

## 空间外差光谱自适应基线校正研究

王新强<sup>1,3</sup>, 张丽娟<sup>1,3</sup>, 熊伟<sup>2</sup>, 张文涛<sup>1,3</sup>, 汪杰君<sup>1,3</sup>, 叶松<sup>1,3\*</sup>

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** 空间外差光谱具有较高的信噪比与光谱分辨率, 在大气微量气体遥感领域得到重要应用, 实现基线的自适应校正为光谱预处理的重要环节。基于光谱的特点, 分别采用阈值拟合法和改进的经验模态法对实测近红外水汽空间外差光谱进行基线校正。结果表明, 两种方法均能实现光谱基线的自动扣除; 以光谱扭曲程度及光谱相似度对两种方法的校正效果进行定量评价, 阈值拟合法校正后的光谱扭曲程度及光谱相似程度为 0.761 和 0.955, 改进经验模态法的结果分别为 0.717 和 0.954, 说明改进经验模态法略优。在校正方法的耗时上, 改进经验模态法以其特有的算法优势仅需较少的迭代次数就能获得最终的基线光谱, 完成校正, 耗时不足阈值拟合法的十分之一, 效率更高。

**关键词** 遥感; 空间外差光谱仪; 自适应; 基线校正

**中图分类号:** O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)09-2933-04

### 引言

空间外差光谱 (spatial heterodyne spectroscopy, SHS) 技术是近年来快速发展的一种新型探测技术, 能在物质吸收波长中心范围探测, 可获  $10^{-2}$  nm 级别或更高的光谱分辨率, 此外还具有: 高通量、无运动部件、集成度高、体积小、重量小、功耗小等特点。通过 SHS 技术可探测到大气中各种微量气体的超高分辨光谱, 实现大气微量气体成分的精确反演, 对了解整个大气环境, 光化学过程、气候变迁、天气预报等均具有重要意义<sup>[1-5]</sup>。

空间外差光谱仪采集的干涉图会受到目标背景、环境温度、湿度等外界因素及仪器自身工作状态的影响, 存在不同程度的基线漂移。在对目标光谱的精细分析中, 为建立一个稳定、可靠的定性或定量分析模型, 必须对基线进行扣除处理。目前常见的基线扣除方法比较多, 有差分、微分等运算量较小的方法, 但受干涉图空间频率影响, 这类方法对基线的扣除不够彻底。多项式拟合法需要先验经验来确定基线类型, 重要参数的选择对校正结果影响较大<sup>[6]</sup>。小波变换法是一种多分辨信号分析方法, 在时域与频域都有表征信号特征

的能力, 在进行基线校正时需要人工预先确定小波基和分解层数, 无法实现自适应校正<sup>[7]</sup>。阈值拟合技术 (TFT) 采用曲线拟合与阈值截断方法逐步逼近光谱信号的趋势项, 当连续两次拟合曲线重合时即得到信号的基线, 校正过程可自动完成<sup>[8]</sup>。经验模态分解 (EMD) 法是近期提出的一种基线校正方法, 该方法可将任何信号分解成一系列本征模态函数 (IMF) 和一个趋势项, 在信号的分解过程中无需知道信号参数, 因此具有自适应性<sup>[9]</sup>。

在当今的大数据时代, 信号及数据的自动获取与处理是时代的发展要求, 因此空间外差光谱仪数据处理的自动化是该仪器发展与应用的必然趋势。本研究基于实测的空间外差光谱数据, 分别采用改进的经验模态方法及阈值拟合方法对基线进行自动校正处理, 分析结果显示两种方法均能实现光谱基线的自动校正, 而经验模态方法的校正耗时更短, 效果更优。

### 1 空间外差光谱仪与干涉数据

空间外差光谱仪的结构如图 1 所示, 它基于迈克尔逊的光路构架, 用两反射式衍射光栅替代两反射镜, 入射光经分

收稿日期: 2016-09-14, 修订日期: 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41561079, 41201342), 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项目 (YQ15105, YQ16105, YQ15111), 桂林电子科技大学创新团队项目资助

作者简介: 王新强, 1977 年生, 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院高级实验师 e-mail: xqwang2006@126.com

\* 通讯联系人 e-mail: yesongmail@sina.com

束器分光后分别射向两光栅, 衍射光返回后经分束器重新合束形成干涉图被探测器接收。沿入射到光栅反方向衍射的光对应基频, 形成的干涉图为平场, 其他波长的光由于衍射方向各不相同, 合束后波面存在不同的夹角, 产生不同空间频率的干涉条纹。入射各单色光干涉图的叠加得到连续光的干涉图。

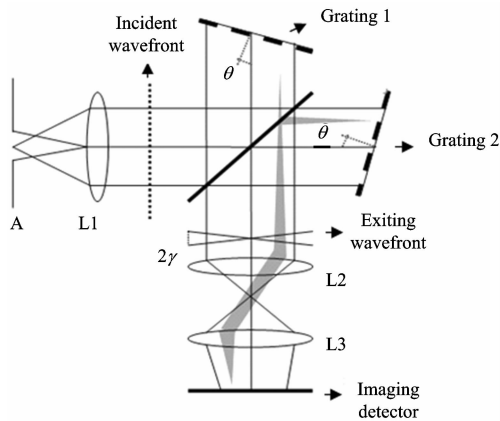


图 1 空间外差光谱仪结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the basic SHS configuration

由于环境影响、光谱仪自身机理特性及干涉仪在一体化加工过程中存在的误差会引起空间外差光谱仪采集干涉图产生失真。实际测量的干涉图可以表示为

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

式(1)中,  $A(x)$  为低频基线, 是探测器像元  $x$  的函数,  $B(\sigma)$  为入射光谱,  $\sigma$  为入射光波数,  $\sigma_0$  为基频波数,  $\theta$  为光栅法线与光轴夹角。实测干涉图为低频基线项与目标干涉图之和, 其傅里叶变换谱为低频项与目标光谱之和, 因此变换光谱与真实光谱存在偏差, 需要进行校正处理。

## 2 校正方法

### 2.1 TFT 方法

TFT 方法实现基线校正以原始数据作为基准, 通过曲线拟合获得截断曲线, 再以截断曲线对原光谱进行截断从而得到迭代信号, 通过迭代信号的多次迭代逐步逼近基线从而实现基线校正的方法, 整个处理可以自动完成。该处理可归纳为以下步骤:

(1) 读入待校正的原始光谱, 在光谱中等间距选取一组离散数据进行最小二乘拟合, 获得拟合曲线。

(2) 用拟合曲线对原光谱进行截断, 将原光谱中超出拟合曲线的部分值以拟合曲线值替代, 得到迭代光谱。

(3) 将迭代光谱作为新的原始光谱重复步骤(1)和(2), 直到相邻的两组迭代光谱标准差小于某一阈值后结束迭代。

(4) 最后得到的迭代光谱即为原输入光谱的基线, 用最初的原始光谱减去该迭代光谱就完成了基线校正处理。

### 2.2 EMD 方法

EMD 方法求解基线的基本思想为: 任何原始信号都由

有限个本征模态(IMF)和一个趋势项构成, 各本征模态(IMF)和趋势项可以通过一系列的“筛选”得到, 用原始信号减去趋势项即完成了信号的基线校正。“筛选”与校正具体过程如下:

(1) 空间外差干涉图经傅里叶变换后获得原始光谱信号  $B(x)$ ; 求出  $B(x)$  上的极大值与极小值点, 分别插值计算出极大值点与极小值点的包络线, 求极大值与极小值包络线的平均线, 该平均线表示为  $m_1(x)$ ; 令  $C_{11}(x) = B(x) - m_1(x)$  为新信号。

(2) 判断  $C_{11}(x)$  是否为本征模态, 判据为同时满足以下条件:

- ①  $C_{11}(x)$  的极值点数量与过零点数量相差不超过 1 个;
- ②  $C_{11}(x)$  上极大值与极小值包络线的均值在所有位置上均为 0。

如果满足判据, 则  $C_{11}(x)$  为第一个 IMF 分量, 如果不满足判据, 将  $C_{11}(x)$  替代  $B(x)$  重复步骤(1)和(2), 直至第  $k$  组信号  $C_{1k}(x)$  满足判据, 则  $C_{1k}(x)$  为第一个 IMF 分量。用  $C_1$  表示第一个 IMF 分量。

(3) 令  $C_{21}(x) = B(x) - C_1$ , 用  $C_{21}(x)$  替代  $B(x)$  重复步骤(1)和(2), “筛选”出第 2, 3, 4, ...,  $n$  个 IMF 分量  $C_2, C_3, \dots, C_n$ 。以  $C_n$  满足单调函数条件, 作为结束“筛选”的判据, 与将相邻两次“筛选”结果的标准差小于某一设定值的结束判据有所不同<sup>[10]</sup>, 实现了“筛选”过程的自适应。

(4) 原始信号  $B(x)$  减去所有的 IMF 分量即可得到其趋势项。反过来说, 所有的 IMF 分量之和即为完成基线校正后的目标信号。

## 3 数据处理与分析

试验使用的数据来自中科院安徽光机所, 由其自行研制的近红外波段探测水汽的空间外差光谱仪采集, 干涉图如图 2(a)所示, 是一幅二维图像。取单行数据经傅里叶变换后可以得到探测目标的对称光谱。为了降低随机噪声的影响, 待校正的光谱由多行数据平均得到。变换光谱如图 2(b)所示, 可以看出光谱底部存在一个明显的趋势项, 所以数据在应用前必须进行基线校正处理。

分别采用 TFT 法与 EMD 法对该数据进行基线校正, 结果如图 3、图 4 所示。经过校正处理后两种方法都能很好的扣除光谱的趋势项, 获得的基线仍然左右对称, 符合空间外差傅里叶变换光谱对称的基本特性。两种方法得到的基线趋势一致, 但是在细节上有所不同。TFT 方法得到的基线仍有少许毛刺, 左右两端与中间仍有较明显的上升沿与尖峰, 因此基线中可能还包括一些有用信号。而 EMD 方法获得的基线比较光滑, 曲线变化平缓, 比较符合背景信号低频缓变的特性。

## 4 评价方法

为了对两种基线校正结果进行定量比较, 以光谱扭曲程度与光谱失真度作为判据对结果进行分析。令基线校正前的

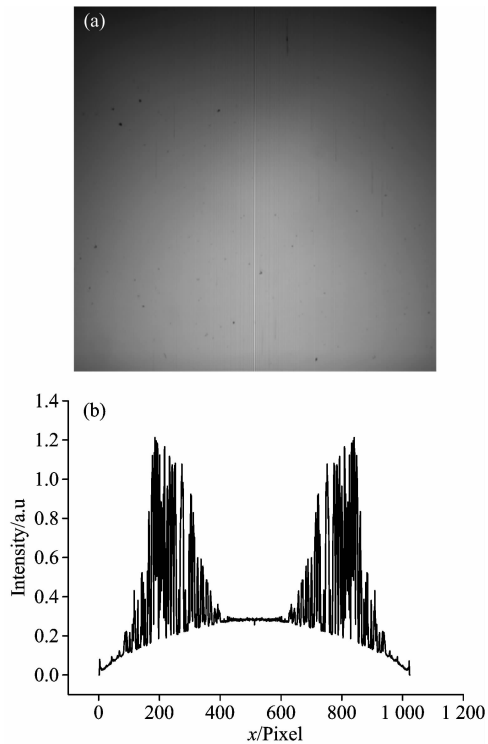


图 2 近红外水汽干涉图与变换光谱

(a): 二维干涉图; (b): 一维变换光谱

Fig. 2 Near infrared moisture interference pattern and transform spectrum

(a): Two-dimension interference pattern;  
(b): One-dimension interference pattern

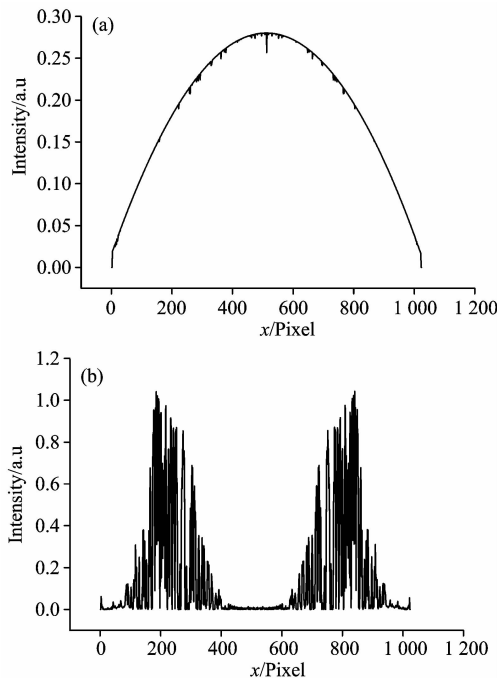


图 3 阈值拟合法基线校正结果

(a): 求取的基线光谱; (b): 基线校正后光谱

Fig. 3 Baseline correction results with the threshold fitting method

(a): The solved baseline spectrum; (b): Baseline-corrected spectrum

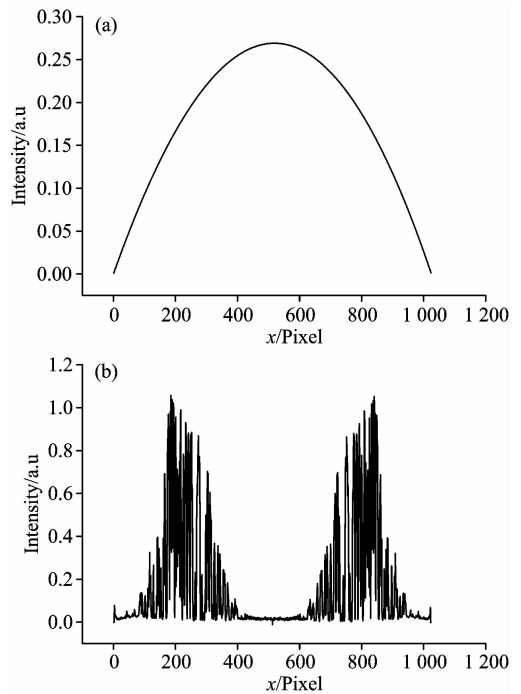


图 4 经验模态法基线校正结果

(a): 求取的基线光谱; (b): 基线校正后光谱

Fig. 4 Baseline correction results with the improved empirical mode method

(a): The solved baseline spectrum;  
(b): Baseline-corrected spectrum

光谱为  $B(x)$ , 校正后的光谱为  $B'(x)$ , 光谱长度为  $N$ , 则光谱扭曲程度的表达式为式(2)

$$D = \lg \left[ 1 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |B(x_i) - B'(x_i)| \right] \quad (2)$$

光谱扭曲程度代表光谱校正前后的匹配程度,  $D$  的值越接近 0 说明校正前后的光谱匹配越好。

光谱失真度的表达式为

$$S_{RQE} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [B'(x_i) - B(x_i)]^2}}{\sum_{i=1}^N B(x_i)} \quad (3)$$

式(3)中,  $S_{RQE}$  为光谱校正前后的失真程度, 其值越接近 0 说明校正前后的光谱失真越小。

定量分析结果如表 1 所示, 可以看出 TFT 与 EMD 方法对空间外差光谱的基线校正效果比较接近, EMD 方法略优。从校正耗时上看, 两种方法的程序运算时间相差十余倍, EMD 方法的耗时更短。主要原因是对空间外差光谱分辨率较高的光谱校正中, 光谱信息比较丰富及精细, TFT 方法求取基线需要通过拟合截断曲线逐步逼近, 在保证截断曲线精度的前提下拟合取点不能过稀, 故拟合得到的截断曲线与原光谱比较接近, 最终导致该方法在向基线逼近的过程中截断(或迭代)次数过多; 而 EMD 方法的校正特点在于通过寻找光谱极值点来确定一系列本征模态, 随着迭代次数的增加, 迭代光谱的极值点会迅速减少, 很快就逼近了最后的本征模态从而获得基线, 故迭代次数较少。

表 1 两种方法的分析结果

Table 1 The analyzed results with the two methods

	$D$	$S_{RQE}$	Operation time/s
TFT	0.761	0.955	8
EMD	0.717	0.954	0.5

的热点,对该类光谱仪获取的光谱数据进行背景基线的自动校正处理是应用的必要环节。本工作分别采用阈值拟合(TFT)法与改进的经验模态(EMD)法对实测的近红外水汽空间外差光谱数据进行基线自动校正研究,结果表明两种方法均能自动实现光谱的基线校正,其中又以经验模态法的校正效果更好、效率更高,能够更好地满足空间外差光谱的应用需求。

## 5 结 论

基于空间外差技术的大气探测是目前国内外研究及应用

## References

- [1] Mierkiewicz E J, Roesler F L, Harlander J, et al. SPIE, 2004, 5492: 751.
- [2] Englert C R, Stevens M H, Siskind D E, et al. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: 1.
- [3] Hartmut B, David B, Brian C. Remote Sensing, 2011, 3: 270.
- [4] Buchwitz M, Reuter M, Schneising O, et al. Remote Sensing of Environment, 2013, 8817: 19.
- [5] LI Zhi-wei, XIONG Wei, SHI Hai-liang, et al(李志伟,熊伟,施海亮,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(7): 2291.
- [6] LÜ Qun-bo, XIANGLI Bin, HUANG Min, et al(吕群波,相里斌,黄旻,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 38(7): 1746.
- [7] Galloway C M, Leru E C. Applied Spectroscopy, 2009, 63(12): 1370.
- [8] LAN Tian-ge, FANG Yong-hua(兰天鸽,方勇华). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2007, 36(2): 257.
- [9] Huang N E, Zheng S, Long S R, et al. Proceedings of The Royal Society of London, 1998, 454: 903.
- [10] Zhang C, Ren W, Mu T, et al. Opt. Express, 2013, 21(3): 2592.

## Study on Adaptive Baseline Correction of Spatial Heterodyne Spectroscopy

WANG Xin-qiang<sup>1,3</sup>, ZHANG Li-juan<sup>1,3</sup>, XIONG Wei<sup>2</sup>, ZHANG Wen-tao<sup>1,3</sup>, WANG Jie-jun<sup>1,3</sup>, YE Song<sup>1,3\*</sup>

1. School 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 has been used in atmospheric trace gases remote sensing field because of its high signal to noise ratio and spectral resolution, and the adaptive correction is a key link in spectrum pretreatment. Based on the spectral characteristics, two methods: the threshold fitting and improved empirical mode, were used separately to correct baseline in measured near infrared moisture spatial heterodyne spectrum. Results show: both the two methods can realize spectral baseline deduction automatically; in addition, the spectral distortion and similarity are 0.761 and 0.955, respectively, when using threshold fitting, and the spectral distortion and similarity are 0.717 and 0.954 (somewhat better), respectively, when using improved empirical mode. As far as the time-consuming is concerned, improved empirical mode using fewer iterations to attain the final baseline spectrum, which is no more than one-tenth of the threshold fitting.

**Keywords** Remote sensing; Spatial heterodyne spectrometer; Adaptive; Baseline correction

(Received Sep. 14, 2016; accepted Dec. 29, 2016)

\* Corresponding author