

FTIR 光谱仪动镜速度和采样抖动的噪声分析

邵春沅, 顾明剑

(中国科学院上海技术物理研究所红外成像与探测重点实验室, 上海 200083)

摘要:分析了傅里叶变换光谱仪由动镜速度和采样抖动的随机误差引起的光谱噪声,建立了基于噪声等效辐亮度差(NERD)和噪声等效温差(NETD)的噪声模型。分析表明,动镜速度的波动与抗混叠滤波器幅频响应、时间延迟的综合作用,以及采样触发的短时抖动,都会引起系统的噪声。通过 MATLAB 数值模拟,对动镜速度和采样抖动的噪声影响进行了仿真分析与模型计算,验证了理论模型,评估了实际仪器的噪声水平,为动镜控制、抗混叠滤波器的设计以及傅里叶变换光谱仪的噪声量化计算和改善提供了依据。

关键词:傅里叶变换光谱仪;动镜速度;采样抖动;噪声模型

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.08.012

Noise analysis on mirror-velocity and sampling jitter in FTIR spectrometer

SHAO Chun-yuan, GU Ming-jian

(Key Laboratory of Infrared Imaging and Detection, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Spectral noise induced by the random errors of mirror-velocity and sampling jitter in Fourier-transform spectrometer is analyzed. A model based on Noise Equivalent Radiance Difference (NERD) and Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) is established. The analytical results show that the mirror-velocity associated with the amplitude variations and the time delay of the anti-aliasing filter and the sampling jitter can lead to system noise. Then, the noise impact of mirror-velocity and sampling jitter is simulated and calculated by MATLAB; the theoretical model is verified; the noise of the actual instrument is evaluated, which provides the basis for mirror control, anti-aliasing filter design, noise calculation and improvement of Fourier-transform spectrometer.

Key words: Fourier-transform spectrometer; mirror-velocity; sampling jitter; noise model

1 引言

在傅里叶变换光谱仪中,干涉图受到许多噪声源的影响,一部分直接来自探测器固有噪声和电路自身的噪声,还有一些是由于动镜扫描过程中影响光程差而导致采样误差。光谱仪要求动镜作高精度的匀速直线运动,但由于动镜驱动机制的机械性使得动镜的运动速度存在随机的波动,造成光程差错误从而导致实际获取的干涉信号存在噪声干扰^[1];

另外在等光程采样过程中,采样位置的随机误差也会引起噪声^[2],如采样抖动等。探测器噪声是最基本和不可避免的,理想的傅里叶变换光谱仪应是探测器噪声限的,动镜速度和采样抖动引起的噪声会增加系统总的噪声,过大时甚至会起主导作用。

通过量化分析这两类误差引起的傅里叶光谱仪光谱噪声,便于系统噪声的计算和相关参数的设定与调整,提高光谱仪的性能,使光谱仪达到高精

作者简介:邵春沅(1990-),男,硕士研究生,主要从事傅里叶干涉仪信号获取方面工作。E-mail:scyshuier@163.com

通讯作者:顾明剑(1976-),男,研究员,博士,主要从事红外高光谱探测,偏振探测与成像等工作。E-mail:gumingj@sinacna.com

收稿日期:2015-11-04; **修订日期:**2015-12-08

度、高灵敏度的要求。

2 傅里叶变换光谱仪的原理

傅里叶变换光谱仪的核心是迈克尔逊干涉仪,如图1所示。入射光信号经过分束器的分光,成为两束光,一束被反射,成为光束1,另一束透射,形成光束2。它们分别经过各自光路的延迟,再一次返回到分束器,并且每一束又分别经过透射和反射,在探测器上发生干涉,形成干涉信号。干涉信号经过探测器转换为电信号,经过电子学系统处理,再由AD转换得到数字干涉图,然后通过傅里叶变换反演得到光谱信息。

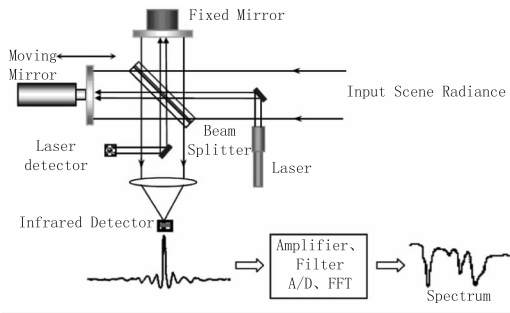


图1 傅里叶变换光谱仪的工作原理

Fig. 1 Operation principle of Fourier-transform spectrometer

设入射光谱 $B(v)$, 干涉信号表达式如下所示:

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(f) B(v) \exp(i2\pi vx) dv \quad (1)$$

其中, v 为波数, cm^{-1} ; $R(f)$ 是系统的总响应; $f = 2uv$; u 是动镜速度, cm/s ; x 为光程差。可以看出, 干涉信号 $I(x)$ 和入射光谱 $B(v)$ 是一对傅里叶变换, 因此若假设探测器和放大电路频率响应平坦, 用电路中抗混叠滤波器响应 $H(f)$ 近似系统整体响应, 干涉信号又可以写成:

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(2uv) B(v) \exp(i2\pi vx) dv \quad (2)$$

3 噪声模型分析

3.1 动镜速度波动^[3-5]

傅里叶变换光谱仪通过动镜扫描产生光程差的变化, 得到干涉图。理想情况下动镜作匀速运动, 但实际的动镜速度都存在一定的波动, 用 Δu 表示动镜速度误差, 则动镜速度可表示为:

$$u_n = u + \Delta u \quad (3)$$

将干涉图函数用泰勒级数展开, 取第一项作为误差的近似, 则有:

$$I(u + \Delta u) \approx I(u) + \Delta u \frac{dI(u)}{du} \quad (4)$$

因此存在动镜速度误差的干涉图函数表达式可以改写为:

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(2uv) B(v) \exp(i2\pi vx) dv + 2\Delta u \int_{-\infty}^{+\infty} H(2uv) B(v) v \exp(i2\pi vx) dv \quad (5)$$

$H'(2uv)$ 是 $H(2uv)$ 关于 u 的一阶导数。干涉图函数经过傅里叶变换反演后得到实际光谱:

$$B'(v) = |B(v) + n_u(v)| \quad (6)$$

$$n_u(v) = \frac{2[H'(2uv)B(v)v] * F[\Delta u]}{H(2uv)} \quad (7)$$

抗混叠滤波器的响应函数可以表示为:

$$H(2uv) = |H(2uv)| \exp(i2\pi \cdot 2uv \cdot \tau) \quad (8)$$

$|H(2uv)|$ 是抗混叠滤波器的幅频特性, τ 是由抗混叠滤波器带来的电路时延。

$$H'(2uv) = |H(2uv)|' \exp(i2\pi \cdot 2uv \cdot \tau) + 2\pi i |H(2uv)| \exp(i2\pi \cdot 2uv \cdot \tau) \quad (9)$$

所以光谱误差 $n_u(v)$ 又可以表示成:

$$n_u(v) = 2 \left[\frac{|H(2uv)|'}{|H(2uv)|} \cdot B(v)v + 2\pi i \cdot \tau \cdot B(v)v \right] * F[\Delta u] \quad (10)$$

$F[\Delta u]$ 为 Δu 的傅里叶变换; $*$ 表示卷积。

傅里叶光谱仪噪声水平的评估用噪声等效辐亮度差 (NERD) 和噪声等效温差 (NETD)^[6-7]。对于随机误差, NERD 即光谱误差的均方根值:

$$\text{NERD}_u = \sqrt{E[n_u^2(v)]} \quad (11)$$

$$\text{NETD} = \frac{\text{NERD}}{dN/dT} \quad (12)$$

其中, dN/dT 是温度为 T 时的普朗克辐射亮度的微分; $E[\]$ 表示取均值。

设 Δu 为平稳随机过程, $E[\Delta u] = 0$, 式(11)可写成:

$$\text{NERD}_u^2 = E\{[2\pi B(v)v]^2 * [F[\Delta u]]^2\} + E\left\{2 \frac{|H(2uv)|'}{|H(2uv)|} B(v)v^2 * [F[\Delta u]]^2\right\} \quad (13)$$

上面的公式比较复杂, 根据文献[8], 可以用简化公式估计光谱带内的噪声辐亮度差 (NERD) 平均值。

若噪声为白噪声, 带宽 W , 动镜速度误差的均方根值设为 Δp , 则噪声的功率谱密度:

$$E\{[F[\Delta u]]^2\} \approx \frac{\Delta p^2}{W} \quad (14)$$

式(13)可以改写成:

$$\overline{\text{NERD}_u} = [2\pi \overline{B(v)} \cdot v_{rms} \cdot 2\Delta p \cdot \tau + 2 \overline{B(v)} \cdot v_{rms} \cdot$$

$$\Delta p \cdot \frac{|H(2uv)|'}{|H(2uv)|} \sqrt{\frac{B}{W}} \quad (15)$$

其中, $\overline{B(v)}$ 表示带内光谱辐射的平均值; v_{rms} 为波数的均方根值; B 是光谱带宽。

噪声源于动镜速度的波动与系统响应的不平坦性、电路时间延迟综合作用, NERD 的大小与动镜速度误差、抗混叠滤波器的幅度响应平坦度 $\frac{|H(2uv)|'}{|H(2uv)|}$ 和电子学延迟时间 τ 有关。

3.2 采样抖动

傅里叶变换光谱仪利用与入射光谱共用光路的激光参考信号产生干涉图采样的时钟脉冲信号。理想情况下, 参考激光经过干涉, 在探测器上通过光电转换, 电信号处理后得到整形输出的方波, 利用方波被测光采样信号。实际上由于 FPGA 晶振不稳定等因素造成采样触发的短时间抖动, 采样点和参考激光干涉信号的过零点存在误差 Δt , 如图 2 所示^[9]。

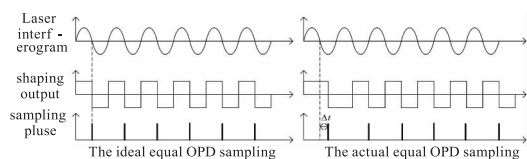


图 2 采样抖动误差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling jitter error

设每一个采样点的光程误差是 Δx , $\Delta x = 2u\Delta t$, 则实际的采样光程差可表示为:

$$x_n = x + \Delta x \quad (16)$$

从 3.1 节的分析可得:

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(2uv)B(v)\exp(i2\pi vx)dv + i2\pi\Delta x \int_{-\infty}^{+\infty} H(2uv)B(v)v\exp(i2\pi vx)dv \quad (17)$$

$$B'(v) = |B(v) + n_x(v)| \quad (18)$$

得到存在采样抖动的光谱误差为:

$$n_x(v) = \frac{i2\pi[H(2uv)B(v)v] * F[\Delta x]}{H(2uv)} \quad (19)$$

设 Δq 为 Δx 的均方根值, 同理可得采样抖动引起的 NERD 平均值估计。

$$E\{[F[\Delta x]]^2\} \approx \frac{\Delta q^2}{W} \quad (20)$$

$$\overline{\text{NERD}_x} = 2\pi \overline{B(v)}v_{rms} \cdot \Delta q \sqrt{\frac{B}{W}} \quad (21)$$

4 仿真分析

傅里叶变换红外光谱仪的滤波电路用于限制信号带宽小于采样频率的一半, 防止采样过程中的频

谱混叠^[10]。根据 3.1 节的噪声分析, 滤波器的幅度不平坦和电子延迟都会引起噪声。因此在抗混叠滤波器设计中除了有效抑制混叠噪声, 还需考虑其平坦度和延迟时间对系统噪声的影响。本文所使用的傅里叶变换光谱仪动镜的运动速度为 4.67 cm/s, 探测器的工作波段分别为长波 650 ~ 1136 cm⁻¹, 中波 1210 ~ 1750 cm⁻¹, 短波 2155 ~ 2550 cm⁻¹, 经过动镜调制的信号带宽分别为 [6071, 10610]、[11301, 16354]、[20127, 23826]。因此抗混叠滤波器采用五阶贝塞尔低通滤波器, 截止频率为 38 kHz。抗混叠滤波器的平坦度 $\frac{|H(2uv)|'}{|H(2uv)|} \leq 1.25 \times 10^{-5}$, 参考激光与干涉信号之间的延时 $\tau_0 \approx 6.5 \mu\text{s}$ 。

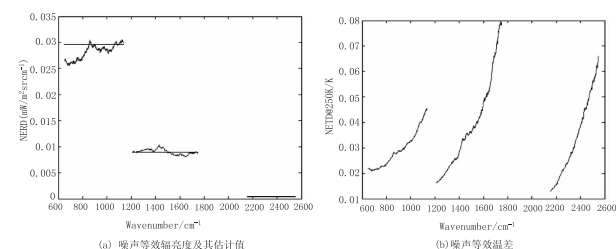
在 MATLAB 环境下, 根据实际研制的光谱仪参数, 进行计算机仿真。动镜速度的均方根误差控制在 2%, $\Delta p = 4.67 \times 2\% = 0.0934 \text{ cm/s}$, 设两种噪声均为高斯白噪声, 具体的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

项目	入射光谱	动镜速度	动镜均方根误差	采样抖动均方根误差
参数	250 K 黑体辐射	4.67 cm/s	$4.67 \times 2\%$	12.5 ns

图 3(a)、图 4(a)、图 5(a) 分别显示了存在动镜速度误差、采样抖动误差情况下 NERD 的数值模型

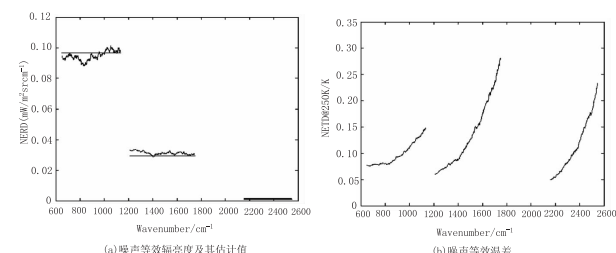


(a) 噪声等效辐射亮度及其估计值

(b) 噪声等效温差

图 3 动镜速度误差(抗混叠滤波的平坦度)引起的噪声

Fig. 3 Noise due to mirror speed error
(the flatness of anti-aliasing filter)



(a) 噪声等效辐射亮度及其估计值

(b) 噪声等效温差

图 4 动镜速度误差(抗混叠滤波器的延迟)引起的噪声

Fig. 4 Noise due to mirror speed error
(phase delay of anti-aliasing filter)

仿真(实线)和近似估计(虚线)。通过比较证明近似计算给出了很好的噪声均值,与实际的仿真具有一致性,可以简化描述仪器参数与光谱噪声的关系,便于设计中噪声估计和仪器参数控制。图3(b)、图4(b)、图5(b)则是对应的噪声等效温差(NETD)仿真结果。

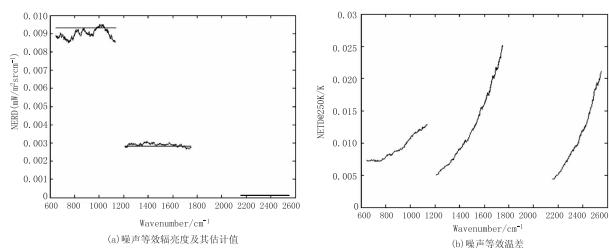


图5 采样抖动引起的噪声

Fig. 5 Noise due to sampling jitter

从图中可以看出,对于设计的傅里叶光谱仪,采样抖动造成的噪声最小,动镜速度波动和电路响应的不平坦性导致的噪声次之,而动镜速度波动和电路延时引起的噪声较大。探测器固有噪声与探测器噪声分别叠加了上述三种噪声源之后的噪声对比如图6所示。

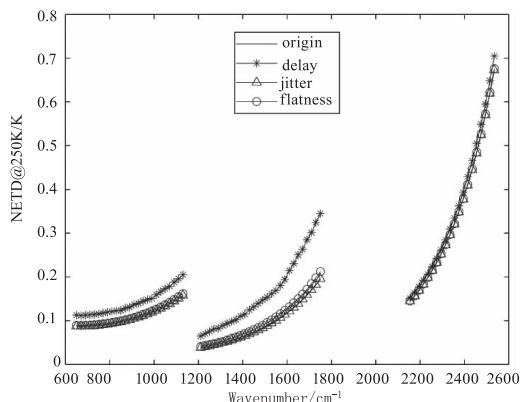


图6 探测器噪声与探测器噪声分别叠加其他噪声源之后的噪声比较

Fig. 6 Detector noise compared with the detector noise including other noise component

相对于探测器的原有噪声水平,采样抖动和电路响应平坦度对噪声几乎没有贡献,电路延时噪声会使总的噪声有一定增加,但也在指标允许的范围内。

5 总结

动镜速度的波动和采样过程中的随机抖动是傅

里叶变换光谱仪系统噪声的重要来源,而动镜速度波动引起的噪声又与电路响应平坦度、相位延迟有关。在设计时必须将动镜速度的波动以及采样抖动控制在一定范围内,同时在设计抗混叠滤波器时也要综合考虑其幅频响应平坦度和相位延迟,提高幅度响应平坦度、降低干涉信号和参考激光信号之间的时延差。

参考文献:

- [1] A S Zachor. Drive nonlinearity: their effects in Fourier spectroscopy [J]. Appl. Opt, 1977, 16(5): 1412 - 1424.
- [2] E E Bell, R B Sanderson. Spectral errors resulting from random sampling-position errors in Fourier transform spectroscopy [J]. Appl. Opt, 1972, 11(3): 688 - 689.
- [3] D Cohen. Performance degradation of a Michelson interferometer due to random sampling errors [J]. Appl. Opt, 1999, 38(1): 139 - 151.
- [4] D Cohen. Noise-equivalent change in radiance for sampling noise in a double-sided interferogram [J]. Appl. Opt, 2003, 42(13): 2289 - 2300.
- [5] L Palchetti, D Lastrucci. Spectral noise due to sampling errors in Fourier-transform spectroscopy [J]. Appl. Opt, 2001, 40(19): 3235 - 3243.
- [6] ZHOU Shichun. Introduction to advanced infrared optoelectronic engineering [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [7] Karl Schwantes, Doug Cohen, Peter Mantica, et al. Modeling Noise Equivalent Change in Radiance (NEdN) for the Cross-track Infrared Sounder (CrIS) [C]. Proc. SPIE, 2002, 4486: 456 - 463.
- [8] L Palchetti, B Carli. Analysis of different sampling procedures in Fourier-transform spectroscopy [C]. Proc. SPIE, 2002, 4485: 210 - 219.
- [9] Ya Kang. Analysis of Sampling Error in FTIR [C]. Proc. SPIE, 2013, 8761: 87610N - 1 - 6.
- [10] MEN Aidong, SU Fei, et al. Digital signal processing [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
门爱东, 苏菲, 等. 数字信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 156 - 161.