

文章编号: 0253-2239(2004)10-1388-5

转镜式傅里叶变换光谱仪光程差非线性研究

杨晓许^{1,2} 周泗忠¹ 相里斌¹ 吕群波^{1,2}

(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: 转镜式傅里叶光谱仪中,转镜的转动形成光程差的非线性。光程差非线性是转镜材料和工作角选择时要考虑的重要因素,通过对它的研究,可以为工程实践提供指导,为进一步研究奠定基础。通过输入单色光时的情况对干涉图进行研究,发现光程差非线性使干涉图的周期发生变化;通过和光程差线性系统的仪器函数比较对复原光谱进行研究,发现非线性给复原光谱带来了噪声和波数漂移。由于光程差的变化是已知的,在光谱复原时,用非线性的光程差代替傅里叶变换中的光程差,就可以对光程差非线性进行补偿。计算机仿真实验的结果表明,这种方法效果明显,经补偿后复原光谱中光程差非线性带来的噪声基本消失。

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

Studies on Nonlinearity of Optical Path Difference of Rotary Fourier Transform Spectrometer

Yang Xiaoxu^{1,2} Zhou Sizhong¹ Xiangli Bin¹ Lü Qunbo^{1,2}

(¹ *Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xian 710068*)
(² *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

(Received 15 December 2003; revised 3 February 2004)

Abstract: High-speed rotary Fourier transform spectrometer has nonlinearity of optical path differences (OPD) because of refractor's rotating. Nonlinearity is an important aspect to be considered when material of rotor and scan angle are chosen. It is studied to direct engineering and more studying here. Its effect on interferogram and reconstructed spectrogram are discussed. Nonlinearity of OPD can cause variance periodic of interferogram. And it introduces noise and wave number shift of reconstructed spectrogram. Since OPD can be calculated while refractor rotating, Nonlinear OPD can be replaced with corresponding linear OPD in Fourier Transform to compensate the nonlinearity of OPD. The computer simulation testifies this method being effective. Noise caused by nonlinearity in reconstructed spectrogram disappears after being compensated.

Key words: optical engineering; rotary Fourier-transform spectrometer; optical path difference; nonlinearity compensating

1 引 言

傅里叶变换光谱仪(Fourier transform spectrometer, FTS)在科研、环境、军事等方面得到了越来越广泛的应用^[1~3]。传统的迈克耳孙傅里叶变换(FT)-光谱仪具有结构复杂,不能快速测量等

不足。转镜式傅里叶变换-光谱仪中用转镜代替直线移动的精密切镜,光谱分辨率高、时间分辨率高;转镜高速转动的惯性,使它具有良好的抗干扰性;转镜式傅里叶变换-光谱仪不需要参考激光,所以结构简单,还具有体积小、稳定性好的优点^[4]。国外的转镜式傅里叶变换-光谱仪已取得了很好的实验结果^[5],国内也正在研究之中。

转镜式傅里叶变换-光谱仪中转镜用于产生光

E-mail: yxx@opt. ac. cn

收稿日期:2003-12-15;收到修改稿日期:2004-02-03

程差,是整个傅里叶变换-光谱仪的关键部分。由于转镜转动,形成了光程差变化的非线性。这是比迈克耳孙傅里叶变换-干涉仪不足的地方。这种非线性,会带来干涉图周期性的变化,从而给复原的光谱图带来较大的影响,也是工程设计中选择转镜参量的限制因素。

针对非线性对系统的影响,可以在光谱复原时进行补偿,这将大大减小非线性带来的影响。这对于提高复原光谱的质量,降低工程设计的难度,都有极大的意义。

2 系统介绍

转镜式傅里叶变换-光谱仪的光学及干涉系统如图 1 所示。LC 为前置望远系统,BS 为半透半反的分束镜,M 为反射镜,ME 为垂直反射镜,D 为探测器,LF 为后置光学系统,R 为转镜。

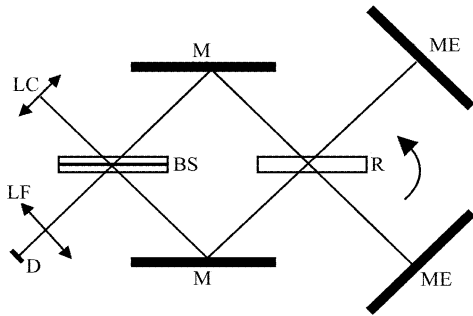


Fig. 1 Rotary Fourier transform spectrometer

工作时,来自目标的光束经前置望远光学系统变成平行光束,然后投射到分束器 BS 上,BS 使其分为反射光束和透射光束,反射光束和透射光束分别经反射镜 M、穿过转镜 R、反射镜 ME、反射镜 M 后回到分束器 BS。当两光束经过转镜时,对转镜的入射角不同,使两束光形成了光程差。光程差的大小随着转镜的转动变化。两束相干光束中的一束沿与入射方向垂直的方向被探测器 D 接受。干涉点的光强随光程差变化而变化,等间隔地测量一系列干涉强度值 $I(x)$, 然后进行傅里叶变换就可得到复原光谱图,其数学表达式为

$$I(x) = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} B(\sigma) \cos(2\pi x \sigma) d\sigma, \quad (1)$$

$$B(\sigma) = \int_0^{x_{\max}} I(x) \cos(2\pi x \sigma) dx, \quad (2)$$

式中 $I(x)$ 为干涉强度, x 为光程差, $B(\sigma)$ 为光谱强度, σ 为波数。

3 光程差的非线性

系统中,转镜产生光程差的公式为^[6]

$$X = 2t \cdot (L_1 - L_2 + \sqrt{2} \sin \theta), \quad (3)$$

式中

$$L_1 = \sqrt{n^2 - 2^{-1} - 2^{-1} \sin 2\theta},$$

$$L_2 = \sqrt{n^2 - 2^{-1} + 2^{-1} \sin 2\theta},$$

$\theta = \omega\tau$, t 为转镜的厚度, n 为折射率, ω 为转镜转动角速度, τ 为转过的零光程差位置的时间。

图 2 是光程差随时间变化的示意图。图中实线是实际的光程差,虚线是理想的线性变化的光程差。从图中明显地可以看出光程差和时间之间的非线性关系。

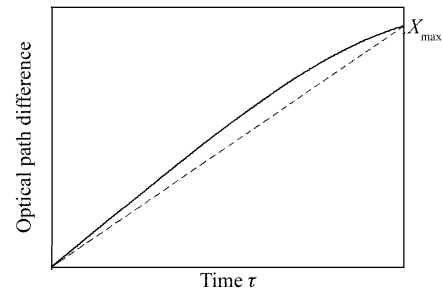


Fig. 2 Nonlinearity of optical path difference

文献[3]中对非线性进行了分析,指出使非线性最小的折射率在 2.9 左右,而且较大折射率的线性要优于较小折射率的线性。而且,转角越大,非线性越大。

4 非线性对系统的影响及补偿

4.1 对采样干涉图的影响

在光程差线性变化的理想系统中,单色光形成的干涉图是一个余弦函数,即 $I(x) = B(\sigma_0) \cos(2\pi\sigma_0 x)$ 。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。干涉图被均匀地采样,在数学上,意味着用一个狄拉克 δ 函数乘(1)式。采样函数如图 3(a)所示^[7]。

$$I_s(x) = I(x) \text{samp}(x) =$$

$$I(x) \left[\frac{1}{\Delta x} \text{comb} \left(\frac{x}{\Delta x} \right) \right] = \sum_{n=N_{\min}}^{N_{\max}} I(n \cdot \Delta x) \cdot \delta(x - n \cdot \Delta x), \quad (4)$$

其中,

$$\text{samp}(x) = \frac{1}{\Delta x} \text{comb} \left(\frac{x}{\Delta x} \right),$$

$$\text{comb} \left(\frac{x}{\Delta x} \right) = |\Delta x| \cdot \sum \delta(x - n \cdot \Delta x),$$

Δx 为抽样间隔。

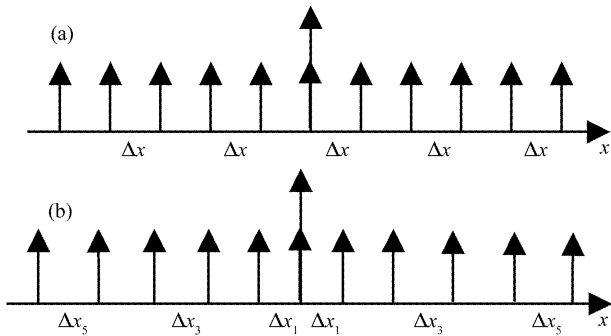


Fig. 3 Sampling function of interferogram. (a) The sampling function with linear optical path difference, (b) The sampling function with nonlinear optical path difference

转镜式傅里叶变换-光谱仪中,单色光的干涉图为 $I(X) = B(\sigma_0) \cos(2\pi\sigma_0 X)$ 。由于光程差 X 和时间 τ 之间不是非线性的关系,所以其干涉图周期就是变化的。这种干涉图周期的变化,可以作为对非线性要求的一个判据。此时,干涉图依然被时间等间隔地抽样,这就意味着(4)式中的 Δx 不再是一个定值,而是一个随时间变化的值。采样函数如图 3(b) 所示。

4.2 对复原光谱的影响

在线性光程差系统中,输入单色光时的复原光谱被称为仪器线形函数(Instrumental line shape, ILS),可用(5)式表示^[8]:

$$\begin{aligned} \text{ILS}(\sigma) = B(\sigma_0) \int_0^{x_{\max}} \cos(2\pi\sigma_0 x) \cos(2\pi\sigma x) dx = \\ B(\sigma_0) x_{\max} \{ \text{sinc}[2\pi(\sigma - \sigma_0)x_{\max}] + \\ \text{sinc}[2\pi(\sigma + \sigma_0)x_{\max}] \}, \quad (5) \end{aligned}$$

在非线性光程差系统中,输入单色光时的复原光谱为

$$\begin{aligned} \text{ILS}_{\text{NL}}(\sigma) = B(\sigma_0) \int_0^{x_{\max}} \cos(2\pi\sigma_0 X) \cos(2\pi\sigma x) dx = \\ \text{ILS} * \mathcal{P}[\cos(2\pi\sigma_0 \epsilon)] - N(\sigma), \quad (6) \end{aligned}$$

式中 $\mathcal{P}()$ 为傅里叶变换,

$$\begin{aligned} N(\sigma) = 2B(\sigma_0) \int_0^{x_{\max}} \sin(2\pi\sigma_0 \epsilon) \sin(2\pi\sigma x) \times \\ \cos(2\pi\sigma_0 x) dx, \end{aligned}$$

$\epsilon = X - x$ 为非线性光程差的误差。

可以看出,光程差非线性给 ILS 带来了较大的影响。图 4 中实线是线性光程差系统的 ILS,虚线是非线性光程差系统的 ILS。很明显可以看出非线性系统的 ILS 有较强的旁瓣,而且还产生了波数漂移。

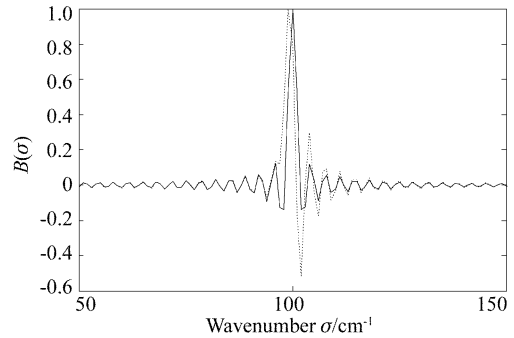


Fig. 4 Instrumental line shape of nonlinear optical path difference system

4.3 非线性的补偿

如果在(6)式中使用非线性的光程差 X 代替积分式中的 x ,则有

$$\begin{aligned} \text{ILS}_{\text{NL}}(\sigma) = B(\sigma_0) \int_0^{x_{\max}} \cos(2\pi\sigma_0 X) \times \\ \cos(2\pi\sigma X) dx = \text{ILS}(\sigma). \quad (7) \end{aligned}$$

补偿后的 ILS 和线性光程差系统的相等。所以,通过对光谱复原的傅里叶变换式中的光程差 x 进行替换,可以达到对光程差非线性补偿的目的。

$$\begin{aligned} B(\sigma) = \int_0^{x_{\max}} I(X) \cos(2\pi\sigma X) dX = \\ \int_0^{x_{\max}} I[X(\tau)] \cdot X'(\tau) \cos[2\pi\sigma X(\tau)] d\tau, \quad (8) \end{aligned}$$

写成实际使用的离散化的和式为

$$B(\sigma) = \sum_{i=0}^N I[X(\tau_i)] \cos[2\pi\sigma X(\tau_i)] \frac{dX}{d\tau} \Big|_{\tau=\tau_i}, \quad (9)$$

其中 N 为干涉图的采样点数, $I[X(\tau_i)]$ 为第 i 个采样值。

5 计算机仿真实验

在以下的仿真实验中,都使用图 5 所示的任意假设原始光谱。除专门说明外,均取转镜折射率 $n = 4.5$, 工作角 $\theta_{\max} = 10^\circ$ 。

5.1 不同折射率时复原光谱的比较

图 6(a)、图 6(b)、图 6(c) 分别是 $n = 1.5$ 、 $n = 2.9$ 和 $n = 4.5$ 时的复原光谱。可以看出, $n = 4.5$ 时的复原光谱失真要小于 $n = 1.5$ 、 $n = 2.9$ 时的复原光谱失真是其中最小的。这证明了文献[3]中大折射率优于小折射率、最佳折射率在 2.9 左右的结论。

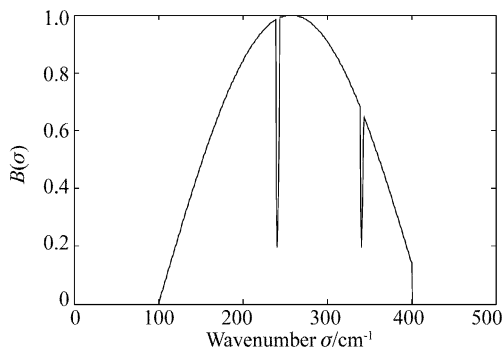


Fig. 5 Source spectrum

5.2 不同转角时复原光谱的比较

图 6(c)、图 6(d)是 $n = 4.5$ 时, $\theta_{\max} = 10^\circ$ 和 $\theta_{\max} = 5^\circ$ 的复原光谱图。可以看出工作角越大,复原光谱越

差。这证明了文献[6]中转角越大,线性越差的结论。

5.3 非线性对复原光谱的影响

为了和光程差线性系统比较,在另外一个光程差线性的系统中,取和图 6(c)非线性系统中相同的最大光程差和采样点数,复原出来光谱图如图 6(e)所示。比较图 6(c)、图 6(e)可以看出,非线性系统的复原光谱中,有较强的噪声出现。

5.4 非线性补偿后的复原光谱

图 6(f)是在非线性系统中,采用(8)式光谱复原,对非线性补偿后的复原光谱图。和图 6(c)、图 6(e)比较可以看出,在补偿后的复原光谱图中,非线性噪声明显消失,和线性系统的复原光谱图基本一致。这说明了(8)式的非线性补偿的方法是有效的。

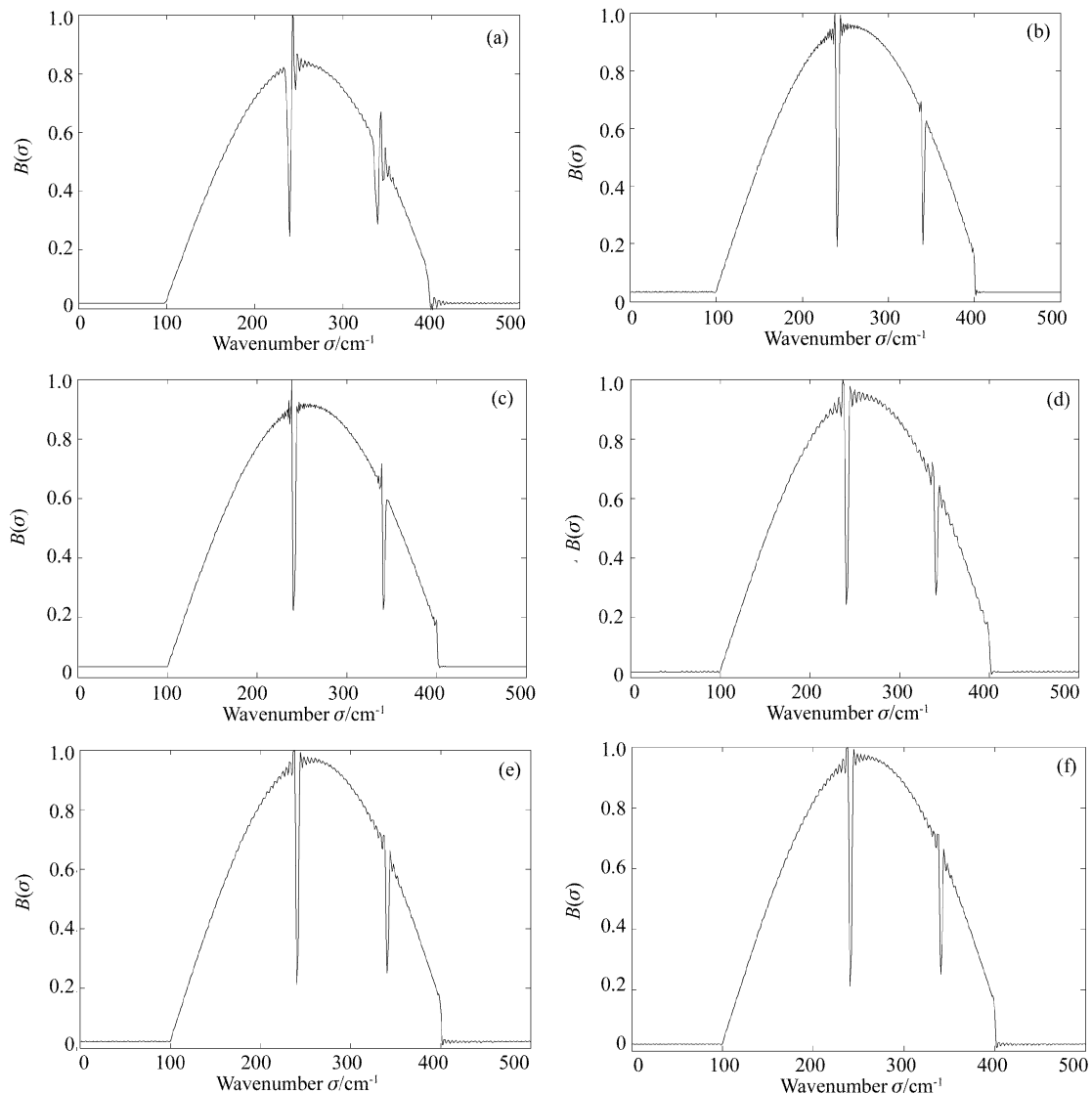


Fig. 6 The results of computer simulation. (a) Reconstructed spectrum when $n=1.5$, (b) reconstructed spectrum when $n=2.9$, (c) reconstructed spectrum when $n=4.5$, (d) reconstructed spectrum when $\theta_{\max}=5^\circ$, (e) reconstructed spectrum with corresponding linear optical path difference, (f) reconstructed spectrum with nonlinearity compensating

结论 由于转镜的转动形成光程差,转镜式傅里叶变换-光谱仪的光程差具有非线性。非线性同转镜的折射率、转角有关,最后的计算机仿真实验证明了这个结论。光程差非线性使干涉图的周期发生变化,并使仪器线形函数有较强的噪声和波数漂移。仿真实验表明,非线性对复原光谱带来了较大影响。用非线性的光程差代替傅里叶变换中的光程差,可以实现对非线性进行补偿。计算机仿真实验结果表明,这种方法效果明显,复原光谱中的非线性带来的噪声基本消失。这种补偿的方法对于其它光程差非线性的系统同样适用。转镜式傅里叶变换-光谱仪中采用非线性补偿后,大大拓宽了转镜的折射率、工作角等参量的选择余地,工程设计中具有很大的实际意义。

参 考 文 献

- 1 Zhang Chunmin, Wang Wei, Xiangli Bin *et al.*. Interference image spectroscopy for upper atmospheric wind field measurement. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(2): 234~239 (in Chinese)
- 2 Li Zhigang, Wang Shurong, Li Futian. Fouier transform spectrometer for ultraviolet and vacuum ultraviolet regions. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(4): 459~462 (in Chinese)
- 3 Li Yunsong, Wu Chengke, Chen Jun *et al.*. Spectral satellite image compression based on wavelet transform. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(6): 691~695 (in Chinese)
- 4 Winthrop Wadsworth, Jens Peter Dybwad. Ultra high speed chemical imaging spectrometer. *Proc. SPIE*, 1997, **3082**: 148~194
- 5 Winthrop Wadsworth, Jens Peter Dybwad. Rugged high speed rotary imaging Fourier Transform Spectrometer for industrial use. *Procl. SPIE*, 2002, **4577**: 83~88
- 6 Huang Huiming, Zhou Yinqing, Zhou Sizhong *et al.*. Studies on optical path difference and its nonlinearity of high speed rotary spectrometer. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2003, **32**(10): 1239~1243 (in Chinese)
- 7 Hu Changqing. *Studies on Fourier-Transform Spectroscopy* (傅立叶变换光谱技术的研究) [MS dissertation]. Xi' an: Xi' an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 1987. 46~48 (in Chinese)
- 8 Zhang Zhilian. *Fourier-Transform Spectroscopy* (傅里叶变换光谱). Beijing: Beijing University Press, 1990. 10~12 (in Chinese)



征 订 启 事

《光学手册》

顾问: 龚祖同 主编: 李景镇 陕西科学技术出版社 16开, 1541页, 定价: 100.00元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有2700多个公式, 1400余幅插图和400多个数据表格, 230万字。手册包括25个光学分科, 5个附录, 2个索引。由20多位光学专家编撰完成, 在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助, 保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富, 表达方式详细得当, 是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于2003年10月19~22日在上海举行, 会议论文集由《中国激光》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每册100元, 光盘版为每张50元。

本期增刊共收录了170多篇论文, 约600多页。出版时间为2004年3月。论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化最新成果, 显示了激光科学技术对国家863计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于2003年10月13~16日在上海举行, 会议论文集由《光学学报》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每套100元, 光盘版为每张50元。

论文集共收录论文436篇, 800多页, 分上下两册。对该论文集OECC会议节目委员会的评价是: 质量之高, 可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话: 021-69918428, 021-69918011

请从邮局汇款 地址: 上海800-211信箱, 光学期刊联合编辑部 邮编: 201800

光学期刊联合编辑部
2004年4月