

使用区域中值滤波算法降低同步辐射红外线站 由 Top-Up 模式引入的噪声

朱化春, 佟亚军, 吉特, 彭蔚蔚, 陈敏*, 肖体乔

(中国科学院上海应用物理研究所 上海光源, 上海 201204)

摘要: 为了提高同步辐射红外光源的光子通量和亮度以及改善光学元件的热稳定性, 同步辐射光源现多采用恒流注束(Top-Up)模式, 以保持储存环内部束流的稳定。在增强器向储存环注束时, 储存环电流的瞬时起伏及电子束团位置的变动等会使同步辐射红外线站所用红外傅立叶变换(FTIR)光谱仪所采的干涉图上出现较大的波动, 形成噪声; 本文根据该噪声的特点, 以及全域中值滤波算法处理该类型的噪声的不足, 提出使用区域中值滤波算法对红外谱学线站使用的 FTIR 光谱仪所采的干涉图进行预处理, 以消除由 Top-Up 模式引入的噪声的影响; 并根据该型噪声的特点和区域中值滤波算法的处理过程, 设计了一套去除由 Top-Up 模式引入的同步辐射红外谱学噪声的流程, 使该区域中值滤波算法的处理过程无需人工干预; 使用该区域中值滤波算法对具有该型噪声的干涉图进行了降噪处理, 计算结果表明: 使用该滤波算法可消除由 Top-Up 模式引入噪声的影响, 提升 Top-Up 模式下所采光谱的信噪比。

关键词: 同步辐射红外光源; 恒流注束; 噪声消除技术; 区域中值滤波

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

Elimination technology of noise introduced by top-up injection in synchrotron radiation infrared beamline

ZHU Hua-Chun, TONG Ya-Jun, JI Te, PENG Wei-Wei, CHEN Min*, XIAO Ti-Qiao

(SSRF, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract: In order to enhance the photon flux and brightness of a synchrotron source, and improve the thermal stability of optical elements, synchrotron radiation source often operates in the quasi-constant current injection (Top-Up) mode. The Top-Up mode can maintain a stable beam current in the storage ring of Synchrotron Source. When the electron is injected into the storage ring from the booster, a noise induced by the instantaneous fluctuation of the beam current in the storage ring will cause a large fluctuation on the interferogram, which can be observed by the FTIR spectrometer used in IR experimental endstation. The median filtering algorithm is not sufficient to filter the noise according to the noise characteristics. Therefore, a zone median filter method is proposed to eliminate the noise introduced by the Top-Up mode. A set of the processes of zone median filtering algorithm is designed, which can eliminate the Top-Up mode induced noise on the interferogram automatically. Simulation results show that: the filtering algorithm can be applied to eliminate the noise on the interferogram introduced by the Top-Up mode effectively, so the method can be used to enhance the spectral SNR of the spectrum in the Top-Up mode.

Key words: synchrotron radiation infrared source, constant current injection, elimination technology of

收稿日期: 2017-09-26, 修回日期: 2018-01-19

Received date: 2017-09-26, revised date: 2018-01-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11405258, 11605281, 11505267), 国家自然科学基金(11475252, 31300480), 上海市自然科学基金(15ZR1448200, 15ZR1448900)

Foundation items: Supported by National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar(11405258, 11605281, 11505267), National Natural Science Foundation of China (11475252, 31300480), and Shanghai Municipal Natural Science Foundation, China (15ZR1448200, 15ZR1448900)

作者简介 (Biography): 朱化春(1981-), 安徽淮南人, 博士, 主要研究领域为红外束线技术、红外谱学和红外谱学显微技术, E-mail: zhuhuachun@sinap.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: minchen@sinap.ac.cn

noise, zone median filtering

PACS: 07. 85. Qe, 33. 20. Ea, 07. 57. -c

引言

同步辐射红外光源相较于传统的热红外光源,具有以下几个方面的优势:高亮度,比传统的红外光源高 2~3 个量级,采用同步辐射红外光源,在红外谱分析中可以得到更强的信号和更高信噪比(小样品时),极大地提高了实验数据采集的效率和质量;高度准直性,通过合理的光学设计,在红外显微分析中,采用同步辐射光源可以在维持较高的信噪比和灵敏度的同时,实现衍射极限的空间分辨率;同步辐射红外光源其谱段基本覆盖了从近红外波段到太赫兹的($10\ 000\sim 10\ \text{cm}^{-1}$)红外波段,波段覆盖范围远大于激光,亮度比传统的实验室热光源高数个量级,可以开展一些独特的研究,因而世界上大多同步辐射光源都建有同步辐射红外光束线站,如 ALS^[1], Spring-8^[2] 的 BL43IR 红外光束线站, Soleil 的 AILES^[3] 以及 SMIS 光束线站^[4], 瑞士光源的红外光束线站^[5] 等,国内在上海光源和合肥光源也建有红外光束线站。

同步辐射红外光束线站通常由三部分组成:储存环弯铁光源、光束线以及实验站。光束线是连接储存环弯铁光源和实验站的桥梁,将储存环上弯铁发出的光引入到实验站的测试仪器中去。光源、光束线和实验站中任何一部分的不稳定,都会给最终的测量结果带来噪声。

FTIR 光谱仪是同步辐射红外光束线站必不可少的测试设备,因 FTIR 光谱仪只采集 Michelson 干涉仪的干涉信号的交变信号,不采集直流信号。在同步辐射红外光束线站的运行过程中,傅立叶变换光谱仪对于同步辐射光源内的储存环内电子束的状态变化非常敏感,电子束的能量起伏会在 FTIR 光谱仪测量的干涉图中引入噪声,因此电子束的噪声会直接在光谱中显示出来,影响系统的信噪比,降低实验数据的质量,从而影响实验结果,尤其是在做显微扫描过程中,这种影响特别明显。

而目前大多数同步辐射装置为了提高同步辐射红外光源的光子通量和亮度以及改善光学元件的热稳定性,都采用恒流模式(Top-Up 模式)^[6],以保持储存环内部束流的稳定。这种模式下每隔几分钟同步辐射加速器就会向储存环中注入少量电子,如图 1 所示。这个注入过程会带来电子束扰动,如果在向

储存环注入束流时,FTIR 光谱仪正在采样,会使所采干涉图上出现较大的扰动,致使整个红外光谱上出现一个 $1/d$ (d 为该扰动出现时,采样点对应的光程差)的调制光谱,从而影响红外光谱的信噪比。

目前使用 Top-Up 模式的红外光束线站,较常用的方法是通过硬件或软件的方法来监测储存环的状态,如 ALS 的 Laetitia Vernoud 等人将谱仪通过光纤与加速器的注束系统相连,当加速器在注束开始和结束时,通过光纤给谱仪发送一个触发信号,当谱仪接收到注束触发信号时,暂停采样,接收到停止注束信号时,恢复采样^[7];佟亚军等人在上海光源的红外光束线站上使用网络装置检测储存环内的束流变化,以判断增强器向储存环注束的开始和结束时间,在增强器向储存环注束前将 FTIR 红外光谱仪的采样暂停,待注束完毕后再重新恢复采样^[8]。但这些方法对时间分辨实验(如快速光谱扫描),如原位、条件测试等,会导致注束时段的光谱丢失(停止采样),会造成一部分随时间变化的信息丢失。因而需要开发一种方法,在不干扰实验的前提下,尽可能的消除由 Top-Up 模式下注束引入的噪声。

本文根据由 Top-Up 引入噪声的特点(该噪声为孤点噪声),以及全域中值滤波算法的不足,提出使用区域中值滤波算法来消减该噪声带来的影响,并设计了一套自适应的区域中值滤波算法的流程,其可自主定位由恒流注束引入的噪声在 FTIR 光谱仪所采的干涉图上的位置,然后使用区域中值滤波算法,对该噪声出现位置前后一段干涉图做中值滤波处理,来减小或去除干涉图上由恒流注束引入的噪声,减小该噪声对 FTIR 光谱仪所测光谱的影响。计算结果表明,使用区域中值滤波算法可基本消除由 Top-Up 引入的噪声,减小甚至消除 Top-Up 对同步辐射红外光谱测试的影响。

1 原理

对于时间敏感的实验,一个采样周期很少会遇到两次以上的注束。且由 Top-Up 引入的噪声出现在干涉图上的位置较随机,如图 2 所示^[6]。根据傅里叶变换原理,则该噪声会对光谱图形成一个周期性的调制,其调制频率由该噪声出现的位置决定,强度由该噪声的强度所决定。

因由 Top-Up 模式下注束引入的噪声是一种随

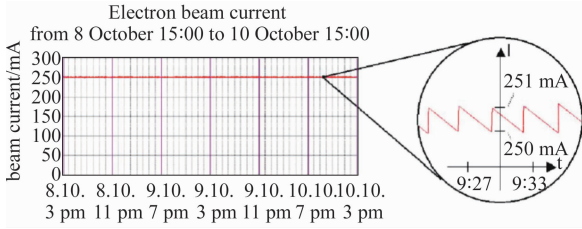


图1 上海光源恒流注束模式
Fig. 1 Top-off operation in Shanghai Synchrotron Radiation Facility

机的孤点噪声 (Spike), 在数字信号处理中, 一般使用中值滤波器去除该噪声. 中值滤波是一种非线性数字滤波器技术^[9], 常用于去除图像或者其它信号中的斑点或盐椒噪声^[10]. 其设计思想是检查输入信号中的采样并判断它是否代表了信号, 使用奇数个采样组成的观察窗实现这项功能, 中值滤波算法对观察窗口中的数值进行排序, 使用观察窗中的中值取代噪声点作为输出, 其定义为,

$$y = \text{med}(x_{K-N}, x_{K-N+1}, \dots, x_K \dots x_{K+N-1}, x_{K+N}) \quad (1)$$

上式中 med 表示中值操作, 其对滑动滤波窗口 (2N + 1) 内的数据点做大小排序, 滤波结果的输出的值为该序列的中值.

因 FTIR 光谱仪所采的干涉图中出现的因 Top-Up 模式下注束引入的噪声的数目较少, 如果对整个干涉图进行中值滤波, 则中值滤波算法有可能导致无噪声位置的干涉图受损, 从而引入额外的噪声. 比较可行的方法是使用中值滤波器对干涉图进行滤波, 通过对比原始干涉图和滤波后的干涉图, 定位噪声出现的位置, 然后对该数据点前后一定区域内的原始干涉图进行中值滤波, 以取代全干涉图滤波, 可在消减由 Top-Up 模式下注束引入之噪声的同时, 尽可能的减小中值滤波造成的光谱失真, 称之为区域中值滤波算法.

该区域中值滤波算法的流程如图 6 所示: (1) 程序首先读入所采样品的干涉图 (如无干涉图, 需要将光谱通过傅里叶变换转换为干涉图); (2) 然后对干涉图进行中值滤波, (3) 使中值滤波处理后的干涉图与同样使用中值滤波处理的无噪声的干涉图相减并取其绝对值, 如图 4 所示, 遍历所有数据点, 查找是否存在由 Top-Up 引入的噪声, 如图 5 所示; (4) 如果该噪声不存在, 则该干涉图无需处理, 直接写入存档文件, 读入下一个干涉图; (5) 如果存在该噪声, 则定位该噪声的位置, 对该噪声出现的位置前后一定区域的数据进行中值滤波处理, 并保存处理

数据; (6) 查询实验文件中是否有其他的干涉图, 如无则 (7) 保存处理结果, 退出程序, 如果存在, 则从步骤 (1) 开始执行.

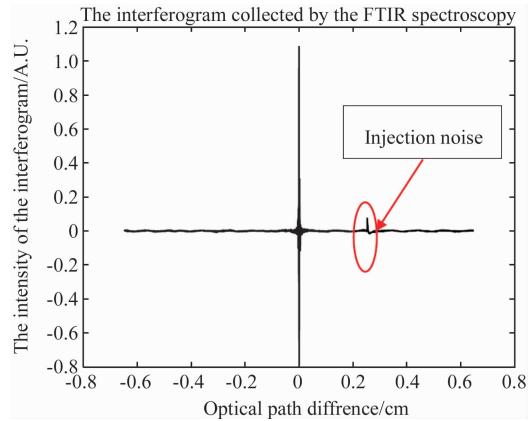


图2 FTIR 光谱仪所采干涉图以及由恒流注束引入的噪声
Fig. 2 The Interferogram collected by the FTIR spectroscopy and the noise induced by the constant current injection

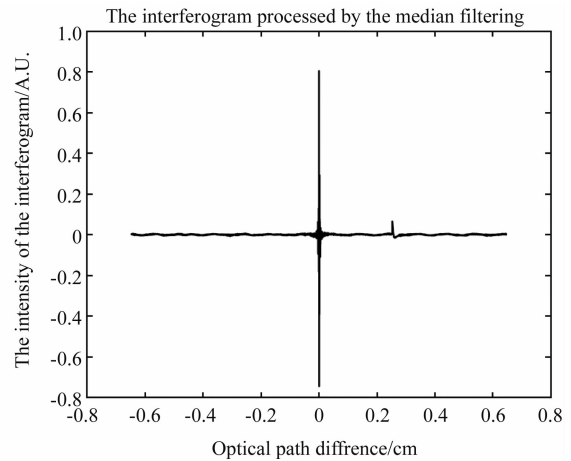


图3 中值滤波处理后的干涉图
Fig. 3 The Interferogram processed by the median filtering

2 计算结果

2.1 全干涉图中值滤波

在计算中使用图 2 中的干涉图, 该干涉图在上海同步辐射红外光源红外谱学显微线站 (BL01B1) 所采集. 首先对整个干涉图进行中值滤波处理, 如图 3 所示, 然后对滤波处理后的干涉图和未处理后的干涉图分别进行傅立叶变换, 可得到对应的光谱图, 如图 7 所示. 由图 7 可以发现, 由 Top-Up 模式下注束引入的噪声会对原始光谱产生一个周期性的调制, 其调制频率由该噪声出现位置所对应的光程差决定; 由于恒流注束持续的时间相对较长, 使该噪声的特征与孤点噪声有偏差, 且 FTIR 光谱仪所采干

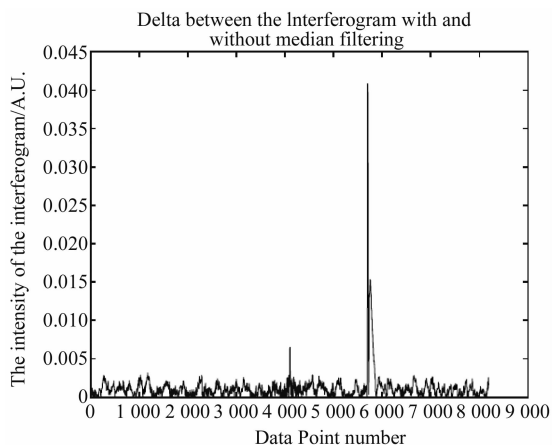


图4 经中值滤波处理后的干涉图的差值
Fig. 4 Delta between the Interferogram with and without noise using median filtering

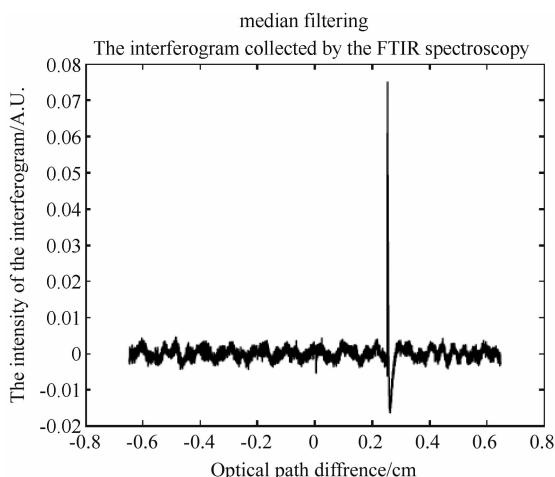


图5 由恒流注束引入的采样噪声
Fig. 5 The noise in the interferogram caused by the constant current injection

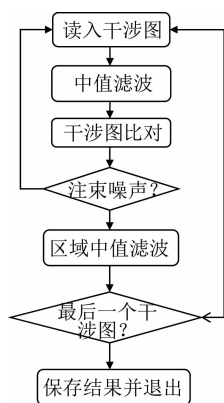


图6 恒流注束噪声区域中值滤波降噪流程图
Fig. 6 The flow chart of reduce the noise caused by constant current injection with median filtering

涉图并不是严格的周期性信号,使用全干涉图中值滤波并不能减小由 Top-Up 模式下注束引入的噪声,

但是干涉图在区域上表现的像周期性信号,理论上可以在噪声出现的一个小的采样范围内对干涉图进行中值滤波处理,以降低 Top-Up 模式下注束引入的噪声的影响。

2.2 干涉图区域中值滤波

区域中值滤波需先对全干涉图进行中值滤波处理,然后使用中值滤波算法,窗口大小为 5,处理后的干涉图(图 3 所示)与未使用中值滤波算法处理的干涉图相减,取其绝对值,如图 5 所示. 然后从该绝对差值中查找大于一定阈值(本文使用的是原始干涉图最大值的 1%,但这个数值需要根据实际测试时的仪器状态而定,原则是在不引入其他噪声(包括机械噪声,以及中值滤波算法自身带来的干扰)的情况下,包含所有 Top-Up 引入的噪声的点,保存该点的位置,然后使用中值滤波器对该点前后一定区域的干涉图进行中值滤波处理。

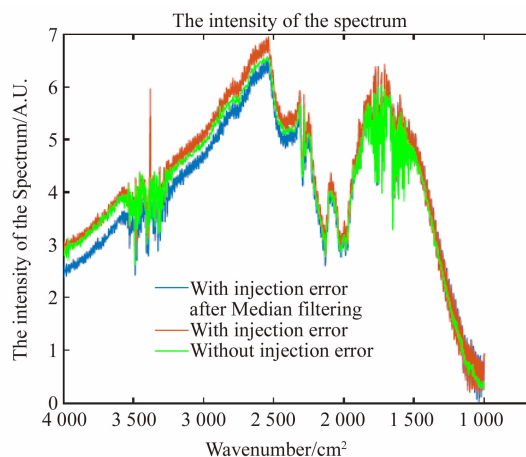


图7 全干涉图中值滤波后的光谱
Fig. 7 The spectrum after median filtering on the entire interferogram

本文所使用的干涉图中只包含一个由 Top-Up 模式引入的噪声,遍历后发现满足阈值要求位于干涉图的第 5696 至 5708 数据点,考虑到 Top-Up 模式引入噪声持续的时间,认为这些数据点的噪声是同一次注束所引入,进行一次区域滤波算法处理. 本文所用的区域滤波算法的数据点宽度为 80,区域中值滤波算法处理前后的干涉图以及无 Top-Up 模式下注束引入噪声的干涉图如图 8 所示,对比该图中 3 种情况下的干涉图,发现使用区域中值滤波算法,可将干涉图中由 Top-Up 模式下注束引入的噪声降低甚至消除,因该滤波算法作用的区域较窄,对区域外的干涉图无影响,理论上不会引入较大的光谱噪声。

对区域中值滤波前后的干涉图进行傅里叶变换

后,得到使用该方法处理前后的光谱图,如图 9,可以发现区域中值滤波算法可将 Top-Up 模式下注束引入的噪声基本消除,且该滤波处理算法未如同全域中值滤波算法一样,引起较大的光谱畸变.使区域中值滤波算法处理前后的光谱图相减,可以得到区域中值滤波算法消减的噪声,使用未处理的含有 Top-Up 引入的噪声和无 Top-Up 模式引入的噪声的光谱相减,可以得到由 Top-Up 模式引入的噪声,其结果如图 10 所示.使区域中值滤波算法处理前和处理后的光谱图与无 Top-Up 模式引入噪声的光谱图相减,可得到由 Top-Up 模式下注束引入的噪声和区域中值滤波算法处理后残余的噪声,使该噪声除以无 Top-Up 模式引入噪声的光谱,可得残余噪声以及原始噪声与无 Top-Up 模式引入噪声的比值,即残余噪声与信号之比 R_{ns} 为,

$$R_{ns} = \frac{I_{\text{Spectrum}} - I_{\text{Spectrum_without_injection_noise}}}{I_{\text{Spectrum_without_injection_noise}}} * 100\% \quad (2)$$

其中 I_{Spectrum} 为使用区域中值滤波算法处理前或处理后的含有 Top-Up 模式引入的光谱强度, $I_{\text{Spectrum_without_injection_noise}}$ 为无 Top-Up 模式引入噪声的光谱强度.其结果如图 11 所示,由图 10 和图 11 对比可见,区域中值滤波算法可基本消除由 Top-Up 模式下注束引入的噪声,且该算法带来的光谱噪声很小,基本可以忽略不计.

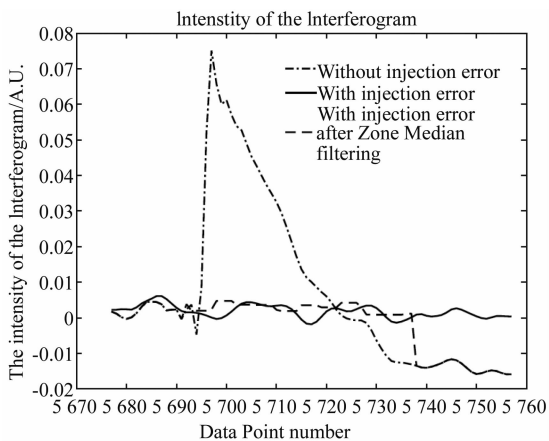


图 8 区域中值滤波后的干涉图
Fig. 8 The interferogram after Zone Median Filtering

3 结论

根据同步辐射红外光束线谱学以及谱学显微线站由 FTIR 光谱仪所采光谱中在加速器储存环 Top-Up 模式下由注束导致的波动引入的干涉图噪声的特点,提出使用区域中值滤波算法对 FTIR 光谱仪

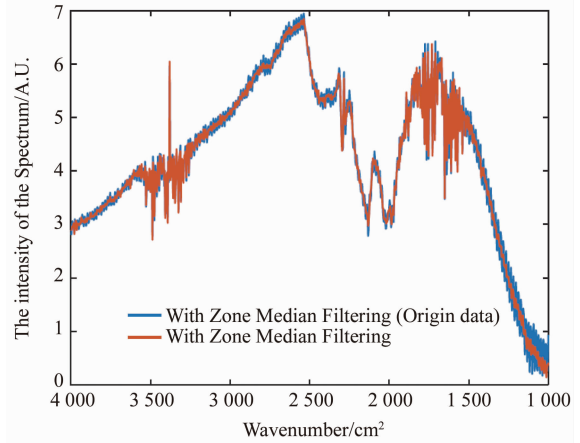


图 9 区域中值滤波后得到的光谱图
Fig. 9 The spectrum after Zone Median Filtering

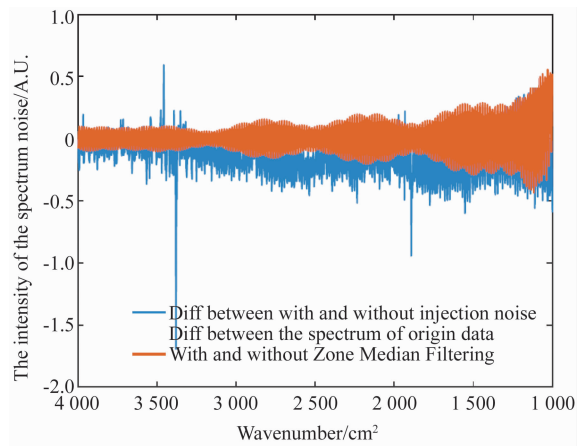


图 10 区域中值滤波去除的噪声
Fig. 10 The spectrum noise elimination by the Zone Median Filtering

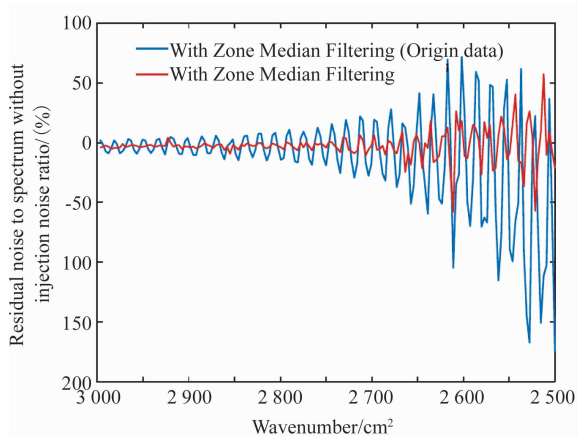


图 11 残余噪声和无 Top-Up 模式引入噪声的光谱之比
Fig. 11 Residual noise to the spectrum without injection noise ratio

所采的干涉图进行降噪预处理,并根据该噪声的特点和滤波算法的处理过程,建立了一套自适应去除

该噪声的流程;该算法的计算结果表明,使用区域中值滤波算法,可减小甚至消除由 Top-Up 模式下注束引入的噪声对所测光谱的影响.且该算法和处理流程具有自适应,处理过程无需人工干预.可提高同步辐射红外谱学以及显微谱学实验测试的信噪比,使之可以更好的适用于快速时间分辨实验测量(如快扫光谱模式).

References

- [1] Martin M C, McKinney W R. The first synchrotron infrared beamlines at the advanced light source; Microspectroscopy and fast timing [C]. *proceedings of the MRS Proceedings*, F, 1998. Cambridge Univ Press.
- [2] Kimura H, Moriwaki T, Takahashi S, *et al.* Infrared beamline BL43IR at Spring-8: design and commissioning [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2001, **467**:441-444.
- [3] Roy P, Rouzières M, Qi Z, *et al.* The AILES infrared beamline on the third generation synchrotron radiation facility SOLEIL [J]. *Infrared physics & technology*, 2006, **49** (1): 139-146.

- [4] Dumas P, Polack F, Lagarde B, *et al.* Synchrotron infrared microscopy at the French Synchrotron Facility SOLEIL [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, **49** (1-2): 152-160.
- [5] Ph L, Quaroni L, Wambach J, *et al.* IR beamline at the Swiss Light Source [C]. *proceedings of the Journal of Physics: Conference Series*, F, 2012. IOP Publishing.
- [6] Gu M, Chen Z, Ouyang L, *et al.* The operation of injection system in the SSRF [C]. *proceedings of the International Particle Accelerator Conference, IPAC'10*, Kyoto, Japan, F May 23, 2010.
- [7] Vernoud L, Bechtel H A, Borondics F, *et al.* Reconciling FTIR spectroscopy with top-off operations at the Advanced Light Source [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, - (1):
- [8] TONG Ya-Jun, CHEN Min, JI Te, *et al.* System and method for removing influence of TOP-Up mode on a synchrotron radiation infrared beam line station [P]. CN104390704A [P/OL] (佟亚军, 陈敏, 吉特, 等. 去除恒流注入对同步辐射红外光束线站影响的系统及方法. CN104390704A [P/OL]). 2014-2014-11-17.
- [9] Tukey J W. *Exploratory data analysis* [M]. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1977.
- [10] Arce G R. *Introduction* [M]. Nonlinear Signal Processing. John Wiley & Sons, Inc. 2005: 1-14.

(上接第 250 页)

- [17] Meng F, Gao S, Wang Y, *et al.* Efficient dispersive waves generation from argon-filled anti-resonant nodeless fiber [C]. *CLEO_SI*. 2017. *STu3K.4.*, 2017.
- [18] Debord B, Alharbi M, Vincetti L, *et al.* Multi-meter fiber-delivery and pulse self-compression of milli-Joule femtosecond laser and fiber-aided laser-micromachining [J]. *Opt. Express*, 2014, **22**(9):10735-10746.
- [19] Guichard F, Giree A, Zaouter Y, *et al.* Nonlinear compression of high energy fiber amplifier pulses in air-filled hypocycloid-core Kagome fiber [J]. *Opt. Express*, 2015, **23**(6):7416-7423.
- [20] Mak K F, Seidel M, Pronin O, *et al.* Compressing μJ -level pulses from 250 fs to sub-10 fs at 38-MHz repetition rate using two gas-filled hollow-core photonic crystal fiber stages [J]. *Opt Lett.*, 2015, **40**(7): 1238-1241.
- [21] Joly N Y, Nold J, Chang W, *et al.* Bright spatially coherent wavelength-tunable deep-UV laser source using an Ar-filled photonic crystal fiber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, **106**(20): 203901.
- [22] ZHOU Y Z, HUANG L L, Chai L, *et al.* The beam combination of multi-core photonic crystal fiber by using the Kagome fiber [J]. *Acta Phys. Sin.*, (周雨竹, 黄莉莉, 柴路, 等. 利用 Kagome 光纤实现多芯光子晶体光纤的输出合束. *物理学报*) 2016, **65**(2): 024206.
- [23] Litchinitser N M, Dunn S C, Usner B, *et al.* Resonances in microstructured optical waveguides [J]. *Opt Express*, 2003, **11**(10): 1243-1251.
- [24] Chang W, Nazarkin A, Travers J C, *et al.* Influence of ionization on ultrafast gas-based nonlinear fiber optics [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(21): 21018-21027.
- [25] Couairon A, Brambilla E, Corti T, *et al.* Practitioner's

- guide to laser pulse propagation models and simulation [J]. *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2011, **199**(1): 5-76.
- [26] Kolesik M, Moloney J V. Modeling and simulation techniques in extreme nonlinear optics of gaseous and condensed media [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2014, **77**(1): 016401.
- [27] Sinkin O V, Holzlohner R, Zweck J, *et al.* Optimization of the split-step fourier method in modeling optical-fiber communications systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1): 61-68.
- [28] Husakou A V, Herrmann J. Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(20): 203901.
- [29] Archambault J L, Black R J, Lacroix S, *et al.* Loss calculations for antiresonant waveguides [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(3): 416-423.
- [30] Vincetti L, Setti V. Waveguiding mechanism in tube lattice fibers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(22): 23133-23146.
- [31] Borzsonyi A, Heiner Z, Kalashnikov M P, *et al.* Dispersion measurement of inert gases and gas mixtures at 800 nm [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(27): 4856-4863.
- [32] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2013.
- [33] Balciunas T, Fourcade-Dutin C, Fan G, *et al.* A strong-field driver in the single-cycle regime based on self-compression in a kagome fibre [J]. *Nat. Communications*, 2015, **6**: 6117.
- [34] Nazarkin A, Korn G. Pulse self-compression in the subcarrier cycle regime [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(23): 4748-4751.