

doi:10.3788/gzxb20184708.0806003

相位敏感光时域反射系统的时钟同源 I/Q 解调方法

刘珉含, 王旭, 于淼, 付群健, 常天英, 张瑾, 崔洪亮

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130012)

摘 要:提出一种基于时钟同源 I/Q 解调的相位敏感光时域反射系统解调方法. 分析了调制信号与混频信号非同源不一致对解调结果的影响, 采用声光调制器调制信号、斩波信号与 I/Q 混频信号时钟同源的方法以消除残余频率的影响. 实验采用双压电陶瓷作为扰动源, 通过 I/Q 解调实时获得后向瑞利散射光幅值和相位, 进而实现扰动的定位和还原. 实验结果表明, 该系统能有效地探测到 5 km 和 9 km 处的正弦扰动, 定位信号信噪比分别达 17.8 dB 和 16 dB, 相位解调结果准确还原正弦扰动, 与正弦曲线的拟合系数分别为 0.994 和 0.991, 均方根误差分别为 0.116 和 0.141. 实验进一步验证了该方法能够测得不同扰动幅度下的相位正弦变化曲线, 并能准确得到不同扰动频率, 且扰动位置处相位变化幅度与扰动强度具有良好的线性关系, 线性拟合系数达 0.992, 均方根误差为 0.499, 均优于非同源解调结果.

关键词: 光纤传感; 时钟同源; I/Q 解调; 相位敏感光时域反射系统; 残余频率

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)08-0806003-8

Clock Homologous I/Q Demodulation in Phase Sensitive Optical Time-Domain Reflection System

LIU Min-han, WANG Xu, YU Miao, FU Qun-jian, CHANG Tian-ying,
ZHANG Jin, CUI Hong-liang

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: A phase sensitive optical time domain reflection system demodulation method based on clock homologous I/Q demodulation is proposed. The influence of the non-homologous disagreement between the modulation signal and the mixing signal on the demodulation results is analyzed. The method using clock homologous modulation signal of the acoustic optical modulator, the chopper signal and the I/Q mixing signal is adopted to eliminate the influence of the residual frequency. Double piezoelectric ceramic is used as the disturbance source, and the amplitude and phase of the backward Rayleigh scattering light can be obtained in real time by I/Q demodulation, so as to achieve the location and reduction of the disturbance. The experimental results show that the system can detect the sinusoidal disturbances at 5 km and 9 km effectively, and the signal to noise ratio of the positioning signal is up to 17.8 dB and 16 dB, respectively. The phase demodulation results accurately restore the sinusoidal disturbance, and the fitting coefficients of the sinusoidal curves are 0.994 and 0.991 respectively, and the root mean square error is 0.116 and 0.141, respectively. Furthermore, the experiment verifies that the method can measure the phase sine curve under different disturbance amplitudes. The different disturbance frequencies can be obtained accurately, and the phase change amplitude at disturbance location has a good linear relationship with the disturbance intensity. The linear fitting coefficient is 0.992, and the root mean square error is

基金项目: 海洋公益性行业科研专项 (No.201405026-01) 资助

第一作者: 刘珉含 (1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术及其应用. Email: liuminhan123321@163.com

导 师: 崔洪亮 (1956—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信和传感、太赫兹科学与技术、纳米光学和纳米电子学等. Email: hcui@jlu.edu.cn

通讯作者: 常天英 (1981—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术及应用、太赫兹科学与技术等. Email: tchang@jlu.edu.cn

收稿日期: 2018-02-09; 录用日期: 2018-05-14

<http://www.photon.ac.cn>

0.499, both are better than the non-homologous demodulation result.

Key words: Fiber sensor; Clock homology; I/Q demodulation; Phase-sensitive optical time-domain system; Residual frequency

OCIS Codes: 060.2370;120.4825;290.5870

0 引言

分布式光纤传感技术可实现整条传感光纤上物理量的连续测量^[1-4],而相位敏感光时域反射系统(Phase-sensitive Optical Time-Domain System, φ -OTDR)作为一种全分布式光纤传感技术,具有灵敏度高、耐腐蚀、动态范围广、结构简单等优点,在大范围周界安防、石油和天然气管道安全监测、大型结构健康监测等领域有广阔的应用前景^[5-8]. φ -OTDR系统通过解调后向瑞利散射光的相位和强度信息,可实现传感光纤沿线的振动、应变等物理量的分布式测量。

φ -OTDR主要分为直接探测和相干探测两种结构,直接探测结构最早由TAYLOR H F等^[9]于1993年提出,其结构和解调方法简单,但信噪比较低,不适合长距离探测,且只能检测信号的强度变化,无法满足振动事件识别的需要,而同时具有强度、相位检测能力,灵敏度更高的相干探测结构逐渐成为研究热点.2010年LU Yue-lan等^[10]采用相干探测结构,将拍频信号与同频率的本地电信号进行混频滤波实现解调,但调制器的频率漂移和本地电信号的不稳定将产生残余频率,造成解调准确性和信噪比的下降.2012年梁可桢、潘政清等^[11-12]提出数字相干解调方法,该技术把分布式多点振动检测的优势和相干检测在相位解调中的优势相结合,实现了在长距离范围内对扰动信号的位置、频率、强度的同时测量,系统结构简单、硬件要求低,但需要采用高速数据采集卡(Data Acquisition Card,DAQ),且数据量巨大,影响系统的实时性.HE Hai-jun等^[13]于2016年采用自混频方法实现了 φ -OTDR相干探测结构的解调,通过拍频信号的自混频消除了残余频率的影响,解调精度和信噪比得到提高,但缺少相位信息的提取,无法准确还原外界扰动的变化.2017年沈隆翔等^[14]运用下变频和数字正交解调方法实现了幅度解调,并通过模式识别方法对外界扰动事件进行分类识别,解调结构中采用直接数字频率合成器(Direct Digital Synthesizer,DDS)作为本地信号源,同样没能避免混频过程中产生残余频率,影响解调和模式识别的准确性。

本文提出了一种用于 φ -OTDR的时钟同源 I/Q 解调方法,该方法在系统中提供时钟同源的调制信号、斩波信号和混频信号,避免了解调过程中残余频率的影响。

1 系统结构与原理分析

1.1 基本原理

基于数字相干检测的 φ -OTDR系统结构如图1所示,窄线宽激光器(Laser)发出的准单频激光,经耦

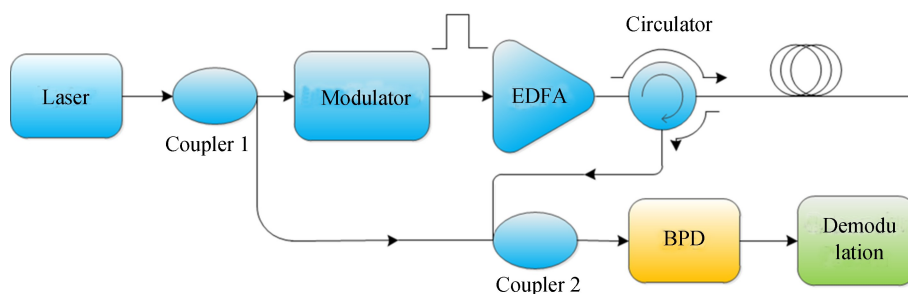


图1 数字相干 φ -OTDR系统结构

Fig.1 Structure diagram of digital coherent φ -OTDR

合器1(Coupler1)分为探测光和本地光两路,探测光经调制器(Modulator)调制为脉冲光,并经掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier,EDFA)进行放大后注入传感光纤. t 时刻返回的后向瑞利散射光可表示为^[15]

$$E_R(t) = \hat{r}(t)E_s e^{j[2\pi(f+f_m)t+\theta_0(t)]} \quad (1)$$

式中

$$\hat{r}(t) = \sum_{i=1}^N r_i e^{j\theta_i(t)} = r e^{j\theta_R(t)} \quad (2)$$

式中, E_s 为探测光振幅, f 和 f_m 分别表示激光中心频率和调制器引入的调制频率, $\hat{r}(t)$ 为后向瑞利散射光综合散射率, 其幅值与相位分别为 r 和 $\theta_R(t)$, N 为探测脉冲内散射中心个数, r_i 和 θ_i 为第 i 个散射中心的散射率和相位, $\theta_0(t)$ 表示探测光脉冲初相, 本地光可表示为

$$E_0(t) = E_0 e^{j[2\pi f t + \theta_0'(t)]} \quad (3)$$

式中, E_0 和 $\theta_0'(t)$ 分别为本地光振幅和初相, 后向瑞利散射光与本地光在耦合器 2(Coupler2)中产生拍频信号, 由平衡探测器(Balance Photo Detector, BPD)接收的拍频信号可表示为

$$S(t) \propto \hat{r} E_s E_0 \cos [2\pi f_m t + \theta_R(t) + \theta_0(t) - \theta_0'(t)] \quad (4)$$

通过对式(4)所示的拍频信号进行解调, 可得出后向瑞利散射光的幅值和相位变化, 进而得到传感光纤外界扰动变化. 为实现相位提取, 需将调制器引入的调制频率 f_m 消除, 同时避免产生残余频率, 保证相位解调的准确.

1.2 时钟同源 I/Q 解调

时钟同源 I/Q 解调结构如图 2 所示, 系统采用外腔光纤激光器(External Cavity Laser, ECL)作为光源, 其具有超窄线宽(小于 2 kHz), 经 90/10 耦合器分为两部分, 90% 的部分进入声光调制器(Acousto-optic Modulator, AOM)进行脉冲调制并引入 80 MHz 的移频, 产生探测光脉冲由 EDFA 放大后经环形器进入传感光纤; 10% 的部分经扰偏器作为本地光与环形器(Circulator)返回的后向瑞利散射光在 3 dB 耦合器中产生拍频信号, 并由 BPD 转换成电信号后分为两路, 分别与由任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)发出的正余弦信号混频(AWG 为 Tektronix 公司的 AFG3251C 型号, 相位分辨率为 0.01° , 相位噪声典型值为 < -110 dBc/Hz@20 MHz, 内部频率基准稳定性为 ± 1 ppm), 再经 2 个截止频率为 10 MHz 的低通滤波器(Low Pass Filter, LPF1 和 LPF2)进行低通滤波, 再经数据采集卡进行采集, 最终送到计算机 PC 进行幅值和相位的解调.

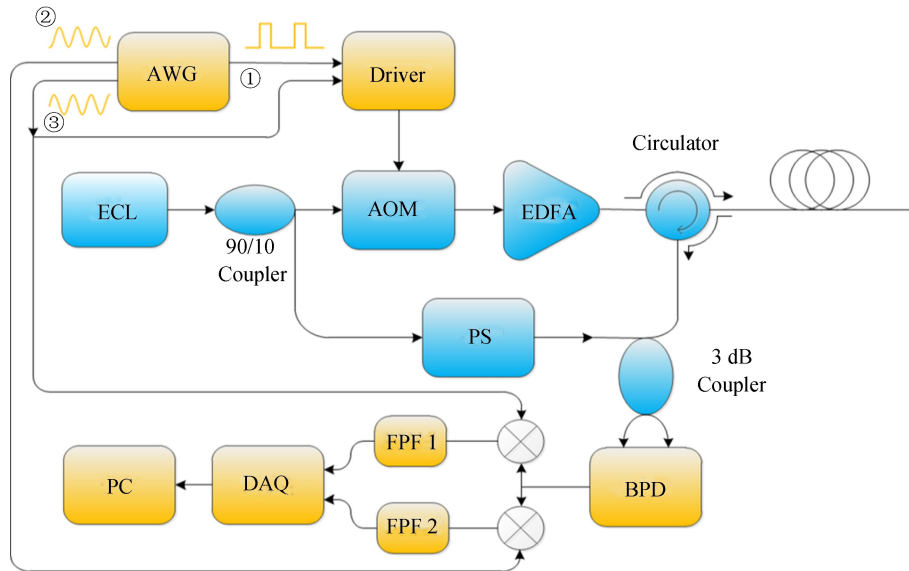


图 2 时钟同源 I/Q 解调结构框图

Fig.2 Block diagram of clock homologous I/Q demodulation

图 2 中 AWG 提供 80 MHz 正弦混频信号②和 80 MHz 余弦混频信号③的同时, 为 AOM 驱动(Driver)提供了脉冲斩波信号①和 80 MHz 的调制信号③, 同源的混频信号和调制信号可以有效避免在解调过程中出现残余频率, 从而提高解调结果的准确度. 式(4)所示的 BPD 信号改写为

$$S(t) \propto A_s(t) \cos [2\pi f_m t + \theta_s(t)] \quad (5)$$

式中, $\theta_s(t) = \theta_R(t) + \theta_0(t) + \theta_0'(t)$, $A_s(t) = \hat{r} E_0 E_s$. 由 AWG 提供的正余弦信号可表示为

$$T_1 = A_T \sin [2\pi f_T t + \theta_T(t)] \quad (6)$$

$$T_2 = A_T \cos [2\pi f_T t + \theta_T(t)] \quad (7)$$

式(6)、(7)中, A_T 、 $\theta_T(t)$ 和 f_T 分别表示信号的幅值、初相和频率, $S(t)$ 分为相同功率的两路, 然后分别与 T_1 、 T_2 进行混频得到

$$H_1 = \frac{1}{2} S(t) \cdot T_1 = \frac{1}{4} A_s(t) A_T \{ \sin [2\pi(f_m + f_T)t + \theta_s(t) + \theta_T(t)] - \sin [2\pi(f_m - f_T)t + \theta_s(t) - \theta_T(t)] \} \quad (8)$$

$$H_2 = \frac{1}{2} S(t) \cdot T_2 = \frac{1}{4} A_s(t) A_T \{ \cos [2\pi(f_m + f_T)t + \theta_s(t) + \theta_T(t)] + \cos [2\pi(f_m - f_T)t + \theta_s(t) - \theta_T(t)] \} \quad (9)$$

从式(8)、(9)可知, 混频后的信号由和频信号与差频信号组成, 为滤除 H_1 、 H_2 中的和频信号, 采用两个截止频率为 10 MHz 的低通滤波器 LPF1 和 LPF2 进行滤波, 从而得到 H_1 、 H_2 中的差频信号, 由于 $f_m = f_T = 80$ MHz, 差频信号中只剩下相位项, 结果可表示为

$$I = -\frac{1}{4} A_s(t) A_T \sin [\theta_s(t) - \theta_T(t)] \quad (10)$$

$$Q = \frac{1}{4} A_s(t) A_T \cos [\theta_s(t) - \theta_T(t)] \quad (11)$$

I 、 Q 两信号为同幅度正交信号, 随后由 DAQ 转换成两路数字信号传输到 PC 上, 最后通过式(12)、(13)可得到幅值和相位信息为

$$A(t) = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (12)$$

$$\theta(t) = \arctan \left(\frac{I}{Q} \right) + 2k\pi \quad (13)$$

式中, $A(t) = \frac{1}{4} A_s(t) A_T$, $\theta(t) = \theta_s(t) - \theta_T(t)$, 由于相位解调结果存在相位缠绕, 要经过相位解缠绕后才能得到实际的相位结果. 因为 AOM 驱动所用调制信号与 T_1 和 T_2 同源, 保证了 f_m 与 f_T 的一致, 如采用 Driver 中自带 80 MHz 的正弦调制信号, 由于驱动器温度变化或外界环境影响, 极易导致 f_m 和 f_T 出现残余频率 f_N , 此时 I 、 Q 信号应表示为

$$I = A_s(t) A_T \sin [2\pi f_N t + \theta(t)] \quad (14)$$

$$Q = A_s(t) A_T \cos [2\pi f_N t + \theta(t)] \quad (15)$$

这将导致最终的相位解调结果出现误差, 存在误差的相位解调结果表示为

$$\theta_r(t) = \theta(t) + 2\pi f_N t \quad (16)$$

由式(16)可知, 由于 f_N 的影响, 实际得到的相位将不能正确表征外界扰动造成的后向瑞利散射光相位变化, 造成扰动探测失效. 时钟同源 I/Q 解调结构中采用同源的调制信号、 T_1 及 T_2 , 可有效地避免 f_N 的产生, 保证了相位解调的精度与稳定性.

图 2 所示的结构中采用 AWG 提供的调制频率、混频信号与脉冲斩波信号来实现时钟同源 I/Q 解调, 由于 AWG 所产生的信号比较稳定, 主要避免了使用 AOM 驱动内部调制信号不稳定而引起的残余频率对解调结果的影响. 而在实际工程应用中, AWG 由于成本较高, 应以成本低且体积小的信号发生模块来代替, 由于模块稳定性不如信号发生器, 且更易受外界环境影响从而产生信号不稳定的现象, 所以时钟同源在实际工程应用中尤为重要. 在实际应用中, 要通过采用同一信号发生模块提供两路正交的混频信号与一路 AOM 驱动信号实现时钟同源, 如采用 ADI 公司型号为 AD 9959 作为信号发生模块, 其包含 4 个时钟同源的 DDS, 采样率达 500 M/s, 频率可调分辨率为 0.12 Hz, 可满足三路时钟同源信号的需求. 由于数字相干 I/Q 解调方法直接对 BPD 输出的拍频信号进行采集, 需采用高速数据采集卡, 当传感光纤距离较长时, 采集的数据量巨大, 且在电脑要对大量数据完成混频和滤波等信号处理过程, 易造成数据处理不及时, 产生数据冗余, 影响解调实时性. 而时钟同源 I/Q 解调过程中混频和滤波都是以模拟信号完成的, DAQ 采集的信号为滤波后的低频信号, 相较于数字相干 I/Q 解调其数据量小, 处理过程简单, 避免了数据冗余, 提高解调实时性.

2 实验结果与分析

2.1 扰动定位

采用如图 2 所示的时钟同源 I/Q 解调结构作为实验装置,AWG 产生的斩波脉冲重复频率为 10 kHz,脉冲宽度为 100 ns,传感光纤长度约为 10 km.采用 2 个压电陶瓷(Piezoelectric Ceramics,PZT)作为扰动源,分别加载在光纤 5 km 处和 9 km 处,PZT 的驱动分别为频率 100 Hz 和 200 Hz 的正弦信号.采用 400 MHz 采样率的 DAQ 采集得到 200 组探测脉冲对应的信号进行解调,后向瑞利散射光的幅值解调结果如图 3(a)所示.从图中可看出,在两处 PZT 扰动所在位置的幅值发生了明显的变化,而没有扰动的位置幅值基本保持不变,因此通过 200 条幅值曲线移动差分累加结果便可得到扰动位置,实现扰动的定位.如图 3(b),位于 5 km 处和 9 km 处的 PZT 扰动被准确定位,且定位信号信噪比分别为 17.8 dB 和 16 dB.图 3(c)和 3(d)分别为两扰动位置处幅值解调结果随时间变化的曲线,两曲线变化与 PZT 引入的 100 Hz 和 200 Hz 正弦扰动相吻合,但由于后向瑞利散射光幅值变化与扰动变化的非线性和幅值易受外界噪声干扰,图中的扰动变化曲线具有明显抖动,噪声较大,而后向瑞利散射光的相位变化与扰动具有线性关系,所以采用后向瑞利散射光的相位变化来还原扰动将更加准确,实现扰动定位后,对扰动位置附近的相位进行分析.

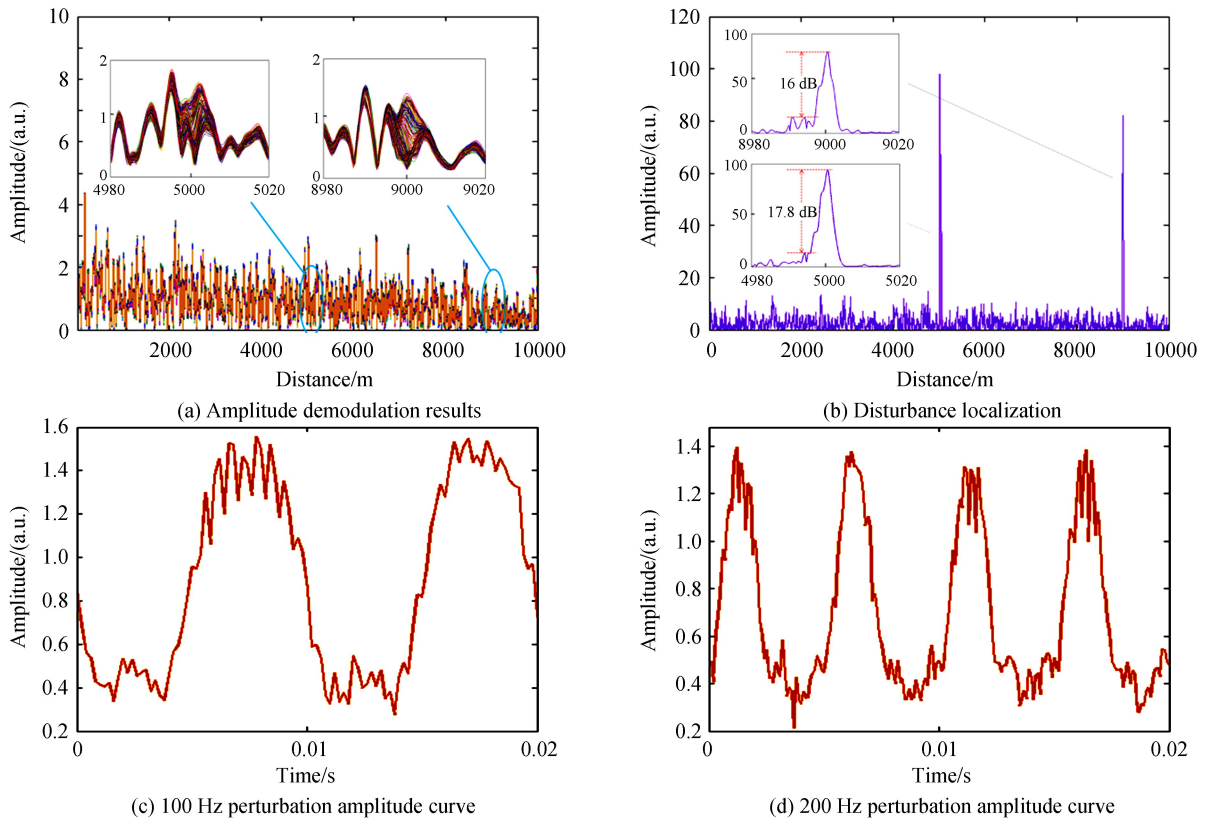


图 3 扰动定位和幅值解调结果

Fig.3 Disturbance location and amplitude demodulation results

2.2 相位提取

由式(13)可得到后向瑞利散射光相位,由于式中反正切函数的值域为 $(-\pi/2, \pi/2)$,要根据 I、Q 所在象限将式(13)结果转化到 $(-\pi, \pi)$ 范围内,再经过相位解卷绕才能得到最终的相位结果.图 4(a)、(b)为两处扰动附近的 200 条相位差曲线,从图中可看出相位在扰动位置 5 km 和 9 km 处 200 条相位差曲线间存在剧烈变化,而无扰动位置的 200 条相位差曲线基本保持一致.图 4(c)所示为两扰动位置相位随时间变化的曲线,两曲线与相应正弦拟合曲线的拟合系数分别为 0.994 和 0.991,均方根误差分别为 0.116 和 0.141,较准确地还原 PZT 所加载的 100 Hz 以及 200 Hz 的正弦扰动.当不采用时钟同源 I/Q 解调结构,将 Driver 中自带的正弦调制信号对 AOM 进行调制,混频信号不再与调制信号同源时,进行解调得到的扰动位置处相位解调结

果如图 4(d)所示,相位变化曲线与相应正弦拟合曲线的拟合系数分别为 0.955 和 0.906,均方根误差为 0.276 和 0.457,两处扰动的误差均高于时钟同源 I/Q 结构的相位解调结果,并可明显看到信号质量较图 4(c)相差很大,失真较严重.其中 200 Hz 的相位曲线要比 100 Hz 的误差更大,从式(16)可知由残余频率产生的相位解调误差将随时间 t 的增加而变大,由于传感光纤上越靠后的位置对应的 t 越大,即相位解调误差将更大,所以位于 9 km 处的 PZT 扰动相位解调结果较 5 km 处的相位解调结果要差.而采用时钟同源 I/Q 解调结构时避免了残余频率 f_N 的出现,在长距离的探测中仍能保持相位解调结果的准确性,保证了扰动的准确还原.为进一步验证同源 I/Q 解调结构的效果,改变 9 km 处扰动的频率,采用 PZT 分别引入 500 Hz、1 kHz、2 kHz 扰动,解调结果如图 5(a)~(c)所示,可看到扰动位置相位随时间呈正弦变化,与正弦扰动相符,且在图 5(d)频谱所示的相位变化频率分别为 500 Hz、1 kHz、2 kHz,实现了扰动频率的还原.

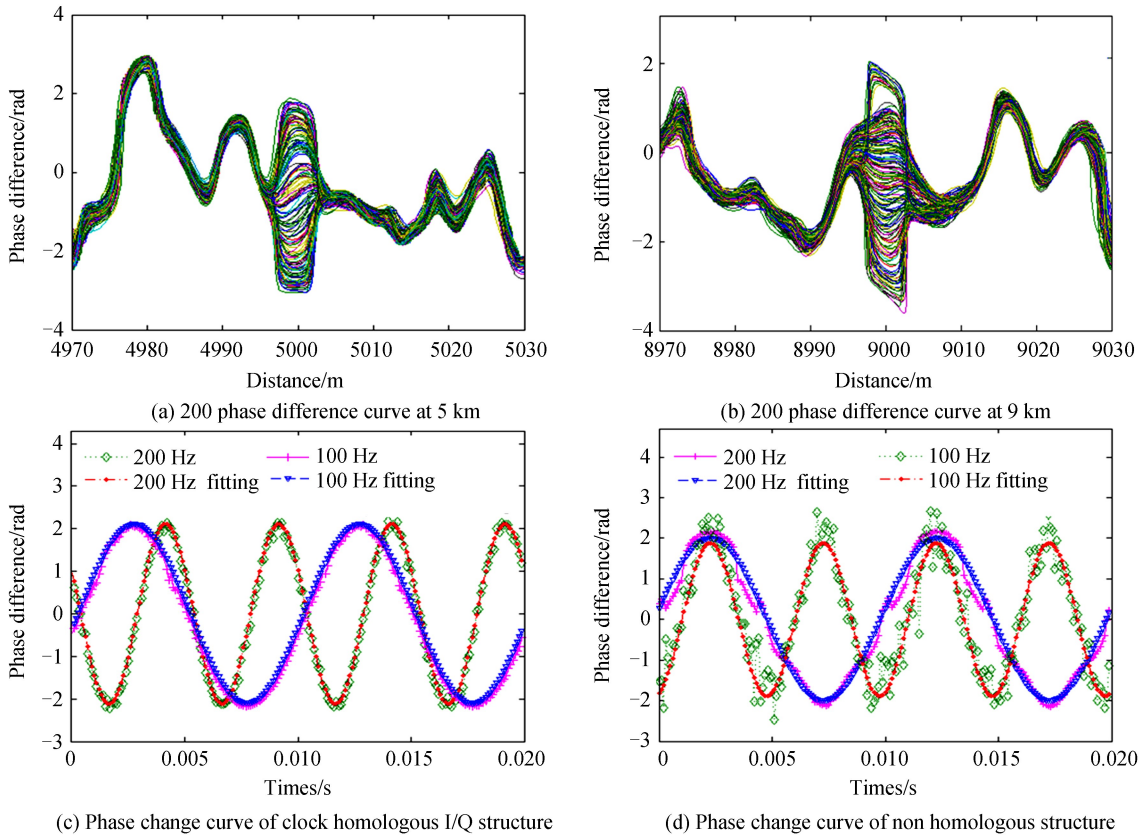
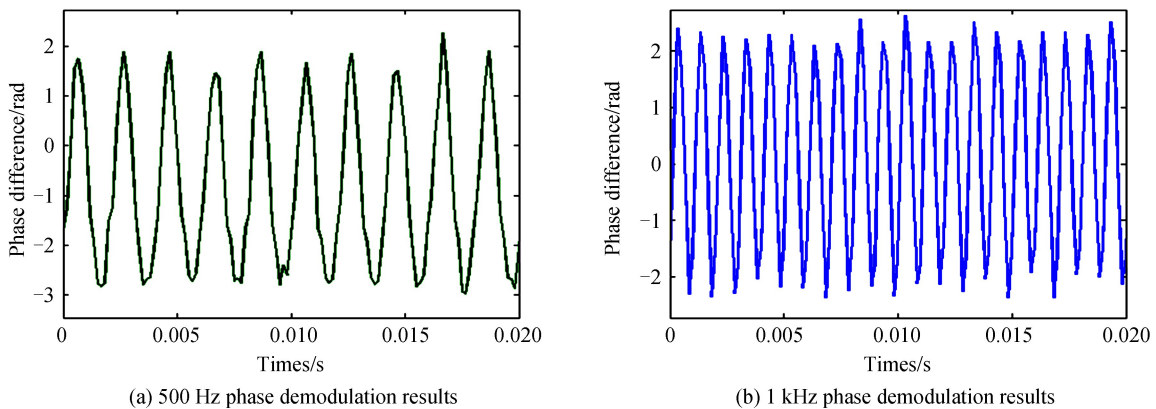


图 4 相位解调结果

Fig.4 Phase demodulation results



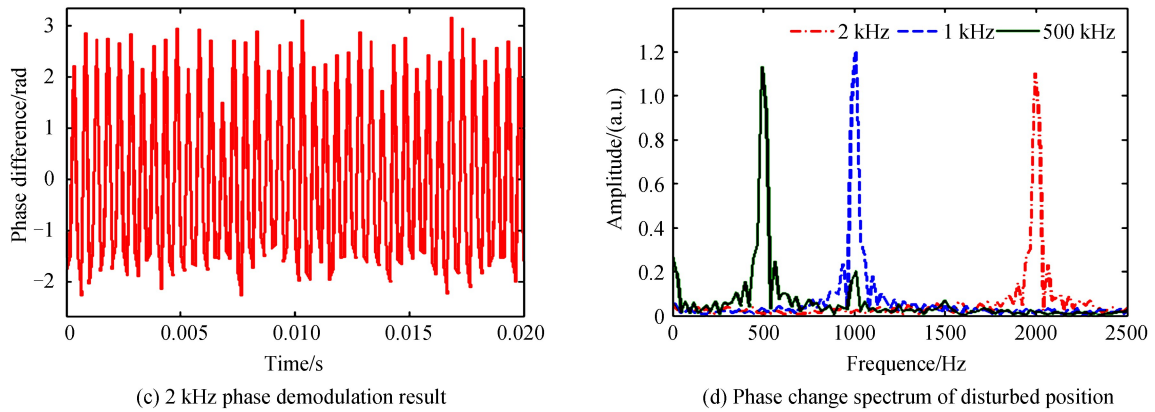


图 5 500 Hz、1 kHz、2 kHz 扰动相位解调结果及频谱
Fig.5 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz disturbance phase demodulation results and spectrum

为研究相位变化幅值与扰动幅度的关系,改变 9 km 处 PZT 的驱动电压,以步进值 0.5 V 从 0.5 V 递增到 5 V,使扰动强度相应地线性增加,采用上述方法得到不同扰动幅度下的相位正弦变化曲线,其幅值及线性拟合曲线如图 6(a)所示.从图中看出幅值随 PZT 驱动电压基本呈线性变化,线性拟合曲线的拟合系数为 0.992,均方根误差为 0.499.而采用非同源 I/Q 解调结构进行实验所得结果如图 6(b)所示,其线性拟合曲线的拟合系数为 0.946,低于图 6(a)曲线的拟合系数,而均方根误差为 1.24,误差明显高于图 6(a)所示结果的误差.由于同源 I/Q 结构消除了残余频率,相位解调误差降低,所以相位解调结果变化的幅值结果也更加准确,其波动相对于存在残余频率的非同源结构要小,因此同源 I/Q 结构相位解调结果变化幅度较非同源结构具有更好的线性度.

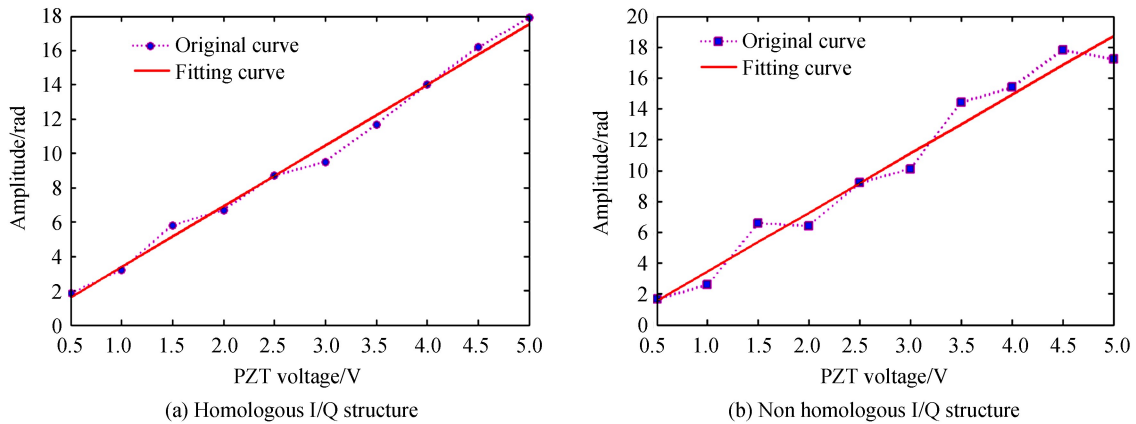


图 6 相位变化幅值随 PZT 驱动电压变化曲线
Fig.6 Variation curve of phase change amplitude with PZT drive voltage

3 结论

本文提出一种 φ -OTDR 的时钟同源 I/Q 解调方法,推导了 φ -OTDR 的幅值和相位解调的过程,并说明 AOM 调制信号与混频信号间存在的残余频率将造成相位解调误差.实验中采用时钟同源 I/Q 解调结构成功对传感光纤 5 km 和 9 km 位置的正弦扰动实现了定位,与非同源结构相比,时钟同源 I/Q 结构的相位解调结果与正弦扰动波形拟合度更高、均方根误差更小,说明时钟同源相位解调结果较非同源相位解调更加准确.对 500 Hz、1 kHz 和 2 kHz 正弦扰动进行相位解调实验,准确得到各信号的频率,且通过改变正弦扰动幅度说明了相位解调结果与扰动强度的线性关系.

参考文献

- [1] LÜ Yue-lan, XING Yong-wei. Investigation on Rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0819001.
吕月兰,行永伟. 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0819001.

- [2] WANG Peng, LOU Shu-qin, LIANG Sheng, *et al.* Selective average based threshold algorithm for φ -OTDR distributed fiber-optic sensing system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(3): 0322003.
王鹏, 娄淑琴, 梁生, 等. 选择性平均的 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统阈值算法[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(3): 0322003.
- [3] WANG Yu, JIN Bao-quan, WANG Yun-cai, *et al.* Real-time distributed vibration monitoring system using φ -OTDR [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, **17**(5): 1333-1341.
- [4] WU Yuan, BIAN Pang, XIAO Qian. Optical fiber circumferential security system based on phase carrier multiplexing and its implementation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 967-971.
吴媛, 卞庞, 肖倩. 基于相位载波复用的光纤周界安防系统及其实现方法[J]. 光子学报, 2011, **40**(7): 967-971.
- [5] LIU Xin, JIN Bao-quan, BAI Qing, *et al.* Distributed fiber-optic sensors for vibration detection[J]. *Sensors*, 2016, **16**(8): 1164.
- [6] PARK J. Fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical time-domain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering[C]. *Photonics China*, 1998: 49-56.
- [7] FURUKAWA S, TANAKA K, KOYAMADA Y, *et al.* High dynamic range coherent OTDR for fault location in optical amplifier systems[C]. *Conference Proceedings, 10th Anniversary, IMTC/94. Advanced Technologies in I & M*. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1994: 106-109.
- [8] YU Miao, LIU Mian-han, CHANG Tian-ying, *et al.* Phase-sensitive optical time-domain reflectometric system based on a single-source dual heterodyne detection scheme[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(14): 4058.
- [9] TAYLAR H F, LEE C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US, 519847[P]. 1993-03-16.
- [10] LU Yue-lan, ZHU Tao, CHEN Liang, *et al.* Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(22): 3243-3249.
- [11] LIANG Ke-zhen, PAN Zheng-qing, ZHOU Jun, *et al.* Multi-parameter vibration detection system based on phase sensitive optical time domain reflectometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(8): 0805004.
梁可桢, 潘政清, 周俊, 等. 一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器[J]. 中国激光, 2012, **39**(8): 0805004.
- [12] PAN Zheng-qing, LIANG Ke-zhen, YE Qing, *et al.* Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [C]. *SPIE*, 2011, 8311: 83110S.
- [13] HE Hai-jun, SHAN Li-yang, LI Zong-lei, *et al.* Self-mixing demodulation for coherent phase-sensitive OTDR system [J]. *Sensors*, 2016, **16**(5): 681.
- [14] SHEN Xiang-long, FENG Hao, SHA Zhou, *et al.* Pattern recognition of heterodyne phase-sensitive optical time-domain reflection technique based on down conversion and IQ demodulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(8): 0806005.
沈隆翔, 封皓, 沙洲, 等. 基于下变频和 IQ 解调的外差型相位敏感光时域反射技术的模式识别[J]. 光学学报, 2017, **37**(8): 0806005.
- [15] FAN Xin-yu, YANG Guang-yao, WANG Shuai, *et al.* Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from optical reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(16): 3281-3288.

Foundation item: State Administration of Oceanography of China (No.201405026-01)

引用格式: LIU Min-han, WANG Xu, YU Miao, *et al.* Clock Homologous I/Q Demodulation in Phase Sensitive Optical Time-Domain Reflection System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0806003

刘珉含, 王旭, 于淼, 等. 相位敏感光时域反射系统的时钟同源 I/Q 解调方法[J]. 光子学报, 2018, **47**(8): 0806003