

# 基于自适应差分滤波的干涉图基线校正方法

吕 航 廖宁放 吴文敏 李亚生 曹 斌

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

**摘要** 基线校正是傅里叶变换成像光谱仪光谱反演的重要环节,因为干涉曲线切趾、相位校正等光谱反演预处理步骤均需要在基线校正完成后进行。提出了一种用于基线校正的自适应差分滤波方法。该方法使用迭代算法动态调整加权均值滤波窗口。仿真结果表明,该滤波方法对直流趋势项的滤除更为彻底。利用实验室仪器获取的紫外潜指纹残留物光谱数据进行分析,结果说明,在仪器工作光谱范围内,使用该方法进行基线校正后得到的光谱曲线与有效光谱曲线基本一致。该方法无需提前选择滤波窗口,具有自适应性。并且基于均值滤波算法的自适应差分滤波方法计算流程简单,迭代效率较高。

**关键词** 光谱学; 基线校正; 差分滤波; 高光谱成像; 紫外

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1030002

## Interferogram Baseline Correction Method Based on Self-Adaptive Differential Filtering

Lü Hang Liao Ningfang Wu Wenmin Li Yasheng Cao Bin

Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Baseline correction is an important step of spectral retrieving procedure for Fourier transform imaging spectrometer data processing, because preprocessing steps of spectral retrieving procedure, such as interference curve apodization and phase correction, need to be implemented after baseline correction is completed. A self-adaptive differential filtering method for baseline correction is presented. This method uses an iterative algorithm for dynamically adjusting its weighted mean filter window. The simulation results demonstrate that the filtering method can filter out the direct current trend more thoroughly. Analysis of the ultraviolet spectral data of latent fingerprint residues obtained by instrument in laboratory is made. The results indicate that within the working spectrum range of the instrument, the spectra obtained by the proposed baseline correction method are substantially consistent with the actual spectra. Since the method does not require a pre-selected mean filter window, it is self-adaptive. Moreover, the self-adaptive differential filtering method based on mean filter algorithm is simple and has high efficient iteration.

**Key words** spectroscopy; baseline correction; differential filtering; hyperspectral imaging; ultraviolet

**OCIS codes** 300.6540; 110.4234; 300.6300

## 1 引 言

尽管傅里叶变换干涉成像光谱仪采集或重组干涉数据的方法各不相同<sup>[1-4]</sup>,但均能保证在信号采集时间范围内观测条件的相对稳定。因此,仪器获取或重组得到的干涉图由有效干涉图(交流分量)与探测器在其采集时间内转化的直流电信号(直流分量)共同组成。理想条件下直流分量为固定值,但在实际测量中,受到

收稿日期: 2015-04-14; 收到修改稿日期: 2015-05-23

基金项目: 国家 863 计划(2014AA093409)、国家科技支撑计划(2012BAK02B04)、公安部重点研究计划(2010ZDYJB1JL006)

作者简介: 吕 航(1984—),男,博士研究生,主要从事高光谱成像技术方面的研究。E-mail: luh@bit.edu.cn

导师简介: 廖宁放(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事成像光谱技术、颜色与图像技术等方面的研究。

E-mail: liaonf@bit.edu.cn(通信联系人)

光源、光路稳定性及观测条件等各种因素的影响<sup>[5]</sup>,直流分量呈现出非线性、非均匀频率分布的低频变化趋势<sup>[6]</sup>。抑制并消除干涉图中低频噪声的影响,从而提取出交流分量代表的有效干涉条纹的方法称为基线校正<sup>[7]</sup>,也有人将其与滤波方法合称为干涉图滤波<sup>[8]</sup>。

目前常见的基线校正方法包括差分、微分方法<sup>[6]</sup>,多项式拟合方法<sup>[9]</sup>,以及近期提出的经验模态分解(EMD)方法<sup>[8,10]</sup>等。其中差分、微分方法运算量较小,但需要提前选定滤波窗口,受干涉图空间频率变化的影响较大,可能滤除部分有效光谱信息;拟合法则先验地限定了基线的类型。EMD方法无需任何先验知识,对信号的类型也没有限制,应用于干涉图滤波时具有自适应性,效果较好。但由于需要多次计算信号极值的包络,所用插值算法耗时量大。此外,EMD方法的筛选停止条件不具备快速收敛性,导致反复迭代影响算法速度<sup>[11]</sup>。

本文针对的是采集自宽波段紫外干涉成像光谱仪<sup>[4]</sup>的实验数据,光谱曲线的特征分布较宽,因此原始干涉图的空间频率变化较大。固定滤波窗口的均值滤波方法会滤除部分有效光谱信息,因此需要一种能够动态调整滤波窗口的方法。本文在对包含直流分量的原始干涉图进行均值滤波迭代运算的过程中,将滤波后残余直流趋势项的变化量作为迭代运算的停止条件,仅需要根据精度要求预设一个判据即可自适应地进行加权滤波窗口选择。经实验验证该方法能够最大限度地保留有效干涉图,使反演得到的光谱曲线更接近实际光谱信号的强度分布,计算精度与运算效率都比较高。

## 2 自适应基线校正方法

### 2.1 自适应差分滤波原理

自适应差分滤波(ADF)方法通过加权均值滤波的方式将干涉曲线中的直流分量提取出来。由于干涉成像光谱仪获得的原始干涉图中的直流分量具有非线性、非均匀频率分布的特点,传统的均值滤波方法受滤波窗口固定的限制,提取出的直流趋势项仍存在部分高频信息残留。如果继续对该直流趋势项进行均值滤波的循环迭代,相当于对原始干涉曲线的均值滤波窗口进行加权调整。通过设置合理的迭代停止条件,将计算出原始干涉图的最佳滤波窗口,从而通过差分滤波将原始干涉图中的有效干涉图提取出来,完成干涉图基线校正。该方法能够根据干涉图的空间频率分布动态调整滤波窗口,因此具有自适应性。

在确定迭代停止条件时,该方法借鉴了EMD方法中判断本征模态函数(IMF)的筛分过程思想。EMD方法筛分过程的目的是提取出各级本征模态函数,其残余分量则为原始干涉图的趋势项。景娟娟等<sup>[10]</sup>将EMD方法应用于干涉图滤波方法中,将该趋势项 $r$ 视为原始信号的直流分量。根据Huang等<sup>[12]</sup>提出的筛分准则,在判定不含IMF的残余分量时,将相邻两次筛分结果的标准差(SD)小于预设值 $\varepsilon$ 作为判据。由此易知,此时趋势项的变化量也最小。因此,求解各次均值滤波迭代前后的趋势项变化量的总体标准差 $C_{SD}$ 作为判据。当相邻两次迭代总体标准差之比小于预设的停止条件时,确定此时的滤波窗口为该原始干涉曲线最适合的加权均值滤波窗口。

自适应差分滤波方法的具体流程如下:

- 1) 对包含直流分量的原始干涉曲线 $r_0(x)=I(x)$ 进行3点均值滤波,得到第1次迭代直流趋势项 $r_1(x)$ 。
- 2) 计算直流趋势项各点变化量分布的总体标准差 $C_{SD}$ :

$$C_{SD_i} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \left| r_i(x_j) - r_{i-1}(x_j) \right| - \left| r_i(x_j) - r_{i-1}(x_j) \right| \right)^2}, \quad (1)$$

式中 $C_{SD_i}$ 为第 $i$ 次迭代的标准差, $N$ 为探测器每行的总采样总数, $j$ 为某采样点, $j \in [1, N]$ 。 $r_0(x)=I(x)$ 表示探测器接收到干涉曲线的信号强度, $r_i(x)$ 表示第 $i$ 次迭代运算时3点均值滤波的结果。

3) 令相邻两次迭代总体标准差之比 $k = C_{SD_{i-1}}/C_{SD_i}$ , $\varepsilon$ 为预设的迭代停止条件的判据,通常可选1.1~1.2。当 $k \leq \varepsilon$ 时滤波停止,直流趋势项 $r_i(x)$ 即为直流分量,进入下一步。否则,将该次迭代趋势项 $r_i(x)$ 作为原始信号重复步骤1)、2),直到满足预设停止条件 $k \leq \varepsilon$ 。

4) 通过原始干涉曲线 $I(x)$ 与第 $n$ 次迭代趋势项代表的直流分量 $r_n(x)$ 进行差分,得到去除直流分量后的干涉曲线 $I_{cor}(x)=I(x)-r_n(x)$ ,基线校正完成。

以上算法流程图如图1所示。

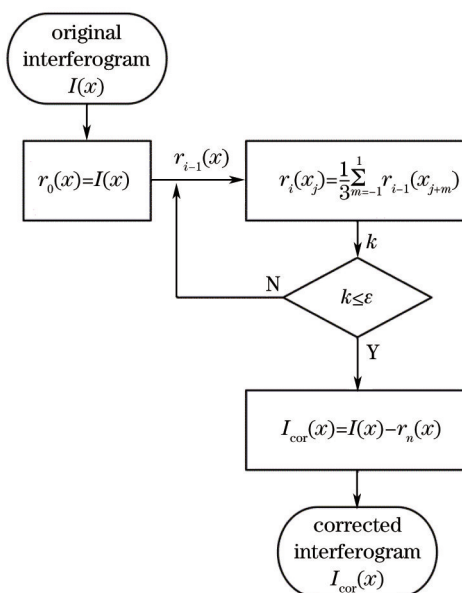


图1 自适应差分滤波算法流程图

Fig.1 Flow diagram of self-adaptive differential filtering algorithm

## 2.2 评价方法

基线校正的质量是通过光谱反演所得光谱曲线的扭曲程度<sup>[11]</sup>与相似系数<sup>[13]</sup>进行评价的。该评价方法将有效干涉曲线  $I_{act}(x)$  经光谱反演得到的有效光谱曲线  $S_{act}(\nu)$ , 与基线校正后的干涉曲线  $I_{cor}(x)$  经相同的光谱反演过程得到的待评价光谱曲线  $S_{cor}(\nu)$  进行比较, 定义仪器工作光谱范围内, 两组光谱曲线间距离平均值的对数为扭曲程度:

$$D = \lg \left[ 1 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_{act}(\nu_i) - S_{cor}(\nu_i)| \right], \quad (2)$$

由(2)式可知, 扭曲程度  $D$  的值越小, 两曲线的间隔就越小, 基线校正后的待评价光谱曲线与有效光谱曲线的匹配程度也越高。

定义仪器工作光谱范围内, 两组光谱曲线之间的相关系数为相似系数:

$$\rho = \frac{\text{Cov}[S_{act}(\nu), S_{cor}(\nu)]}{\sqrt{\sigma[S_{act}(\nu)]} \sqrt{\sigma[S_{cor}(\nu)]}}, \quad (3)$$

式中  $\text{Cov}(\cdot)$  表示协方差,  $\sigma(\cdot)$  表示方差。根据数学定义, 相似系数  $\rho$  越大则两组光谱曲线一致性越好, 且  $-1 \leq \rho \leq 1$ 。当  $\rho = 1$  时, 两曲线完全一致。

以上两个参数共同决定了基线校正后的待评价光谱曲线与有效光谱曲线之间的差异, 对基线校正的质量进行评价。

## 3 实验与讨论

### 3.1 仿真实验

使用矩形函数分别对窄带及宽带光谱曲线进行仿真模拟。矩形函数可表示为  $S_{act}(\nu) = A, \nu \in [a, b]$ , 其中  $A$  为矩形函数的幅值,  $\nu$  为波数, 故  $a, b$  分别为矩形函数起始点和终止点的波数值, 分别代表光谱信号分布的低频端与高频端。根据傅里叶变换公式, 并将干涉图配成  $-\infty < x < +\infty$  的偶对称图形, 矩形函数对应的有效干涉曲线可以由以下公式得到:

$$\begin{aligned} I_{act}(x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} S_{act}(\nu) \exp(j2\pi\nu x) d\nu = 2 \int_a^b A \cos(2\pi\nu x) d\nu \\ &= 2A \int_a^b \cos(2\pi\nu x) d\nu \end{aligned} \quad (4)$$

受探测器离散采样点总数  $N$  限制, 用于仿真的有效干涉曲线需由离散函数求得, 即

$$I_{\text{act}}(x) = A \sum_{x=0}^N \sum_{\nu=a}^b \cos\left(2\pi \frac{\nu}{N} x\right). \quad (5)$$

直流分量使用直流幅值  $A_1$  与低频分量  $I_r(x)$  共同模拟,其中

$$I_r(x) = A_2 \sum_{x=0}^N \sin\left(k \times 2\pi \frac{x}{N}\right), \quad (6)$$

当  $k = (0, 1) \cup (1, 2)$  时,  $I_r(x)$  可以较好地模拟低频分量。

综上所述,用于仿真实验的原始干涉曲线可以表示为

$$I(x) = I_{\text{act}}(x) + A_1 + I_r(x). \quad (7)$$

进行仿真实验时的采样点  $N = 1024$ , 即反演得到的光谱曲线为偶对称分布的 512 个采样点。有效光谱曲线  $S_{\text{act}}(\nu)$  为 3 组低频至高频分布的窄带矩形函数及 4 组宽带矩形函数, 分别编号 1~7(表 1)。有效干涉曲线  $I_{\text{act}}(x)$  混入相同的直流分量后, 分别使用固定窗口均值滤波方法、EMD 方法和本文提出的 ADF 方法对该仿真干涉曲线进行基线校正效果实验。其中, 均值滤波分别使用 3、5、7 点固定滤波窗口取均值的方法去除直流分量; ADF 方法取迭代停止条件判据  $\varepsilon = 1.2$ ; EMD 方法采用 Rilling 等<sup>[14]</sup>提供的 Matlab EMD 算法包提取趋势项。由表 1 可见, ADF 与 EMD 方法的迭代次数均能够随有效光谱信号的频率及带宽变化进行调整。其中, ADF 方法呈现出低频干涉曲线迭代次数较多, 高频干涉曲线迭代次数较少; 窄带仿真数据对应的迭代次数相对较少, 宽带仿真数据迭代次数相对较多等规律。由于迭代次数直接决定加权均值滤波窗口, 因此 ADF 方法与干涉图的空间频率分布存在关联。

表 1 ADF 与 EMD 方法对各仿真干涉曲线的迭代次数

Table 1 Iteration times of ADF and EMD methods to process simulated interference curves

| No. | Simulated rectangular wave |     | Bandwidth | Iteration times |     |
|-----|----------------------------|-----|-----------|-----------------|-----|
|     | $a$                        | $b$ |           | ADF             | EMD |
| 1   | 100                        | 150 | 50        | 14              | 7   |
| 2   | 250                        | 300 | 50        | 8               | 7   |
| 3   | 450                        | 500 | 50        | 9               | 10  |
| 4   | 100                        | 300 | 200       | 15              | 6   |
| 5   | 300                        | 500 | 200       | 9               | 8   |
| 6   | 200                        | 500 | 300       | 12              | 9   |
| 7   | 100                        | 500 | 400       | 15              | 6   |

通过计算有效光谱曲线  $S_{\text{act}}(\nu)$  与基线校正后反演得到的待评价光谱曲线  $S_{\text{cor}}(\nu)$  之间的扭曲程度与相似系数, 对均值滤波、ADF 及 EMD 方法的基线校正质量进行评价。计算结果如表 2 所示, 可以得出以下结论:

1) 除编号 1 低频窄带分布的仿真信号以外, ADF 与 EMD 方法对各仿真干涉曲线的滤波结果均比较接近, 二者均为有效的基线校正方法。而固定滤波窗口的均值滤波仅对编号 3 高频窄带仿真信号有较好的滤波效果, 对其他仿真信号滤波所得光谱曲线的质量均与 ADF、EMD 方法存在较大差距;

2) 对编号 1~3 窄带仿真信号, 当信号频率较低时 ADF 方法滤波所得光谱曲线的质量弱于 EMD 方法; 而当信号频率较高时, ADF 方法所得光谱曲线质量优于 EMD 方法;

3) 对编号 4~7 宽带仿真信号, ADF 方法总体接近或略优于 EMD 方法。

表 2 各种滤波方法所得光谱曲线质量

Table 2 Quality of the spectra obtained by various filtering methods

| No. | Distortion  |      |      |      | Correlation coefficient |             |      |      |        |        |
|-----|-------------|------|------|------|-------------------------|-------------|------|------|--------|--------|
|     | Mean filter |      |      | ADF  | EMD                     | Mean filter |      |      | ADF    | EMD    |
|     | 3           | 5    | 7    |      |                         | 3           | 5    | 7    |        |        |
| 1   | 2.61        | 2.41 | 1.97 | 1.57 | 0.54                    | 0.54        | 0.59 | 0.68 | 0.9473 | 0.9999 |
| 2   | 2.12        | 2.05 | 1.57 | 0.53 | 0.55                    | 0.87        | 0.99 | 0.94 | 0.9999 | 0.9994 |
| 3   | 2.19        | 1.93 | 1.66 | 0.52 | 0.65                    | 0.997       | 0.98 | 0.98 | 0.9999 | 0.9988 |
| 4   | 2.45        | 2.11 | 1.89 | 1.04 | 0.53                    | 0.15        | 0.22 | 0.41 | 0.9110 | ≈1     |
| 5   | 1.96        | 1.85 | 1.72 | 0.53 | 0.65                    | 0.48        | 0.43 | 0.57 | 0.9996 | 0.9954 |
| 6   | 2.09        | 1.87 | 1.77 | 0.53 | 0.65                    | 0.20        | 0.39 | 0.41 | 0.9996 | 0.9928 |
| 7   | 2.27        | 2.00 | 1.81 | 0.86 | 0.95                    | 0.10        | 0.20 | 0.32 | 0.9037 | 0.9483 |

结合表1提供的迭代次数变化,可知ADF方法随光谱信号频率及带宽变化对滤波窗口进行调整后,基线校正后的光谱曲线质量较好。仿真实验结果证明,ADF方法是一种有效的自适应干涉图基线校正方法。

### 3.2 验证实验与讨论

验证实验采用实验室自制的窗扫型近景紫外干涉成像光谱仪<sup>[4]</sup>进行数据采集,该仪器的扫描动镜设置在被测目标与干涉装置的光路之间,因此扫描过程不影响被测目标的照明条件,确保重组得到的原始干涉图的直流分量为稳定的低频分布。仪器采集得到的干涉数据,垂直方向表示的空间维的采样点为1024 pixel,水平方向表示的干涉维的采样点亦为1024 pixel,原始干涉图如图2所示。由于使用宽波段光源提供照明,且仪器具有宽光谱响应的特点,干涉条纹的能量集中在零级光程差附近,如图3所示。实验分别使用固定窗口均值滤波、EMD方法和提出的ADF方法对原始干涉图进行基线校正,再经过光谱反演过程获得被测目标的光谱图。为了去除噪声,同时保证结果的可比性,实验采用了相同的切趾方法。为便于显示光谱曲线,提取原始干涉图第588行干涉曲线进行基线校正质量的比较,该行干涉曲线如图4所示。原始干涉曲线 $I(x)$ 经光谱反演得到原始光谱曲线 $S(\nu)$ ,而基线校正应保证在仪器工作范围内光谱信号的完整。因此可以认为在仪器工作光谱范围内,有效光谱曲线 $S_{act}(\nu)$ 应与原始光谱曲线 $S(\nu)$ 一致,即 $S_{act}(\nu) = S(\nu)$ 。



图2 重组得到的原始干涉图  
Fig.2 Reconstructed original interferogram

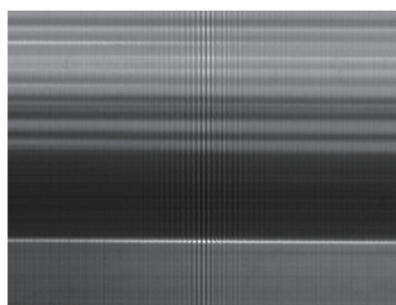


图3 原始干涉图中零级光程差附近的干涉条纹  
Fig.3 Interference fringes near zero optical path difference position in original interferogram

固定滤波窗口的均值滤波方法虽然算法简单、运算速度快,但滤波窗口需要与干涉曲线的空间频率相匹配。根据图5所示第588行3、5、7点均值滤波后反演得到的待评价光谱曲线,能够观察到待评价光谱数据存在明显的基线漂移<sup>[7]</sup>。

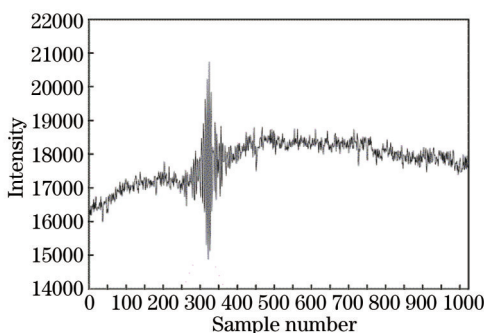


图4 第588行原始干涉曲线  
Fig.4 Original interference curves in line 588

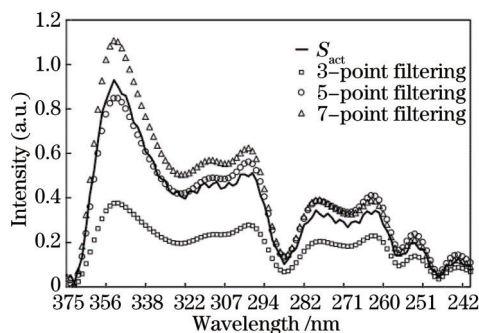


图5 3、5、7点均值滤波后光谱曲线的基线漂移  
Fig.5 Baseline drift of spectra obtained by 3-, 5-, 7-point mean filter methods

将上文所用第588行原始干涉曲线使用EMD方法去除直流分量,完成基线校正后的干涉曲线如图6所示。根据Huang等<sup>[12]</sup>提出的判据,趋势项或幅值小于预设值,或者为单调函数或常数时,EMD方法的筛分过程才停止。由于实验原始干涉图的直流分量包含非均匀频率分布的低频分量,而EMD方法的趋势项判据过于严格,会导致差分后的干涉曲线中部分低频分量残留。因此,在Zhang等<sup>[8]</sup>提出的背景去除方法中,需要提取部分高级次的IMF项与趋势项 $r$ 求和后共同组成背景,即直流分量。

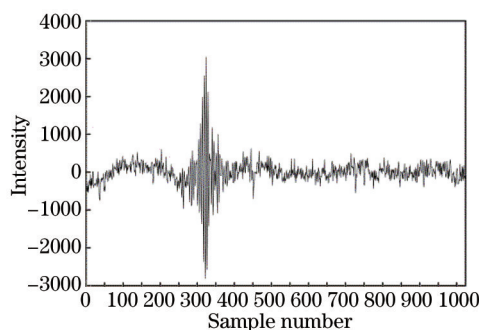


图6 第588行EMD方法基线校正后的干涉曲线

Fig.6 Interference curves in line 588 obtained by EMD baseline correction method

使用ADF方法对第588行原始干涉曲线进行基线校正后的干涉曲线如图7所示。可以看出,ADF方法基本保留了有效干涉曲线,对直流分量的滤除比较彻底。如图8所示,将使用ADF与EMD方法进行基线校正后,反演得到的待评价光谱曲线结果进行比较。在仪器工作光谱范围内,ADF方法与EMD方法基线校正的结果均与有效光谱曲线 $S_{act}(\nu)$ 基本一致。

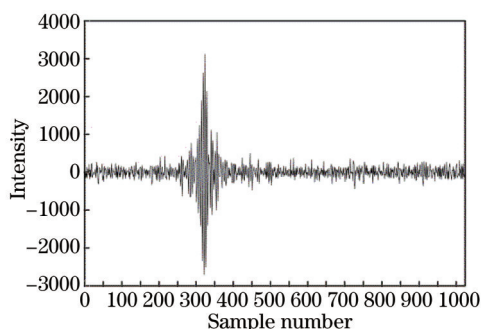


图7 第588行ADF方法基线校正后的干涉曲线

Fig.7 Interference curves in line 588 obtained by ADF baseline correction method

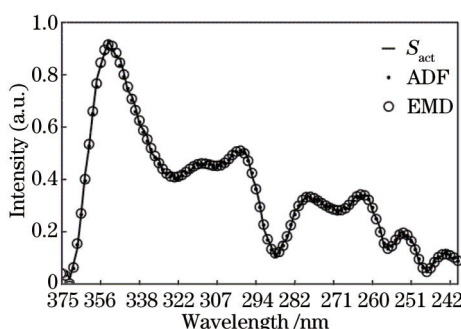


图8 ADF与EMD方法滤波后的光谱曲线比较

Fig.8 Comparison between spectra obtained by ADF and EMD filtering methods

图9为使用ADF方法滤波时,按照(1)式计算第588行直流趋势项总体标准差 $C_{SD}$ 在各迭代次数的值,可见总体标准差的收敛趋势是单调的且收敛迅速。图10为对原始干涉图分别使用ADF与EMD方法进行基线校正时,空间维各行完成滤波的迭代次数分布。可见两种方法的迭代次数接近,主要迭代次数均为7~8次。但由于ADF方法基于均值滤波算法,运算量远小于需要多次逐点插值拟合的EMD方法,由表3使用Matlab记录运算时间的验证结果可知,ADF方法虽然与均值滤波方法相比运算时间有所增加,但仍然是一种高效的基线校正方法。

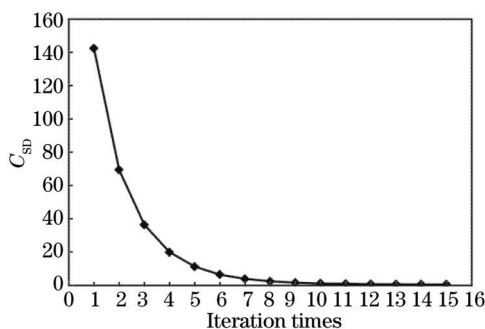


图9 ADF方法趋势项变化量的标准差分布  
Fig.9 Standard deviation distribution of residual trend of ADF method

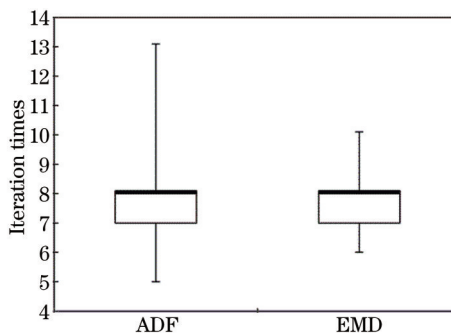


图10 ADF与EMD方法迭代次数分布比较  
Fig.10 Comparison between iteration times of ADF and EMD methods

表3 干涉图基线校正方法计算时间

Table 3 Operation time of baseline correction methods for one interferogram

| Baseline correction method | Operation time /s |           |
|----------------------------|-------------------|-----------|
|                            | 1×1024            | 1024×1024 |
| ADF method                 | 0.002             | 1.64      |
| EMD method                 | 0.095             | 82.9      |
| Mean filter method         | 0.0004            | 0.33      |

ADF方法与EMD方法的基线校正质量,将通过干涉图空间维各行光谱反演所得待评价光谱曲线的扭曲程度与相似系数的分布进行评价。图11为两种方法的扭曲程度分布比较,EMD方法在部分行略优于ADF方法。但在图12相似系数分布比较中,两种方法的相似系数基本均优于0.99,说明两种方法反演得到的光谱曲线与有效光谱曲线基本一致。

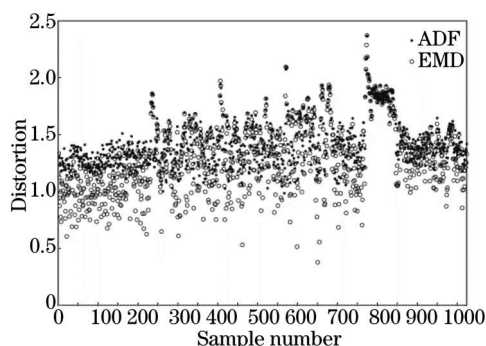


图11 ADF与EMD方法扭曲程度分布

Fig.11 Distortion distribution of ADF and EMD methods

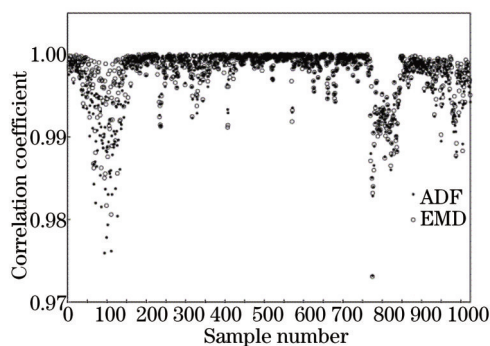


图12 ADF与EMD方法相似系数分布

Fig.12 Correlation coefficient distribution of ADF and EMD methods

## 4 结 论

提出的自适应基线校正方法,可以根据干涉图的空间频率分布动态调整加权均值滤波窗口,通过差分滤波能够有效地将包含低频噪声的直流分量从原始干涉图中去除。并且迭代算法基于均值滤波算法,运算量远小于同为自适应方法的EMD方法。通过仿真实验及对近景紫外成像光谱仪的实测数据进行的验证实验,证明基线校正后光谱曲线与有效光谱曲线的一致性高,可以达到与EMD方法相似的结果。因此与传统的均值滤波等基线校正方法相比,该方法能更有效地去除直流分量,具有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Meng Xin, Li Jianxin, Zhu Rihong, *et al.*. Near-field mechanism research on hyperspectral image plane interferometric imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0230001.  
孟 鑫, 李建欣, 朱日宏, 等. 高光谱像面干涉的近场成像机理研究[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0230001.
- 2 J Chen, Y Zhu, B Liu, *et al.*. Experimental study of Fourier transform spectrometer based on MEMS micro-mirror[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(5): 053003.
- 3 Du Shusong, Wang Yongmei, Tao Ran. Multiple beam interferential spectral imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0830003.  
杜述松, 王咏梅, 陶 然. 多光束干涉光谱成像技术[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0830003.
- 4 Liu Yang, Liao Ningfang, Bai Tingzhu, *et al.*. Study of the structure of large aperture ultraviolet Fourier transform imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0330001.  
刘 洋, 廖宁放, 白廷柱, 等. 一种大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪结构研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0330001.
- 5 Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Analysis and design for the optical system of a static infrared Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222006.  
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统分析与设计[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222006.

- 6 Sun Yi, Du Zhenhui, Yin Xin, *et al.*. Investigation on baseline correction in pollutant monitoring on-line by NIR spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10): 2282–2284.  
孙毅, 杜振辉, 尹新, 等. 近红外光谱气体在线分析中基线校正方法的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2282–2284.
- 7 Lan Tiange, Xiong Wei, Fang Yonghua, *et al.*. Research on preprocessing algorithm for infrared spectral signals of biological aerosols [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2742–2747.  
兰天鸽, 熊伟, 方勇华, 等. 生物气溶胶红外光谱信号预处理算法研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2742–2747.
- 8 C Zhang, W Ren, T Mu, *et al.*. Empirical mode decomposition based background removal and de-noising in polarization interference imaging spectrometer[J]. Opt Express, 2013, 21(3): 2592–2605.
- 9 Lü Qunbo, Xiangli Bin, Huang Min, *et al.*. Error correction method of the spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(7): 1746–1750.  
吕群波, 相里斌, 黄旻, 等. 空间调制干涉光谱成像仪数据误差修正方法[J]. 光子学报, 2009, 38(7): 1746–1750.
- 10 Jing Juanjuan, Xiangli Bin, Li Ran, *et al.*. Interferogram filtering method based on empirical mode decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1007001.  
景娟娟, 相里斌, 李然, 等. 基于经验模态分解的干涉图滤波方法[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1007001.
- 11 Liang Lingfei. Window Empirical Mode Decomposition and Its Application in Image Processing[D]. Beijing: Beijing University of Posts & Telecommunications, 2010: 5, 25–26.  
梁灵飞. 窗口经验模式分解及其在图像处理中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010: 5, 25–26.
- 12 N E Huang, Z Shen, S R Long, *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1998, 454(1971): 903–995.
- 13 Wang Ting. Research on EMD Algorithm and Its Application in Signal Denoising[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010: 38–40.  
王婷. EMD算法研究及其在信号去噪中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010: 38–40.
- 14 G Rilling, P Flandrin, P Gonçalvès. On empirical mode decomposition and its algorithms[C]. IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing NSIP-03, 2003: 8–11.

栏目编辑: 吴秀娟