

单边干涉图相位校正技术与关键问题

张敏娟¹ 张记龙^{1,2} 王志斌^{1,2} 田二明¹ 郝健¹

(¹ 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051
² 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要 基于傅里叶变换红外光谱仪干涉图的单边过零采样和非对称性,对 Forman 卷积法干涉图相位校正方法进行分析和改进。针对 Forman 卷积法相位校正过程中需卷积运算,硬件实现难的问题,应用三个快速傅里叶变换(FFT)运算实现线性卷积,节省运算时间。并通过仿真分析了小双边数据量、切趾函数、多次相位校正等对干涉图相位校正效果的影响。在以 500 K 的红外黑体为辐射源,获取红外光谱范围的大气吸收谱实验中,通过 HgCdTe 点探测器获取单边过零干涉图,采用改进的 Forman 法对干涉图进行相位校正和光谱重建,经标定、归一化后的复原光谱,光谱分辨率为 4 cm^{-1} ,波长误差比较小,有比较高的准确度。

关键词 图像处理;傅里叶变换光谱仪;非对称干涉图;Forman 法;卷积

中图分类号 TN911.74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.043002

Correcting Method of Asymmetric Single-Side Interferogram and Analyzation of Key Problems

Zhang Minjuan¹ Zhang Jilong^{1,2} Wang Zhibin^{1,2} Tian Erming¹ Hao Jian¹

(¹ *Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, Taiyuan, Shanxi 030051, China*
² *Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China*)

Abstract In the Fourier transform infrared spectrometers, the interferograms are usually sampled by means of the single-side beyond zero path difference and the interferograms are asymmetric. In order to realize the Fourier cosine transform and truly rebuild the spectrum, the phase-corrected technologies of Forman is researched and improved. In the Forman method, the convolution is used in several times so that the operation is complication and it is difficult to realize by the hardware circuits. The linear convolution is realized though three fast fourier transform (FFT) operation to reduce the quantity of computation. It is found that quantity of the short double-side data, apodization function and the times of phase correction affect the result of the corrected interferograms in the experiment. The 500 K infrared blackbody is used as the radiant source to achieve the absorption spectrum of the atmosphere in the infrared range. The single-side beyond zero interferograms is achieved by the HgCdTe dot diode detection. The interferograms are corrected and rebuilt by the improved Forman method. The spectral resolution of the rebuild absorption spectrum is 4 cm^{-1} and the wavenumber error is little. which show the higher accuracy of spectrometers.

Key words image processing; Fourier transform spectrometer; asymmetric interferogram; Forman method; convolution

OCIS codes 300.6300; 300.6340; 070.1170; 010.5620

1 引言

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)以其宽光谱、多通道、高分辨率等优点,是红外波段最有效的测量与分析

收稿日期: 2011-11-08; **收到修改稿日期**: 2011-12-15; **网络出版日期**: 2012-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(61127015,61040062)、科技部国际合作资助项目和山西省国际合作计划(2010081038)资助课题。

作者简介: 张敏娟(1977—),女,讲师,博士研究生,主要从事光电信号处理方面的研究。E-mail: zmj7745@163.com

导师简介: 张记龙(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光电系统的设计与研究。E-mail: zhangjl@nuc.edu.cn

仪器,广泛应用于环境监测、农业、生物医疗、军事、航空航天等领域。在傅里叶变换光谱仪中干涉图有双边、单边两种采样方式。且在单边采样中有两种方法:1)在零光程差点到最大光程差点之间采样;2)适当保留过零数据的单边过零采样,通常称为“过零采样”。理想情况下,干涉图是关于零光程差点对称的,三种方法都能准确复原入射信号光谱^[1,2]。然而对于实际仪器和系统,由于光学系统的偏差(如光路中元件位置的偏差引入了不同的光程差)、电子学系统产生的相移(如放大器,滤波器等器件引入的延时)、采样的不均匀及采样位置误差(如没有采到零光程差点)等因素使得干涉图不对称,不能准确复原被测目标的辐射光谱^[3,4]。

Connes 提出双边采样,通过求模的方法克服干涉图的相位误差,但该方法存在两个不足之处:1)双边采样,数据量大,若要达到与单边采样相同的分辨率,数据量几乎增加 1 倍;2)求模运算是非线性运算,随机噪声求模叠加,信噪比降低,尤其是在信号弱时表现更为明显。因此,目前动态傅里叶变换光谱仪普遍不采用双边采样。

干涉图单边采样数据量小、分辨率高,但单边采样需要对干涉图进行相位校正。常用的单边采样相位校正方法有 Forman 卷积法和 Mertz 乘法^[5~7]。Mertz 乘法是在频域实现频谱相位校正,算法简单,但误差比较大,不能克服非线性相位误差。Forman 卷积法在时域对干涉图进行相位校正,对线性和非线性相位误差都有比较好的校正效果^[8]。且能方便引入数字滤波器以抑制噪声,但需要经过一次或多次卷积运算,计算量大,硬件实现难。本文对 Forman 卷积法相位校正的实现过程进行分析,运用两个快速傅里叶变换(FFT)和一个快速傅里叶逆变换(IFTT)实现卷积运算,减小运算量,方便了硬件实现;并分析了相位校正过程中,选取不同过零数据量、多次卷积相位校正以及不同切趾函数对相位校正效果的影响。并在实验中以 500 K 红外黑体为辐射源,获取大气窗口在红外波段的吸收谱。实验中干涉图采用该方法进行相位校正,结果表明该方法误差比较小,能满足高精度测量要求。

2 Forman 法相位校正分析与实现

2.1 Forman 法相位校正原理

在理想情况下获取的干涉图是关于零光程差点余弦对称的,即:

$$I(x) = 2 \int_0^{\infty} B(\nu) \exp(-i2\pi\nu x) d\nu. \quad (1)$$

这则可以采样单边干涉数据进行傅里叶余弦变换复原光谱,有:

$$B(\nu) = 2 \int_0^{\infty} I(x) \cos(2\pi\nu x) dx. \quad (2)$$

但在实践工程中,系统会引入各种不可避免的线性和非线性相位误差 $\varphi(\nu)$,则干涉图为

$$I_d(x) = 2 \int_0^{\infty} B(\nu) \cos[2\pi\nu x + \varphi(\nu)] d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) \exp[-i\varphi(\nu)] \exp(-i2\pi\nu x) d\nu. \quad (3)$$

非对称干涉图 $I_d(x)$ 实际是 $B(\nu) \exp[-i\varphi(\nu)]$ 的傅里叶变换。这样,由非对称干涉图计算复原光谱为

$$B(\nu) \exp[-i\varphi(\nu)] = \int_{-\infty}^{\infty} I_d(x) \exp(i2\pi\nu x) dx. \quad (4)$$

为了实现对干涉图单边余弦傅里叶变换,这就需要采集的干涉图进行相位补偿。Forman 法相位校正的算法流程如图 1 所示。

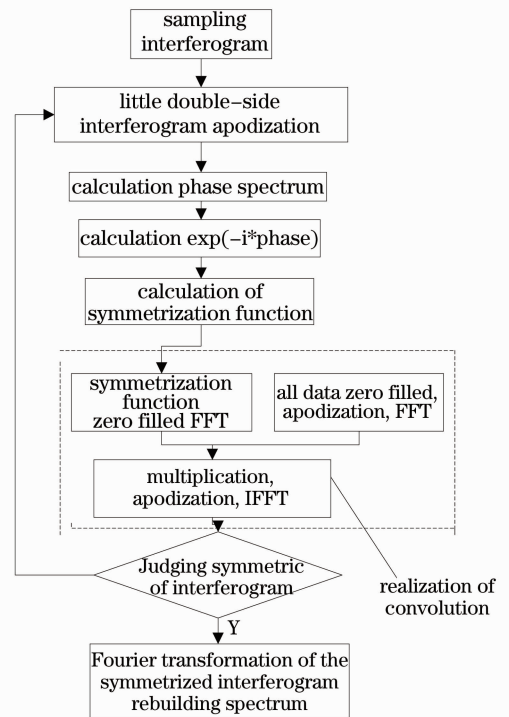


图 1 Forman 法相位校正的流程图
Fig.1 Flowing chart of correcting asymmetric interferogram based on Forman method

2.2 Forman 法相位校正分析

对 Forman 法相位校正原理进行分析可知, Forman 法有如下几个特点:

1) 干涉图零光程点信号强度最大, 可用来确定零光程点, 通常选择干涉图的最大值或最小值作为零光程差点, 选取小双边数据求相位谱函数。如果干涉图对称性很差, 光程差的零点将分布在一个小范围内, 可对采集的多个干涉信号取平均滤除噪声^[9,10]。

2) 可以多次相位校正。在相位误差比较严重时, 经过一次校正干涉图对称性仍可能比较差, 不满足要求。由于相位校正改变的仅是相位, 幅度谱是不变的, 因此, 可多次卷积进行相位校正。但每次相位校正前都必须以零光程点为中心选取小双边干涉数据, 求相位误差函数 $f(x)$, 比较复杂。

3) 相位校正过程可能包含一次或多次校正过程, 运算量比较大, 且硬件实现难, 这则需要考虑简化卷积运算、提高硬件实现的可行性。

4) 为了减小数据截断引起的旁瓣效应, 需对干涉图进行切趾, 但切趾函数的引入会降低光谱分辨率, 这则需考虑切趾函数与相位校正之间的匹配关系。

5) 在实际工程应用中, 一般是测量某一范围内的光谱 (ν_1, ν_2) , 但是干涉图包含的噪声频率是从 0 到 ν_m ($\nu_2 < \nu_m$), ν_m 是仪器采样的最大波数(最高频率)。因此滤除光谱范围 (ν_1, ν_2) 外的所有频率成分可以提高系统的信噪比。滤波过程在频域即是矩形函数和频谱的乘积, 在时域即是干涉图和矩形函数傅里叶变换的卷积。很显然, 这个滤波过程容易结合到干涉图对称化过程中。将矩形函数和相位谱函数相乘后进行傅里叶逆变换, 即可得到带有数学滤波功能的对称化函数。这也是采用 Forman 法进行相位校正的优点。

2.3 用 FFT 实现线性卷积

卷积过程包含有大量乘法和加法运算, 一定程度地限制了数据处理的实时性, 不能满足时效性强的工程应用。基于傅里叶变换的性质, 可利用两个 FFT 和一个 IFFT 实现卷积过程, 提高计算效率^[11]。卷积运算实现的原理如下: 已知 M 点的序列 $x(n)$ 和 L 点的序列 $h(n)$, 则它们的线性卷积 $y(n) = x(n) * h(n)$ 是 $(M+L-1)$ 点的序列; 对于两个均为 N 点的序列, 它们的圆周卷积 $y(n) = x(n) \otimes h(n)$ 仍是一个 N 点的序列, 且根据圆周卷积定理有:

$$Y(k) = \text{FFT}[y(n)] = X(k) \cdot H(k), \quad (5)$$

$$y(n) = x(n) \otimes h(n) = \text{IFFT}[X(k) \cdot Y(k)]. \quad (6)$$

如果在线性卷积过程中, 将两序列分别补零, 使之具有列长为 N 点的序列, 且满足 $N \geq M+L-1$ 时, 则可利用圆周卷积定理实现线性卷积过程。

在干涉图相位校正过程中, 采用 FFT 计算线性卷积, 需要对两个序列补零, 则使运算量增加。但由于 FFT 运算速度比较快, 所需运算时间仍会比直接计算少, 容易硬件实现。而且可采用分段卷积的方法, 即将较长序列分为多个小段, 每一段长度都与短序列接近, 将每小段进行圆周卷积运算最后求和。这也能发挥圆周卷积的优点, 减少运算量。

3 仿真与实验

3.1 实验条件

实验采用主动探测, 以 500 K 的红外黑体为辐射源, 获取大气窗口的吸收谱。在实验中, 通过迈克尔孙干涉仪, 获取经大气吸收后的黑体辐射源产生的干涉信号, 通过 HgCdTe 半导体点探测器对干涉信号进行光电变换, 以 He-Ne (632.8 nm) 激光器为参考光源, 实现对干涉信号的等光程差采样, 且采样间隔为 632.8 nm, 单边过零采集总点数为 4760 点, 零光程差点位于第 561 点左右。基于 Matlab 2007a 对采集到的干涉图进行相位误差校正和分析, 并通过实验验证该方法的准确性和可行性。

3.2 仿真及实验分析

3.2.1 不同小双边数据量

计算对称化函数时, 需要计算零光程点附近的小双边数据的相位谱, 因此, 小双边数据量影响对称函数的精度。数据量少不能完整地反应干涉信号的相位误差, 但数据量过大则采集的数据点数多, 计算量大。图 2 是在采集数量点总数为 3700 点, 过零数据量分别为 32, 64, 128, 256, 512 点时经过一次相位校正后的干

涉图。从图中可以看出,当过零数据量比较小时,包含的相位信息不丰富,以至于校正后的干涉图对称性差;随着数据量的增加,干涉图对称性提高。当小双边数据量为总数据量的 10% 以上时,一般可满足相位校正的要求。以下若没有特殊说明,都采用 512 点的小双边数量计算相位谱。

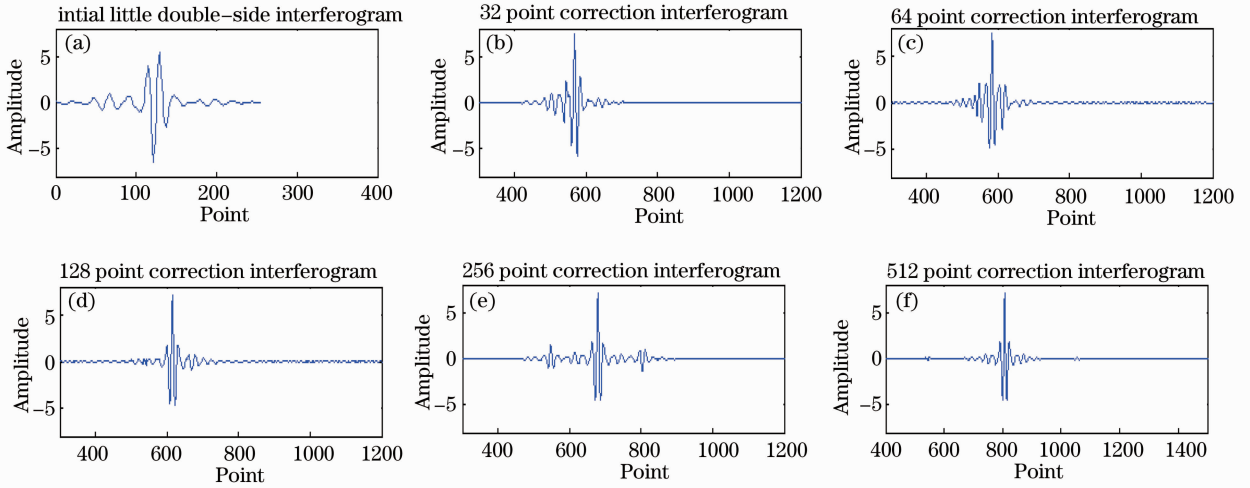


图 2 小双边数据点数不同的校正干涉图

Fig. 2 Corrected interferograms of the different quantity of short double-side data

3.2.2 多次相位校正

图 3(a) 是采集的单边过零干涉图,由于干涉图关于零光程差点余弦不对称,则需对干涉图进行相位校正。图 3(b)~(d) 分别是经过一次、两次和三次相位校正后的干涉图。从图 3 中可以看出经过第一次相位校正后,干涉图基本上是关于零光程点余弦对称的偶函数,可以直接运用余弦 FFT 运算求被测信号的光谱。同时从图 3 中也可以看出每经过一次相位校正,在校正后干涉图的双边出现对称的旁瓣振荡,这是由于截取零光程差点附近的小双边数据计算相位谱时,引入了矩形窗函数,造成了干涉图的旁瓣效应;为了消除旁瓣振荡,需对小双边数据进行加窗处理。

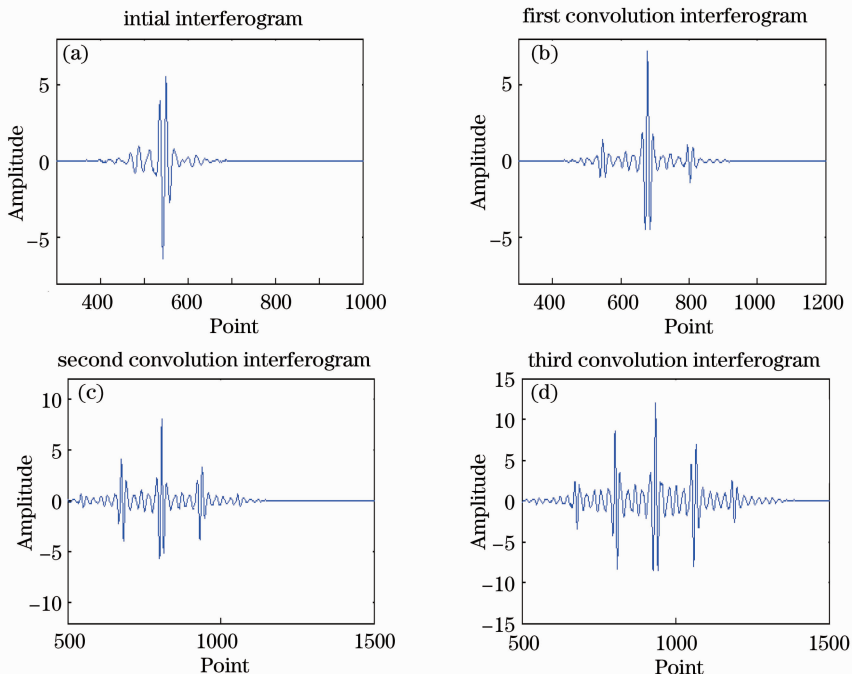


图 3 多次相位校正后的干涉图

Fig. 3 Corrected interferograms

3.2.3 窗函数对相位校正的影响

在实际工程中采集到的干涉数据是经过仪器函数截断后的数据,这将使复原光谱的谱线变宽,分辨率降低,并出现旁瓣振荡淹没有用谱线。为了有效抑制旁瓣效应,可通过加窗进行切趾。

图 4 是对小双边数据加窗后进行相位校正的干涉图,可以看出加三种不同的窗函数都有效地消除了旁瓣振荡。这也表明了 Forman 法对切趾函数的要求不高,普通的窗函数基本就能满足要求。

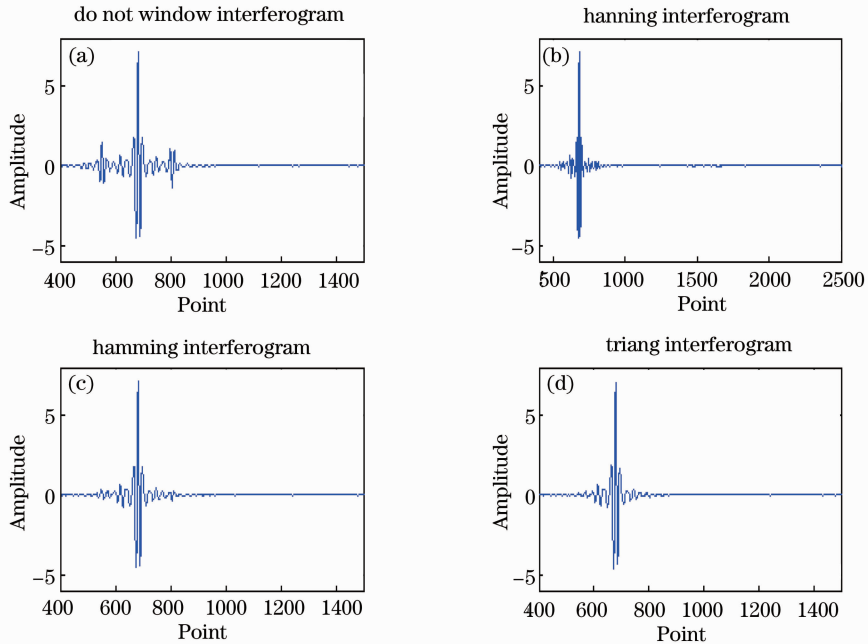


图 4 加窗函数后的校正干涉图

Fig. 4 Interferograms of adding different apodization functions

3.3 实验结果及分析

在实验中,采用改进的 Forman 法对干涉图进行相位校正。在改进的 Forman 法中以零光程差点为中心,选取 512 点小双边数据加 hanning 窗切趾计算相位谱,并通过乘以 (500, 4500) 波数范围的数字滤波器产生带有滤波功能的对称化函数。对称化函数与原干涉图进行卷积实现干涉图的对称化处理。对干涉图进行单次相位校正,得到校正的干涉图如图 5(a) 所示。通过对干涉图余弦傅里叶变换复原 500 K 红外黑体的辐射谱经大气吸收后的吸收光谱。经过定标,归一化后的大气吸收谱如图 5(b) 所示,其光谱分辨率达到 4 cm^{-1} 。图 6 是 500 K 标准黑体的辐射谱。

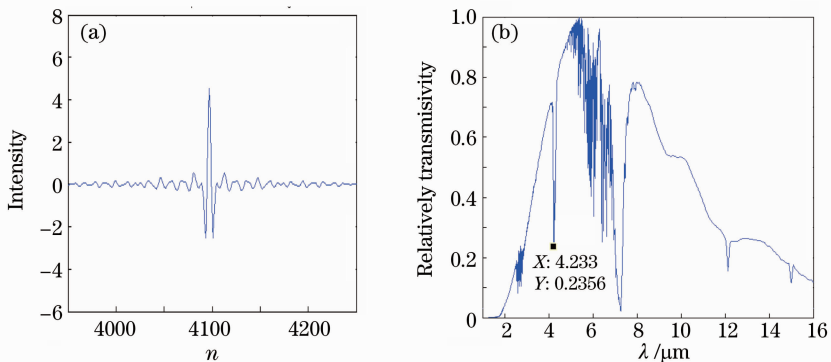


图 5 500 K 红外黑体辐射经大气吸收后获取的校正干涉图(a)和吸收谱(b)

Fig. 5 (a) Corrected interferogram and (b) absorption spectrum of 500 K infrared blackbody

已知在近红外波段,大气窗口的吸收主要是水蒸气 H_2O 、 CO_2 。 H_2O 吸收带主要在 $2.5\sim 3.0\ \mu\text{m}$ 、 $5\sim 7\ \mu\text{m}$ 两个波段,而 CO_2 吸收峰主要有 $2.8\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$;且 $2.8\ \mu\text{m}$ 的吸收峰也出现在 H_2O 的吸收带 $2.5\sim 3.0\ \mu\text{m}$ 范围,从图 5(b)中显示不出来。而 $4.3\ \mu\text{m}$ 的吸收峰从图中可以明显看出。图 5(b)中的吸收峰显示在 $4.236\ \mu\text{m}$,存在 $33\ \text{nm}$ 比较小的波长位置误差。这些误差主要是由有限光程差和傅里叶变换算法引入的。较小的波长位置误差表明了采用 Forman 法能比较好地进行相位校正,重建光谱精度比较高。图 5(b)的纵坐标表示经大气窗口吸收后的黑体辐射强度,本文仅对大气窗口中的气体进行定性分析,没有考虑气体的吸收强度。

4 结 论

在单边采样的傅里叶变换光谱仪中,准确的相位校正技术和高质量的切趾函数已经成为制约提高复原光谱质量的瓶颈。本文基于 Forman 卷积法对相位校正的方法进行研究和改进,分析了不同小双边数据量、不同切趾函数以及多次卷积对干涉图相位校正的影响,并通过三个快速傅里叶变换实现卷积运算,节省了运算时间。最后通过实验探测经大气吸收后的 $500\ \text{K}$ 红外黑体的辐射,复原的大气吸收光谱分辨率为 $4\ \text{cm}^{-1}$,且波长误差比较小。

参 考 文 献

- Xiang Libin, 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
- Liu Yong, Wu Jiandong, Zhu Ling *et al.*. Spectral recovery in fiber Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1697~1700
刘 勇,吴建东,朱 灵等. 光纤傅里叶变换光谱仪光谱复原技术研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1697~1700
- M. L. Forman, W. H. Steel, G. A. Vanasse. Correction of asymmetric interferograms obtained in Fourier spectroscopy [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(1): 59~63
- H. Sakai, G. A. Vanasse, M. L. Forman. Spectral recovery in Fourier spectroscopy [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **58**(1): 84~89
- Wu Jinguang. *Modern Fourier Transform Infrared Spectroscopy and its Application* [M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1994. 24~29
吴瑾光. *近代傅里叶变换红外光谱技术及应用* [M]. 北京: 科学文献出版社, 1994. 24~29
- Weng Shifu. *Fourier Transform Infrared Spectrometer* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 46~54
翁诗甫. *傅里叶变换红外光谱仪* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 46~54
- Avishai Ben-David, Agustin Ifarraguerrri. Computation of a spectrum from a single-beam Fourier-transform infrared interferogram [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6): 1181~1189
- Li Baosheng, Liu Yong, Wang An. Processing of interferogram symmetrization in optical fiber Fourier spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(16): 1077~1080
李保生,刘 勇,王 安. 光纤傅里叶变换光谱仪干涉图的对称化处理[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(16): 1077~1080
- K. H. Michaelian. Interferogram symmetrization and multiplicative phase correction of rapid-scan and step-scan photoacoustic FTIR data[J]. *Infrared Phys.*, 1989, **29**(1): 87~100
- K. H. Michaelian. Signal average of photoacoustic FTIR data—computation of spectra from double-sided low resolution interferograms [J]. *Infrared Phys.*, 1987, **27**(5): 287~296
- Sun Yamin, Yin Dekui. A improved algorithm for correction of remote sensing interferograms based on Forman method[J]. *Singal Processing*, 2008, **24**(6): 1048~1051
孙雅敏,殷德奎. 基于 Forman 法对遥感干涉图像进行相位校正的改进[J]. *信号处理*, 2008, **24**(6): 1048~1051

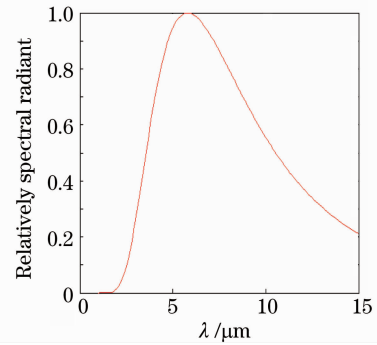


图 6 $500\ \text{K}$ 标准黑体的辐射谱

Fig. 6 Radiants pectrum of $500\ \text{K}$ standard infrared blackbody