

基于小波变换的干涉光谱信号检测与校正方法

孟鑫*, 刘磊, 江升, 张冰, 李志增

中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555

摘要 傅里叶变换光谱仪通过获取待测光的干涉信号来反演光谱信息, 是重要的光谱测试与分析仪器。受光电探测电路不稳定、干涉模块装调不到位等因素的影响, 傅里叶变换光谱仪获得的干涉光谱信号会出现漏采点、过饱和点、噪声点等无效数据点, 导致反演的光谱信号出现失真。为此, 研究了一种基于小波变换的干涉光谱信号检测方法, 该方法能够快速有效地定位干涉信号中多种无效数据点的位置; 在此基础上, 研究了干涉光谱信号的校正方法, 根据无效点所在区间的信号特征, 通过样条插值方法进行数据拟合, 校正干涉光谱信号。通过仿真验证了本方法的可行性; 搭建了近红外波段傅里叶变换光谱实验系统, 并基于该系统进行验证性实验, 对获得的干涉信号进行检测与校正, 提高了反演光谱信号的准确性。

关键词 光谱学; 傅里叶变换光谱仪; 干涉条纹检测; 小波变换

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0930007

Detection and Revision of Interference Spectral Signals Based on Wavelet Transforms

Meng Xin*, Liu Lei, Jiang Sheng, Zhang Bing, Li Zhizeng

Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, The 41st Research Institute of
China Electronics Technology Group Corporation (CETC), Qingdao, Shandong 266555, China

Abstract Fourier transform spectrometry is an important device in spectral testing and analysis, which reconstructs a spectrum from a captured interference spectral signal. Invalid data points of the interference spectral signal, such as missing sampling points, oversaturation points, and noise points, arise from the photoelectric detection circuit's instability and inadequate installation of interference module, and the recovery spectrum from an interference spectral signal containing such invalid data points causes distortion. Hence, a method for testing interference spectral signals is proposed using wavelet transforms, wherein invalid data points are quickly and effectively located, and a method for revising the interference spectral signal is researched based on interference signal characteristics of the interval where invalid data points are located. Spline interpolation is used for data fitting, and the interference spectral signal is revised accordingly. The feasibilities of both proposed methods are verified via simulation, and they are validated using a near-infrared Fourier transform spectrometer prototype. Thus, interference signals of the prototype are tested and revised to improve the accuracy of the recovery spectral signal.

Key words spectroscopy; Fourier transform spectrometer; interference fringe test; wavelet transform

OCIS codes 300.6300; 120.2650; 120.3180

1 引 言

傅里叶变换光谱仪是重要的光谱测试仪器, 主要用于获取红外波段光谱, 具有高通量、多通道等优点^[1], 在物质分析、生命科学、航空航天遥感等领域具有重要的应用价值^[2-4]。与色散型光谱仪不同, 傅

里叶光谱仪不能直接获取光谱信息, 它先是检测待测光的干涉信息, 然后利用傅里叶变换来反演光谱信息。当傅里叶变换光谱仪的光机系统、扫描系统不稳定时, 或光电转换系统存在瑕疵等情况下, 干涉光谱信号就会出现漏点、坏点、过饱和点等无效数据点。对含有无效数据点的干涉信号进行傅里叶变

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-03-25; 录用日期: 2019-05-21

基金项目: 安徽省自然科学基金(1808085QF201)、装备预研领域基金(JZX720190243015101、JZX720190256052201、JZX720190254046101)

* E-mail: njustmengxin@163.com

换,会导致重构光谱信号出现畸变,影响复原精度^[5]。因此,干涉光谱信号的准确性会直接影响复原光谱的精度,需要对其获取的干涉信号进行检测,对于存在瑕疵的干涉条纹进行校正。当坏点明显区别于周围信号时,可以通过观察干涉条纹进行人工排除,但对于漏点、零光程差附近功率异常点等坏点,则很难通过人工排查,需要通过专门的算法进行排查。

傅里叶变换光谱仪获取的干涉信号是不同频率光波正弦信号的叠加,干涉光谱信号的特征与待测光谱特征密切相关,不同带宽、形状的待测光谱信息,对应的干涉条纹差别较大,采用传统的正弦条纹检测方法无法有效检测傅里叶变换光谱仪获取的干涉信息。小波变换是一种时间-频率分析方法,具有多分辨率分析的特点,在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力,是分析信号位置和频率特性的有效“工具”^[6]。利用小波变换可以直接检测干涉条纹中过饱和点的位置,但却无法有效检测漏采样点和光强坏点^[7]。

2 基本原理

2.1 干涉光谱信号检测方法

傅里叶变换光谱仪获取的干涉信号由多组正弦信号叠加而成,呈振荡分布,对干涉信号进行一阶求导,然后再进行小波变换处理,就可以检测干涉条纹中的漏采样点、坏点、过饱和点等无效点。干涉光谱信号的小波变换为

$$W_T(a, \tau) = \langle I'(\Delta), \varphi_{a,\tau}(\Delta) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R I'(\Delta) \varphi_{a,\tau}^* \left(\frac{\Delta - \tau}{a} \right) d\Delta, \quad (1)$$

式中: $I'(\Delta)$ 为干涉光谱信号的一阶导数; Δ 为光程差; $\varphi_{a,\tau}(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi_{a,\tau} \left(\frac{\Delta - \tau}{a} \right)$ 代表一类小波函数族,其中 a 和 τ 代表小波变换后两个域特征量,称为母小波,该函数必须要满足一定的条件,且不唯一^[8]; $*$ 表示复共轭; W_T 为干涉信号的小波分解函数; R 为小波变换域。干涉信号经过一阶求导后,既能消除干涉信号中直流项对检测的干扰,又能将无效点的信号进行放大,有利于发现无效点的位置。

小波变换的特点决定了它可以根据不同的应用场合选择合适的小波母函数,这里选择 Morlet 函数作为检测函数。Morlet 小波是一个 Gauss 包络的复小波函数,是 Gabor 小波的一个特例,1982 年

Morlet 首次将其用于地震信号的分析中^[9]。该函数在时-频域上有良好的分辨率,应用领域较为广泛。Morlet 小波函数的解析式为

$$m(t) = \exp(j2\pi f_c \Delta) \exp(-\Delta^2 / f_b), \quad (2)$$

式中: t 为小波变换后 Δ 对应的频域信号; f_c 为小波的中心频率; f_b 为带宽参数。 f_b 越小,波形衰退得越快,带宽越宽,直至逼近一个脉冲函数; f_b 越大,波形衰减得越慢,带宽越窄,最后退化成一个余弦函数。因此,在用 Morlet 小波进行坏点检测时需要选择合适的 f_c 和 f_b 参数。经过小波变换后,提取高阶小波变换后的函数,并提取其强度值,无效点位置的光强会出现明显的异常,数值远大于左右两个相邻峰值点对应的数值。根据这一特点,可以有效地确定无效点的位置。

2.2 干涉光谱信号的校正方法

在利用小波变换定位无效点后,需要对无效点进行修补,目前通常采用曲线拟合后插值的方法。常用的拟合插值方法主要有多项式拟合方法和样条插值拟合方法。在傅里叶变换光谱仪干涉信号校正中,以上两种方法都可以使用。单色光的干涉信号为正弦曲线,复色光的干涉信号是不同频率正弦函数的叠加,能量主要集中在零光程差附近,随着光程差增大,信号幅值呈明显的振荡衰减。样条拟合插值方法可以看作是分段多项式拟合,三次样条拟合更适合用来对这类振荡信号进行插值。

三次样条拟合函数相对简单,拥有连续的二阶导数,不仅可以用于内插值,还可以适用于外插值,可以自动延展插值范围,三次样条拟合函数定义为:若函数 $f(\Delta) \in C^2[\Delta_1, \Delta_2]$, C 为干涉光程差区间范围,且在该区间段内的每个小区间中,至少一个区间满足三次多项式

$$f_j(\Delta) = a_1 \Delta^3 + a_2 \Delta^2 + a_3 \Delta + a_4, \quad (3)$$

式中: $f_j(\Delta)$ 为小区间内的拟合函数, j 为区间内拟合函数的标号; $a_1 \sim a_4$ 为拟合函数的系数。 Δ 为光程差,则 $f(\Delta)$ 为给定区间范围内的三次样条函数。三次样条函数除了要求各个节点处的插值函数与原函数相等之外,还要求 $[\Delta_1, \Delta_2]$ 内的节点满足连续性条件以及边界条件^[10]。样条函数拟合插值要求已知数据分布相对均匀,因此对于缺失的干涉信号,宜采用外插值方法进行拟合。

对干涉条纹进行校正后,在进行离散傅里叶变换前,还需要进行一系列预处理,包括去趋势项、切趾、相位校正等。除了这些常规的过程,对于小双边干涉条纹,还需要利用特殊窗函数进行

处理。为了降低离散傅里叶变换的栅栏效应,在进行离散傅里叶变换前还需要进行补零。干涉条纹经过预处理后,再通过傅里叶变换即可复原物点的光谱信息。

3 仿真实验与分析

为验证利用小波变换方法检查干涉信号无效点的有效性以及三次样条拟合插值方法校正干涉条纹的效果,本文进行了仿真实验。设傅里叶变换光谱仪的探测波数为 $1000 \sim 25000 \text{ cm}^{-1}$ ($400 \sim 10000 \text{ nm}$),干涉信号对应的光程差为 $-0.5 \sim 0.5 \text{ mm}$,采样间隔为 25 nm 。

3.1 干涉信号无效点检验仿真实验的结果与分析

傅里叶变换光谱仪获取的干涉信号波形与待测谱型相关,为模拟不同光谱波形干涉信号的检测能力,对具有不同光谱波形的两个干涉条纹进行仿真。两个光谱波形对应的谱型宽度不同,如图 1 所示。

干涉信号中在靠近零光程位置以及远离零光程位置均出现了无效点,如图 2 所示。无效点分别位于干涉条纹序列的第 10000 个点和第 19990 个点,对应的光程差分别为 -0.250000 mm 与 -0.000025 mm 。

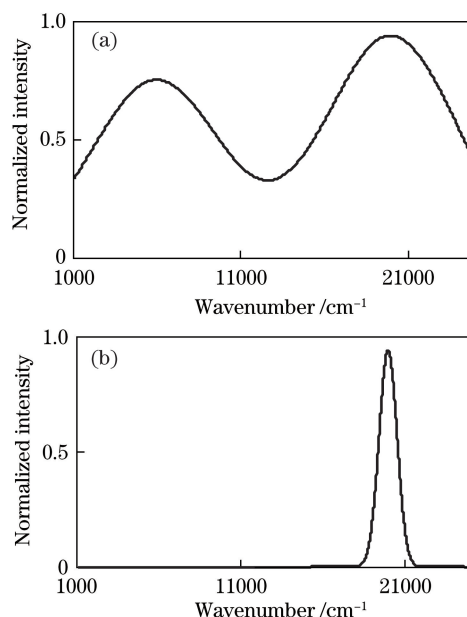


图 1 两组模拟的光谱信号。(a)宽带光谱曲线;(b)窄带光谱曲线

Fig. 1 Two simulated spectral signals. (a) Broad-band spectral curve; (b) narrow-band spectral curve

对干涉信号进行一阶求导后,利用 Morlet 小波对干涉信号进行处理,小波中心频率设置为远小于干涉信号的采样频率,小波变换尺度为 $1 \sim 15$ 。

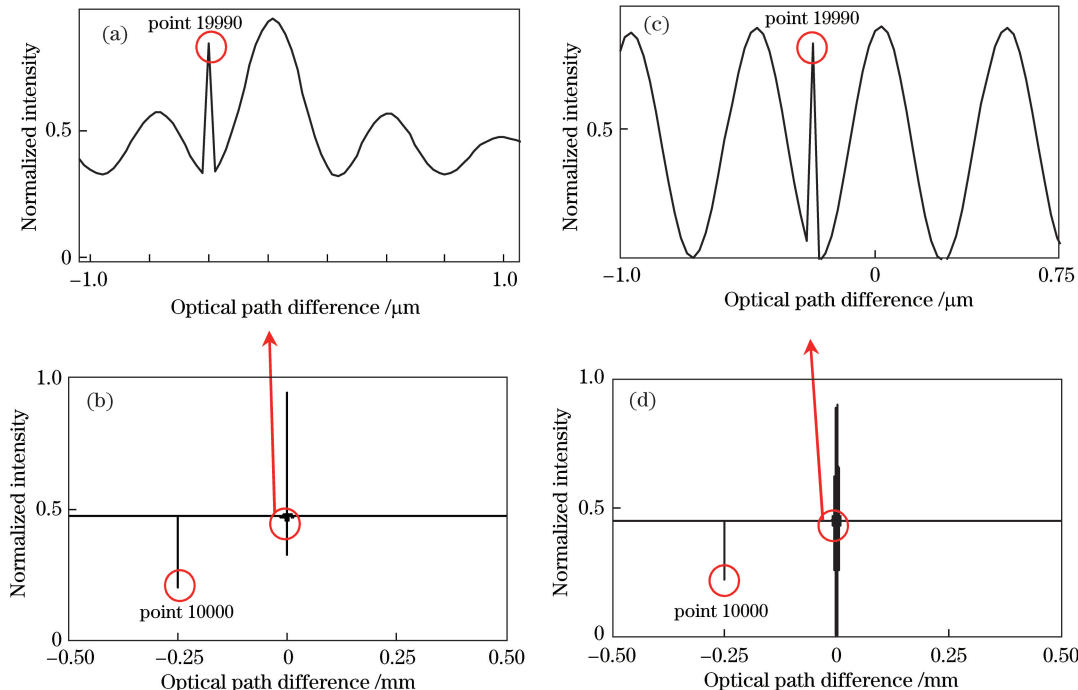


图 2 两组模拟光谱信号中的无效点。(a)宽带光谱干涉条纹的局部放大图;(b)宽带光谱干涉条纹;(c)窄带光谱干涉条纹的局部放大图;(d)窄带光谱干涉条纹

Fig. 2 Invalid data points of two simulated spectral signals. (a) Local magnification of broad-band spectrum interference fringe; (b) broad-band spectrum interference fringe; (c) local magnification of narrow-band spectrum interference fringe; (d) narrow-band spectrum interference fringe

Morlet 小波变换后得到的矩阵的行数为 15, 对小波变换后的矩阵求模, 取第 15 阶对应的数据曲线, 如图 3 所示。由图 3 可知, 在小波变换后的干涉信号

中, 无效点位置对应的强度值明显增强, 其数值远大于左右两个相邻峰值点对应的数值。根据这一特点, 可以有效定位无效点。

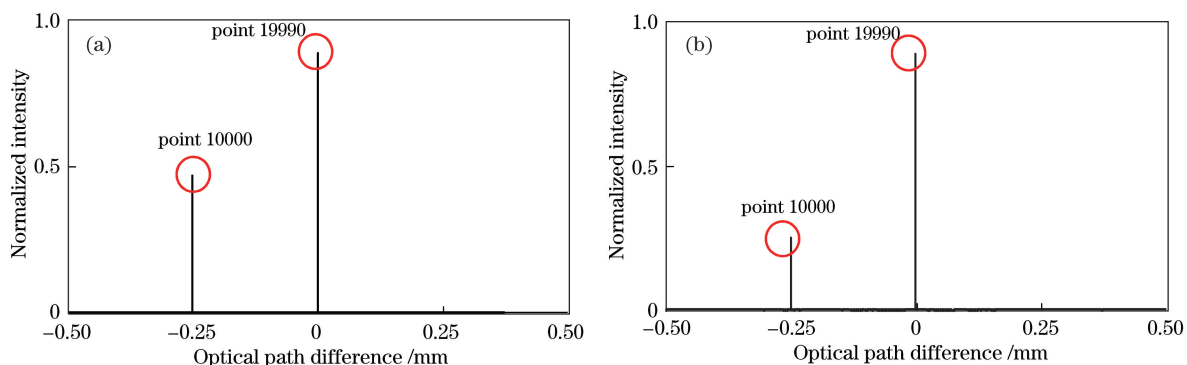


图 3 干涉信号小波变换后第 15 阶对应的信号。(a) 宽带光谱小波信号; (b) 窄带光谱小波信号

Fig. 3 15th-order corresponding signal after wavelet transform of interferometer signal.

(a) Broad-band spectrum wavelet signal; (b) narrow-band spectrum wavelet signal

漏采样是推扫式傅里叶变换光谱仪的干涉数据可能出现的情况, 尤其是在傅里叶变换光谱仪的开发调试过程中, 需要判断是否存在漏采样的情况。对干涉信号进行小波变换同样也能发现漏采样的情况。当漏采样位置远离零光程差位置时, 去直流项后, 其对干涉信号的影响不大;

当漏采样位置离零光程差位置较近时, 对干涉信号的影响较大。设图 1 中第一组光谱对应的干涉信号在零光程差附近位置存在漏采样情况, 对应的干涉信号如图 4 所示, 漏采样点位于干涉信号序列中的第 19985 个点, 对应的光程差为 -0.000375 mm。

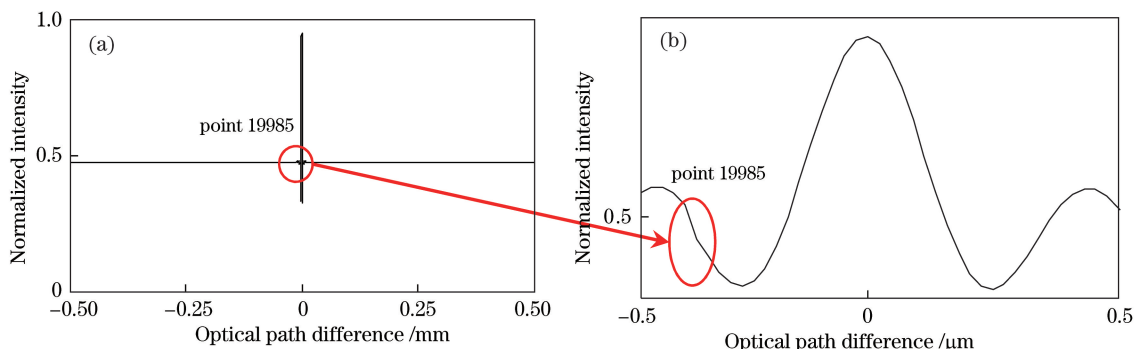


图 4 存在漏采样的干涉信号。(a) 完整信号; (b) 局部放大信号

Fig. 4 Interference signal with missing sample point. (a) Complete signal; (b) locally amplified signal

漏采样对干涉信号波形的影响不如其他无效点明显, 但是如果不进行数据检测, 不对漏采样点进行处理, 同样也会导致复原光谱出现误差, 如图 5 所示 (实线为模拟光谱信号, 虚线为存在漏采样时复原的光谱)。与模拟光谱信号相比, 复原光谱出现了明显的畸变。

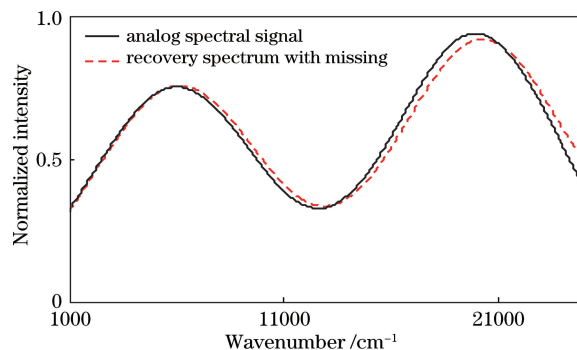


图 5 由漏采样的干涉信号得到的复原光谱

Fig. 5 Recovery spectrum of interferometer signal with missing sample point

利用 Morlet 小波对干涉信号的一阶导数进行处理, 取第 15 阶对应的数据曲线, 如图 6 所示。可见, 漏采点处的强度明显增强, 其值远大于左右两个相邻峰值点对应的数值。根据这一特点, 可以有效定位漏采点。

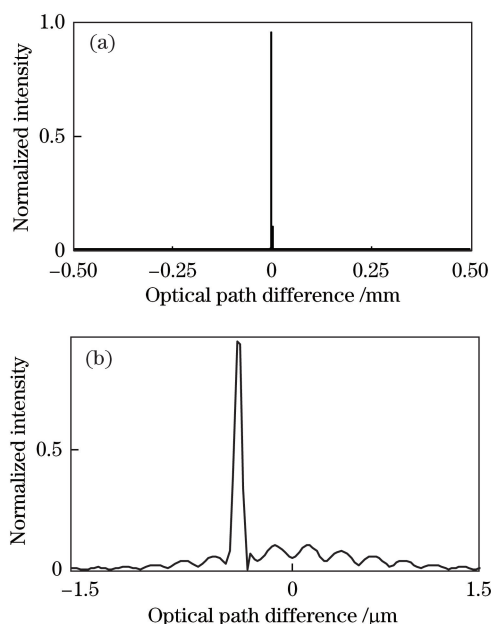


图 6 存在漏采样点的干涉信号经小波变换后第 15 阶对应的信号。(a)完整信号;(b)局部放大信号
Fig. 6 15th-order corresponding signal of interference signal with missing sample point after wavelet transform. (a) Complete signal; (b) locally amplified signal

3.2 干涉信号校正的仿真实验与分析

采用三次样条拟合校正方法对干涉信号中的无效点进行校正。复色光干涉信号呈现出类周期性振荡,虽然干涉信号的调制度明显降低,但振荡周期在整个区间变换缓慢。因此,采用三次样条拟合干涉信号时,只需要覆盖 1~2 个振荡周期即可。利用三次样条拟合方法对图 2 所示的两个干涉信号中无效点之前的 20 个点进行三次样条拟合,然后通过外插值方法计算得到第 21 个点数据作为无效点的校正信号。校正后的两个无效点位置的强度值与图 1 中的模拟值如表 1 所示。经拟合校正后,干涉信号中无效点位置的强度值偏差控制在 5%左右。拟合精度与干涉信号的采样精度有关,随着干涉信号采样精度的提高,拟合精度会进一步提高。

表 1 校正后无效点位置的强度值与模拟值

Table 1 Intensity values at invalid data points after revision and simulated values

Band	Point number	Simulated intensity	Revised intensity	Accuracy / %
Broad-band	10000	2086.6130	2086.6075	0.00026
	19990	942.6276	947.126	0.48
Narrow-band	10000	205.9405	205.9210	0.0095
	19990	9.0608	9.5608	5.5

经傅里叶变换后重构的光谱图像如图 7 所示,可见,对校正后的干涉信号再进行傅里叶变换处理得到的光谱信号与给定的光谱数据重合较好。复原光谱误差如图 8 所示,仿真实验中第一组模拟光谱复原的相对误差在 0.03%以内,第二组模拟光谱复原的相对误差在 0.01%以内。

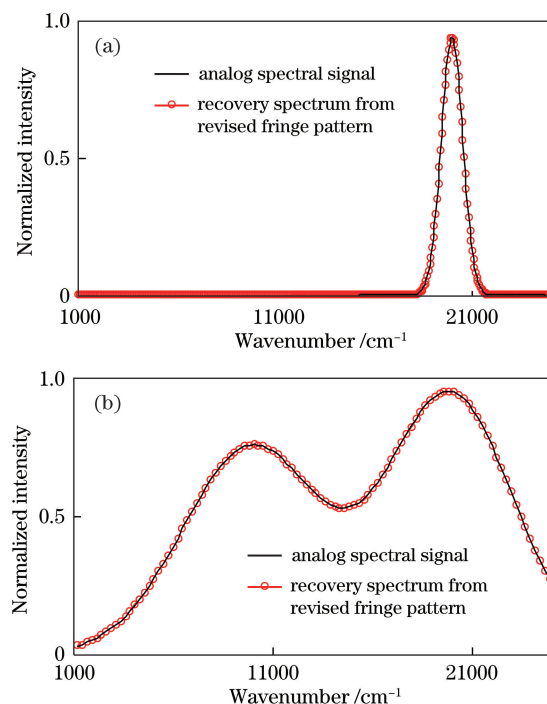


图 7 由校正的干涉信号复原得到的光谱信息。
(a)宽带光谱曲线;(b)窄带光谱曲线

Fig. 7 Recovery spectral information from revised interference signal. (a) Broad-band spectral curve; (b) narrow-band spectral curve

4 实验结果与分析

利用自主设计搭建的近红外傅里叶变换光谱测试实验系统验证干涉信号检测和校正方法的可行性。实验系统由光机模块、伺服控制系统、光电探测系统和主机构成,原理如图 9(a)所示,实验系统如图 9(b)所示。采用变形 Sagnac 光路,在两个反射镜 M1、M2 中间加入双角锥反射镜。采用稳频氦氖激光器作为参考光源,参考光与待测光共光路,采用光敏探测器接收参考光信号,在过零点采样。实验系统的测试波段设置为 1250~2000 nm (5000~8000 cm⁻¹),采用钢镓砷探测器作为待测光探测器,角锥最大推扫行程为 20 mm。实验系统采用变形 Sagnac 干涉结构,如图 9(c)所示。在 Sagnac 共光路干涉仪的两个反射镜中间加入两个角锥反射镜,通过移动两个角锥反射镜进行推扫。

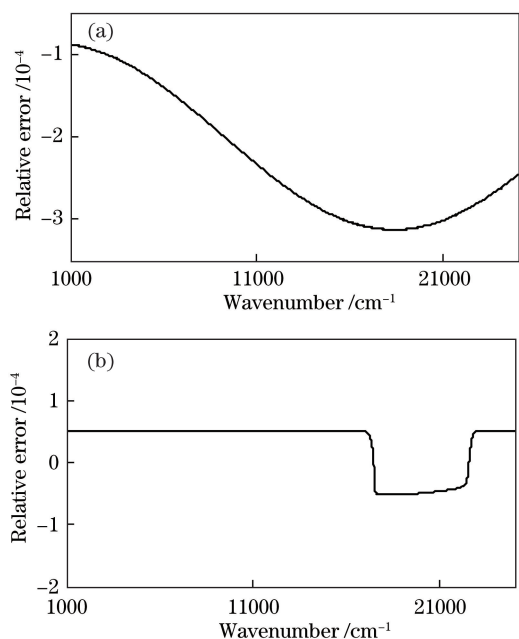


图 8 模拟干涉信号中复原光谱信号的相对误差。

(a) 宽带光谱误差曲线; (b) 窄带光谱误差曲线

Fig. 8 Relative errors of recovery spectral signal from simulated interference signal. (a) Broad-band spectral error curve; (b) narrow-band spectral error curve

利用实验系统对法布里-珀罗半导体激光器 (FP-LD; 中心波长在 1320 nm 附近) 进行测试, 设定最大光程差为 16 mm, 得到的干涉信号如图 10(a) 所示, 对应的复原光谱曲线如图 10(c) 中实线所示。在多次实验中发现, 增大采样速度会导致出现漏采样现象。利用小波变换检查系统, 获取干涉条纹, 提取干涉条纹中漏采样点位置, 如图 10(b) 所示, 为第 3865 个采样点。当直接对漏采样干涉信号进行傅里叶变换重构光谱后, 得到的光谱信号如图 10(c) 中的方格线所示, 明显偏离原光谱信号。利用样条插值方法在漏采样位置进行补偿, 然后对干涉信号进行傅里叶变换, 重构光谱如图 10(c) 中蓝色圆圈线所示, 复原光谱与原光谱信号基本重合。

未经修正的干涉信号复原光谱与原光谱之间的误差如图 11 中的虚线所示, 重构光谱误差达到了 8%, 修正后的干涉信号的复原光谱与原光谱之间误差如图 11 中的实线所示, 重构光谱误差在 0.5% 以内。这表明, 小波变换能够有效检测傅里叶变换光谱仪获取的干涉信号中的无效点, 通过三次样条插值能够有效校正无效点处干涉信号的光强, 经过傅里叶变换后复原光谱的误差得到有效控制。

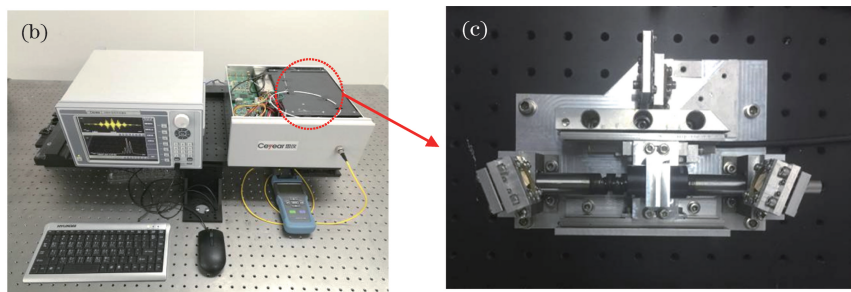
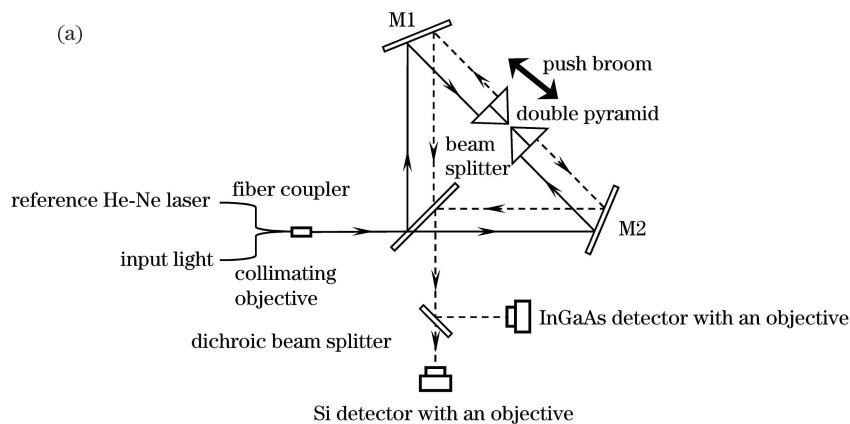


图 9 实验系统。(a) 原理图; (b) 完整的实验系统; (c) 干涉模块

Fig. 9 Experimental system. (a) Principle of system; (b) complete experimental system; (c) interference module

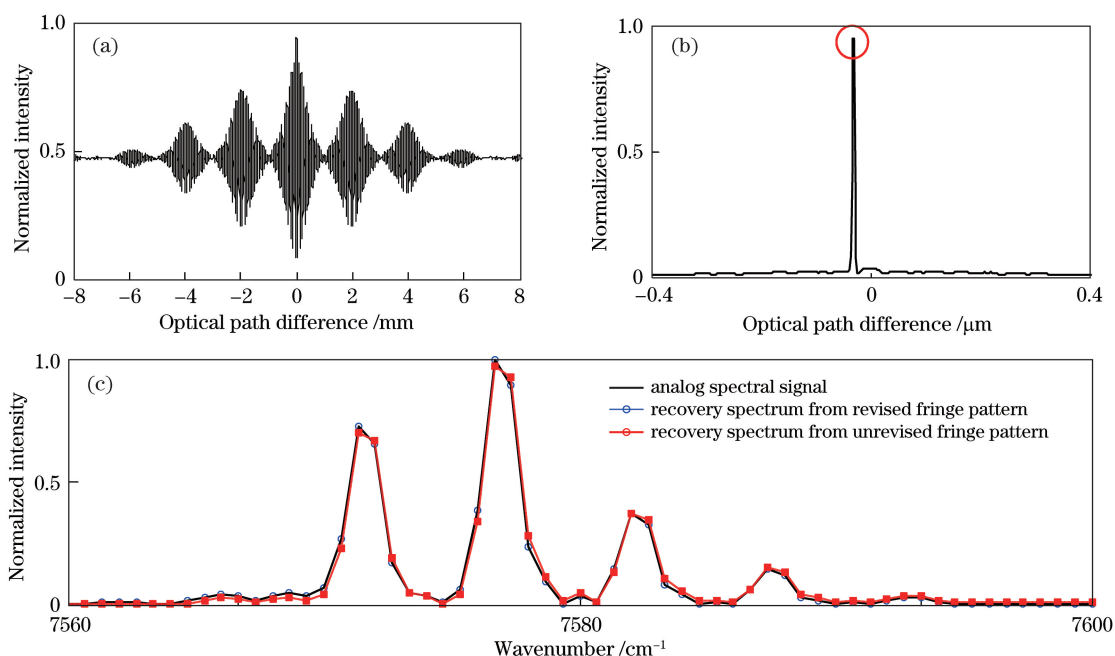


图 10 实验获得的干涉信号与复原光谱信号。(a)干涉信号;(b)小波变换信号;(c)复原光谱信号

Fig. 10 Interference signal captured by experimental system and recovery spectral signal. (a) Interference signal; (b) wavelet transform signal; (c) recovery spectral signal

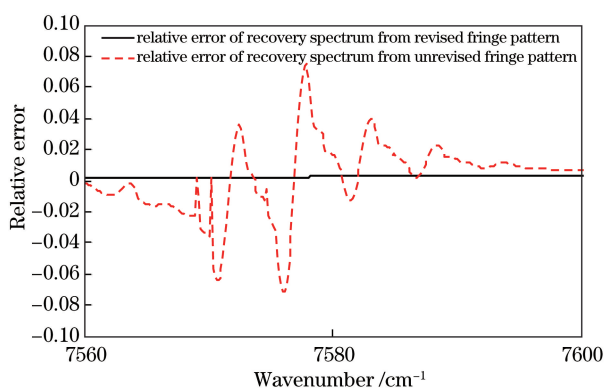


图 11 实验中复原光谱信号的相对误差

Fig. 11 Relative errors of recovery spectral signal from experimental interference signal

5 结 论

根据傅里叶变换光谱仪获取的待测光谱干涉信号的特点,对基于小波变换的干涉信号无效点检测方法进行了研究。先对干涉信号进行一阶求导,再进行 Morlet 小波变换。经过小波变换后,高阶小波信号中无效点位置对应的信号强度明显区别于其周围信号的强度,与相邻峰值数据之间存在明显差距,其数值远大于左右两个相邻峰值点对应的数值。根据这一特点,可以自动搜索无效点的位置。在此基础上,研究了干涉信号无效点位置光强的校正方法,采用三次样条插值函数对无效点前的一段数据进行

拟合,然后通过外插值方法对无效点位置的数据值进行拟合修补。在模拟仿真中,对校正后的干涉信号进行光谱复原,重构光谱的误差控制在 0.05% 以内。利用搭建的近红外波段傅里叶变换光谱实验系统对 FP-LD 光源(中心波长在 1320 nm 附近)进行测试,检测漏采样的情况,并进行干涉条纹校正。结果表明,复原光谱信号与不存在漏采样时的光谱信号基本一致,误差在 0.5% 以内。小波变换具有多尺度特性,适用于检测不同谱型对应的干涉信号中的多种无效点,包括光强畸变点、饱和点、坏点以及漏采样点等,在傅里叶变换光谱仪的研发、定期维护以及使用过程中,可以用于对干涉信号的检测与校正。

参 考 文 献

- [1] Berthomieu C, Hienerwadel R. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy[J]. *Photosynthesis Research*, 2009, 101(2/3): 157-170.
- [2] McParland S, Berry D P. The potential of Fourier transform infrared spectroscopy of milk samples to predict energy intake and efficiency in dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(5): 4056-4070.
- [3] Talari A C S, Martinez M A G, Movasaghi Z, *et al.* Advances in Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of biological tissues[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2017, 52(5): 456-506.
- [4] Vanek M D, Nolt I G, Tappan N D, *et al.* Far-infrared sensor for cirrus (FIRSC): an aircraft-based

- Fourier-transform spectrometer to measure cloud radiance[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(13): 2169-2176.
- [5] Yiu P, Keymeulen D, Berisford D, *et al.* Design and integration of an adaptive controller for a Fourier transform spectrometer[C]//2014 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS), July 14-17, 2014, Leicester, United Kingdom. New York: IEEE, 2014: 285-292.
- [6] Quiroga R Q, Nadasdy Z, Ben-Shaul Y. Unsupervised spike detection and sorting with wavelets and superparamagnetic clustering[J]. *Neural Computation*, 2004, 16(8): 1661-1687.
- [7] Latzko T. Spike detection and correction of interferograms recorded by an imaging Fourier transform spectrometer[C]//Fourier Transform Spectroscopy 2015, March 1-4, 2015, Lake Arrowhead, CA, USA. New York: IEEE, 2015: FW3A.4.
- [8] Yu Q, Zhao Y J, Yu F, *et al.* Method for terahertz time-domain spectral analysis based on wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 838-843.
余倩, 赵跃进, 于飞, 等. 一种基于小波变换的太赫兹时域光谱分析方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 838-843.
- [9] Huang S J, Hsieh C T, Huang C L. Application of Morlet wavelets to supervise power system disturbances[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, 14(1): 235-243.
- [10] Li Y, Li S, Gao M G, *et al.* Comparative study on two infrared interferogram acquisition and spectrum recovery methods[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0930005.
李妍, 李胜, 高闽光, 等. 两种红外干涉图采集及光谱复原方法的对比研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0930005.