

基于经验模态分解的干涉图滤波方法

景娟娟^{1,2} 相里斌^{2*} 李 然¹ 石大莲¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院光电研究院, 中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094)

摘要 干涉图滤波是干涉光谱成像仪光谱反演过程中的一个关键环节,常用的滤波方法主要是差分法和拟合法。差分法对背景噪声不能完全去除;拟合法则需要先验知识,而且在干涉数据两端拟合误差较大。经验模态分解(EMD)方法是近年来提出的一种新的用于线性和稳态谱分析信号处理方法,该方法提出后在很多领域得到广泛应用。将EMD方法应用到干涉图的滤波过程中,使得对背景噪声的提取更为合理,而且具有自适应性,避免了常用滤波方法的不足。利用实验室实际获取的数据进行分析,可以看出:EMD滤波后空间维的光谱相对均方根误差(RQE)均值为0.0068,精度最高;其次为拟合法,RQE均值为0.0073;最后为差分法,RQE均值为0.0079。

关键词 光谱学;光谱成像;干涉图;滤波;经验模态分解;光谱反演

中图分类号 TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1007001

Interferogram Filtering Method Based on Empirical Mode Decomposition

Jing Juanjuan^{1,2} Xiangli Bin² Li Ran¹ Shi Dalian¹

(¹ Key Laboratory of Spectral Imaging Technique, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
² Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract Interferogram filtering is a key technique in the process of spectral recovery of imaging Fourier transform spectrometer. Differential filtering and polynomial filtering are usually used, but differential filtering cannot filter the noise completely, and polynomial filtering, which needs the noise type when filtering, produces big bias at both ends of the interferograms. Empirical mode decomposition (EMD), a new signal processing method in linearity and stationary spectral analysis, is now widely used in many aspects. EMD technique is applied to interferogram filtering. It can avoid the disadvantages of differential filtering and polynomial filtering, and it is more reasonable to extract the background noise. The data acquired in the laboratory are used to analyze the precision of different filtering methods. The result indicates that the precisions of differential filtering, polynomial filtering and EMD are 0.0079, 0.0073, 0.0068, respectively. EMD is the optimum filtering method, followed by the polynomial filtering and differential filtering.

Key words spectroscopy; imaging spectroscopy; interferogram; filtering; empirical mode decomposition; spectral recovery

OCIS codes 110.4234; 300.6300; 230.0230

1 引 言

由于仪器获取的干涉图是直流分量与交流分量的叠加,理想情况下,交流分量包含了目标的光谱信

息,直流分量为固定值,可以从干涉图中直接减掉,但实际获取的数据由于受到各种误差因素的影响,从而使得直流分量成为随光程差变化的值,这种随

收稿日期: 2013-04-22; 收到修改稿日期: 2013-06-20

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724005)

作者简介: 景娟娟(1979—),女,博士,副研究员,主要从事光谱成像仪数据处理方面的研究。E-mail: jjgrzlyx@163.com

* 通信联系人。E-mail: xiangli@aoe.ac.cn

误差变化的值通常是一种缓变量,属于低频噪声。对于干涉图进行滤波的目的是消除背景噪声影响,抑制低频噪声,从而提取有效的干涉图,也有人将这一过程称为消趋势项^[1-2]。影响干涉数据质量的因素很多,如光源的非均匀性^[3]、光学系统设计过程中的像差^[4]、加工过程中的面形误差^[5-6]、装调过程中的装配位置误差^[7]等,都会对获得的干涉数据产生影响,通常情况下是综合影响的结果。

目前常用的干涉图滤波方法有差分法和拟合法^[8],差分法的优点是算法简单、运行速度快,缺点是对背景噪声去除得不彻底,而拟合法则需要有一定的先验知识,也就是需要提前预测背景噪声的类型,如线性函数、指数函数、多项式函数等。经验模态分解(EMD)法是美国宇航局戈达德空间飞行中心 Huang 等^[9]提出的一种新的信号处理方法,该方法提出后被认为是近年来对以傅里叶变换为基础的线性、稳态谱分析的一个重大突破,在白噪声特性分析^[10]、振动信号提取^[11]、地球物理^[12]、生物医学^[13]、频谱分析^[14]等领域得到广泛应用。

本文将 EMD 技术应用到干涉图滤波过程中,相对于目前常用的差分法和拟合法,具有自适应性,对背景噪声的提取更加合理,计算精度高等优点。

2 EMD 滤波原理

EMD 方法的基本思想是任何复杂的时间序列都可以分解成一组互不相同的、简单的、非正弦的固有模态函数(IMF)和一个趋势项。其最大的优势是它根据数据自身特征来进行分解,不需要设定基函数,即能够对非线性、非平稳信号进行线性化、平稳化处理,因此具有自适应性。该方法提出后很多学者进行了跟踪研究,针对该算法在提取固有模态函数过程中存在的不足,对多种截止准则进行改进^[15-17],也对提取上下包络线的插值算法进行了修正^[18-19]。

IMF 的提取过程称为“筛过程”,提取的具体步骤如下^[9]:

1) 假设待分析的时间序列为 $x(t)$,找到 $x(t)$ 的所有极大值点,通过三次样条函数或者多项式拟合等方法找出原始数据的上包络线;同理,找到 $x(t)$ 的所有极小值点,用同样的方法找出原始数据的下包络线;计算上包络线与下包络线的均值,称为平均包络线 $m_1(t)$;计算原始信号与平均包络线的差值,可以得到一个新的信号 $C_{11}(t)$,即

$$C_{11}(t) = x(t) - m_1(t), \quad (1)$$

这个过程即称为“筛分”, $C_{11}(t)$ 为筛分得到的新信号。判断 $C_{11}(t)$ 是否满足 IMF 的两个条件:

① 整个时程内,数据序列的极大值、极小值数量与过零点数量相同或者最多相差一个;

② 数据序列的任何一点处,上下包络的均值为 0。

如果满足,则 $C_{11}(t)$ 就是 $x(t)$ 的第一个 IMF 分量 C_1 , $x(t)$ 与 $C_{11}(t)$ 的差值即为趋势项 r_1 :

$$r_1 = x(t) - C_1 = x(t) - C_{11}(t), \quad (2)$$

2) 如果不满足,则将 $C_{11}(t)$ 作为原始信号重复步骤 1)继续筛分,假设经过 k 次筛分后得到信号 $C_{1k}(t)$ 满足 IMF 条件

$$C_{1k} = C_{1k-1}(t) - m_k(t), \quad (3)$$

则得到第一个 IMF 分量 C_1 : $C_1 = C_{1k}$,计算原始信号与该 IMF 的差值 r_1 :

$$r_1 = x(t) - C_1, \quad (4)$$

3) 把 r_1 作为新的序列重复上述步骤,提取出第 2,3,4,..., n 个 IMF 分量 $C_2, C_3, C_4, \dots, C_n$,以及余量: $r_2 = r_1 - C_2, r_3 = r_2 - C_3, \dots, r_n = r_{n-1} - C_n$ 。这时 r_n 不再包含任何模式的信息,即为原始信号的趋势项。

最终,信号 $x(t)$ 可以表示为所有 IMF 与趋势项之和:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n C_i + r_n. \quad (5)$$

由(5)式可以看出所有 IMF 的和,或者用原始信号减去余量 r_n 即为去除趋势项后的信号。

3 评价方法

为了对滤波的效果进行定量的评价,以光谱失真度^[20]即光谱相对均方根误差(RQE)作为评价指标,该方法可以从幅值上对两条光谱的偏离程度进行评价。其具体表达式为

$$S_{\text{RQE}} = \frac{\sqrt{\int_0^{0.5} |\hat{S}(\tilde{f}) - S(\tilde{f})|^2 d\tilde{f}}}{\int_0^{0.5} S(\tilde{f}) d\tilde{f}}, \quad (6)$$

式中 $S(\tilde{f})$ 为原始光谱, $\hat{S}(\tilde{f})$ 为仿真得到的光谱, $\tilde{f} = 1/(\lambda f_e)$ 为归一化频率($0 < \tilde{f} < 0.5$), λ 为波长, f_e 为采样频率。

将连续的积分公式改为离散的求和公式来计算,即

$$S_{\text{RQE}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{S}_i - S_i)^2}}{\sum_{i=1}^N S_i}. \quad (7)$$

4 实验分析

以干涉成像光谱仪(LASIS)样机在实验室实际获取的干涉数据为例,空间维像元数为490,干涉维像元数为128,原始干涉图如图1所示,采用单边过零采样^[21]方式,经过减暗电流、探测器像元间响应非均匀性修正、坏像元修正等初步处理后得到的干涉数据如图2所示。接下来分别利用差分法、拟合法和EMD方法进行干涉图滤波,然后经过切趾、相位修正、快速傅里叶变换(FFT)等步骤得到目标的光谱图。差分滤波算法比较简单,主要是利用两相邻光程差除干涉数据的差值达到滤除背景噪声的目的,拟合滤波法可参见文献[7],这里不再详细进行叙述。为使计算的结果具有可比性,切趾均采用三角函数,相位修正方法均采用绝对值法。

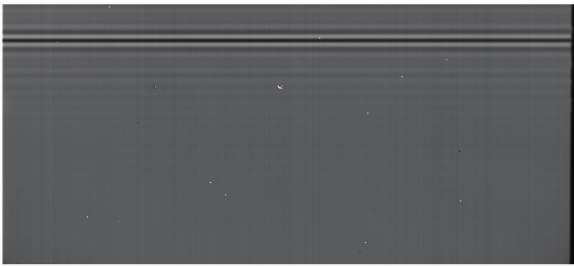


图1 LASIS获得的原始干涉数据

Fig. 1 Origin interferogram captured by LASIS



图2 暗电流与非均匀修正后的干涉图

Fig. 2 Interferogram after dark current reduction and response nonuniformity correction

4.1 差分滤波

差分滤波后的干涉数据如图3所示,可以看出差分后干涉图基线基本变平,而且只剩下对提取光谱信息有用的交流信号。提取第260列干涉曲线,差分前如图4所示,差分后如图5所示,可以看出差分可以消除干涉图的直流分量,与此同时干涉图变得不再对称。对空间维所有列的干涉图进行光谱反演得到目标的光谱,以所有列反演谱的平均值作为标准值 S_i ,计算其他列与标准值的RQE(见图6),RQE的平均值为0.0079。

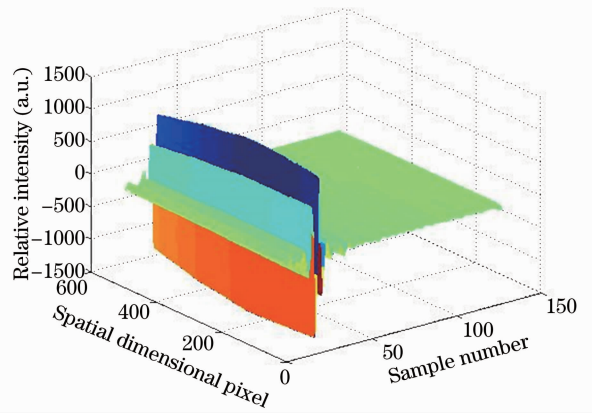


图3 差分后的干涉图

Fig. 3 Interferogram after differential filtering

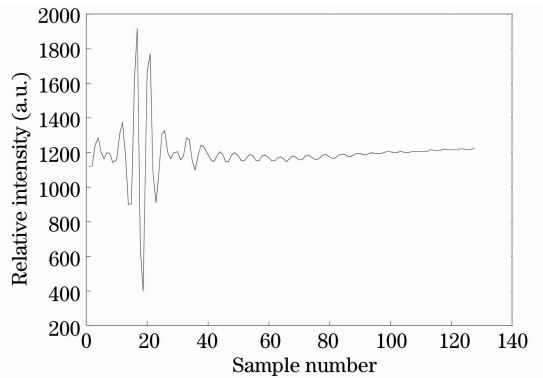


图4 差分前第260列的干涉图

Fig. 4 Interferogram before differential filtering at column 260

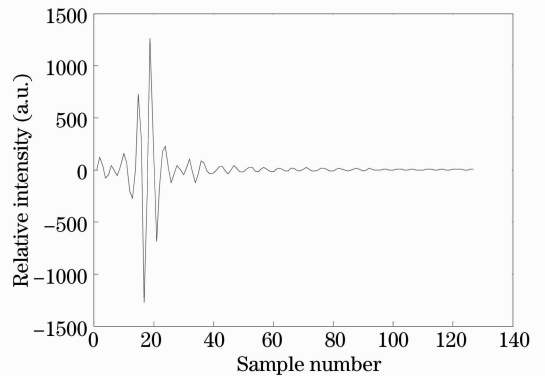


图5 差分后第260列干涉图

Fig. 5 Interferogram after differential filtering at column 260

4.2 拟合滤波

仍然采用前面的数据,采用拟合法拟合出的直流分量如图7所示,滤波后的干涉图如图8所示。提取第260列干涉图,拟合得到的基线如图9所示,基线去除后的干涉图如图10所示,对拟合滤波后空间维所有列的干涉图进行光谱反演得到目标的光谱,计算得到RQE(见图11)。RQE的平均值为

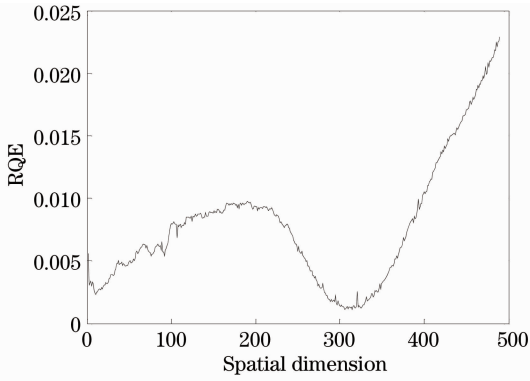


图 6 差分滤波空间维反演光谱的 RQE

Fig. 6 RQE of recovered spectrum at spatial dimension using differential filtering method

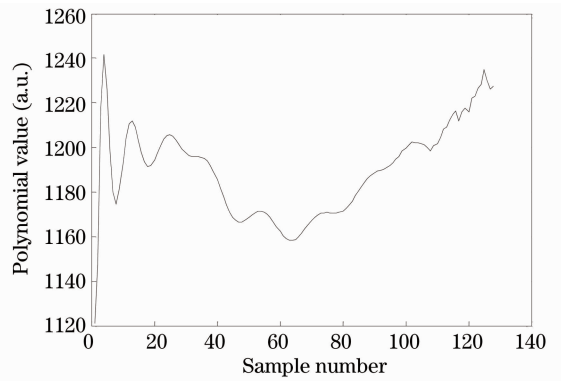


图 9 第 260 列拟合值

Fig. 9 Polynomial value of interferogram at column 260

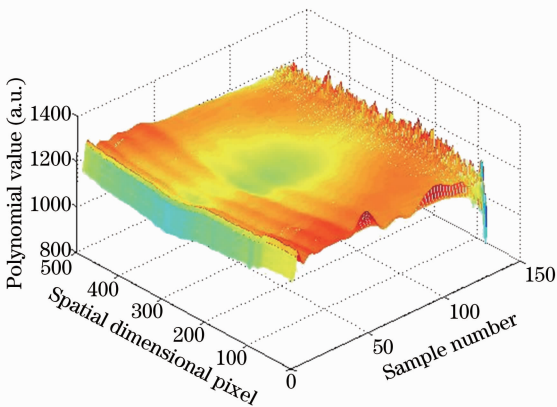


图 7 拟合出的直流分量

Fig. 7 Constant component fitting

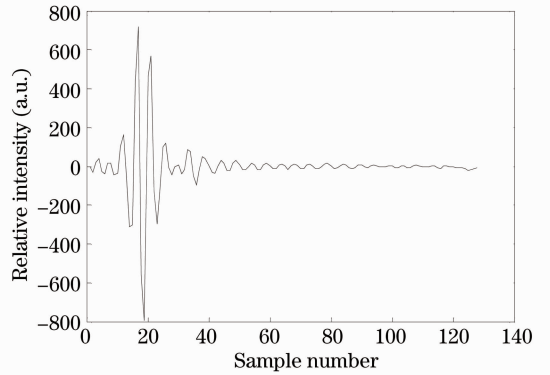


图 10 第 260 列干涉图滤波后

Fig. 10 Interferogram after polynomial filtering at column 260

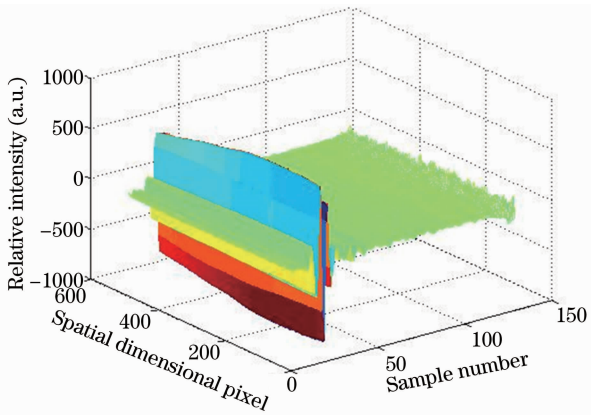


图 8 去直流后的干涉图

Fig. 8 Interferogram after constant component omitting 0.0073. 可以看出,拟合滤波较好地保持了干涉图的对称性,但是,在干涉图的两端处误差较大,背景噪声去除效果不是很好,不过,由于长光程差处对反演光谱的影响较小,总体来说,拟合滤波的效果要好于差分滤波法。

4.3 EMD 滤波

利用 EMD 方法提取的直流分量如图 12 所示,滤

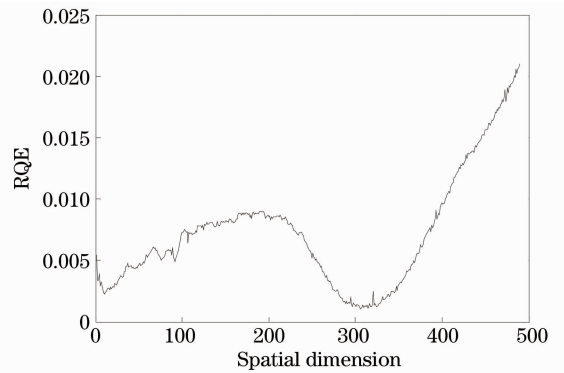


图 11 拟合滤波空间维反演光谱的 RQE

Fig. 11 RQE of recovered spectrum at spatial dimension using polynomial filtering method

波后的干涉图如图 13 所示。提取第 260 列干涉图进行 EMD 分解,得到 4 个 IMF 及其余量如图 14 所示,其中图 14(a)~(d)为提取的 4 个 IMF,图 14(e)为余量即带有背景噪声的直流分量,对其进行滤波后得到的干涉图如图 15 所示,对 EMD 滤波后的干涉图进行光谱反演,空间维所有列反演光谱的 RQE 见图 16。可以看出,EMD 方法很好地保持了干涉图的对称性,提取的直流分量比较平缓,与实际情况比

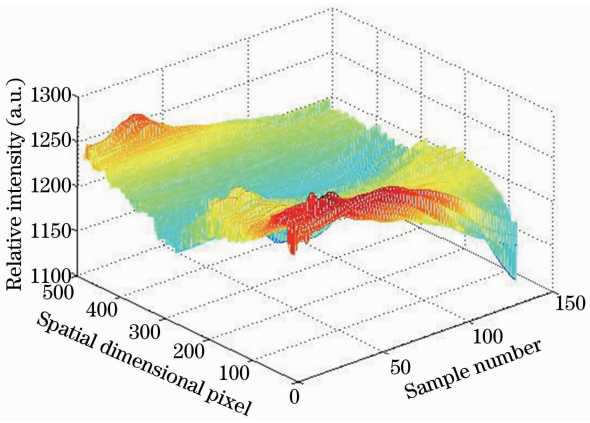


图 12 EMD 提取的直流分量

Fig. 12 Constant component calculated by EMD

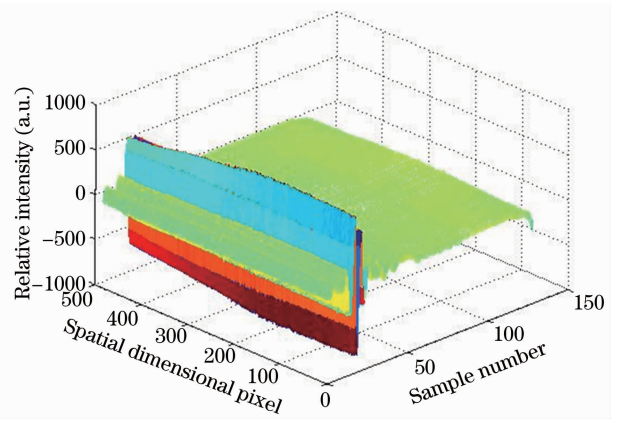


图 13 去基线后的干涉图

Fig. 13 Interferogram after constant component omitting

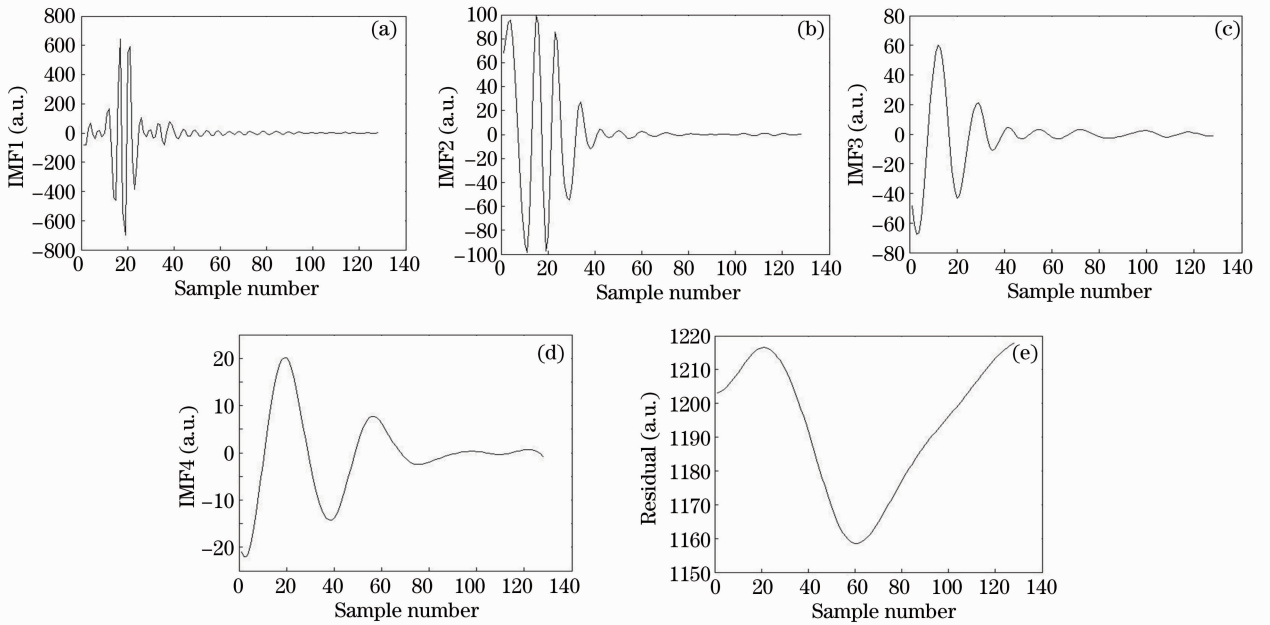


图 14 第 260 列干涉图提取的(a) IMF1, (b) IMF2, (c) IMF3, (d) IMF4 及(e)其余量

Fig. 14 (a) IMF1, (b) IMF2, (c) IMF3, (d) IMF4 and (e) residual values calculated by interferogram at column 260

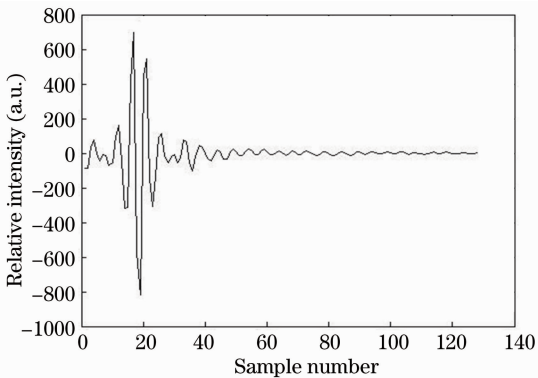


图 15 第 260 列干涉图去基线后

Fig. 15 Interferogram after constant component omitting at column 260

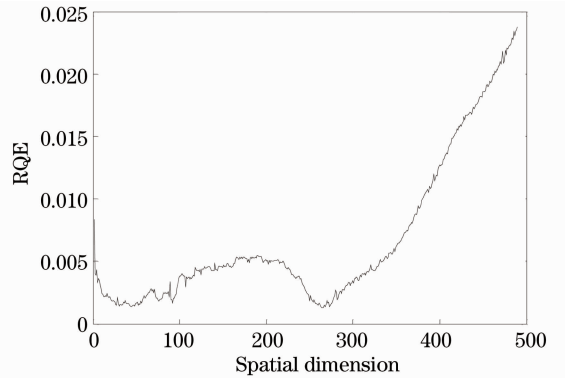


图 16 EMD 滤波空间维复原光谱的 RQE

Fig. 16 RQE of recovered spectrum at spatial dimension using EMD method

较接近,去除直流后的干涉图在边缘处也不会存在较大起伏。其空间维 RQE 的平均值为 0.0068,效果优于差分滤波和拟合滤波法。

5 结 论

干涉图滤波是傅里叶变换干涉光谱成像仪光谱反演过程中的一个关键环节,通过滤波处理可以消除背景噪声影响,抑制低频噪声,提取有效的干涉图。本实验将 EMD 技术应用到干涉图滤波过程中,具有自适应性,对背景噪声的提取更为合理,克服了常用的差分滤波对背景噪声去除效果不好,以及拟合滤波需要先验知识,且在干涉数据两端误差较大的不足。利用 LASIS 样机对在实验室实际采集的干涉数据进行分析,结果证明 EMD 方法的复原精度最高,拟合法的复原精度其次,差分法的复原精度最差。

参 考 文 献

- Zong Kongde, Hu Guangshu. Digital Signal Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993. 166.
宗孔德, 胡广书. 数字信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993. 166.
- Li Suning, Zhu Rihong, Li Jianxin, *et al.*. Method of reconstruction on Fourier transform spectroscopy [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(2): 268–272.
李苏宁, 朱日宏, 李建欣, 等. 傅里叶干涉成像光谱技术中的重构方法 [J]. 应用光学, 2009, 30(2): 268–272.
- 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.
- V N Mahajan. Aberrations of diffracted wave fields. I. Optical imaging [J]. J Opt Soc Am A, 2000, 17(12): 2216–2222.
- Wan Min, Su Yi, Zhang Wei, *et al.*. Influence of the surface error of optical elements on beam quality [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(4): 495–500.
万敏, 苏毅, 张卫, 等. 光学器件面形误差对光束质量的影响 [J]. 光学学报, 2002, 22(4): 495–500.
- Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Analysis of vibration effect to surface figure measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112001.
王汝冬, 田伟, 王平, 等. 振动对面形测量误差的影响分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112001.
- Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Tolerance analysis for a static Fourier-transform infrared spectrometer based on multi-micro mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0607002.
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 静态傅里叶变换红外光谱仪的公差分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0607002.
- 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.
- 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]. Proc R Soc Lond A, 1998, 454(1971): 903–995.
- Z Wu, N E Huang. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. Proc R Soc Lond A, 2004, 460(2046): 1597–1611.
- D Pines, L Salvino. Structural health monitoring using empirical mode decomposition and the Hilbert phase [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(1): 97–124.
- N E Huang, Z Wu. A review on Hilbert–Huang transform: method and its applications to geophysical studies [J]. Rev Geophys, 2008, 46(2): RG2006.
- N E Huang, S S Shen. Hilbert-Huang Transform and Its Application [M]. World Scientific, 2005.
- Zou Haihua, Zhao Hong, Zhou Xiang. Triple-frequency color-encoded fringe projection profilometry based on empirical mode decomposition [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812009.
邹海华, 赵宏, 周翔. 基于经验模式分解的三频彩色条纹投影轮廓术 [J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812009.
- N E Huang, M C Wu, S R Long. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [J]. Proc R Soc Lond A, 2003, 459(2037): 2317–2345.
- G Rilling, P Flandrin, P Goncalves. On empirical mode decomposition and its algorithms [C]. IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing NSIP, 2003, 3: 8–11.
- Z G Xu, B X Huang, K W Li. An alternative envelope approach for empirical mode decomposition [J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(1): 77–84.
- S D Hawley, L E Atlas, H J Chizeck. Some properties of an empirical mode type signal decomposition algorithm [C]. IEEE Int Conf on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2008. 3625–3628.
- G G S Pegram, M C Peel, T A McMahon. Empirical mode decomposition using rational splines: an application to rainfall time series [J]. Proc R Soc A, 2008, 464(2094): 1483–1501.
- C Mailhes, P Vermande, F Castanie. Spectral image compression [J]. J Opt, 1990, 21(3): 121–132.
- Xiangli Bin, Yuan Yan. Some aspects of the data processing of the single sided interferogram [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(12): 1869–1873.
相里斌, 袁艳. 单边干涉图的数据处理方法研究 [J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1869–1873.

栏目编辑: 何卓铭