

文章编号: 1001-3806(2013)03-0409-04

弹光调制干涉具干涉数据的获取及光谱复原

王明艳¹, 王志斌^{1,2*}, 张记龙^{1,2}

(1. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 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, 太原 030051)

摘要: 为了获得弹光调制干涉具干涉信号的频谱, 需进行光谱反演, 但因其相位是非线性的, 直接采用快速傅里叶变换反演光谱会导致光谱严重失真, 因此提出采用非均匀快速傅里叶变换算法对干涉数据进行光谱反演的方法。首先采用基于高速数据采集卡 PCI-5122 设计的虚拟示波器获取 652.6nm 激光经弹光调制干涉具的干涉数据, 然后在 MATLAB 环境中对干涉数据进行光谱反演, 得到了相应的频谱信息。结果表明, 对采集的 652.6nm 激光波长测量误差小于 1nm, 谱线位置误差小于 0.1%, 验证了该算法在弹光调制非均匀干涉数据光谱反演的可行性, 这对弹光调制高性能傅里叶变换光谱仪的设计有借鉴应用价值。

关键词: 傅里叶光学与光信号处理; 弹光调制器; 干涉数据; 非均匀快速傅里叶变换; 光谱反演

中图分类号: TH744.3 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.031

Acquisition of photoelastic modulator interferometer data and spectrum recovery

WANG Ming-yan¹, WANG Zhi-bin^{1,2*}, ZHANG Ji-long^{1,2}

(1. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to obtain the frequency spectrum of a photoelastic modulator interferometer, it needs spectrum recovery. Because of the nonlinear phase, the effect of spectrum recovery is poor by using the fast Fourier transform, so the non-uniform fast Fourier transform algorithm was proposed for spectrum recovery of the interference data. Firstly, the interference data with 652.6nm laser passing through the photoelastic modulator interferometer was obtained by the virtual oscilloscope based on high-speed acquisition card PCI-5122. Then, the spectrum interference data was recovered with Matlab software. The recovery results show that the wavelength measurement error of the collected 652.6nm laser data is less than 1nm, the recovered error is less than 0.1%, which verifies the feasibility of the algorithm for the spectrum recovery of non-uniform photoelastic modulation interference data and have reference value for the design of high-performance photoelastic modulator-Fourier transform spectrometer.

Key words: Fourier optics and optical signal processing; photoelastic modulator; interference data; non-uniform fast Fourier transform; spectrum recovery

引言

现阶段, 弹光调制干涉具因其具有高速、宽光谱

范围的特点, 在科学研究、环境检测、军工测试等方面有广泛的应用前景^[1-3]。但是到目前为止, 基于弹光调制干涉具的傅里叶变换光谱仪仍然处于研究阶段。因弹光调制干涉具获取的干涉数据与传统傅里叶变换干涉具获取的数据不同, 其相位是非线性的, 而快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)只适应于相位均匀采样的情况, 对于相位非均匀采样的干涉数据不再实用^[4]。本文中的弹光调制干涉具就是利用弹光晶体效应产生光程差, 实现双光束干

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61127015); 国家国际科技合作专项计划资助项目(2012DFA10680)

作者简介: 王明艳(1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事光谱成像仪数据处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

收稿日期: 2012-08-22; 收到修改稿日期: 2012-09-29

涉。它所产生的干涉信号是非线性的,不能采用常用的 FFT 复原光谱,它会导致光谱严重失真,所以,必须研究相位非线性的光谱复原的新方法,即非均匀快速傅里叶变换(non-uniform fast Fourier transform,NUFFT)算法^[5-7]。

目前,这种算法已经在转镜式傅里叶变换光谱仪和时空联合调制干涉光谱成像仪中被广泛地应用。在转镜式傅里叶变换光谱仪中,由于转镜的转动形成非线性光程差,这样导致干涉信号的非线性变化^[8-11];在时空联合调制干涉光谱成像仪中,为了获得完整的光谱信息,须经过全视场推扫,由于推扫过程的非均匀性,导致干涉图存在非均匀的采样问题^[12]。但截止到现在,并没有将其应用在弹光调制傅里叶变换光谱仪中,所以,有必要对 NUFFT 算法进行深入研究,并依此来完成弹光调制干涉具光谱的反演工作。

1 弹光调制干涉具的基本原理

弹光调制干涉具基本原理如图 1 所示,入射光 I_{in} 经过起偏器 P_1 、弹光晶体 M ,由于弹光晶体双折射被分成 o 光和 e 光,两束光产生的光程差为 $x = l\Delta n$ (迈克逊干涉具为 $x = n\Delta l$) 其中 $\Delta n = B \sin(\omega t)$ 为折射率差; B 为双折射率差的最大值; ω 是调制角频率; l 为晶体中通光路径长度。再经过检偏器 P_2 ,由探测器得到干涉信号,然后用 NI 公司提供的高速数据采集卡 PCI-5122 设计的虚拟示波器^[13]NI Scope 软面板分别记录 632.8nm 652.6nm 激光的干涉条纹函数,并以 632.8nm 激光为标准通过傅里叶变换即可恢复待测 652.6nm 激光的光谱曲线。

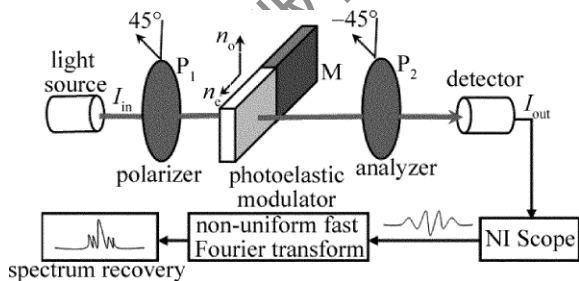


Fig. 1 Basic birefringence interferometer

当入射光为 $I_{in}(\sigma)$ 、波数为 σ 时,通过弹光调制干涉具后,所得到的干涉信号为:

$$I_{out}(t) = \int_0^{\infty} I_{in}(\sigma) \cos\left[2\pi \frac{l(n_o - n_e)}{\lambda}\right] d\sigma = \int_0^{\infty} I_{in}(\sigma) \cos\left[2\pi \frac{l\Delta n}{\lambda}\right] d\sigma =$$

$$\int_0^{\infty} I_{in}(\sigma) \cos[2\pi B l \sigma \sin(\omega t)] d\sigma \quad (1)$$

式中 $I_{in}(\sigma)$ 是入射光的光谱, n_o 和 n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率, $X = Bl$ 为干涉信号的最大光程差。通过对干涉数据 $I_{out}(t)$ 进行傅里叶变换就可以恢复入射光的光谱 $I_{in}(\sigma)$:

$$I_{in}(\sigma) = \int_0^{T_0/4} I_{out}(t) \cos[2\pi B l \sigma \sin(\omega t)] dt \quad (2)$$

式中 T_0 为调制周期。

2 光谱反演算法及其实现

2.1 NUFFT 算法

非均匀快速傅里叶变换(NUFFT)算法的基本原理如下:非均匀干涉数据反演其实就是用 1 组均匀傅里叶变换系数的线性组合来近似表示,即寻求 $x_{k-q/2}$ ($k=0, \dots, q$) 满足下面条件:

$$S_j w^{jmc} = \sum_{k=[mc]-q/2}^{[mc]+q/2} x_{k-q/2}(c) w^{jk} \quad (3)$$

式中 $m \geq 2$, $w = e^{-i2\pi/(mN)}$, $[mc]$ 表示最接近 mc 的整数, q 为正偶数, $c = N\nu$, ν 为非均匀采样点, S_j ($j = -N/2, \dots, N/2 - 1$) 为一种窗函数,也可以称为精度因子或者比例因子。

窗函数的选择是一个关键性的问题,理想情形下,它在频域是具有紧支撑的,在时域也有很好的能量集中性质。本文中 choice Gaussian 窗函数作为卷积核函数来进行光谱反演,以提高频率分辨率。将 (3) 式表示成矩阵形式,即为:

$$Ax(c) = v(c) \quad (4)$$

因 (3) 式为超定方程组,没有精确解,通过最小二乘法求解,可得 $x(c)$ 的最小二乘解为:

$$x(c) = F^{-1}a(c) \quad (5)$$

式中 $a(c) = A^H v(c)$, $F(m, N, q) = A^H A$ (H 代表共轭转置)。

2.2 NUFFT 算法的光谱反演

弹光调制干涉具中,因光程差 X 和时间 t 之间的非线性导致干涉图周期是变化的。而 FFT 要求时间必须是均匀的,因此本文中采用 NUFFT 算法,它是针对非均匀的采样数据设计的算法。在进行光谱反演的过程中,不仅提高了谱重建的运算效率,而且保证了重建光谱的精度。

NUFFT 算法反演光谱的基本步骤为: (1) 用 632.8nm 和 652.6nm 激光通过弹光调制干涉具产生干涉数据 $I_{out}(t)$, 用 NI Scope 软面板采集 1 组非

均匀的干涉数据 $I_{out}(t)$ 进行保存; (2) 寻找一个合适的脉冲函数 $x(c)$ (如高斯脉冲函数) 与非均匀的干涉信号 $I_{out}(t)$ 进行卷积, 得到卷积后的数据为 $I(\tau)$:

$$I(\tau) = I_{out}(t) * x(c) \quad (6)$$

(3) 对卷积后的数据以确定的均匀采样间隔进行重采样, 得到均匀采样后的卷积数据 $T(\tau)$:

$$T(\tau) = I(\tau) s(\tau - n\Delta\tau) \quad (7)$$

式中 $s(\tau - n\Delta\tau)$ 为采样函数; (4) 对均匀采样的卷积数据进行周期延拓, 然后用 FFT 对周期延拓后的数据进行快速傅里叶变换, 得到卷积数据的离散变换谱 $I_{in}(\sigma)$; (5) 对得到的离散变换谱 $I_{in}(\sigma)$ 进行退卷积, 得到非均匀干涉数据 $I_{out}(t)$ 对应的变换谱 $I_{in}(\sigma)$, 假定脉冲函数对应的离散变换谱为 $G(\sigma)$, 则:

$$I_{in}(\sigma) = I_{in}'(\sigma) / G(\sigma) \quad (8)$$

3 干涉数据的获取及光谱反演

3.1 干涉数据参量设置

本文中测试使用的标准光谱仪是日本的 Q8344A 型光谱仪, 使用的激光器是固体 He-Ne 激光器, 波长分别为 632.8nm 和 652.6nm, 使用的采集卡是美国 NI 公司的 PIC-5122 采集卡。首先用 Q8344A 型光谱仪分别测得标准的 632.8nm 和 652.6nm 激光的光谱, 然后用弹光调制干涉具测量 632.8nm 和 652.6nm 激光得到 2048 个点的干涉数据, 为了保证光谱分辨率, 提取单周期的干涉信号, 按照非均匀采样光程差得到的是非均匀采样干涉信号, 再利用 NIFFT 算法对非均匀的干涉信号进行光谱反演, 以 632.8nm 激光作为参考光, 确定同样驱动电压和晶体振动频率下 652.6nm 激光产生的干涉数据, 并与理想情况下的光谱数据进行对比。仿真所用的参量为 632.8nm、652.6nm 的激光, 弹光晶体振动频率为 50kHz, 最大光程差 $X = 10757.6\text{nm}$ 。

3.2 干涉谱图的采集与处理分析

3.2.1 632.8nm 激光干涉数据的获取 干涉数据获取是整个弹光调制干涉具的关键环节, 通过频谱复原才能将空间分布的干涉信号转变为频谱信息。作者利用 NI 公司高速数据采集卡 PCI-5122 设计的虚拟示波器的软面板 NI Scope, 来采集 632.8nm 激光产生的干涉数据并完成存储采集回来的干涉数据, 设置采样点数为 2048 个点, 然后在 MATLAB 环境中提取单周期的干涉数据, 有效点数为 1024 个点, 能够完整地复原出光谱的全部信息。提取的过程如图 2 所示。

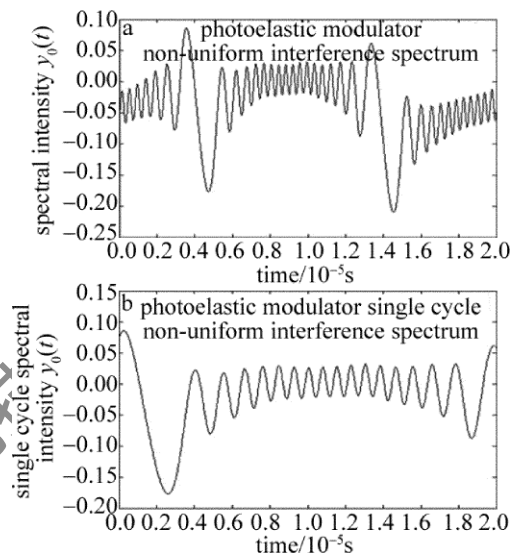


Fig. 2 Extracting process of single cycle interference signals
a—2048 points interference data b—single cycle interference data

3.2.2 632.8nm 激光干涉数据反演光谱及谱线标定 对非均匀光程差得到的干涉信号进行插值, 对相应干涉信号进行 FFT 来完成 632.8nm 激光光谱的反演。干涉数据傅里叶变换后是相应激光的频谱分布, 为得到其波长分布信息, 需进行谱线的标定。图 3a 和图 3b 分别是 632.8nm 激光通过标定前后的光谱, 图 3c 为日本 Q8344A 型光谱仪测试的该波长激光光谱。图 3a 的横坐标代表干涉条纹个数, 图 3b 的横坐标代表波数, 图 3c 的横坐标代表波长。3 个图的纵坐标均为光强。

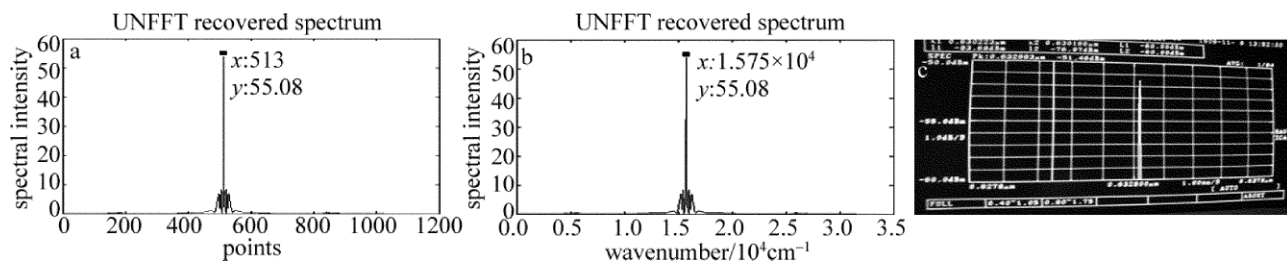


Fig. 3 Recovered 632.8nm laser spectrum
a—before calibration b—after calibration c—632.8nm laser test based on Q8344A spectrometer

3.2.3 652.6nm 激光干涉数据反演光谱及误差分析 本文中用 632.8nm 激光光谱对弹光干涉具产生的干涉数据进行光谱反演后的激光光谱进行标定,再将前端的激光换为波长为 652.6nm 的激光探头,通过弹光干涉具后,用 NI Scope 采集干涉数据,对采集到的干涉数据进行傅里叶变换,得到单色光谱,从而可以得到实际谱线与理论谱线的偏差。

Q8344A 型光谱仪测试的 652.6nm 激光如图 4 所示,对 652.6nm 激光测试的部分干涉数据及反演结果如表 1 所示。

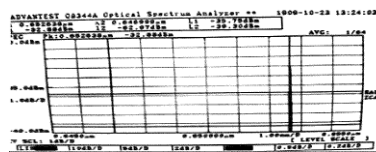


Fig. 4 652.6nm laser test based on Q8344A spectrometer

Table 1 652.6nm laser measurement results and error analysis

center wavelength of laser tested by Q8344A spectrometer/nm	center wavenumber of the recovered spectrum/cm ⁻¹	center wavelength of the recovered spectrum/nm	wavelength error/nm	error proportion/%
652.6	1.533 × 10 ⁴	652.3	0.3	0.046
	1.533 × 10 ⁴	652.3	0.3	0.046
	1.533 × 10 ⁴	652.3	5.3	0.046
	1.533 × 10 ⁴	652.3	0.3	0.046
	1.534 × 10 ⁴	652.0	0.6	0.092

由表 1 可以看出,反演后 652.6nm 激光谱线的位置与谱线的实际位置相差小于 1nm,谱线位置误差比例小于 0.1%,波长均值为 $\lambda = 652.24\text{nm}$,标准差为 $\eta = 0.117\text{nm}$,平均相对误差为 $\delta = 0.0552\%$ 。由此可以看出,标定后的光谱能较好地反映激光的频谱信息。据研究结果分析,造成这种误差有两方面的原因:(1)采集回来干涉数据的不均匀性;(2)算法中核函数的优化问题。针对性的对以上两方面加以改进,则可以进一步降低误差,提高精度。

4 结论

针对弹光调制干涉具产生干涉数据的信息,将 NUFFT 算法应用在光谱数据的反演过程中,采用了实验过程中采集到 632.8nm 激光通过弹光晶体的干涉信号反演出其光谱,并以其作为参考光测试了 652.6nm 激光的光谱信息,分析了反演精度,完成了干涉数据的采集、存储和反演过程。实验结果表明,使用此算法可以较好地分辨出不同波长的激光光谱信息,能够突破弹光调制干涉具的关键技术,使光谱分辨率有所提高,但是由于算法的优化程度不够和采集回来干涉数据和仿真的干涉数据之间的误差,造成光谱反演的精度方面还待提高,需要对算法进行更深层次的研究。

参考文献

- [1] KEMP J C. Piezo-optical birefringence modulators: new use for a long-known effect[J]. Journal of the Optical Society of America, 1969, 59(8): 950-953.
- [2] CANIT J C, BADOZ J. New design for a photoelastic modulator [J]. Applied Optics, 1983, 22(4): 592-594.
- [3] YANG D, CANIT J C, GAIGNEBET E. Photo-elastic modulator: polarization modulation and phase modulation [J]. Journal of Optics(Paris), 1995, 26(4): 152-159.
- [4] COOLEY J W, TUKEY J W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series [J]. Mathematics of Computation, 1965, 19(90): 297-301.
- [5] XUE H, ZHANG L, LIU Y N. Overview of nonuniform fast Fourier transformation [J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2010, 19(3): 33-46(in Chinese).
- [6] FESSLER J A, SUTTON B P. Nonuniform fast fourier transforms using min-max interpolation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(2): 560-574.
- [7] LIU Q H, NGUYEN N. An accurate algorithm for nonuniform fast Fourier transform(NUFFT' s) [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1998, 8(1): 18-20.
- [8] JING J J, XIANGLI B, LÜ Q B. Analysis on spectrum recovery for nonuniform sampling interferogram [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1211006(in Chinese).
- [9] YANG X X, ZHOU S Zh, XIANGLI B, et al. Studies on nonlinearity of optical path difference of rotary Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(10): 1388-1392(in Chinese).
- [10] YAO T, LÜ Q B, XIANGLI B, et al. Comparison of correction methods for nonlinear optic path difference of reflecting rotating Fourier transform spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1678-1682(in Chinese).
- [11] HU C G, SUN L D, LI Y N, et al. Retardation correction for photoelastic modulator based multi-channel reflectance difference spectroscopy [J]. Journal of the Optical Society of America, 2008, 25(6): 1240-1245.
- [12] YIN Sh M, XIANGLI B, ZHOU J S, et al. Real-time data processing of interferential imaging spectrometer based on FPGA [J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2007, 26(4): 274-278(in Chinese).
- [13] WU Z Ch, ZHANG T H. Signal acquisition and processing based on PXI-6225 [J]. Instrumentation Technology, 2010(4): 16-18(in Chinese).