

基于零阶贝塞尔函数加权的三角窗切趾函数

邓竞蓝^{1,2}, 童晶晶^{1*}, 高闽光¹, 李相贤¹, 李妍¹, 韩昕¹, 刘文清¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 傅里叶变换是干涉图分析处理的常用方法, 由于截断效应, 对样本数据直接进行傅里叶变换时会发生频谱泄漏, 常采用加切趾函数的方法减小泄漏。首先分析多种常见切趾函数的性能, 研究切趾函数主瓣宽度与旁瓣衰减对频谱泄漏的影响; 在此基础上, 提出一种基于零阶贝塞尔函数加权的三角窗切趾函数, 对三角窗函数加权, 使其旁瓣衰减加快。实验结果表明: 采用提出的改进的三角窗切趾函数能有效抑制频谱泄漏; 相比于三角窗, 改进的三角窗切趾函数平均峰-峰值信噪比提升了 4.9%, 方均根值信噪比提升了 3.5%, 优于常见窗中最优的布莱克曼窗。改进的三角窗切趾函数的主瓣宽度为 0.043π , 与汉宁窗接近, 具有较高的频率分辨率。

关键词 信号处理; 光谱分析; 改进的三角窗函数; 切趾函数; 干涉图; 傅里叶变换

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0307001

Improved Triangular Window Apodization Function Based on Zero-Order Bessel Function

Deng Jinglan^{1,2}, Tong Jingjing^{1*}, Gao Minguang¹, Li Xiangxian¹, Li Yan¹,
Han Xin¹, Liu Wenqing¹

¹Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The Fourier transform is commonly used in interferogram analysis. However, owing to the truncation effect, the direct application of Fourier transform for sampled data tends to cause spectral leakage. To address this problem, the apodization function is often adopted. In this paper, we first analyze the performances of different interferogram apodization functions. Then, the effects of the mainlobe width and sidelobe attenuation of the apodization functions on spectral leakage are studied. Finally, we propose an improved triangular window apodization function based on the zero-order Bessel function. It can accelerate the sidelobe attenuation by weighing the triangular window function. Results from extensive experiments show that the improved triangular window apodization function can effectively suppress energy leakage. When compared to the triangular window, this study suggests that the proposed method improves the mean of the peak-to-peak signal-to-noise ratio by 4.9% and the root mean square signal-to-noise ratio by 3.5%. In addition, these results are more accurate than that achieved using the Blackman window. Further, the mainlobe width of the improved triangular window apodization function is 0.043π , which is closed to that of the Hanning window. Therefore, our proposed method proffers a good frequency resolution.

Key words signal processing; spectral analysis; improved triangular window function; apodization function; interferogram; Fourier transform

OCIS codes 070.4790; 070.6020

1 引 言

傅里叶变换红外光谱技术^[1]主要利用不同物质

对不同波长的红外辐射的吸收特性来确定分子的组成和结构, 基于该项技术研制的傅里叶变换红外光谱仪^[2]常被应用于材料科学^[3]、环境监测^[4-6]等领

收稿日期: 2019-07-30; 修回日期: 2019-08-30; 录用日期: 2019-09-30

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-320)、国家自然科学基金青年科学基金(41605015)、安徽省自然科学基金面上项目(1708085MD94)

* E-mail: jjtong@aiofm.ac.cn

域。但是,利用该仪器采集信号时,只能采集部分样本数据^[7],由于原始信号频率和采样频率往往不同步,因此直接使用傅里叶变换会导致频谱能量泄漏^[8]。为减少频谱泄漏,可采用合适的切趾函数^[9]对信号进行处理。切趾的核心思想是在时域上对信号加窗,在频域上表现为卷积,卷积过程可以被看作是一组具有特定函数形状的滤波器的平滑过程,因而,切趾过程也能有效抑制杂散光、干涉仪动镜移动、制冷机振动等因素引入的噪声^[10]。

近年来,采用切趾函数处理光谱信号得到广泛研究。Norton等^[11]提出了一种适用于傅里叶光谱的切趾函数并详细讨论了三个特定的功能。在此工作的基础之上,Naylor等^[12]提出一组接近最优的切趾函数,该函数可在很大程度上保留 sinc 函数的正交特性,给定该切趾函数的主瓣宽度后,可以通过调整该函数的系数来使最大的旁瓣幅值达到最小,进而获得最优的旁瓣。相里斌等^[13]研究了一种小双边加权和大双边三角形切趾方法,这种方法能够保证复原光谱的准确性和切趾效果。张鹏等^[14]采用一种阶跃切趾函数对非对称干涉图进行加权处理,减小了光谱失真。陈洁婧等^[15]针对不同信噪比的干涉图,利用蒙特卡罗方法对不同线宽的不同切趾函数的优化反演结果进行分析。李晨等^[16]针对傅里叶变换带来的频谱泄漏和非同步采样带来的较大误差问题,分析了凯塞窗中影响函数旁瓣的 β 参数对信号幅值误差的影响。

针对便携式傅里叶变换红外光谱仪得到的干涉图进行切趾处理时,研究人员多采用汉宁窗、布莱克曼窗等,这些切趾函数具有一定的局限性,例如海明窗不能有效抑制频谱泄漏,布莱克曼窗不能有效保留细节信息。本文对便携式傅里叶变换红外光谱仪采集的信号进行干涉图切趾处理。分析多种常见切趾函数特性,研究主瓣宽度与旁瓣衰减程度对干涉图处理时的影响;在此基础上,提出一种基于零阶贝塞尔函数加权的三角窗切趾函数,利用零阶贝塞尔函数生成权重对三角窗进行加权处理,使其更加集中于主瓣。与常用三角窗相比,改进后的三角窗切趾函数的的主瓣略微增大,旁瓣衰减增加,能够有效抑制频谱泄漏,为光谱图保留更多的细节。

2 基本原理

2.1 干涉图切趾

傅里叶变换红外光谱仪中动镜的扫描距离受到限制,因此仪器只能采集截断的样本数据进行分析,

即在完整的干涉图信号上加矩形窗切趾函数对信号进行截取,该过程可以表示为

$$s_D(n) = s \times \text{rect}(n), \quad (1)$$

式中, n 为样本点数, s 为理想的无限长的信号, $\text{rect}(n)$ 为矩形窗切趾函数, $s_D(n)$ 为截断后的信号。经离散傅里叶变换得到红外光谱图,可表示为

$$S_D(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s_D(n) \times \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} kn\right), \quad (2)$$

$$0 \leq k \leq N-1,$$

式中, $S_D(k)$ 为截断后信号的频域表示, N 为总样本点数。由于采样频率与原始信号频率不同步, $S_D(k)$ 易发生畸变,产生频谱能量泄漏。为减少频谱能量泄漏,可采用切趾函数对截断后的时域信号进行加权:

$$s_Q(n) = s_D(n) \times w(n), \quad (3)$$

式中, $s_Q(n)$ 为切趾处理后信号的时域表示, $w(n)$ 为切趾函数的时域表示。根据傅里叶变换的卷积特性,(3)式也可写为

$$S_Q(k) = S_D(k) * W(k), \quad (4)$$

式中: $S_Q(k)$ 为切趾处理后信号的频域表示,即为所求的光谱图; $W(k)$ 为切趾函数的频域表示;* 表示卷积运算。在实际应用中,常选用三角窗、汉宁窗、海明窗、布莱克曼窗作为切趾函数。

2.2 改进的三角窗切趾函数

对便携式傅里叶变换红外光谱仪采集的信号进行研究,发现三角窗具有一定的优越性,主瓣宽度较小。但是,三角窗对频谱泄漏的抑制作用有限,为使三角窗能更高效地抑制频谱泄漏,本文提出一种基于零阶贝塞尔函数加权的三角窗切趾函数,通过对三角窗加权,使改进后的三角窗主瓣宽度与旁瓣衰减达到新的权衡。改进的三角窗切趾函数 $w(n)$ 可以表示为

$$w(n) = \text{triang}(n) \times q(n), \quad (5)$$

式中, $q(n)$ 为点数为 n 的权重, $\text{triang}(n)$ 为三角窗函数的离散形式。当总样本点数 N 为奇数时可以表示为

$$\text{triang}(n) = \begin{cases} \frac{2n}{N+1}, & 1 \leq n \leq \frac{N+1}{2} \\ 2 - \frac{2n}{N+1}, & \frac{N+1}{2} + 1 \leq n \leq N \end{cases}, \quad (6)$$

当 N 为偶数时可以表示为

$$\text{triang}(n) = \begin{cases} \frac{2n-1}{N+1}, & 1 \leq n \leq \frac{N}{2} \\ 2 - \frac{2n-1}{N}, & \frac{N}{2} + 1 \leq n \leq N \end{cases}. \quad (7)$$

三角窗切趾函数的主瓣小,旁瓣衰减较慢,采用 $q(n)$ 加权可使三角窗的能量集中到主瓣,旁瓣衰减增加。但是,主瓣过大也会使频率分辨率降低,损失重要的细节信息。因此, $q(n)$ 的本质是使加权后的三角窗在主瓣宽度与旁瓣衰减之间取得新的权衡,在提升三角窗旁瓣衰减的同时,要有相对较小的主瓣。受凯塞窗函数^[17]的设计启发,本文用第一类修正的零阶贝塞尔函数设计权重 $q(n)$, $q(n)$ 可以表示为

$$q(n) = \frac{I_0 \left[2 \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2n}{N-1} \right)^2} \right]}{I_0(2)}, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (8)$$

式中, $I_0(\cdot)$ 表示第一类修正的零阶贝塞尔函数,表达式为

$$I_0(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left(\frac{z^2}{4} \right)^i / [i! \Gamma(i+1)] \right\}, \quad (9)$$

式中, z 表示输入参数, $q(n)$ 等效为 β 为2的凯塞窗函数, $\Gamma(\cdot)$ 表示伽马函数。由图1可以看出:在时域上, $q(n)$ 加权后的三角窗略微向内凹陷;在频域上,改进后的三角窗主瓣宽度略微增大,由 0.039π 增大为 0.043π ,与汉宁窗接近。可见,改进后的三角窗具有较高的频率分辨率,旁瓣衰减增加,抑制频谱泄漏效果增强。利用加权后的三角窗对截断的光谱信号进行切趾,将(2)、(3)、(5)、(8)式代入(4)式,可得

$$S_Q(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ s_D(n) \cdot \text{triang}(n) \cdot \frac{I_0 \left[2 \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2n}{N-1} \right)^2} \right]}{I_0(2)} \right\} \exp \left(-j \frac{2\pi}{N} kn \right), \quad (10)$$

式中, $S_Q(k)$ 为利用加权后的三角窗对截断的输入信号进行切趾处理得到的光谱。

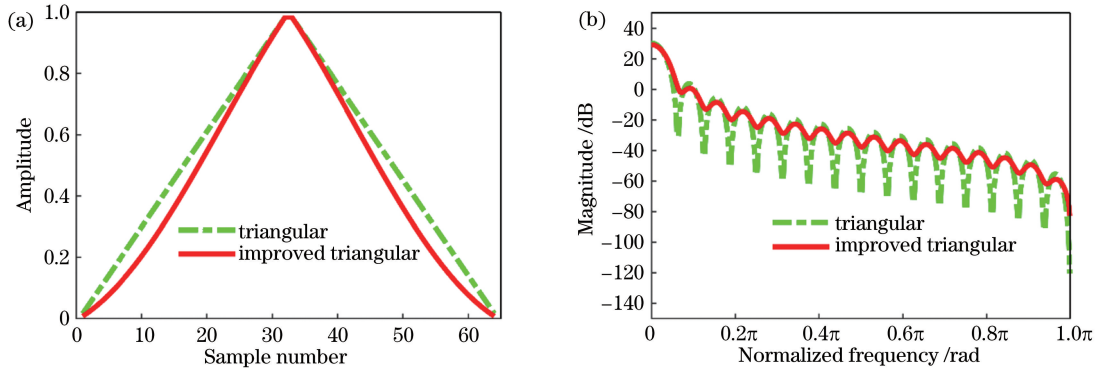


图1 三角窗及改进后的三角窗切趾函数时频域分析图。(a)时域;(b)频域

Fig. 1 Time-frequency domain analysis of triangular window and improved triangular window apodization functions.

(a) Time domain; (b) frequency domain

2.3 评价指标

傅里叶变换光谱仪的性能通常用信噪比^[10]表示,选用 $2100 \sim 2200 \text{ cm}^{-1}$ 或 $2500 \sim 2600 \text{ cm}^{-1}$ 这两个不受空气中水汽和二氧化碳光谱影响的区间计算。常用的表示仪器噪声的方法有透射率法和吸光度法。本文采用透射率法,在 $100\% \tau$ 线上截取 $2100 \sim 2200 \text{ cm}^{-1}$ 波段分别计算 $100\% \tau$ 线上峰-峰值噪声 P 和方均根值噪声 R_{MS} 。峰-峰值信噪比 R_{SN-PP} 为

$$R_{SN-PP} = \frac{100}{P}, \quad (11)$$

方均根值信噪比 R_{SN-RMS} 为

$$R_{SN-RMS} = \frac{100}{R_{MS}}. \quad (12)$$

3 实 验

3.1 实验数据采集

本次实验数据采用自主研发的便携式傅里叶变换红外光谱仪获取。图2为便携式傅里叶变换红外光谱仪的工作原理图,该仪器是以迈克耳孙干涉仪为核心设计的一款能定量分析大气污染气体、监测大气环境的便携式仪器;干涉仪核心组成部件包括分束器、动镜和固定镜。如图2所示,红外光源发出的红外光通过分束器,理想状态下,50%的光反射到动镜后又反射回分束器,另外50%的光透过分束器到达固定镜再反射回分束器,以此形成光程差,发生干涉。当光程差为0时,从固定镜和动镜反射回分束器的两束光的相位相同,叠加后不发生干涉,光强为这两束光的强度之和。当动镜移动 $1/4$ 波长时,

光程差为半波长,此时两束光的相位相反,叠加后相互抵消,光强为0。当动镜再移动 1/4 波长时,光程差为一个波长,两束光的相位差为一个波长,相位相同,与零光程差时情况一样。当动镜匀速移动时,探测器检测到的信号强度呈余弦变化,形成干涉图。

图 2 所示的仪器运行过程如下:待测气体经采样头、过滤器到达多次反射吸收样品池内,同时红外辐射信号经光学系统准直后导入傅里叶变换红外光谱仪内,经光谱仪干涉调制后,再导入多次反射吸收

样品池内,从样品池导出的经干涉调制后的红外辐射信号携带有待测样品的吸收信息,将信号会聚到探测器上就可得到干涉图。

本文进行了三次实验,每次实验采集 160 组实验数据进行分析。考虑到设备开机后探测器尚未完全制冷而带来的信号波动,将前几组信号噪声较大的数据去除,取中间连续的 80 组,共计 240 组实验数据,每 16 组数据取一次平均并进行傅里叶变换,每次实验得到 5 组光谱图数据。

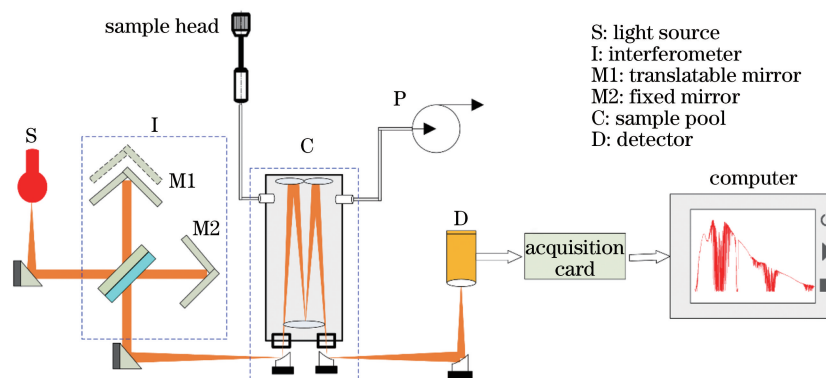


图 2 便携式傅里叶变换红外光谱仪工作原理示意图

Fig. 2 Working principle of portable Fourier transform infrared spectrometer

3.2 改进的三角窗切趾函数与其他常用切趾函数对比实验

本次实验利用不同参数(β)的凯塞窗^[17]、三角窗、汉宁窗、海明窗、布莱克曼窗和改进的三角窗对实验数据进行对比实验研究。凯塞窗的基本性能如图 3(a)及表 1 所示:参数 β 越大,主瓣宽度越大,旁瓣衰减越大。图 3(b)及表 1 集中展示了矩形窗、三角窗、汉宁窗、汉明窗、布莱克曼窗、改进的三角窗切

趾函数的基本性能,分析后可知:汉宁窗和三角窗具有较小的主瓣宽度,分别为 0.043π 和 0.039π ,频率分辨率较高;布莱克曼窗旁瓣衰减较快 (-58.1 dB),幅值识别精度较高;本文提出的基于零阶贝塞尔函数加权的三角窗切趾函数旁瓣衰减 (-28.5 dB)相对三角窗 (-26.6 dB)有所提升,与布莱克曼窗相比,其主瓣宽度更小,为 0.043π ,具有更高的频率分辨率。

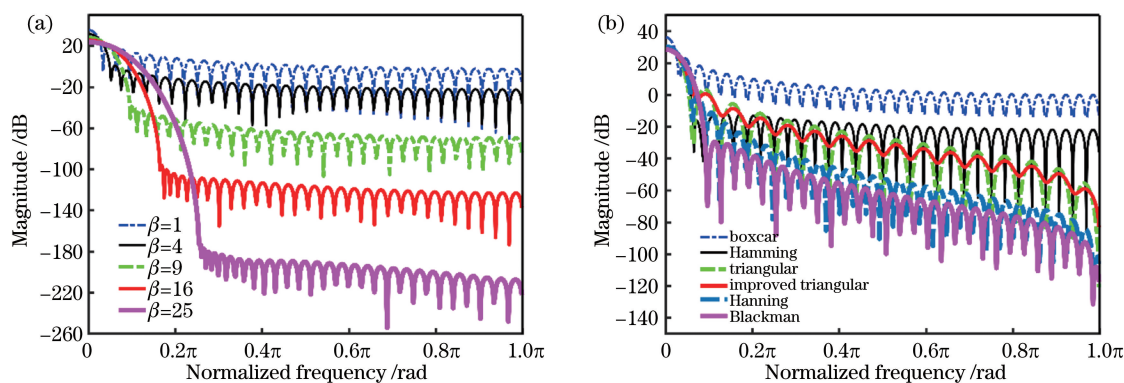


图 3 常用切趾函数的频谱。(a)不同参数的凯塞窗切趾函数;(b)其他常用的切趾函数

Fig. 3 Spectra of different apodization functions. (a) Kaiser window with different parameters;

(b) other common apodization functions

4 实验结果与分析

峰-峰值信噪比及方均根信噪比如表 2 和表 3

所示,表 2 是利用不同 β 的凯塞窗切趾函数处理干涉图得到的信噪比结果,本文用它来研究不同切趾函数的主瓣宽度和旁瓣衰减对频谱泄漏的影响。表

3 是利用三角窗、汉宁窗、海明窗、布莱克曼窗及改进的三角窗处理干涉图得到的信噪比结果。图4(a)表明,原始信号(加矩形窗)光谱图存在明显的光谱泄漏,在样品定量分析时会造成严重的干扰。由图4、图3(a)、表1和表2可知; $100\% \tau$ 线上的信噪比与旁瓣衰减明显关联;凯塞窗切趾函数的旁瓣衰减随 β 的增大而增强,对应的信噪比逐渐增加,同时主瓣宽度也逐渐增大,函数频率分辨率下降。气体定量分析的常用波段为 $900 \sim 1100 \text{ cm}^{-1}$,有少量水汽等气体被吸收,信号的光谱图应有微弱的波动。从图4可以看出,当 β 过大,如 $\beta=25$ 时,凯塞切趾函数出现了明显的过平滑。

表1 不同切趾函数的主瓣宽度与旁瓣相对衰减

Table 1 Mainlobe width and relative sidelobe attenuation of different apodization functions

Apodization function	Relative sidelobe attenuation /dB	Mainlobe width
Kaiser ($\beta=1$)	-14.7	0.027π
Kaiser ($\beta=4$)	-30.6	0.035π
Kaiser ($\beta=9$)	-66.0	0.051π
Kaiser ($\beta=16$)	-122.0	0.066π
Kaiser ($\beta=25$)	-201.3	0.082π
Rectangular	-13.3	0.027π
Triangular	-26.6	0.039π
Hanning	-31.5	0.043π
Hamming	-42.5	0.039π
Blackman	-58.1	0.051π
Improved triangular	-28.5	0.043π

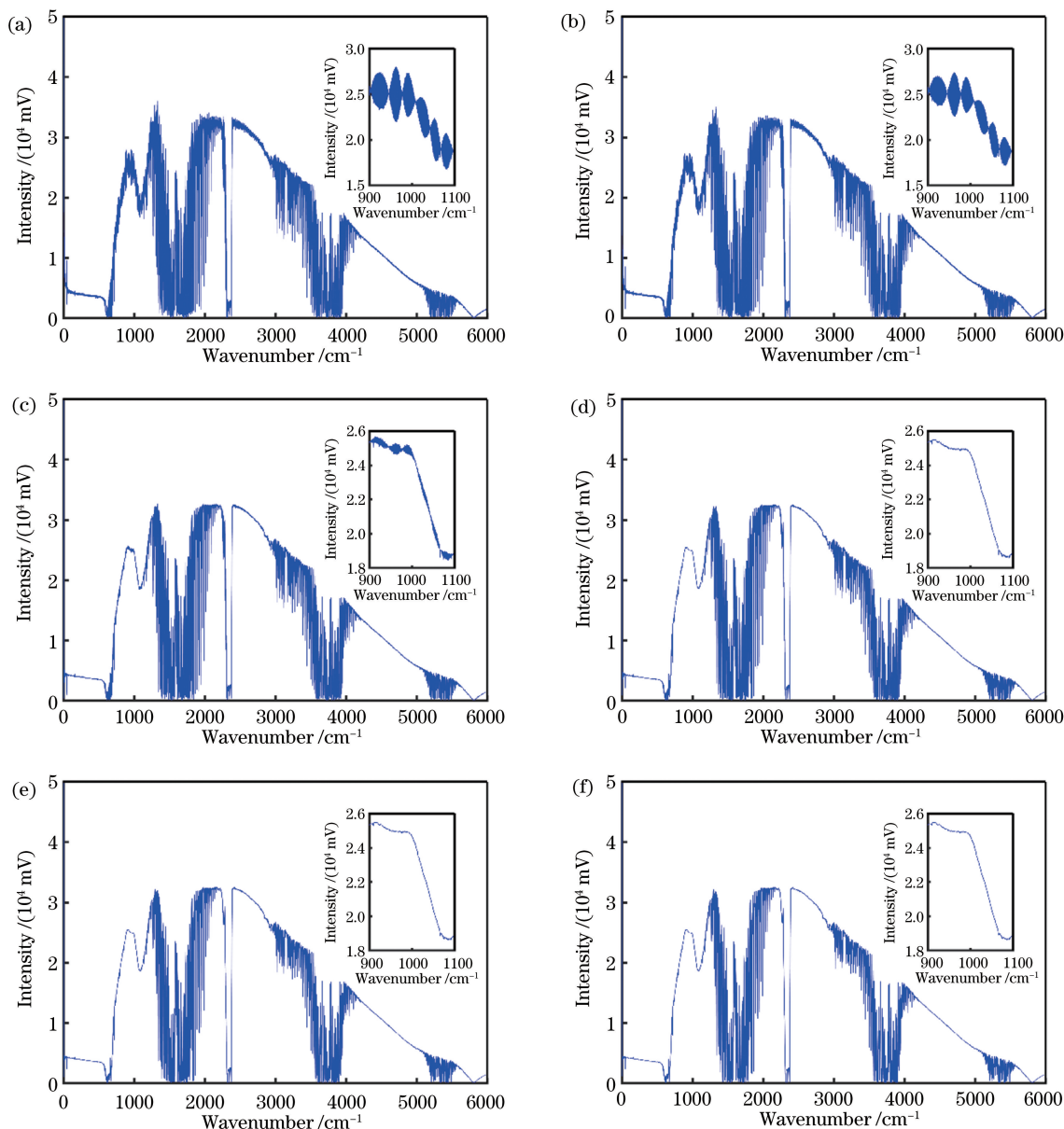
图4 不同参数的凯塞窗切趾函数的数据处理结果图。(a)原始信号;(b) $\beta=1$;(c) $\beta=4$;(d) $\beta=9$;(e) $\beta=16$;(f) $\beta=25$

Fig. 4 Results after data processing by Kaiser window apodization function with different parameters.

(a) Original signal; (b) $\beta=1$; (c) $\beta=4$; (d) $\beta=9$; (e) $\beta=16$; (f) $\beta=25$

表 2 不同参数的凯塞窗切趾函数对应的信噪比结果

Table 2 Signal-to-noise ratio of Kaiser window apodization function with different parameters

Kaiser window		Test 1	Test 2	Test 3	Average
$\beta=1$	R_{SN-PP}	6.080×10^3	5.121×10^3	6.600×10^3	5.934×10^3
	R_{SN-RMS}	2.854×10^4	2.401×10^4	3.092×10^4	2.782×10^4
$\beta=4$	R_{SN-PP}	7.859×10^3	8.172×10^3	7.902×10^3	7.978×10^3
	R_{SN-RMS}	3.604×10^4	3.664×10^4	3.596×10^4	3.621×10^4
$\beta=9$	R_{SN-PP}	9.320×10^3	9.716×10^3	9.051×10^3	9.362×10^3
	R_{SN-RMS}	4.066×10^4	4.334×10^4	3.850×10^4	4.083×10^4
$\beta=16$	R_{SN-PP}	1.030×10^4	1.088×10^4	9.968×10^3	1.038×10^4
	R_{SN-RMS}	4.416×10^4	4.744×10^4	3.600×10^4	4.253×10^4
$\beta=25$	R_{SN-PP}	1.095×10^4	1.188×10^4	1.066×10^4	1.116×10^4
	R_{SN-RMS}	4.681×10^4	5.065×10^4	4.084×10^4	4.610×10^4

表 3 常用切趾函数对应的信噪比结果

Table 3 Signal-to-noise ratio of common apodization functions

Apodization function		Test 1	Test 2	Test 3	Average
Original signal	R_{SN-PP}	5.613×10^3	4.613×10^3	6.270×10^3	5.499×10^3
	R_{SN-RMS}	2.680×10^4	2.155×10^4	2.955×10^4	2.597×10^4
Triangular	R_{SN-PP}	8.751×10^3	9.239×10^3	8.605×10^3	8.865×10^3
	R_{SN-RMS}	3.934×10^4	4.121×10^4	3.785×10^4	3.947×10^4
Hanning	R_{SN-PP}	8.443×10^3	8.697×10^3	8.427×10^3	8.522×10^3
	R_{SN-RMS}	3.806×10^4	3.987×10^4	3.715×10^4	3.836×10^4
Hamming	R_{SN-PP}	8.285×10^3	8.643×10^3	8.237×10^3	8.388×10^3
	R_{SN-RMS}	3.742×10^4	3.877×10^4	3.679×10^4	3.766×10^4
Blackman	R_{SN-PP}	9.240×10^3	9.603×10^3	8.985×10^3	9.276×10^3
	R_{SN-RMS}	4.040×10^4	4.300×10^4	3.837×10^4	4.059×10^4
Improved triangular	R_{SN-PP}	9.208×10^3	9.721×10^3	8.964×10^3	9.298×10^3
	R_{SN-RMS}	4.071×10^4	4.330×10^4	3.853×10^4	4.085×10^4

由图 3(b)、图 5 及表 3 可以看出:海明窗函数具有较小的主瓣宽度与旁瓣衰减,但在衰减后趋于平缓,导致频谱泄漏不能得到有效抑制。三角窗和汉宁窗函数的主瓣宽度和旁瓣衰减各有优势,且其抑制频谱泄漏的效果相近。布莱克曼窗函数的旁瓣衰减大,平均峰-峰值信噪比和方均根信噪比分别能达到 9276 和 40590,性能比三角窗、汉宁窗更好;但布莱克曼窗函数的旁瓣宽度较大(0.051π),频率分辨率低。从图 5(e)可以看出,布莱克曼窗函数出现了略微过平滑的现象。由表 3 可知,与常用的三角窗相比,本文提出的改进的三角窗切趾函数的平均峰-峰值信噪比提升了 4.9%,方均根值信噪比提升了 3.5%,分

别达到 9298 和 40850,优于常用的几种切趾函数。与此同时,在同样的平台下(Inter i5-7500 CPU, MATLAB R2016a),利用三角窗函数求得的光谱图的平均运行时间约为 43.8 ms,利用加权三角窗函数求得的光谱图的平均运行时间约为 45.6 ms,即加权所带来的时间成本非常小。由表 1 可得,改进后的三角窗切趾函数相对布莱克曼窗函数有较小的主瓣宽度(0.043π),频率分辨率更高。图 5(f)表明,改进后的三角窗切趾函数能更好地保留细节。

5 结 论

对比分析了多种常用切趾函数的性能,研究切

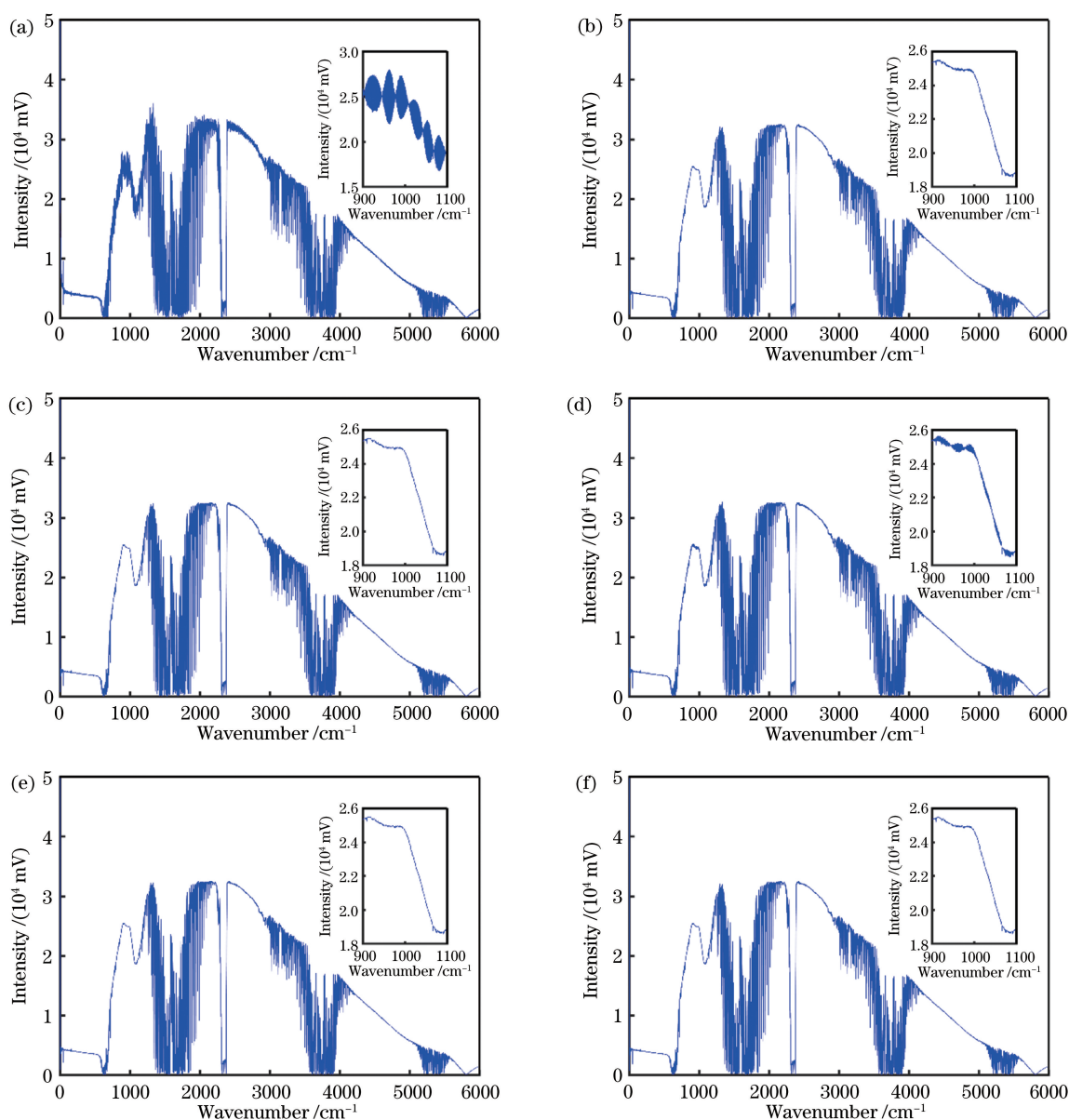


图5 不同切趾函数数据的处理结果图。(a)原始信号;(b)三角窗;(c)汉宁窗;(d)海明窗;(e)布莱克曼窗;(f)改进的三角窗

Fig. 5 Results after data processing by different apodization functions. (a) Original signal; (b) triangular window; (c) Hanning window; (d) Hamming window; (e) Blackman window; (f) improved triangular window

趾函数主瓣宽度与旁瓣衰减对频谱泄漏的影响;在此基础上,提出一种基于零阶贝塞尔函数加权的三角窗切趾函数,并将改进的三角窗切趾函数与多种常用的切趾函数进行对比,结果证明了提出的切趾函数的优越性。本文通过大量实验得出以下三个结论:1)在相同的条件下,较大的旁瓣衰减对光谱图中频谱能量泄漏有一定的抑制作用;2)较大的主瓣宽度容易导致光谱图过平滑,损失图像的细节信息;3)本文提出的基于零阶贝塞尔函数加权的三角窗切趾函数能有效抑制光谱图中的能量泄漏,提升信噪比,同时具有较小的主瓣宽度,能有效保留细节信息。

参 考 文 献

- [1] Smith B C. Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011: 1-16.
- [2] Yang K. Research and application on a certain number of core technologies of Fourier transform infrared spectrometer [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010: 40-74.
杨琨. 傅里叶变换红外光谱仪若干核心技术研究及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2010: 40-74.
- [3] Luo X Y, Du Y P, Shen M H, et al. Investigation of fibrous cultural materials by infrared spectroscopy

- [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(1): 60-64.
罗曦芸, 杜一平, 沈美华, 等. 红外光谱在纤维质文物材料鉴别中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(1): 60-64.
- [4] Tong J J, Liu W Q, Gao M G, et al. Measurement and study of partial VOCs based on open path FTIR [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7656: 76562B.
- [5] Han X, Li X X, Gao M G, et al. Emissions of airport monitoring with solar occultation flux-Fourier transform infrared spectrometer [J]. Journal of Spectroscopy, 2018, 2018: 1069612 .
- [6] Deng C L, Tong J J, Gao M G, et al. Simulation of tomographic reconstruction algorithms for open-path Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0707001.
邓鑫岭, 童晶晶, 高闽光, 等. 开路傅里叶变换红外光谱层析重建算法仿真[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0707001.
- [7] 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.
- [8] Lyon D. The discrete Fourier transform, part 4: spectral leakage [J]. The Journal of Object Technology, 2009, 8(7): 23-34.
- [9] Traficante D D, Nemeth G A. A new and improved apodization function for resolution enhancement in NMR spectroscopy [J]. Journal of Magnetic Resonance (1969), 1987, 71(2): 237-245.
- [10] Weng S F. Fourier transform infrared spectrometer analysis [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 67-72.
翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱仪分析[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2010: 67-72.
- [11] Norton R H, Beer R. New apodizing functions for Fourier spectrometry [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 259-264.
- [12] Naylor D A, Tahic M K. Apodizing functions for Fourier transform spectroscopy [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(11): 3644-3648.
- [13] Xiangli B, Yuan Y. Some aspects of the data processing of the single sided interferogram[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(12): 1869-1874.
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): 1869-1874.
- [14] Zhang P, Zhang Z H. A novel apodization function of single sided interferogram[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(7): 878-882.
张鹏, 张志辉. 一种新的过零单边干涉图切趾加权函数[J]. 光子学报, 2012, 41(7): 878-882.
- [15] Chen J J, Feng Y T, Hu B L, et al. Window function optimization in atmospheric wind velocity retrieval with Doppler difference interference spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0207002.
陈洁婧, 冯玉涛, 胡炳樑, 等. 多普勒差分干涉光谱仪大气风速反演过程中窗函数优化[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0207002.
- [16] Li C, Li C, Jiang F, et al. Harmonic detection algorithm based on Kaiser window [J]. Electronic Science and Technology, 2018, 31(5): 5-7, 11.
李晨, 李川, 姜飞, 等. 基于凯塞窗的谐波检测算法[J]. 电子科技, 2018, 31(5): 5-7, 11.
- [17] Kaiser J F. Nonrecursive digital filter design using the I_0 -sinh window function [C]//Proceedings of 1974 IEEE International Symposium on Circuits & Systems, April 1974, San Francisco, DA, USA. New York: IEEE, 1974: 20-23.