

FFT 与 CZT 联合算法用于光纤 法布里珀罗传感器解调

戴霞娟, 王 鸣

(南京师范大学 光电技术江苏省重点实验室, 江苏 南京 210097)

[摘要] 通过对法布里-珀罗(F-P)型压力传感器傅里叶解调法的理论分析,在FFT的基础上引入CZT(线性调频Z变换),以对传统的FFT算法进行改进.通过Matlab模拟解调,该联合算法相对误差仅为0.1%.在对测量范围为0~3MPa的F-P腔MEMS压力传感器进行的解调试验中,当采用256点FFT变换和100点CZT变换时,其分辨率达到0.05MPa,拟合度为0.99316.实验证明,FFT、CZT联合解调的方法可以达到较高的精度,满足实际需求.其计算量小、解调精度高的优点,使它具有解调传感器复用信号的潜力.

[关键词] F-P 传感器, CZT, MEMS

[中图分类号] TN253 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292(2008)01-0088-05

Application of the FFT Algorithm Associated With CZT in the Demodulation of Fabry-Perot Pressure Sensors

Dai Xiajuan Wang Ming

(Jiangsu Key Lab of Opto-electronic Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract In this paper, the FFT demodulation method of Fabry-Perot pressure sensors theoretically is analysed, and CZT (chirp z-translation) is introduced here on the basis of FFT to improve the traditional FFT algorithm. In the simulation by Matlab, the relative error of this new method is just 0.1%, and in the experiment of the demodulation of the MEMS Fabry-Perot pressure sensor, whose metrological range is from 0 to 3 MPa, its resolution reaches 0.05 MPa and its linearity achieves 0.99316, where we use 256 dots' FFT and 100 dots' CZT. The experiment shows that this new method of combining FFT with CZT can reach a higher precision, meets the practical demands, and may be applied in the demodulation of multiplexed sensors for its higher resolution and less calculational quantum.

Key words Fabry-Perot pressure sensors, CZT, MEMS

光纤 MEMS 压力传感器由于其具有的微型、响应频带宽、高灵敏度、可批量生产、免除电磁干扰、适用于恶劣环境等特点而成为光纤传感领域中的热点^[1,2],人们一直对其构造加工及信号解调进行着研究.常用解调方法有强度法、条纹计数法、波长匹配法和傅里叶变换解调法等.其中傅里叶变换解调法^[3,4]是将外部压力引起的腔长改变问题转化成经 F-P 腔反射回来的光谱的频率漂移的问题,通过 FFT 变换,然后搜索频谱峰值(避开直流峰)所对应的频率,解调出外界压力的大小.

然而傅里叶变换解调法在解调精度上具有一定的局限性.对于入射光是高斯型的情况,采用高斯插值的方法可以缓解这一不足.为了解决其它谱型的傅里叶变换解调精度问题,本文引入了线性调频 Z 变换^[5](Chirp Z-transform, CZT).CZT 是由傅里叶变换导出的一种频谱分析方法,它的结果等价于离散时间傅里叶变换(DFT)在部分频带上的频谱等间隔取样,对信号带宽中的部分频带进行高频率分辨率的频谱细化,这就使得 CZT 具有直接、快速、经济的特点.因此可以将 FFT 和 CZT 算法联合起来^[6],以最小的计算量达到最高的解调精度.

收稿日期: 2007-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(BG2003024)和江苏省高技术研究计划(BG2003024)资助项目.

作者简介: 戴霞娟(1982-),女,硕士研究生,研究方向: 光纤传感. E-mail: dxjuan115@sohu.com

通讯联系人: 王 鸣(1950-),教授,博士生导师,研究方向: 激光应用与传感. E-mail: wangming@njnu.edu.cn

1 联合解调原理

对于 F-P 压力传感器, 在光纤端面反射率较低时可以用双光束干涉进行近似, 其反射光强可用下式表示^[3]:

$$I_r = 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} L \right) \right] I_0 \tag{1}$$

式中, R 为端面反射率 (假设两端面反射率相同), I_0 为入射光强 (假设各波长上入射光强相同), L 为 F-P 腔的腔长.

由式 (1) 可见, F-P 腔的反射光谱是关于波长的倒数 $\frac{1}{\lambda}$ 的余弦曲线, 用 $\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$ (ν 为光频率) 代入式 (1), 则得到一个关于光频率 ν 的余弦曲线:

$$I_r = 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi \nu}{c} L \right) \right] I_0 \tag{2}$$

则光谱频率可表示为:

$$f = \frac{2L}{c} \tag{3}$$

因为压力和敏感膜的形变量 (F-P 腔的腔长 L) 成线性关系, 则解调出 L 就可计算出压力的大小, 而 L 的大小可以通过求解光谱的频率再由式 (3) 得到. 通常实验中接收到的是基于波长的光谱数据, 则解调时需先将其变换成基于光频率的光谱数据, 再对光频率进行等间隔插值, 将新的光谱数据进行 FFT 变换以求频率.

为了提高频率求解的精度, 势必要取尽量多的点进行 FFT 运算, 大大增加了计算量. 显然, N 点的 FFT 的频谱分辨率为 $2\pi/N$, 要使分辨率达到 $2\pi/(M \cdot N)$, 则必须要做 $N \times M$ 点的 FFT, 运算量扩大了 M 倍. 为了在不增加、少增加计算量的前提下提高频率分辨率, 于是引入了 CZT 算法.

对已知的时间序列 $x(n)$ ($0 \leq n \leq N-1$), 定义其 Z 变换为^[5]:

$$X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) z^{-n} \tag{4}$$

为使 z 可沿 Z 平面内更一般的路径取值, 令 z 的取值样点为:

$$z_k = A W^{-k}, \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \tag{5}$$

式中, M 为频率点数, A 和 W 是任意复数: $A = A_0 e^{j\theta_0}$, $W = W_0 e^{-j\varphi_0}$, 将它们代入 z_k 得:

$$z_k = (A_0 e^{j\theta_0}) (W_0^{-k}) (e^{j\varphi_0 k}), \tag{6}$$

因此有:

$$z_0 = A_0 e^{j\theta_0}, \dots, z_k = A_0 W_0^{-k} e^{j(\theta_0 + \varphi_0 k)}, \dots, z_{M-1} = A_0 W_0^{-(M-1)} e^{j(\theta_0 + \varphi_0(M-1))}. \tag{7}$$

取样所沿的周线如图 1 所示. 由图 1 可见:

- (1) A_0 表示起始取样点 z_0 的矢量半径长度, 通常 $A_0 \leq 1$, 否则 z_0 将处于单位圆 $z = 1$ 的外部.
- (2) θ_0 表示起始取样点 z_0 的相角 (即角频率), 它可是正值或负值.
- (3) φ_0 表示两相邻抽样点之间的角频率差. φ_0 为正时, 表示 z_k 的路径是逆时针旋转的; φ_0 为负时, 表示 z_k 的路径是顺时针旋转的.
- (4) W_0 的大小控制着周线盘旋是向内弯曲还是向外弯曲. $W_0 < 1$ 则随着 k 的增加, 周线盘旋向外弯曲; $W_0 > 1$ 则随着 k 的增加, 周线盘旋向内弯曲; $W_0 = 1$, 表示半径为 A_0 的一段圆弧; 若又有 $A_0 = 1$ 则这段圆弧是单位圆的一部分.

将 z_k 代入到式 (4) 可得:

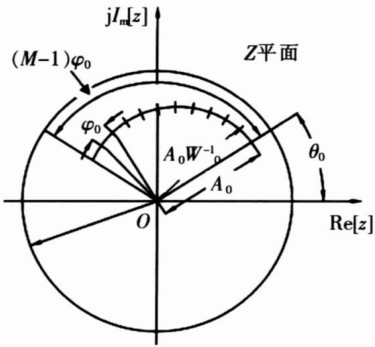


图 1 CZT 在 Z 平面的螺旋抽样
Fig.1 Helix sample of CZT in Z plane

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) A^{-n} W^{nk}, \quad 0 \leq k \leq M-1$$

(8)

式中, $X(z_k)$ 是 $X(z)$ 在给定轨迹 z_k 上的取值.

当满足一些特殊条件: (1) $M = N$; (2) $A_0 = 1$, $\theta_0 = 1$; (3) $W = 1$, $\varphi_0 = 2\pi/N$ 时, 就恢复到 z 是均匀的等角度分布于全部 $z = 1$ 单位圆上的情况, 即变为该序列的 DFT.

根据 CZT 的基本原理可知, 其可对 Z 平面上的单位圆进行局部抽样, 细化频谱, 即在有限的频率范围 $\Delta\omega$ 内进行频谱分析, 频谱分辨率为 $\Delta\omega/M$. 如果 $\Delta\omega = 2\pi m/N$, $m = 1, 2, \dots, N-1$ 即在单位圆周上的 FFT 的几个采样点之间进行较密的频谱分析. 若 $m = 1$ 则进行 N 点 FFT 后再进行 M 点 CZT, 频谱分辨率同样达到 $2\pi/(M \cdot N)$, 但其计算量要远远小于 $N \times M$ 点 FFT 的计算量.

这种联合算法体现出一种局部放大的小波处理思想, 能在增加有限计算量的基础上极大地提高分辨率, 从而提高测频精度.

2 模拟计算

假设光纤端面反射率为 0.04 腔长为 $400\text{ }\mu\text{m}$, 波长在 $1\,510\sim 1\,590\text{ nm}$ 之间, 入射光强为 1, 在波长上等间隔取 256 个点. 图 2(a)、(b) 分别是波长—光谱图和插值后的光频率—光谱图.

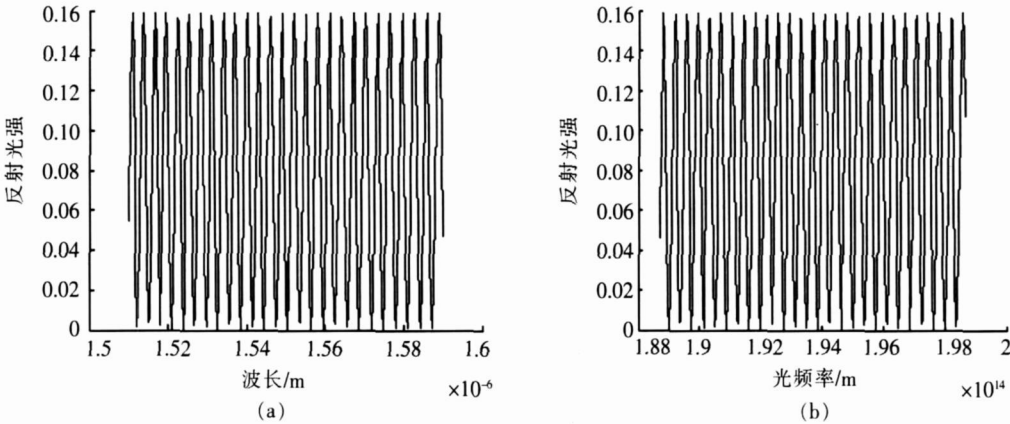


图 2 波长—光谱图和插值后的光频率—光谱图

Fig.2 Cavity length-intensity spectrum and frequency-intensity spectrum after interpolant

将插值形成的 256 点的光谱进行 FFT 变换, 取其绝对值, 并将其峰值处放大显示, 如图 3 所示.

从图 3 中可以看出 27 点 (索引从 0 开始) 处于峰值的位置, 26 点次之, 28 点又次之. 由于截断区间不等于信号周期的整数倍, 所以图 3 的峰值点并不是真实峰值^[7-8], 但却是最接近真实峰值的一个点, 真实峰值应该在 27 点与其相邻点之间. 由于加窗余弦函数的连续谱是 sinc 函数, 根据 sinc 函数的对称性, 精确的峰值在最高点与次高点之间, 所以真正的峰值点应该在 26 点与 27 点之间. 在这两点之间做 100 点 CZT 进行频谱细化, 细化谱线如图 4 所示.

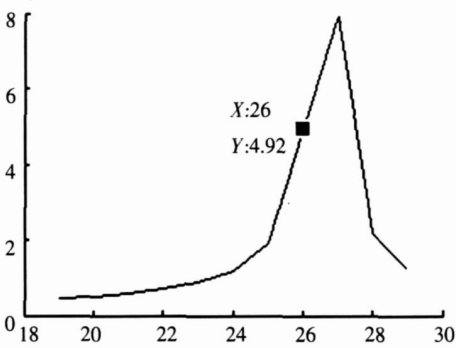


图 3 256 点 FFT 变换第 20~30 点图

Fig.3 20~30 dot in 256 dots' FFT

搜索 CZT 频谱的峰值点所对应的横坐标, 可计算出该 F-P 腔的腔长为 $399.565\,8\text{ }\mu\text{m}$, 其相对误差为 0.1%, 该方法估计频率所得出的腔长可满足实际解调中的精度要求. 如果只进行 256 点 FFT 取其峰值, 算得腔长为 $405.42\text{ }\mu\text{m}$, 其误差是 CZT 细化后的 10 倍多, 如果要提高精度则要增大 N , 在波长 $1\,510\sim 1\,590\text{ nm}$ 内提高采样频率的做法是不实际的, 只要采样频率大于信号频率的两倍, 频谱的峰值点坐标可以根据下式得到:

$$k = N \cdot f_0 / f_s,$$

(9)

式中, N 为数据点数, f_0 为信号频率, f_s 为采样频率.

当 f_s 增大时 N 同步增大, k 则保持不变. 要提高解调精度只有以增加波长范围的发放增大 N , 然而由于

实际解调中光源宽度的限制, 也无法满足要求. 因此 FFT 与 CZT 联合解调法不失为可实际应用的好方法.

3 实验检验

为了检验 FFT 和 CZT 联合算法的可行性, 建立起如图 5 所示的实验系统. 由 Si720 传感分析仪输出的宽光源经 2:2 耦合器一端与 F-P 压力传感器相连, 另一端悬空, 其反射光再经耦合器输入 Si720, Si720 扫描出反射光的光谱经网线传送给 PC, 由 PC 对光谱数据进行处理.

这里 F-P 压力传感器采用的是南京师范大学光电实验室研制的光纤 MEMS 压力传感器, 其结构如图 6 所示.

光从单模光纤进入传感器, 在光纤—硼硅玻璃、硼硅玻璃—空气腔、空气腔—铝介质界面上反射, 反射光彼此干涉, 最后反射到光纤的是复合腔的干涉信号, 复合法珀腔由硼硅玻璃层和空气腔构成. 当硅敏感膜受到压力时, 产生形变, 导致法布里—珀罗腔腔长减小.

利用标准活塞式压力计给光纤 MEMS 压力传感器加压, 从 0 MPa 开始间隔为 0.5 MPa 加压到 2.0 MPa 分别利用 FFT、CZT 联合算法和 FFT 算法进行解调, 其结果比较如图 7 所示. 从图中可以看到, 联合算法的线性度明显比 FFT 单独计算时好.

对 FFT、CZT 联合算法的实验数据进行拟合, 如图 8 所示. 得到的拟合方程为: $L = 221.09 - 2.70278 \times P$ (μm), 拟合度达到 0.99316

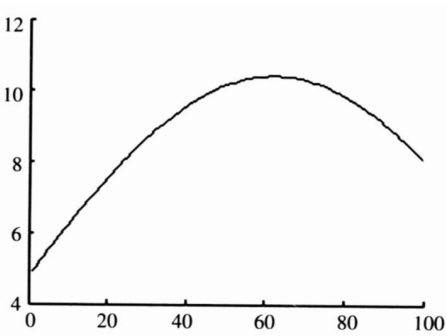


图 4 100 点 CZT 频谱图
Fig.4 100 dots' CZT

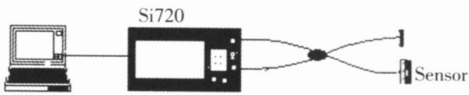


图 5 实验系统图
Fig.5 Experiment system

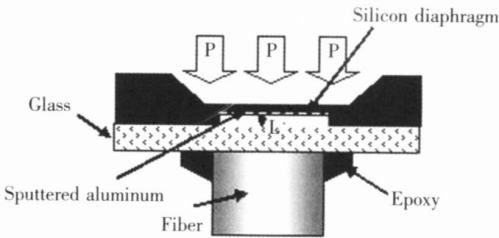


图 6 光纤 MEMS 压力传感器结构示意图
Fig.6 The sketch of optical fiber MEMS pressure sensor

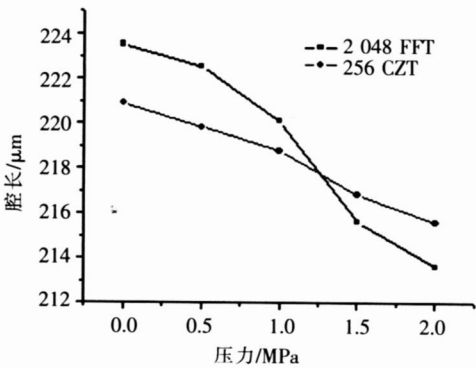


图 7 两种算法实验数据比较图
Fig.7 Compare of two method

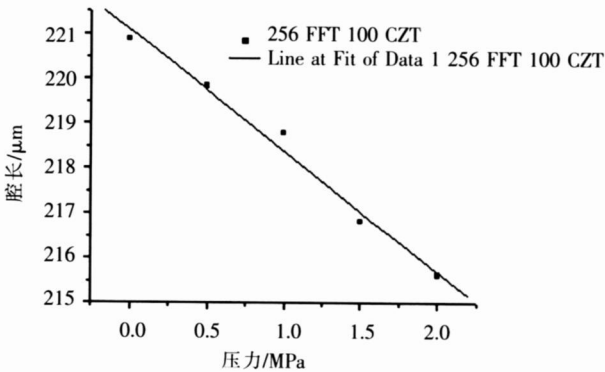


图 8 FFT、CZT 联合算法数据拟合图
Fig.8 Cavity length versus pressure

4 结论

为了解决平坦宽光源的使用使傅里叶变换解调法中后继的高斯插值提高频率分辨率的方法不再可行的问题, 本文提出了 FFT 和 CZT 联合算法对 MEMS 压力传感器进行解调. 该算法既没有大幅度增加计算量, 又从根本上提高了传感器的解调精度, 并且通过模拟和实验证明该算法是可行、可靠的. 该方法解调的快速、高频率分辨率的优点, 使其在传感器的复用解调方面具有较好的可行性.

[参考文献] (References)

- [1] Abeysinghe Don C, Dasgupta Samhita, Boyd Joseph T, et al A novel MEMS pressure sensor fabricated on an optical fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(9): 993-995.
- [2] Zhou Jie, Dasgupta Samhita, Kobayashi Hiroshi, et al Optically interrogated MEMS pressure sensors for propulsion applications [J]. Opt Eng, 2001, 40(4): 598-604.
- [3] 章鹏, 朱永, 陈伟民. 光纤法布里-珀罗传感器腔长的傅里叶变换解调原理研究 [J]. 光子学报, 2004, 33(12): 1449-1452.
Zhang Peng, Zhu Yong, Chen Wein. A study on Fourier transformation demodulating theory of the gap of optical fiber Fabry-Perot sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(12): 1449-1452 (in Chinese).
- [4] 章鹏, 朱永, 唐晓初, 等. 基于傅里叶变换的光纤法布里珀罗传感器解调研究 [J]. 光学学报, 2005, 25(2): 187-189.
Zhang Peng, Zhu Yong, Tang Xiaochu, et al. Demodulation of the optical fiber Fabry-Perot sensor based on Fourier transform [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(2): 187-189 (in Chinese).
- [5] 程佩青. 数字信号处理教程 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2001: 172-177.
Cheng Peiqing. Digital Signal Processing [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 172-177 (in Chinese).
- [6] 和昆英, 郭虹, 刘洛琨, 等. 一种 FFT 和 CZT 联合的快速高精度频率估计算法 [J]. 电视技术, 2006(8): 18-20.
He Kunying, Guo Hong, Liu Luokun, et al. A fast frequency estimate arithmetic with high resolution using FFT and CZT [J]. Video Engineering, 2006(8): 18-20 (in Chinese).
- [7] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983: 121-123.
Ying Huaiqiao. Wave and Frequency-Spectrum Analyzing and Random Data Processing [M]. Beijing: Chinese Railway Press, 1983: 121-123 (in Chinese).
- [8] 冯志华, 刘永斌, 张键. 用在频谱细化中 Chirp-Z 变换的特性分析 [J]. 信号处理, 2006, 22(5): 741-745.
Feng Zhifeng, Liu Yongbin, Zhang Jian. Character analyses of the chirp-Z transformation used in the spectrum zooming [J]. Signal Processing, 2006, 22(5): 741-745 (in Chinese).

[责任编辑: 严海琳]