effective, time saving and convenient method.

Key words: spatial heterodyne spectrometer; interferogram; wavelet transform; baseline correction

0 引言

空间外差光谱技术 (Spatial Heterodyne Spectroscopy——SHS) 是一种新型的超光谱分析技术, 超高的光谱分辨率, 无运动部件, 大光通量以及大视场等特点使空间外差光谱技术被美国、加拿大和中国等国家广泛应用于天文观测和大气遥感等领域^[1-5]。SHS 综合了光栅和傅里叶变换光谱 (Fourier Transform Spectroscopy——FTS) 的特点, 与传统的傅里叶变换光谱仪的调制方式不同, 其采用空间外差调制的方式来获取干涉图。干涉图与光谱图之间存在着傅里叶变换关系, 干涉图的失真将影响光谱图的重建。由于在获取干涉图的过程中, 因背景、调整误差等干扰会使干涉图数据发生变化, 基线漂移是最常见的畸变^[6-7]。因此, 为得到准确的目标光谱, 对变换光谱进行基线校正必不可少。

目前, 可应用于空间外差干涉图基线校正的方法有一阶差分、阈值拟合和小波变换等方法。其中一阶差分去基线的方法简单, 对单色谱亦有一定的效果, 但是对连续谱效果不明显, 文中的光谱图, 已对其进行了一阶差分处理, 但并没有达到去除基线的目的。而阈值拟合去基线是比较成熟的干涉图基线校正方法。该方法中阈值大小的选择对校正结果影响较大, 阈值选择大则校正效果差, 选择较小时, 校正效果好, 但耗时多。小波变换是近几年兴起的一种多分辨信号分析工具, 在时域和频域都有表征信号特征的能力。由于其优良的特性, 现已成为信号分析处理的热门研究方向。文中利用改进的小波变换方法对 SHS 获取到的近红外水汽干涉图进行基线校正, 分析小波函数及分解层数对校正效果的影响, 并对小波校正结果与阈值拟合的校正结果进行比较。

1 空间外差光谱仪

空间外差光谱仪与迈克尔逊干涉仪相类似, 光学系统结构如图 1 所示, 其采用闪耀光栅代替迈克尔逊干涉仪中的反射镜。入射光经过分束器分成透

射部分和反射部分, 分别传输到闪耀光栅 G_1 、 G_2 并发生衍射。返回的两部分衍射光经分束器重新合束, 在出射面上形成干涉条纹, 最后经过光学系统 L_1 、 L_2 成像在 CCD 上, 得到一维干涉图, 表达式如下:

$$I(x) = A(x) + \int_0^{\infty} B(\sigma) \cos[8\pi(\sigma - \sigma_0)x \tan \theta] d\sigma \quad (1)$$

式中: $B(\sigma)$ 为入射光谱; σ 、 σ_0 分别为平场波数及入射光波数; θ 为光栅法线与光轴夹角; x 为 CCD 像元位置; $A(x)$ 为低频基线信号。理想情况下的干涉图不含低频项, 其傅里叶变换便可得到无误差的目标光谱^[7-8]。然而实际中的干涉图包含低频基线信号, 经过傅里叶变换后得到一低频项与理想光谱的和, 因此变换光谱与真实光谱存在偏差, 需要进行基线校正。

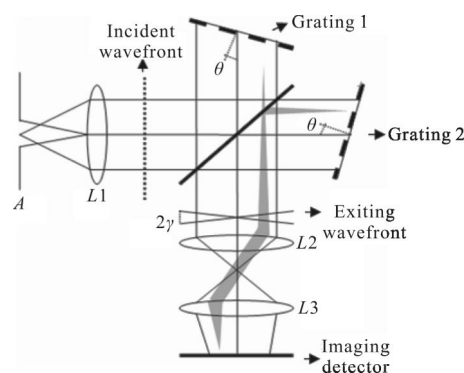


图 1 空间外差光谱仪结构图

Fig.1 Schematic diagram of SHS configuration

2 校正基线的小波分析

基于小波分析的光谱信号处理中, 将不同频率组成的信号用不同的分辨率窗口进行分解, 可以表征信号的局部频谱特征^[9]。利用小波函数将原始光谱信号进行分解, 其分解原理图如图 2 所示, 可得到小波逼近 cA_i 和小波细节 cD_i , 其中小波逼近为低频信号, 小波细节则为高频信号。分解结束后, 将小波逼近系数置零, 然后将分解的信号重构, 达到去除基线的目的^[10-12]。选取不同的小波函数和分解层数将影响基线校正的结果。小波函数具有一系列性质, 致使在进行基线校正时, 由于这些性质差异的存在, 会

影响基线校正的结果。这些性质包括正交性、对称性、紧支性,和消失矩阶数,因此在选取小波函数时,应从这几个因素来考虑。

为了处理上的简单化,根据先验知识,选用 Matlab 中常用的几个小波函数作为分解基准进行试验。由表 1 可知, $BiorN_r.N_d$ 函数虽然没有正交性,但却是双正交小波,具有正则性,最主要的特征是具有线性相位特性。在试验的过程中,对这几个小波函数的基线校正效果进行了对比,发现 $BiorN_r.N_d$ 的校正效果较为理想,因此选为此次实验的小波函数。由于消失矩和支撑长度相矛盾,因此在选取参数 N 时应折中考虑,在此次实验中 $N_r=3, N_d=3$ 。

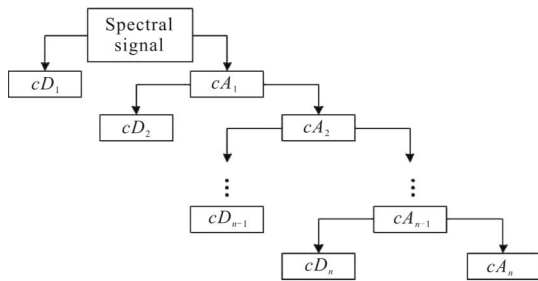


图 2 小波变换信号分解原理

Fig.2 Principle of wavelet transform signal decomposition

表 1 不同小波函数的性质比较

Tab.1 Nature of different wavelet function

| Wavelet function | Coif N | Db N | $BiorN_r.N_d$ | Sym N |
|-------------------|-----------|-----------|---------------|-----------|
| Orthogonal | Yes | Yes | No | Yes |
| Compact support | Yes | Yes | Yes | Yes |
| Symmetry | Near from | Near from | No | Near from |
| Vanishing moments | $2N$ | N | N_r-1 | N |

除以上小波函数会影响到基线校正的结果,小波的分解层数也是基线校正的关键,分解层数过低时,光谱信号中仍然存在基线信号,基线信号去除不明显;而当分解层数过高时,基线信号夹杂着有用信号,对信号进行重构后,会丢失一部分有用信号,致使光谱信号失真。图 3 为不同分解层数得出的基线信号,可以看出,分解层数从 8~11,求出的基线信号形状不完全相同。分解层数越高,基线信号的形状越平坦,波形起伏越不明显,因此选择适当的层数对于基线校正的结果至关重要。从图中基线形状判断,当分解层数为 9 层和 10 层时,基线形状与原始光谱图

的基线形状接近,因此选择 9 层或者 10 层分解较为合理。

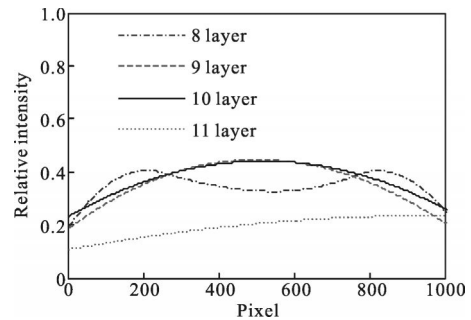


图 3 不同分解层数的基线信号

Fig.3 Baseline signal for different decomposition layers

3 实验结果

此次测试采用的数据由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的近红外空间外差光谱仪采集,仪器的基频波长为 $931.246 \text{ nm}^{[13]}$,干涉图如图 4(a) 所示,使用 Matlab 作为分析工具进行基线校正研究。空间外差光谱仪采集到的干涉图二维结构,要获取通常意义上的光谱,需从中提取出一维干涉图进行变换得到。图 4(b) 为提取的一维干涉图,可以看出干涉图的强度变化在横轴的中部较大,向两端变化的过程中逐渐减小,这是由于干涉图的外差调制机制决定的。

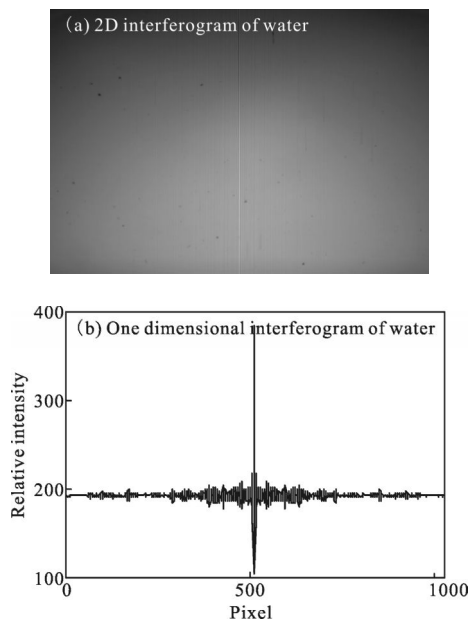


图 4 水汽干涉图

Fig.4 Interferogram of water

根据前文的分析,选取 Bior3.3 作为小波基,对原始光谱进行 9 层分解、小波逼近系数置零、信号重构,最终得到去除基线后的光谱,结果如图 5(b)所示,可见基线得到很好的扣除。为了进一步检验小波基线校正的效果,将目前较为成熟的光谱基线校正方法-阈值拟合方法的校正结果作为对象进行对比,因为该方法可以实现光谱基线的自动、准确校正。阈值拟合法的校正结果如图 5(c)所示,可以看出基线也得到了比较完整的扣除。最终两种方法得到的校正光谱相关系数 $R=0.9999$,相关度极高,说明两种方法的基线校正结果一致。在此次对比中,两种校正方法都采用同一计算机进行处理,利用小波变换方法去基线的程序运算耗时约为 8 s,而利用阈值拟合法去基线的程序运算耗时比前者的高,相差约为十倍。说明在基于 PC 平台的空间外差干涉图基线校正上,小波变换法是一种高效的方法。

另一方面,空间外差光谱仪采集的数据为二维干涉图,数据量大。为了缓解星上数据传输压力,满

足目标信息获取与处理的实时性,基于 FPGA 的干涉式光谱仪星上实时处理系统是目前的研究热点及今后的发展方向^[14-15]。FPGA 处理系统的一个重要特点是采用查找表 LUT 结构,根据特定要求去查找相应的结果进行处理,而小波变换去基线的方法非常适合这一特点。将可用的小波函数和分解层数根据不同的输入条件进行组合生成查找表。在应用中根据具体条件从查找表中选择合适的组合,然后对干涉图进行基线处理,可以极大提高运算效率。

4 结 论

具有高分辨率、高精度、高灵敏度的空间外差光谱仪,已广泛地应用到大气观测以及航天遥感等领域,随着科技的进步和完善,空间外差光谱技术也将在这些领域发挥越来越重要的作用。对空间外差光谱仪获取的数据进行处理是获得无误差目标光谱的必要环节,而基线校正是数据处理中最常见且不能忽略的问题。针对前人在空间外差干涉图基线校正研究中的不足,文中采用改进的小波变换方法对空间外差光谱仪的近红外水汽数据进行基线校正研究。分析了小波函数以及分解层数对校正结果的影响,进而确定适当的小波函数及分解层数完成基线的校正。最后将小波校正结果与最小二乘法多项式阈值拟合的校正结果进行对比。结果显示,利用小波变换对空间外差干涉图进行基线校正,效果理想,耗时短,对空间外差光谱仪数据的高效处理具有一定的实用意义。

参 考 文 献:

- [1] James E Lawler, Zac E Labby, John M Harlander, et al. Broadband, high-resolution spatial heterodyne spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(34): 6371-6384.
 - [2] Harlander J, Roesler F, Cardon J, et al. Shimmer: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth's middle atmosphere.[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1343-1352.
 - [3] Shi Hailiang, Fang Yonghua, Xiong Wei, et al. Spatial heterodyne spectroscopy and application in atmospheric remote sensing[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(6): 463-468. (in Chinese)
- 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]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(6):

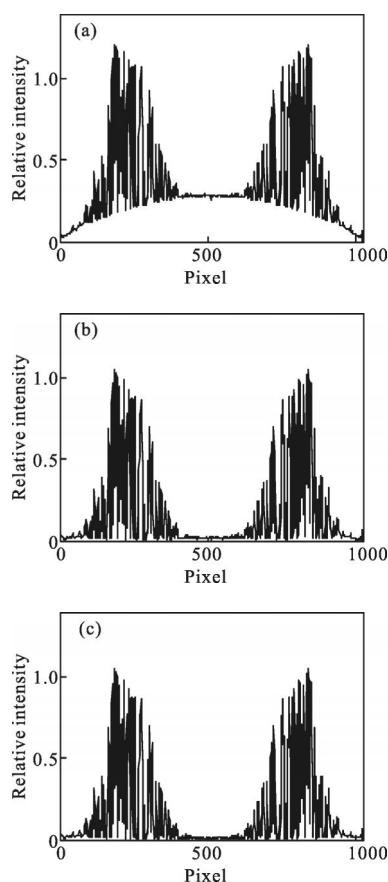


图 5 基线校正光谱

Fig.5 Spectrum of baseline correction

- 463–468.
- [4] 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. (in Chinese)
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.
- [5] Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin, et al. Development and application of spatial heterodyne spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27 (S1): 983–985. (in Chinese)
叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱技术的发展与应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S1): 983–985.
- [6] Lan Tiange, Fang Yonghua. New method of preprocessing infrared spectral signals[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 257–260. (in Chinese)
兰天鸽, 方勇华. 红外光谱信号预处理的新方法 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 257–260.
- [7] Wang Xinqiang, Ye Song, Zhang Lijuan, et al. Study on phase correction method of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(5): 1424–1428. (in Chinese)
王新强, 叶松, 张丽娟, 等. 空间外差光谱仪相位校正方法的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(5): 1424–1428.
- [8] Ye Song, Xiong Wei, Qiao Yanli, et al. Data processing for interferogram of heterodyne spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3): 848–852. (in Chinese)
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.
- [9] Liang Dong, Yang Qinying, Huang Wenjiang, et al. Estimation of leaf area index based on wavelet transform and support vector machine regression in winter wheat [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 335–340. (in Chinese)
梁栋, 杨勤英, 黄文江, 等. 基于小波变换与支持向量机回归的冬小麦叶面积指数估算[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 335–340.
- [10] Li Qingbo, Xu Yupu, Li Xiang, et al. Study on a modified baseline correction method based on wavelet transform [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20 (5): 698–701. (in Chinese)
李庆波, 徐玉坡, 李响, 等. 一种改进的小波基线校正方法的研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(5): 698–701.
- [11] Hu Yaogai, Zhao Zhengyu, Wang Gang. Baseline correction and background elimination using wavelet transforms [J]. *J Huangzhong Univ of Sci & Tech*, 2011, 39 (6): 36–40. (in Chinese)
胡耀垓, 赵正予, 王刚. 基于小波的光谱信号基线校正和背景扣除[J]. 华中科技大学学报, 2011, 39(6): 36–40.
- [12] Guo Yuan, Zhao Xuehong, Zhang Rui, et al. The noise filtering and baseline correction for harmonic spectrum based on wavelet transform[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(8): 2172–2176. (in Chinese)
郭媛, 赵学虹, 张锐, 等. 小波变换应用于谐波谱线的噪声滤除与基线校正[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2172–2176.
- [13] Wang Xinqiang, Ye Song, Xiong Wei, et al. Calibration of fundamental frequency wavelength of spatial heterodyne spectrometer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(4): 827–831. (in Chinese)
王新强, 叶松, 熊伟, 等. 空间外差光谱仪基频波长的定标[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(4): 827–831.
- [14] Zhang Minjuan, Wang Zhibin, Li Xiao, et al. The stability and measuring technology of the maximum optical path difference of photo-elastic modulator interferograms [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35 (5): 1436–1439. (in Chinese)
张敏娟, 王志斌, 李晓, 等. 弹光调制干涉图最大光程差的稳定性及检测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35 (5): 1436–1439.
- [15] Yin Shimin, Xiang Libin, Zhou Jinsong, et al. Real-time data processing of interferential imaging spectrometer based on FPGA[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(4): 274–278. (in Chinese)
殷世民, 相里斌, 周锦松, 等. 基于 FPGA 的干涉式成像光谱仪实时数据系统研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26 (4): 274–278.