

基于快速傅里叶变换的分布式振动传感信号解调分析

司召鹏¹, 毛邦宁^{1**}, 卜泽华¹, 龚华平¹, 徐贲¹, 康娟¹, 杨春君², 赵春柳^{1*}¹中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;²杭州国照检测技术有限公司, 浙江 杭州 310012

摘要 提出了一种在光纤距离方向作快速傅里叶变换(FFT)的振动信号相位提取方法,并在分布式声波传感(DAS)系统上加载 200 Hz 正弦信号进行了验证。该方法在振动传感光纤距离方向上采用分距离滑动 FFT 变换提取载波信号的相位,然后对光纤方向缠绕的相位信号进行差分,进而在光纤方向与时间方向上进行解缠绕处理,最后对解缠绕信号进行高通滤波。与 DAS 系统信号解调常用的 IQ 解调、希尔伯特变换解调相比,该方式提取的 200 Hz 振动信号的信噪比为 36.71 dB,比 IQ、希尔伯特变换提取的信噪比分别高 21.04 dB 和 20.91 dB,且 FFT 提取的振动相位信号的周期性好,无谐波及低频噪声干扰。对 2000 Hz 和 5000 Hz 正弦振动信号的提取结果也表明该方式具有较好的适用性。

关键词 遥感; 傅里叶光学; 快速傅里叶变换; 扰动检测; 信号调制; 信噪比

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220902

1 引言

相位敏感光时域反射(φ -OTDR)是一种分布式光纤传感技术,具有监测范围广、灵敏度高、监测成本低、测量参数多等优势,已成为现代传感技术中发展最迅速的传感方式之一^[1-2]。对比于其他分布式光纤传感技术,该技术能够在长距离范围内对微弱信号进行分布式多点测量。

φ -OTDR 系统的发展经历了两个阶段。第一阶段,检测背向瑞利散射光的振幅,变换后得到振动信息。这一方案于 1993 年由 Taylor 等^[3]提出,只能定性检测振动信息,这一时期的 φ -OTDR 技术通常被称为“分布式振动传感技术”,即 DVS 技术。2011 年以后,研究人员陆续开发了新的定量解调振动信号的方法,如数字相干解调^[4-5]、希尔伯特变换^[6]解调,这些方法可以定量解调出振动信号的振幅、相位、频率等多维信息,这一阶段的 φ -OTDR 技术通常被称为“分布式声波传感技术”,即 DAS 技术。DAS 技术利用相干瑞利背向散射技术在普通单模传感光纤中可以实现对远距离外部振动、声音、温度变化的连续探测,该技术不仅具有较强的环境适应性,还具有抗电磁干扰、耐化学腐蚀、隐蔽性好等特点。DAS 系统通常采用 IQ 解调与希尔伯特变换解调的方式,这两种解调方式各有优点,但也具有一定的缺陷:IQ 解调方式结构较为简单,信噪比和灵敏度都比较高,但其解调结果容易受到窄线

宽激光器频率漂移引起的相位噪声以及本地光与瑞利散射光偏振态不稳定的影响,使得解调的准确度下降^[7];希尔伯特变换可用于 DVS 系统与 DAS 系统,但由于慢变噪声项在低通滤波时无法消除,抗噪性能相对要差一些^[8]。

本文提出了一种基于快速傅里叶变换(FFT)的信号解调方法,该方法采用分块滑动对光纤距离方向上的振动信号进行傅里叶变换,并根据声光调制器的中频信号设定频点,以提取振动信号的幅值与相位信息,同时对所提取的振动信号的缠绕相位进行光纤方向上的差分,并对差分后的相位进行光纤方向与时间方向上的两次解缠绕,成功提取了加载在光纤上的正弦振动信号。该方法的解调步骤简单,相比 IQ 解调和希尔伯特变换解调提取的信号受到脉冲光相干衰落的影响更小,且解调出的信号没有谐波干扰。对比了三种解调方式所提取信号的信噪比,结果显示:FFT 提取信号的信噪比最大,且滤除了低频噪声的干扰。

2 DAS 系统实验装置及原理

基于 φ -OTDR 的 DAS 结构如图 1 所示。窄线宽激光器(NLL)是本系统的光源,激光器线宽为 3 kHz。窄线宽激光器发出的光首先经过一个 90:10 的分光计分成两束光,其中 10% 的光进入一个 50:50 的耦合器,90% 的光进入声光调制器(AOM)。声光调制器需要一个脉冲发生器进行驱动,脉冲驱动频率为

收稿日期: 2022-05-24; 修回日期: 2022-06-14; 录用日期: 2022-06-20; 网络首发日期: 2022-07-01

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFF0217803, 2020YFF0217800)

通信作者: *clzhao@cjlu.edu.cn; **maobangning@cjlu.edu.cn

10 kHz, 脉宽为 100 ns, 同时声光调制器会对脉冲光进行调制, 并产生一个 80 MHz 的信号移频。通过声光调制器的脉冲光经过掺铒光纤放大器(EDFA)后, 光信号被放大, 放大的光脉冲进入环形器(CIR)。传感光纤产生的背向瑞利散射光信号经环形器反射回

来并进入 50:50 的耦合器, 背向瑞利散射光信号与 10% 的本地光信号在耦合器中进行相干叠加。平衡探测器(BPD)将光信号转换为电信号, 平衡探测器的带宽为 100 MHz。输出的信号由采集卡(DAQ)进行采集。

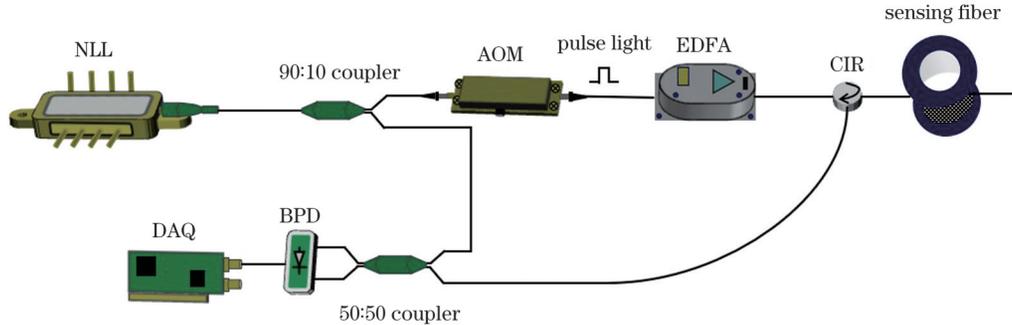


图1 DAS系统结构图

Fig. 1 DAS system structure diagram

在 DAS 系统中, 某时刻平衡探测器输出的电流^[9]为

$$X(t) = 4E_R E_L \cos[\Delta\omega t + \varphi(t)], \quad (1)$$

式中: E_R 是传感光干涉场的振幅; E_L 是本地光的振幅; $\Delta\omega$ 是声光调制器引入的频移量; $\varphi(t) = \varphi_L(t) - \varphi_R(t)$, $\varphi_L(t)$ 是本地光的初始相位, $\varphi_R(t)$ 是传感光干涉场的相位。当外部扰动信号作用于传感光纤时, 扰动会使得该处光纤的折射率发生变化, 引起瑞利散射光波的相位发生变化。因此, 传感光纤上的外部扰动可以通过信号的相位变化来检测, 其频率可以通过分析扰动信号的频谱获得^[10]。

3 FFT 信号提取流程

FFT 是在离散傅里叶变换(DFT)的基础上发展起来的, 避免了离散傅里叶变换中的重复运算, 大大节省了工作量。对于长度为 n 的离散信号数据序列, FFT 的复杂度为 $n \lg n/2$ 。

离散数据信号经过 FFT 后, 其结果也为相同数目的复数点, 每个点的物理意义由时间与幅值变化为频率与幅值。其中傅里叶变换后的幅值与相位^[11]分别表示为

$$|F(u)| = \sqrt{R^2(u) + I^2(u)}, \quad (2)$$

$$\varphi(u) = \arctan[I(u)/R(u)], \quad (3)$$

式中: $R(u)$ 和 $I(u)$ 分别表示傅里叶变换的实部与虚部。

采用 FFT 提取 DAS 系统振动信号的解调流程如图 2 所示。采集卡采集的数字信号 $X(t)$ 经过带通滤波器(BPF), 首先设定带通滤波器的参数使得中频信号 80 MHz 附近的信号通过, 本文带通滤波器设定带宽为 70~90 MHz; 然后根据 DAS 探测系统的距离分辨率设定步长, 为防止两段步长连接处有信号振动, 进而使得提取的振动信号的相位不连续, 文中每次从步

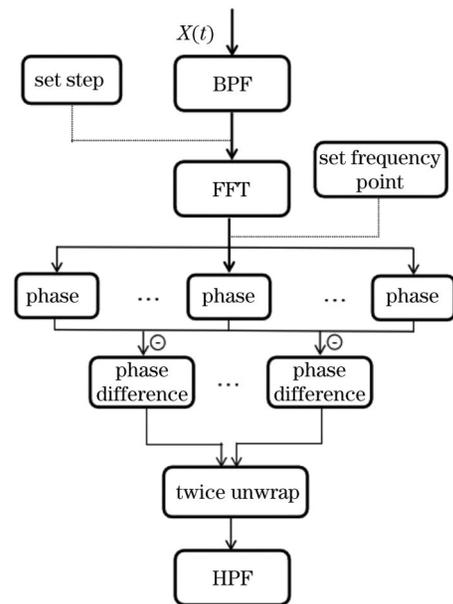


图2 FFT振动信号提取流程图

Fig. 2 Flow chart of FFT vibration signal extraction

长的一半向前重叠前进, 对所设定的步长进行 FFT; 再根据声光调制器的中频信号设定频点, 进而提取振动信号的相位信息; 接着对信号的相位进行相互差分来消除信号的相位噪声, 但是此刻的相位差为缠绕的相位信息, 还须对相位信号分别进行光纤方向与时间方向上的相位解缠绕处理, 以提取振动信号的周期性相位; 最后对提取的相位信号进行高通滤波(HPF)处理, 以消除系统器件及低频噪声的影响。

4 实验分析与对比

4.1 相位提取与解缠绕

实验中采用压电陶瓷(PZT)对信号发生器产生的频率为 200 Hz 的正弦信号进行扰动, PZT 的驱动电压为 0.5 V。传感光纤长为 3 km, 信号加载在光纤的

1960 m 附近,传感光纤缠绕在 PZT 管上的长度为 20 m。本文设定 FFT 步长为 15 m,重叠前进步长为 10 m。FFT 提取的原始相位信息比较混乱,且每条曲线的相位都在 $(-\pi, \pi)$ 之间。这是由于激光器的噪声和声光调制器的噪声使得传感光纤中光脉冲的初始相位发生了改变,进而使得背向瑞利散射的相位也发生了变化,因此初始相位的位置不同^[12]。通过对提取的相位进行相互差分不仅可以消除相位噪声,还可以实现振动信号的定位,但是差分后相位的跳变现象依然存在,需要对差分的相位作解缠绕处理。

图 3 是振动点相位差分后光纤方向上的相位解缠绕结果。从图 3 中可以看出相位跳变问题已经得到了消除,解缠绕后的相位曲线只在扰动处有相位混乱问题。但是 PZT 带来的信号振动加载在脉冲的时间方向上,因此需要对相位差进行时间方向的解缠绕处理。

对相位差进行时间方向的再次解缠绕后还须对信号进行去直流与高通滤波处理,去直流处理可以减去解调算法引入的初始偏置,而高通滤波处理可以去除窄线宽激光器频漂的影响以及干涉带来的低频扰动信息。图 4 是相位差时间方向的解缠绕图以及时间方向解缠后的相位差-时间-距离图。图 4(a) 是解调后的相位时间图,图中完整地解调出了加载在

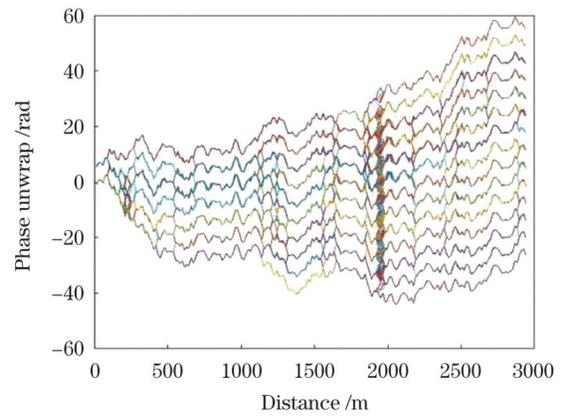


图 3 振动点相位差分后光纤方向上的相位解缠绕图
Fig. 3 Optical fiber directional phase unwinding diagram after phase difference of vibration points

PZT 上的正弦信号,信号较为光滑,周期性良好,未振动区域的背景噪声分布得也较为均匀,但是图中解调的正弦信号有两条,笔者认为是在缠绕在 PZT 上的传感光纤过长,导致振动信号在传感光纤上出现了蔓延。图 4(b) 是两次相位解缠绕后的相位差-时间-距离图,从图中可以看出在距离方向上的定位信息良好,在时间轴方向上解调信号呈正弦周期性变化,信号具有良好的周期性。

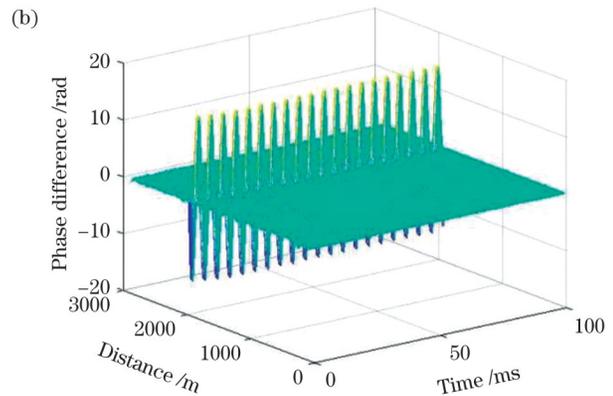
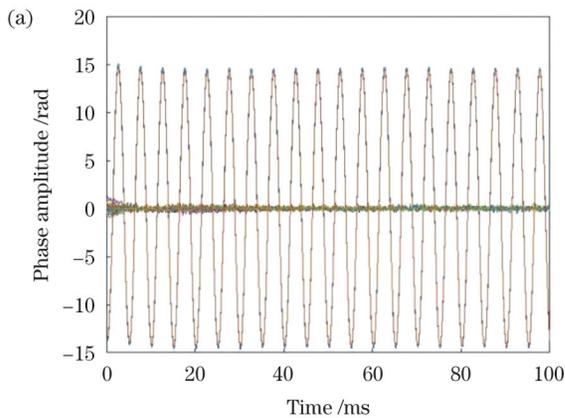


图 4 相位差在时间方向上的解缠绕图以及时间方向解缠后的相位差-时间-距离图。(a) 时间方向解缠绕后的相位-时间图;(b) 相位差随时间-距离的变化图

Fig. 4 Unwinding diagram of phase difference in time direction and time-distance diagram of phase difference after unwinding of time direction. (a) Phase-time diagram with time direction unwinding; (b) diagram of phase difference with time-distance variation

4.2 不同解调方式下的解调信号对比

本文也对同一振动信号分别使用 IQ 解调方式与希尔伯特解调方式进行了振幅相位提取,且相位信息提取后的后续相位解缠绕及去直流与高通滤波参数设定一致。图 5 是三种信号解调方式提取的振动信号的相位-时间图。图 5(a) 为 FFT 信号解调方式提取的振动信号的相位-时间图,该相位-时间图的正弦周期性很强,周期分布均匀,所受信号相干衰落的影响较小。这是因为本文设定的 FFT 步长为 15 m,而驱动信号的脉冲宽度为 100 ns,对应的空间分辨率为 10 m,该提取方式虽然牺牲了一部分位置分辨率,但本文通过步长重

叠前进对位置分辨率进行补偿,因此达到了比较不错的效果。图 5(b) 和图 5(c) 分别是 IQ 解调方式、希尔伯特变换解调方式提取的相位-时间图,这两种解调方式提取的振动信号的相位-时间图的周期性分布不是十分均匀,信号的幅度稳定性较差,而且在信号的尾端都存在着信号相干衰落的问题。此外,这两种解调方式解调出的相位信号的幅值相比 FFT 解调方式提取的相位信号的幅值小。

图 6 展示了三种解调方式提取的信号的频谱图。图 6(a) 是 FFT 解调方式提取的信号的频谱图,图中显示所解调的信号的相位频率为 200 Hz,振动信号频率

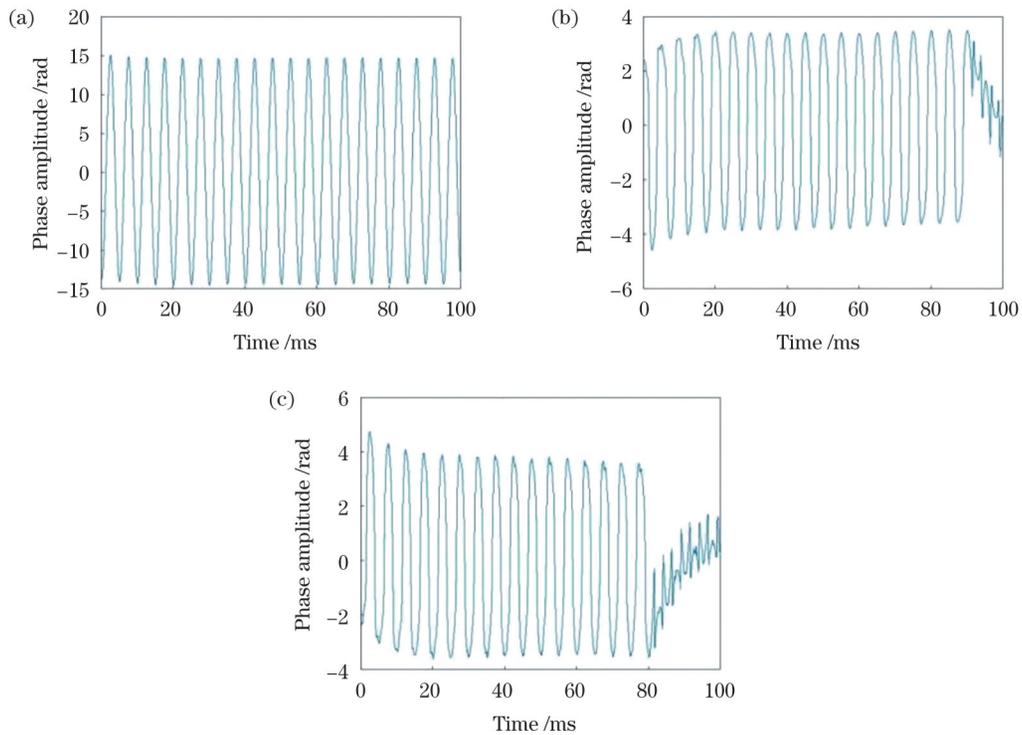


图5 三种解调方式提取的振动信号的相位-时间图。(a)FFT解调;(b)IQ解调;(c)希尔伯特变换解调

Fig. 5 Phase-time diagrams of vibration signals extracted by three demodulation methods. (a) FFT demodulation; (b) IQ demodulation; (c) Hilbert transform demodulation

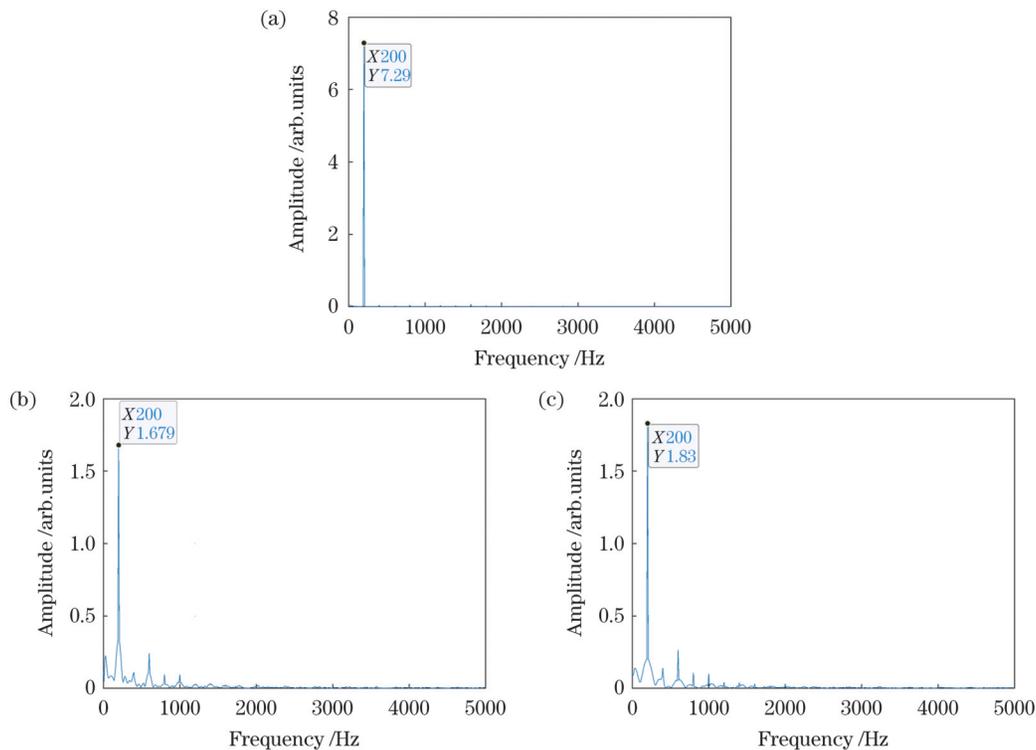


图6 三种解调方式提取的信号的频谱。(a)FFT解调;(b)IQ解调;(c)希尔伯特变换解调

Fig. 6 Spectra of extracted signals by three demodulation methods. (a) FFT demodulation; (b) IQ demodulation; (c) Hilbert transform demodulation

解调准确,且频谱信息显示所解调的信号没有受到谐波的干扰。图6(b)和图6(c)分别为IQ解调方式、希尔伯特变换方式获取的振动信号相位的频谱图,图中信息显示两种方式提取的振动信号相位的频谱均为

200 Hz,但这两种解调方式提取的信号均受到了诸多谐波及低频噪声的干扰。

图7展示了三种信号解调方式提取的振动信号的功率谱。图7(a)为FFT信号解调方式获取的振

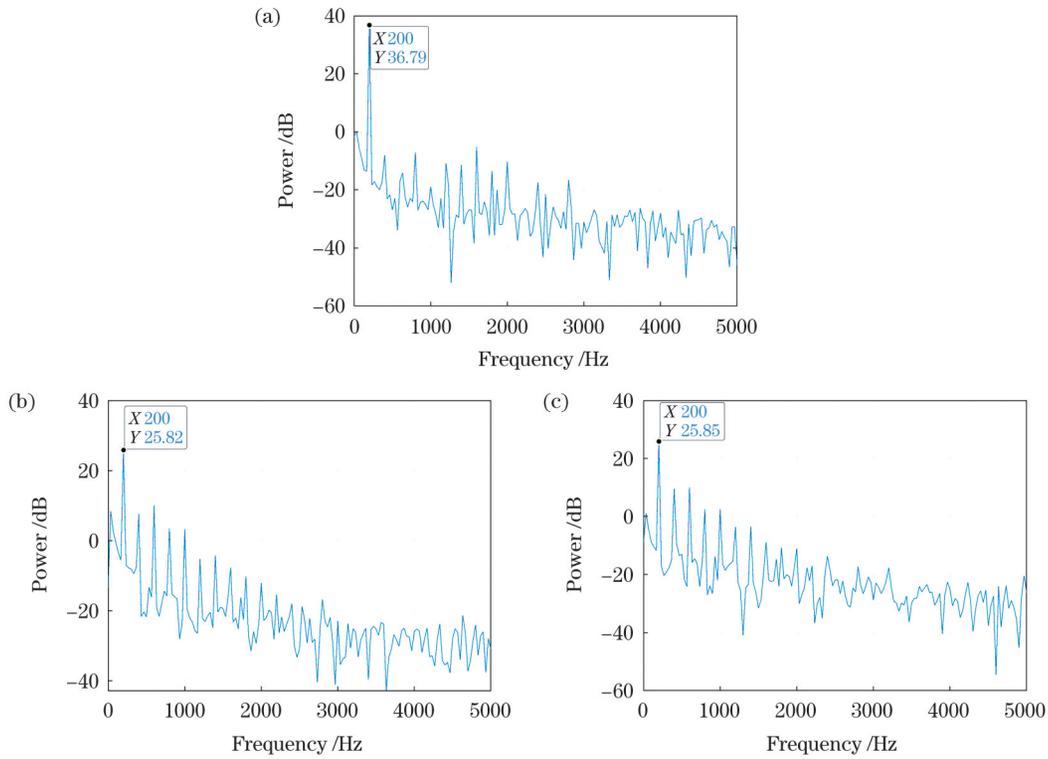


图 7 三种解调方式下解调信号的功率谱图。(a)FFT 解调;(b)IQ 解调;(c)希尔伯特变换解调

Fig. 7 Power spectra of demodulation signals in three demodulation modes. (a) FFT demodulation; (b) IQ demodulation; (c) Hilbert transform demodulation

动信号相位的功率谱信息,图中显示解调信号的频率为 200 Hz,信噪比为 36.71 dB,且所提取的信号没有受到低频噪声及其他噪声的干扰。图 7(b)为 IQ 信号解调方式获取的信号功率谱,解调信号的频率为 200 Hz,但信号中夹杂着低频噪声扰动,且信号谐波频率扰动功率多处大于 0 dB。图 7(c)为希尔伯特变换解调方式获取的振动信号的功率谱,图中功率谱信息显示解调信号的频率为 200 Hz,但与 IQ 解调方式一样,解调信号的谐波扰动功率多处大于 0 dB;同时,图 7(b)、(c)显示的信噪比分别为 15.67 dB 和 15.80 dB,均小于 FFT 信号解调方式的

信噪比。

进一步,本文研究了不同频率振动信号的 FFT 解调效果,并对其进行频谱分析。鉴于本文脉冲驱动频率为 10 kHz,根据奈奎斯特采样定理,能检测的最大频率为 5 kHz,因此本文分别对 2000 Hz 的中频信号与 5000 Hz 的高频信号进行了相位提取。图 8 展示了 FFT 解调方式提取的 2000 Hz 中频信号与 5000 Hz 高频信号的相位-时间图。图 8(a)、(b)显示所提取的振动信号周期性良好,相位幅值稳定,验证了该方式对振动信号等频带信号的提取具有较好的适用性。

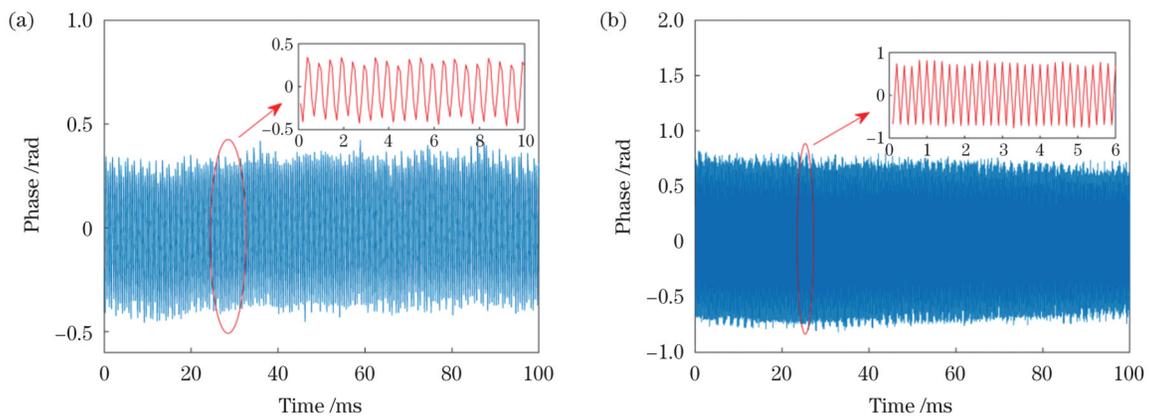


图 8 FFT 解调方式下中频信号和高频信号的相位-时间图。(a)2000 Hz 中频信号;(b)5000 Hz 高频信号

Fig. 8 Phase-time diagrams of intermediate- and high-frequency signals in FFT demodulation mode. (a) Intermediate-frequency signal of 2000 Hz; (b) high-frequency signal of 5000 Hz

图 9 展示了 2000 Hz 中频信号和 5000 Hz 高频信号的相位信号的频谱图。解调的相位信号的频率分别

为 2000 Hz 和 5000 Hz, 振动信号频率解调准确, 且频谱信息展示所解调的信号没有受到谐波的干扰。

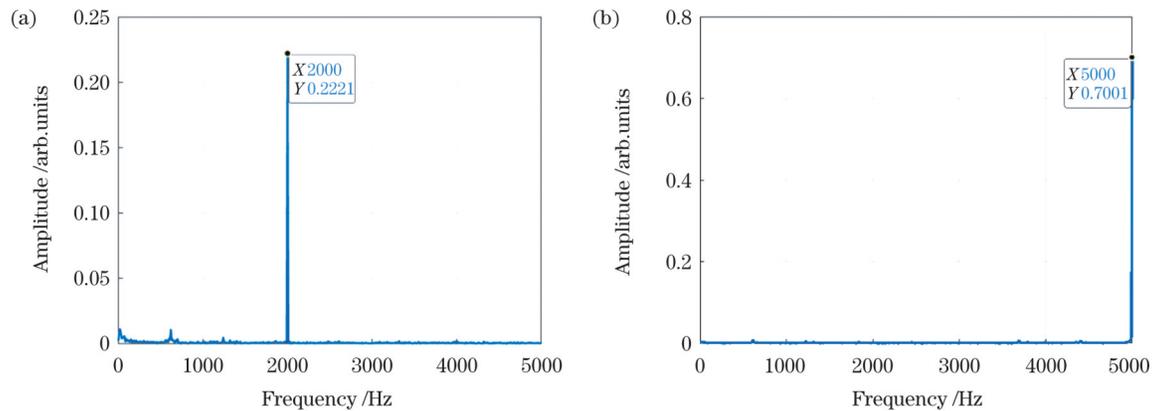


图 9 FFT 解调方式下的信号频谱图。(a) 2000 Hz 中频信号; (b) 5000 Hz 高频信号

Fig. 9 Signal spectra under FFT demodulation mode. (a) Intermediate-frequency signal of 2000 Hz; (b) high-frequency signal of 5000 Hz

5 结 论

本文主要提出了一种基于 FFT 的 DAS 信号的解调方式, 并通过 FFT 解调方式对振动信号的相位进行了提取, 对振动处的缠绕相位进行差分, 然后对相位进行光纤方向与时间方向的二次解缠绕, 在两次相位解缠绕后再对信号进行去直流与高通滤波处理, 成功解调出了加载在 PZT 上的 200 Hz 的正弦周期性信号。与 IQ 解调、希尔伯特变换解调方式相比, 该方式解调出的相位信号受信号相干衰落的影响小, 且频率信息显示信号没有受谐波干扰, 所解调的信号周期性良好, 相位幅值均大于 IQ、希尔伯特变换解调出的相位幅值。对比了三种解调方式所提取信号的信噪比, 结果显示: FFT 提取的 200 Hz 信号的信噪比为 36.71 dB, 比 IQ 和希尔伯特变换提取的信噪比分别高 21.04 dB 和 20.91 dB, 而且该方式滤除了低频噪声的干扰。分别对 2000 Hz 和 5000 Hz 的正弦振动信号进行提取, 提取结果表明该方式具有较好的适用性。

参 考 文 献

- [1] Wang C, Wang C, Shang Y, et al. Distributed acoustic mapping based on interferometry of phase optical time-domain reflectometry [J]. *Optics Communications*, 2015, 346: 172-177.
- [2] 刘旭安, 李俊, 史博, 等. 基于相位敏感型光时域反射仪的袋式除尘器漏袋检测技术[J]. *光子学报*, 2019, 48(8): 0806002.
Liu X A, Li J, Shi B, et al. Leakage bag detection technology of bag filter based on phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(8): 0806002.
- [3] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847[P]. 1993-03-16.
- [4] Wang Z N, Zhang L, Wang S, et al. Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 853-858.
- [5] 盛庆华, 俞钊, 卢斌, 等. 基于异构加速的 Φ -OTDR 实时信号处理系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0104002.
Sheng Q H, Yu Z, Lu B, et al. Real-time phase-sensitive optical time-domain reflectometry signal processing system based on heterogeneous accelerated computing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0104002.
- [6] Yang G Y, Fan X Y, Wang S, et al. Long-range distributed vibration sensing based on phase extraction from phase-sensitive OTDR[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 6802412.
- [7] Shang Y, Yang Y H, Wang C, et al. Optical fiber distributed acoustic sensing based on the self-interference of Rayleigh backscattering[J]. *Measurement*, 2016, 79: 222-227.
- [8] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106004.
Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106004.
- [9] Taylor M G. Phase estimation methods for optical coherent detection using digital signal processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(7): 901-914.
- [10] 司召鹏, 卜泽华, 毛邦宁, 等. 基于相位解调的相位敏感光时域反射计研究综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1100006.
Si Z P, Bu Z H, Mao B N, et al. Review of phase sensitive optometer based on phase demodulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1100006.
- [11] 於玺. 快速傅里叶变换在信号处理中的应用[J]. *信息记录材料*, 2021, 22(10): 184-186.
Yu X. Application of fast Fourier transform in signal processing[J]. *Information Recording Materials*, 2021, 22(10): 184-186.
- [12] 于森, 孙铭阳, 张耀鲁, 等. 相位敏感光时域反射系统相位模糊及解缠绕[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(5): 20200437.
Yu M, Sun M Y, Zhang Y L, et al. Phase ambiguity and unwrapping of phase-sensitive optical time-domain reflectometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200437.

Demodulation Analysis of Distributed Vibration Sensor Signals Based on Fast Fourier Transform

Si Zhaopeng¹, Mao Bangning^{1**}, Bu Zehua¹, Gong Huaping¹, Xu Ben¹, Kang Juan¹,
Yang Chunjun², Zhao Chunliu^{1*}

¹College of Optics and Electronic Science and Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;

²Hangzhou National Camera Testing Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China

Abstract

Objective Phase-sensitive optical time-domain reflectometry is a type of distributed optical fiber sensing technology that has become one of the most rapidly developing sensing methods in modern sensing technology because of its wide monitoring range, high sensitivity, low monitoring cost, and many measuring parameters. Compared with other distributed optical fiber sensing technologies, this technology can perform distributed multipoint measurement of weak signals over long distances. Distributed acoustic sensing (DAS) technology uses coherent Rayleigh backscattering technology in common single-mode sensing fibers that can realize the continuous detection of remote external vibration, sound, and temperature changes. This technology has strong environmental applicability, electromagnetic interference resistance, chemical corrosion resistance, and good concealment. Therefore, research on the DAS technology of a phase sensitive optical time domain reflectometer (φ -OTDR) system has great scientific and practical significance for social engineering applications. A DAS system typically adopts IQ and Hilbert demodulation, but both have certain defects. Although the IQ demodulation method has a simple structure, its demodulation results are easily affected by phase noise caused by the frequency drift of narrow linewidth laser and polarization instability of local light and Rayleigh scattering light, decreasing the demodulation accuracy. Hilbert transform can be used in DVS and DAS systems, but the low noise term cannot be eliminated in low pass filtering; therefore, the anti-noise performance is poor. In order to address the limitations of IQ and Hilbert transform demodulation methods, a signal demodulation method based on fast Fourier transform (FFT) is adopted in this study to improve the signal-to-noise ratio of vibration signals and to reduce the interference of low frequency noise, pulse optical coherence fading, and harmonics.

Methods The digital signal collected by the acquisition card is first passed through a belt pass filter such that the signal frequency near the intermediate frequency signal passes through, and then, the step size is set according to the range resolution of the DAS detection system. To prevent signal vibration at the connection of two steps, the phase of vibration signal extraction is discontinuous. The set step size is transformed by FFT, and the frequency point is set according to the intermediate frequency signal of an acoustooptic modulator. Then, the phase information of the vibration signal is extracted. The signal phase is differentiated to eliminate the phase noise of the signal, and then, the phase signal is unwound in the fiber and time directions. Finally, the extracted phase signal is processed by high-pass filtering to eliminate the influence of system components and low-frequency noise.

Results and Discussions Compared with IQ and Hilbert transform demodulation methods, the FFT signal demodulation method has strong phase periodicity, uniform period distribution, better amplitude stability, and less influence from signal coherent fading (Fig. 5). The phase signals demodulated by IQ and Hilbert transform have poor amplitude stability and uneven periodic distribution, and the amplitude of the demodulated signals extracted by both IQ and Hilbert transform demodulation methods is smaller than that extracted by FFT demodulation. Further, the frequency spectrum of the FFT demodulation signal shows that the phase of the vibration signal is not disturbed by harmonic and low frequency noise. Both IQ and Hilbert transform demodulation methods are disturbed by many harmonics and low frequency noise (Fig. 6). Furthermore, the signal-to-noise ratio (SNR) of vibration signals extracted by three demodulation methods is compared; the FFT demodulation method has the highest SNR (Fig. 7).

Conclusions In this study, we adopted a DAS signal demodulation method based on FFT. The phase information of vibration signals is extracted by FFT for the vibration of the wrapped phase difference. Then, the phases secondary wrapped in fiber and time directions are obtained, and finally, a DC signal is achieved with high-pass filtering processing. The 200 Hz sinusoidal periodic signal loaded on PZT is demodulated successfully. Compared with the IQ and Hilbert demodulation methods, the phase signal demodulated by FFT is less affected by the signal coherent fading, and the frequency information display signal is not interfered by harmonics. The signal demodulated by the IQ and Hilbert demodulation methods has good periodicity, and the phase amplitude of FFT demodulation method is larger than that of the IQ and Hilbert demodulation method. The SNR of 200 Hz signal extracted by FFT is 36.71 dB, that is, 21.04 dB and 20.91 dB higher than that extracted by IQ and Hilbert transform, respectively. Moreover, this method filters the interference of low frequency noise. For sinusoidal vibration signal extraction at 2000 Hz and 5000 Hz, the experimental results show that this method has good applicability.

Key words remote sensing; Fourier optics; fast Fourier transform; disturbance detection; signal modulation; signal noise ratio