

转镜式傅里叶变换光谱仪光程差非线性的 拟合法补偿*

杨晓许^{1,2} 周泗忠¹ 相里斌¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 转镜式傅里叶变换光谱仪中光程差非线性带来了干涉图周期变化和相位误差, 对非线性的拟合法补偿利用采样得到的干涉图进行重构, 得到不含相位和周期误差的干涉图, 再按照均匀采样函数对干涉图进行二次采样, 消除非线性光程差对复原光谱的影响. 经过二次采样的干涉图不含周期和相位误差, 可以直接使用现有的软件进行光谱复原. 计算机仿真实验证明这种方法行之有效, 且利用 4 次多项式拟合干涉图效果更好.

关键词 光学工程; 转镜式傅里叶变换光谱仪; 光程差; 非线性补偿

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A

0 引言

转镜式傅里叶变换光谱仪依靠转动的镜体形成连续变化的光程差, 可以克服直线动镜的不足^[1,2], 实现快速的干涉图扫描和高速的光谱测量, 具有分辨率高、稳定性好等优点^[3,4], 越来越多的受到人们的关注. 在转镜式傅里叶变换光谱仪中, 由于转镜的转动, 形成了光程差变化的非线性^[5]. 文献[6]中指出: 光程差的非线性带来了干涉图周期的变化和相位误差, 也给复原光谱带来了噪音和波数漂移. 这是转镜式干涉仪中的不足之处. 文献[6]中提出通过修正复原光谱变换公式来进行非线性补偿. 但现有的光谱复原算法和软件, 比如快速傅里叶变换, 都是针对线性光程差系统的, 无法直接实现这种公式修正方法. 本文从另一个角度出发, 提出利用采样点对干涉图利用多项式拟合方法重构, 然后进行二次采样, 得到不含非线性光程差的干涉图, 从而消除光程差非线性对复原光谱的影响, 实现对非线性的补偿. 由于直接对干涉图进行了非线性补偿, 可以很方便地移植利用原有的光谱复原算法和软件.

1 光程差的非线性

转镜式傅里叶变换光谱仪按照转动的镜体不同, 分为反射式和透射式两种形式, 如图 1.

图 1(a) 的反射转镜系统中, 当入射和出射光线垂直时, 光程差大小为^[7]

$$X = 2R \left[\frac{1 + \sin 2\theta}{\cos(45^\circ - \theta)} - \frac{1 - \sin 2\theta}{\cos(45^\circ + \theta)} \right] \quad (1)$$

式中, R 为两个平行反射镜之间的距离, $\theta = \omega \cdot \tau$, ω 为转镜转动角速度, τ 为转过的零光程差位置的时间.

图 1(b) 的透射转镜系统中, 转镜产生光程差的公式为^[8]

$$X = 2t \cdot (L_1 - L_2 + \sqrt{2} \sin \theta) \quad (2)$$

式中

$$L_1 = (n^2 - 2^{-1} - 2^{-1} \sin 2\theta)^{1/2}, L_2 = (n^2 - 2^{-1} + 2^{-1} \sin 2\theta)^{1/2}, t \text{ 为转镜的厚度, } n \text{ 为折射率.}$$

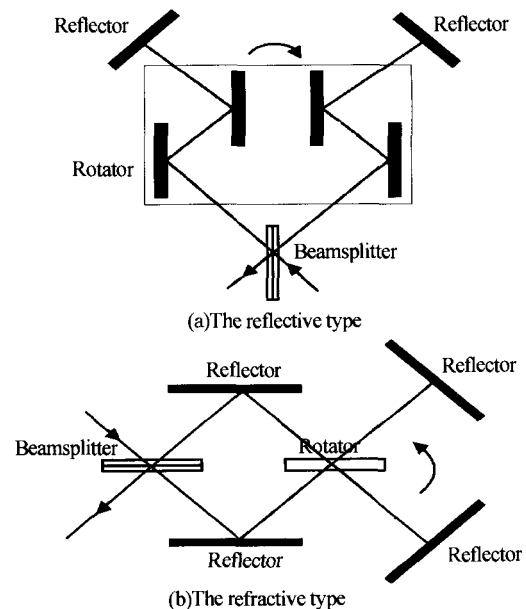


图 1 转镜式傅里叶变换光谱仪
Fig. 1 Rotary Fourier transform spectrometer

2 光程差非线性干涉图的采样

在光程差线性变化的理想系统中, 光程差和时间是正比关系, 即 $x \propto t$. 所以其干涉图周期是均匀的. 转镜式傅里叶变换光谱仪中, 由于光程差 X 和时间 τ

之间不是线性的关系,相当于得到的干涉图包含一个相位误差,或者认为其干涉图周期就是变化的。

无论是线性系统还是非线性系统,干涉图都被均匀地采样,采样函数如图 2(a)。在非线性系统中,含有相位误差的干涉图被如图 2(a)的采样函数相乘,相当于不含相位误差的干涉图被如图 2(b)的不等间隔采样函数相乘,如图 3,实线表示对干涉图的均匀采样,虚线表示对干涉图的非均匀采样。

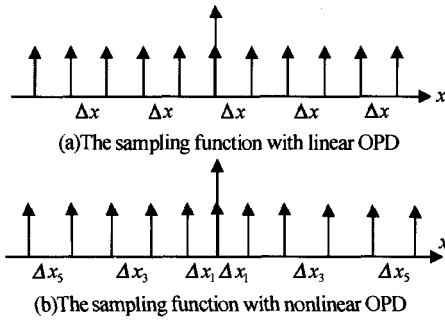


图 2 干涉图的线性和非线性采样函数
Fig. 2 Sampling function of interferogram

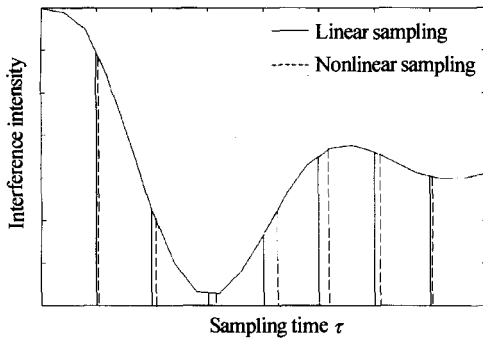


图 3 干涉图的非均匀采样
Fig. 3 Nonlinear sampling of interferogram

3 干涉图的二次采样

光程差非线性给复原光谱带来了噪声和波数漂移^[6],原因在于对干涉图的时间非均匀性采样,而在复原光谱时,使用的线性变化的光程差。根据采样定律,当采样频率大于奈奎斯特频率时,采样点可以不失真地恢复出原始信号。在光程差非线性系统中,对干涉图使用足够高的采样频率进行采样,可以利用采样点的光程差 x 和干涉强度 $I(x)$ 恢复得到整个完整的干涉图。对这个完整的干涉图进行二次采样,就可得到不含非线性误差的干涉图。即在图 3 中利用非均匀采样点拟合得到整个干涉曲线,再对干涉曲线利用均匀采样,进行光谱复原,可以消除光程差非线性带来的影响。

干涉图是一个连续变化的函数,在一个有限的区间上可近似表达为

$$I(x) = f(x) \approx \sum_{i=0}^N k_i \cdot x^i \tag{3}$$

式中 k_i 为多项式系数, x 为采样点光程差, N 为多项式最高次幂。二次采样的具体过程是:从第 N 个采样点开始,利用采样点 $x_{i-N+1} \sim x_{i+N-1}$ 的采样值和式(3)拟合干涉图,然后利用线性光程差和式(3)进行二次均匀采样,直到倒数第 N 个采样点结束。

4 计算机仿真实验

仿真实验将验证二次采样的有效性和比较不同最高次幂的效果。在以下的仿真实验中,采用如图 1(b)的透射转镜式傅里叶变换光谱仪。使用图 4(a)的任意假设原始光谱,取转镜折射率 $n=4.5$,工

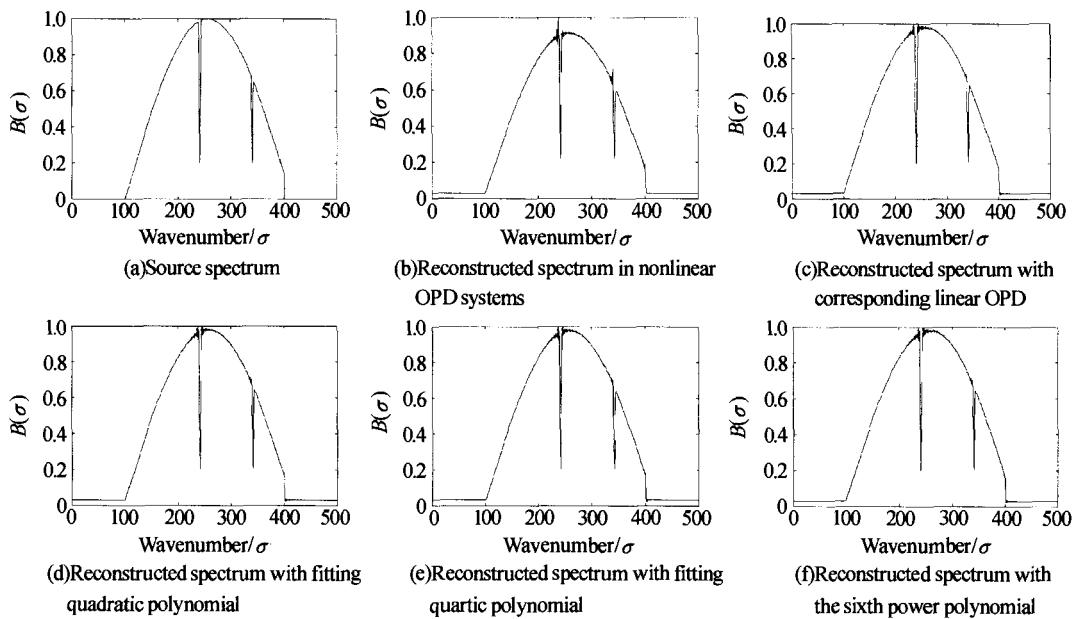


图 4 计算机仿真实验结果
Fig. 4 The results of computer simulation

作角 $\theta_{max} = 10^\circ$. 分别对于干涉图进行 2 次方、4 次方和 6 次方多项式拟合, 然后对重构的干涉图按照线性光程差二次采样, 进行光谱复原. 复原光谱时均未作切趾处理.

计算机仿真的效果如图 4.

1) 图 4(b) 为它的复原光谱, 可以明显看出非线性带来的噪声;

2) 图 4(c) 是在线性光程差系统中, 取相同的采样点数和最大光程差的复原光谱;

3) 图 4(d) 是对干涉图进行 2 次多项式拟合, 二次采样后复原的光谱. 可以看出, 非线性带来的噪声基本消失;

4) 图 4(e)、图 4(f) 分别是对干涉图按 4 次多项式和 6 次多项式拟合, 二次采样后的复原光谱. 可以看出非线性带来的误差基本消失, 情况和 2 次多项式拟合一致. 以线性系统的复原光谱作为期望值, 比较不同多项式拟合的复原光谱的误差, 见表 1.

表 1 不同多项式拟合的复原光谱误差

	未补偿	2 次方拟合	4 次方拟合	6 次方拟合
误差均方根	0.04	3.33×10^{-5}	3.32×10^{-6}	4.00×10^{-5}

从表中可以看出: 拟合后复原光谱误差大大减小, 接近 0; 4 次方的拟合效果比 2 次方和 6 次方要相对好些. 进一步的计算机仿真实验, 也证明了这个结论.

5 结论

转镜式傅里叶变换光谱仪中存在光程差的非线性, 由于这种非线性是可以计算的, 所以可以用数学手段消除它的影响. 利用多项式拟合对干涉图进行重构, 通过二次采样得到不含周期变化和相位误差的干涉图, 可以有效地消除光程差非线性的影响. 文中通过透射转镜系统的计算机仿真, 证明了这种方法的有效性. 从本质上来讲, 这种方法和前文中

傅立叶变换时光程差替换的方法是一致的. 干涉图多项式拟合方法直接得到不含光程差误差的干涉图, 可以很方便地使用其他通用算法和软件进行光谱复原. 同时, 可以拓宽转镜的折射率、工作角等参数的选择余地, 工程设计中具有很大的实践意义. 通过干涉图多项式拟合来消除光程差非线性的方法, 同样适用于其他非线性光程差系统.

参考文献

- 1 相里斌. 傅里叶变换光谱仪中的主要技术环节. 光子学报, 1997, **26**(6): 550~554
Xiangli B. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6): 550~554
- 2 杨晓许, 周泗忠, 相里斌. 转镜式干涉光谱仪中的误差容限研究. 光子学报, 2004, **33**(3): 338~341
Yang X X, Zhou S Z, Xiangli B. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 338~341
- 3 Winthrop W, Jens P D. Ultra high speed chemical imaging spectrometer. *SPIE*, 1997, **3082**: 148~194
- 4 Winthrop W, Jens P D. Rugged high speed rotary imaging Fourier Transform Spectrometer for industrial use. *SPIE*, 2002, **4577**: 83~88
- 5 苏星, 黄惠民. 基于高速转镜的高分辨率干涉光谱仪非线性理论研究. 光子学报, 2001, **30**(12): 1472~1480
Su X, Huang H M. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(12): 1472~1480
- 6 杨晓许, 周泗忠, 相里斌. 转镜式傅里叶变换光谱仪光程差非线性的研究. 光学学报, 2004, **24**(10): 1388~1392
Yang X X, Zhou S Z, Xiangli B. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1388~1392
- 7 Kauppinen J K, Salomaa I K, Partanen J O. Carousel interferometer. *Applied Optics*, 1995, **34**(27): 6081~6085
- 8 黄惠明, 周荫清, 周泗忠, 等. 转镜式干涉光谱仪光程差和非线性的研究. 光子学报, 2003, **32**(10): 1239~1243
Huang H M, Zhou Y Q, Zhou S Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1239~1243

Compensating Nonlinearity of Optical Path Difference of Rotary Fourier Transform Spectrometer with Fitting Interferogram

Yang Xiaoxu^{1,2}, Zhou Sizhong¹, XiangLi Bin¹

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-05-30

Abstract Because of rotating reflector or refractor, there is nonlinearity of Optical Path Difference (OPD) in high-speed rotary FT-Spectrometer. Nonlinearity which was studied to direct engineering in this paper is a very important aspect to be considered in designing system. In nonlinear OPD system, interferogram is sampled linearly, which brings interferogram phase and period error. The case corresponds to the interferogram without those errors sampled nonlinearly. Interferogram without phase and period errors can be reconstructed with those interferogram data sampled in unequal intervals through fitting polynomial. Then the reconstructed interferogram is sampled in equal intervals. Those data are used to reconstruct spectrum without noise caused by OPD nonlinearity. Computer simulation shows this method is effective, and fits interferogram with quartic polynomial well. The method is also effective in other nonlinear OPD systems.

Keywords Optical engineering; Rotary interference spectrometer; Polynomial fitting; Nonlinearity compensating



Yang Xiaoxu was born in 1972. He received his B. S. degree from the Henan Normal University in 1996. Now he is working for his Ph. D. degree in the Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His interesting fields include Fourier transform interferometer.