

弹光调制非等相位干涉信号的快速光谱反演算法

王明艳¹ 王志斌^{1,2} 张记龙^{1,2} 张敏娟¹ 陈友华¹ 景 宁¹
(¹ 中北大学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 在弹光调制-傅里叶变换光谱仪(PEM-FTS)中,由于调制光程差的非线性,不能直接采用快速傅里叶变换(FFT)进行反演光谱,且直接计算开销过大。首先在 Matlab 软件中用非均匀快速傅里叶变换算法(NUFFT)对 PEM 非等相位干涉信号进行了软件仿真,其次设计了以 TMS320C6713 高性能浮点数字信号处理器(DSP)芯片为核心的光谱信息处理系统,实现了硬件上的光谱实时处理。研究表明,算法对光谱反演具有速度快、精度高等优点,1024 点光谱反演的速度较直接运算的速度提高 20 多倍,反演精度可达 0.78%。

关键词 光谱学;弹光调制器;非等相位;插值;非均匀快速傅里叶变换;数字信号处理器

中图分类号 TN911.74 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0507001

Research for Fast Spectrum Recovery Algorithm of PEM Nonequiphase Phase Interference Signal

Wang Mingyan¹ Wang Zhibin^{1,2} Zhang Jilong^{1,2} Zhang Mingjuan¹ Chen Youhua¹ Jing Ning¹

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

Abstract In the photoelastic modulator-Fourier transform spectrometer (PEM-FTS), because the modulation optical path difference is nonlinear, the fast Fourier transform (FFT) cannot be directly used for spectrum recovery, and direct computing cost is too much. The phase of PEM interference signal is simulated by Matlab with the non-uniform fast Fourier transform algorithm (NUFFT), and then the core of the spectrum information processing system is designed with TMS320C6713 floating-point digital signal processor (DSP), finally, it realized the real-time processing of the spectrum on hardware. The result shows that the algorithm for spectrum recovery has some advantages, such as fast running speed, high accuracy and so on. 1024 point spectrum recovery speed is 20 times more than direct operation speed, recovery precision can reach 0.78%.

Key words spectroscopy; photoelastic modulator; nonequi phase; interpolation; non-uniform fast Fourier transform; digital signal processor

OCIS codes 070.4790; 110.4234; 190.4970; 200.4560

1 引 言

近年来,弹光调制-傅里叶变换光谱仪(PEM-FTS)在科研、环境和军事等方面得到了越来越广泛

的应用^[1~3]。但在 PEM-FTS 中存在非线性光程差的问题,并对光程差进行调制,得到非线性的采样信号。快速傅里叶变换(FFT)^[4]要求时域数据均匀采

收稿日期: 2011-12-14; **收到修改稿日期:** 2012-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(61040062)、国家自然科学基金仪器专项基金(611127015)和国际科技合作项目(S2012ZR0247)资助课题。

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。

E-mail: 2006070224wmy@163.com

导师简介: 王志斌(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事光谱成像技术及遥感遥测等方面的研究。

E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

样,频率均匀分布于 $(-\pi, \pi)$,这样直接采用FFT重建光谱会导致光谱失真;采用直接计算开销过大,也不适合硬件实现。Dutt等^[5,6]提出非均匀快速傅里叶变换(NUFFT),它是针对非均匀采样数据进行FFT研发出来的一种新型算法,其后许多学者对其进行过研究^[7~9]。这种算法在对非线性干涉信号进行反演的过程中,不仅速度快,而且精度高。

对于光谱反演的整体系统,采集数据量大、信息处理过程复杂、实时性要求高是其最明显的特点。高性能的数字信号处理器(DSP)^[10,11]的发展为满足实时光谱信息处理^[12]的要求提供了一条良好的途径。本文系统采用浮点DSP芯片TMS320C6713

为核心处理器,实现了对干涉仪采集的干涉图信息的实时处理^[13]。因此,在硬件上用NUFFT算法来实现光谱重建,具有重要的应用价值及实际意义。

2 PEM的干涉信号

弹光调制傅里叶变换光谱仪的核心组件为一在外力作用下振动的晶体,而晶体振动形变是正弦函数,因此产生的光程差是非线性的,这样就得到随时间变化的非线性干涉谱。弹光双折射干涉具的基本工作原理如图1所示。

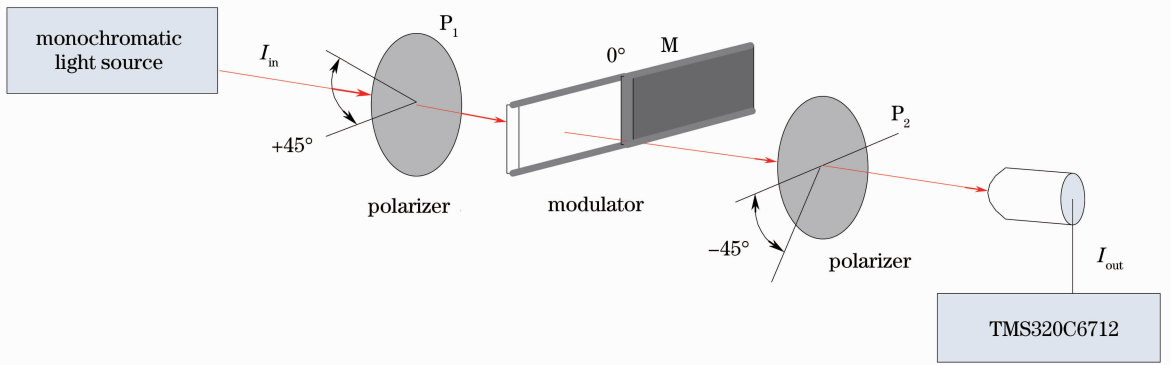


图1 弹光双折射干涉原理图

Fig. 1 Basic birefringence interferometer

与 x, y 轴成 45° 偏振的入射光 I_{in} ,经过弹光晶体时,由于双折射被分成 o 光和 e 光,通过晶体后,两束光产生的光程差为 $x = l\Delta n$ (迈克耳孙干涉具中为 $x = n\Delta l$),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 为调制角频率; l 为晶体中通光路径长度。通过调制折射率差,得到相应的非线性调制光程差。通过检偏器后,产生干涉

$$I_{out}(t) = \int_0^{\infty} I_{in}(\sigma) \cos(2\pi Bl\sigma \sin \omega t) d\sigma, \quad (1)$$

式中 $I_{in}(\sigma)$ 为入射光的光谱, σ 为波数, $X = Bl$ 为弹光调制器相位的振幅。通过点探测器进行光电转换,即可获得其干涉信号。对其进行傅里叶变换便可获得入射光的光谱为

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

式中 T_0 为调制周期。

在PEM-FTS中,由于光程差的非线性导致干涉图产生了形变,并非理想的正弦衰减曲线,如图2所示。图2(a)中的非线性与线性光程差对图2(b)中的窄带光谱产生的干涉信号分别为图2(c)和

图2(d)所示。

因此,对于非等相位的干涉信号,采用传统FFT对此光谱进行反演会导致光谱严重失真,且直接计算开销过大,速度也不够快,更不适合硬件实现。为此用NUFFT算法对此光谱进行反演,在Matlab上实现了其软件仿真,在高性能浮点DSP芯片TMS320C6713实现硬件操作和实时处理。DSP整个系统结构紧凑、稳固,具有较好便携性,以及独立实时分析处理数据的能力。

3 NUFFT算法

因经典的FFT算法只适用于等间隔采样的数据,而直接计算非均匀离散傅里叶变换(NUDFT)的计算量巨大。许多学者研究了NUFFT,本文将用Q. H. Liu等^[8]提出的NUFFT算法来重建非线性的干涉信号。

非均匀干涉数据反演其实就是用一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

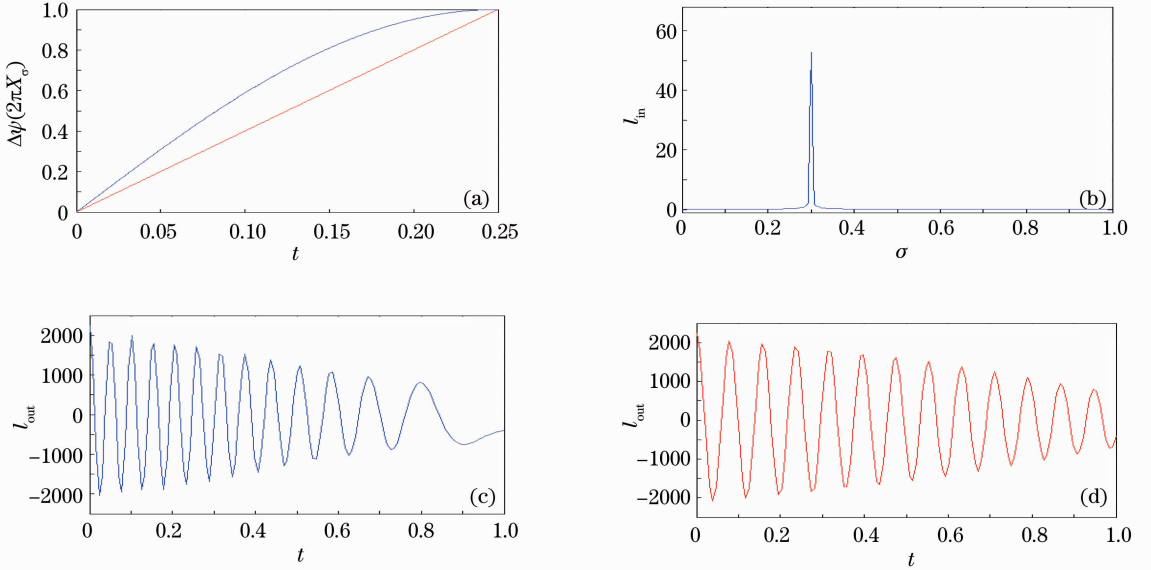


图2 干涉谱。(a)线性和非线性光程差;(b)窄带光谱;(c)非线性光程差产生的干涉信号;(d)线性光程差产生的干涉信号
Fig.2 Interference spectrum. (a) Linear and nonlinear optical path difference; (b) narrow-band spectrum; (c) interference signal of nonlinear optical path difference; (d) interference signal of linear optical path difference. Arbitrary units are used in panels b,c,and d

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

式中 $m \geq 2$, $\omega = \exp(-i2\pi/mN)$, $[mc]$ 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^[5] 或者比例因子^[11]。一般有

- 1) 矩形窗函数 $S_j = 1, j = -N/2, \dots, N/2-1$;
- 2) Gauss 窗函数^[3] $S_j = \exp\left[-b\left(\frac{2\pi j}{\mu N}\right)^2\right], j = -N/2, \dots, N/2-1$;
- 3) 余弦窗函数 $S_j = \cos \frac{\pi j}{\mu N}, j = -N/2, \dots, N/2-1$ 。

NUFFT 算法一般都采用了过采样技术, 利用时域和频域都具有较好集中性的窗函数 φ 来进行计算。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。本文选择 Gauss 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)。

由上面可知 NUFFT 的实现步骤如下:

1) 对于每个 ω_k , 由(4)式计算展开系数 $x_j(\omega_k)$;

2) 计算傅里叶系数 $\tau_l = \sum_{j,k,[m\omega_k]_+ + j = l} \alpha_k x_j(\omega_k)$;

3) 运用均匀的 FFT 计算:

$$T_j = \sum_{l=-mN/2}^{mN/2-1} \tau_l \exp(2\pi i j l / mN);$$

4) 上面求得值乘以比例系数, 接近于近似的非均匀 FFT 的结果: $\tilde{f}_j = T_j S_j^{-1}$ 。

由以上 NUFFT 算法的实现步骤可以看出, 该算法的运算复杂度为 $O(qN + mN \lg mN)$, 因为 $m \ll N$, 所以运算复杂度近似为 $O(qN + mN \lg N)$ 。而一般情况下, 选择 $m = 2, q = 8$, 此时用 Matlab 仿真出来的 N 点直接运算和采用 NUFFT 算法的乘法次数, 如下图 3 所示。由图 3 可知, 当点数越多时, NUFFT 可以明显减少乘法次数。

4 实验仿真与结果分析

根据理论方法和计算步骤, 验证 NUFFT 算法对光谱分析的有效性。仿真用 300 K 成的标准黑体辐射谱, 峰值波长在 $10 \mu\text{m}$, 然后根据(1)式产生光程差非线性的 PEM 干涉信号, 再利用 NUFFT 算法首先在 Matlab 上对此干涉信号进行了反演, 然

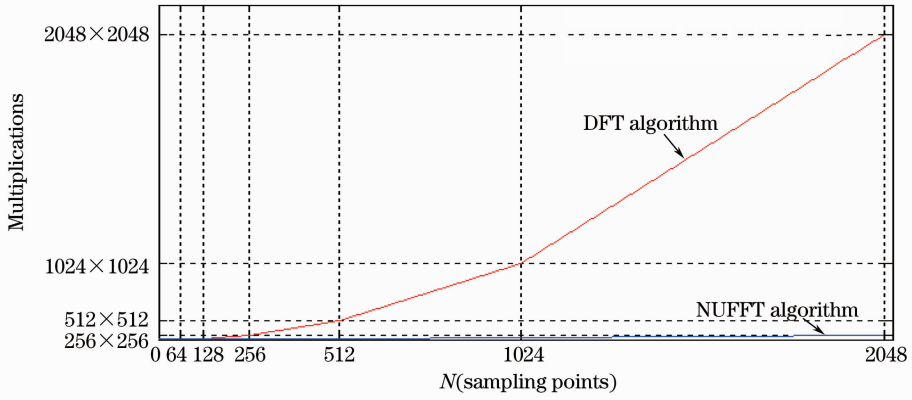


图 3 N 点 DFT 和 NUFFT 算法乘法次数的比较

Fig. 3 Comparison of multiplications of N point DFT and NUFFT algorithm

后在 TI 公司提供的 TMS320C6713 高精度 DSP 芯片上来实现此光谱反演。假定非均匀采样干涉数据为 $I_{out}(t)$ ，用 NUFFT 算法反演光谱的方法如下：

1) 寻找一个合适的卷积核函数(如高斯脉冲函数) $x(c)$ 与非均匀采样数据 $I_{out}(t)$ 进行卷积处理，使其频域空间带限，这样得到卷积后的数据为

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

2) 对卷积后的数据进行均匀采样，得到采样后的数据 $II(\tau)$ ，通常这一采样为过采样

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

式中 $s(\tau - n\Delta\tau)$ 为采样函数。

3) 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 $I'_{in}(\tau)$ ；

4) 利用得到的离散变换谱 $I'_{in}(\tau)$ 对 $I(t_n)$ 进行退卷积处理，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

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

利用 NUFFT 算法对非均匀采样干涉数据进行光谱反演，其反演流程如图 4 所示。

为评价用 NUFFT 反演光谱的反演精度，本文

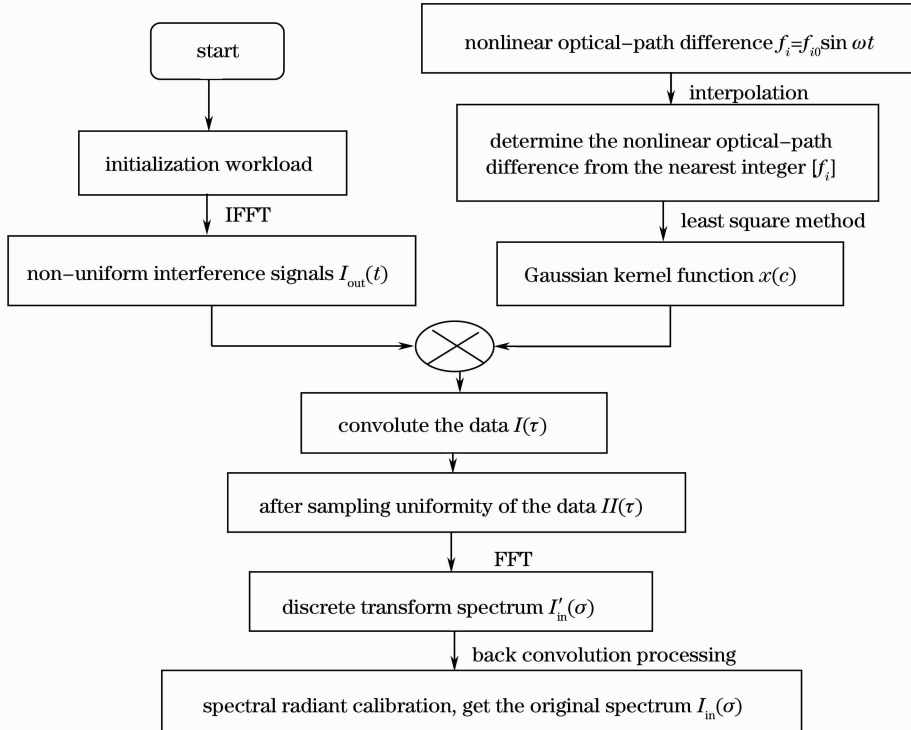


图 4 基于 NUFFT 算法的光谱反演

Fig. 4 Spectrum recovery process based on NUFFT algorithm

以 2 范数的均值和无穷范数来定义反演的运算精度,其计算方法为

$$E_2 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N |\tilde{f}_j - f_j|^2}{\sum_{j=1}^N |f_j|^2}}, \quad (9)$$

$$E_\infty = \max_{1 \leq j \leq N} |\tilde{f}_j - f_j| / \max_{1 \leq j \leq N} |f_j|,$$

式中 \tilde{f}_j 为反演光谱, f_j 为原始光谱, N 为光谱谱段数。

而为了综合评价这种算法在不同软件环境下的反演效果,除了对反演精度进行比较外,还需要看其运行时间的快慢。

比较时所用的计算机配置为:实验的硬件运行设备为 Intel (R) Core (TM) 2 Duo CPU T6600 @ 2.20 GHz,软件版本为 Matlab 7.0 和 CCS3.1,操作系统为 Microsoft Windows XP。下面的仿真分别是分别用 Matlab 7.0 和浮点 DSP 芯片 TMS320C6713 反演 300 K 的标准黑体辐射谱的干涉谱,反演数据点数为 1024 个点,不同软件下的仿真效果如图 5 所示。表 1 是对 1024 点弹光干涉信号在同样环境下用直接计算的方法和用 NUFFT 算法在 Matlab 和 DSP 中反演光谱消耗时间比较和反演误差分析。

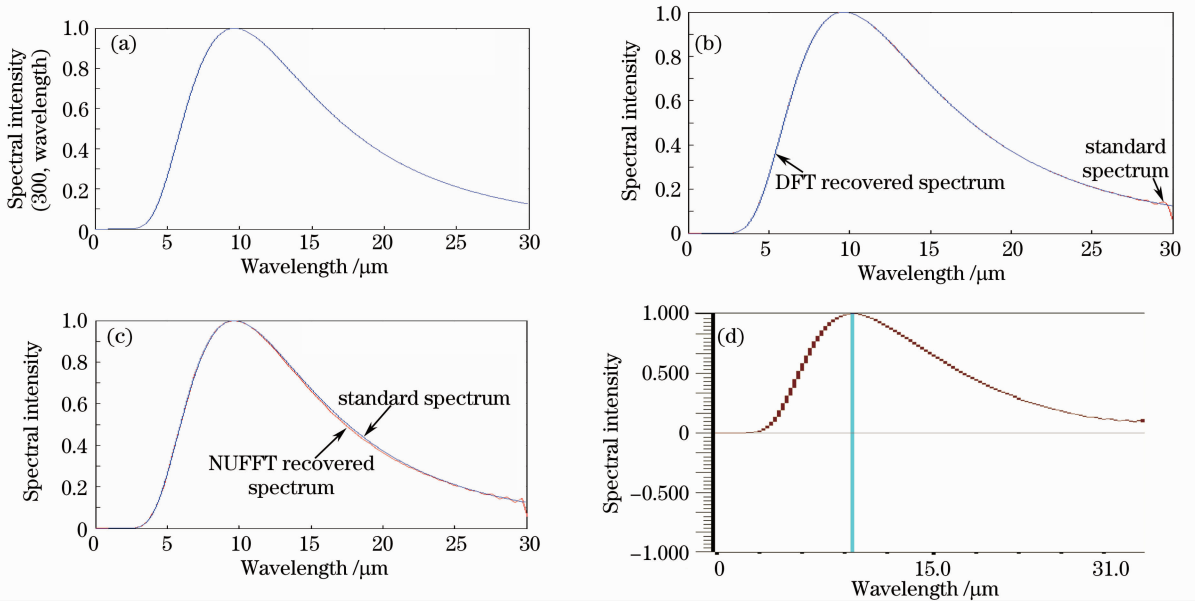


图 5 300 K 标准黑体辐射谱与仿真结果。(a) 300 K 标准黑体辐射谱;(b) Matlab 中 DFT 反演光谱和标准光谱;
(c) Matlab 中 NUFFT 反演光谱和标准光谱;(d) DSP 反演光谱

Fig.5 Standard blackbody radiation spectrum at 300 K and simulation results. (a) 300 K standard blackbody radiation spectrum; (b) DFT recovered spectrum and the standard blackbody spectrum; (c) NUFFT recovered spectrum and the standard blackbody spectrum; (d) DSP recovered spectrum

表 1 本文算法用不同软件反演时间、反演精度及时间改善比

Table 1 Comparison of spectrum recovery time, spectrum recovery precision and improved recovery time by different softwares

	DFT operation results t_1	NUFFT operation results	
		in Matlab t_2	in DSP t_3
Spectrum recovery time / s	0.9690	0.0441	0.0079
Two norm E_2 / %	0.067	0.78	0.83
Infinite norm E_∞ / %	0.060	8.73	8.95
Improved multiple time	$t_1/t_2=21.989$	$t_1/t_3=122.658$	$t_2/t_3=5.615$

从图 5 和表 1 可以明显看出,在反演速度上,在 Matlab 中使用 NUFFT 算法的反演速度是 DFT 算法的 21.989 倍,使用 NUFFT 算法在 DSP 中是在 Matlab 中的 5.615 倍,比 DFT 算法提高了 122.658 倍;在反演精度上,使用 DFT 算法反演光谱可达到

0.067%,而使用 NUFFT 算法在 Matlab 中仿真的反演精度为 0.78%,在硬件 DSP 上反演精度为 0.83%,由此可以看出虽然使用 DFT 算法的反演精度要略高于 NUFFT 算法,但两种算法反演出来的光谱都与标准光谱非常接近。综合比较了反演速度和反演精度

以后,可以看出本文所采用的在 TMS320C6713 中使用 NUFFT 算法整体上对光谱反演是可行的,并且相对于 Matlab 中的仿真速度有所提高,实现了干涉数据的硬件处理。

5 结 论

本文提出基于非均匀快速傅里叶变换的最小二乘反演法,将其算法应用到非均匀采样干涉数据的光谱反演处理中,并在 Matlab 进行了软件仿真,进而选用浮点 DSP 芯片 TMS320C6713 在硬件上实现了此光谱的反演,证明了该算法运用在弹光调制产生的非线性光程差光谱反演中是可行的。非均匀数据的傅里叶变换采用非均匀快速傅里叶变换算法,并且用硬件来实现,极大地提高了计算速度,为后期采用更高性能 DSP 的傅里叶变换光谱仪提供了很好的基础;但是在仿真过程中还存在一定的误差,还需要进一步研究。

参 考 文 献

- Jing Juanjuan, Zhou Jinsong, Xiangli Bin. 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
景娟娟,周锦松,相里斌. 反射转镜式干涉光谱仪光程差非线性修正方法比较[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(6): 1678~1682
- Jing Juanjuan, Xiangli Bin, Lü Qunbo. Analysis on spectrum recovery for nonuniform sampling interferogram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1211006
景娟娟,相里斌,吕群波. 非均匀采样干涉数据的光谱反演分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1211006
- Yang Xiaoxu, Zhou Sizhong, Xiangli Bin *et al.*. Studies on nonlinearity of optical path difference of rotary Fourier transform

- spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1388~1392
杨晓许,周泗忠,相里斌等. 转镜式傅里叶变换光谱仪光程差非线性研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1388~1392
- J. W. Cooley, J. W. Tukey. Algorithm for the machine calculation of complex fourier series [J]. *Math. Comp.*, 1965, **19**(90): 297~301
 - A. Dutt, V. Rokhlin. Fast Fourier transforms for nonequispaced data[J]. *SIAM J. Sci. Comput.*, 1993, **14**(6): 1368~1393
 - G. Geylkin. On the fast Fourier transform of functions with singularities[J]. *Appl. Comput. Harmonic Anal.*, 1995, **2**(4): 363~381
 - Xue Hui, Zhang Li, Liu Yinong. Overview of nonuniform fast Fourier transformation [J]. *CT Theory and Applications*, 2010, **19**(3): 33~46
薛会,张丽,刘以农. 非标准快速傅里叶变换算法综述[J]. *CT理论与应用研究*, 2010, **19**(3): 33~46
 - Q. H. Liu, N. Nguyen. An accurate algorithm for nonuniform fast Fourier transform (NUFFT's) [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, 1998, **8**(1): 18~20
 - J. A. Fessler, B. P. Sutton. Nonuniform fast Fourier transforms using min-max interpolation [J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2003, **51**(2): 560~574
 - Wang Hua, Wen Desheng. Application of imaging processing implemented by DSP in spacial transient optical signal locating system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **35**(8): 1273~1275
王华,汶德胜. DSP 图像处理技术在空间瞬态光辐射定位探测中的应用[J]. *光学学报*, 2006, **35**(8): 1273~1275
 - Li Fanghui, Wang Fei, He Peikun. TMS320C6000 Series DSPs Principle and Application (Second Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 1~2, 9~11
李方慧,王飞,何佩坤. TMS320C6000 系列 DSPs 原理与应用(第2版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2003. 1~2, 9~11
 - Xiong Wei. Based on DSP Infrared Real-Time Signal Processing Software Design [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004. 58~61
熊伟. 基于 DSP 的红外实时信号处理软件设计[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2004. 58~61
 - Guo Zhuofeng, Ding Yan. Designed of a real time image processing system on DSP [J]. *Optical Technique*, 2004, (1): 78~79
郭卓锋,丁艳. 基于 DSP 的实时图像处理系统的设计[J]. *光学技术*, 2004, (1): 78~79

栏目编辑: 韩峰