

相位敏感光时域反射计的高频振动检测

宋牟平^{**}, 庄守望^{*}, 王轶轩

浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 相位敏感光时域反射计(φ -OTDR)可以有效地检测光纤的振动信息,但受传感光纤长度的限制,可检测的振动频率范围一般在几百赫兹到几千赫兹之间。为了提高振动检测范围,组建了基于外差相干检测的 φ -OTDR系统,采用 I/Q 解调方法获得传感光纤散射光信号的相位信息,对此相位信息在空间域与时域上相继进行差分相位解调,从而实现对光纤中高频振动信号的分布式检测。理论上分析了高频振动检测方案的可行性,并在实验中有有效解调出了频率为 500 kHz 的振动信号,传感距离达到了 23 km。

关键词 光通信; 相位敏感光时域反射计; 高频振动检测; 外差检测; 相位解调

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0506001

High-Frequency Vibration Detection of Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometer

Song Muping^{**}, Zhuang Shouwang^{*}, Wang Yixuan

College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract The phase-sensitive optical time-domain reflectometer (φ -OTDR) can effectively detect the vibration information of fiber; however, the detectable vibration frequency range is generally between several hundred hertz and several kilohertz, limited by the length of the sensing fiber. To improve the vibration detection range, a φ -OTDR system that uses heterodyne coherent detection is built in this study. The phase information of the scattered optical signal of the sensing fiber is obtained using the I/Q demodulation method. Differential phase demodulation in the space and time domains is consecutively performed to achieve a distributed detection of high frequency vibration signals in the fiber. Furthermore, the feasibility of the proposed high-frequency vibration detection scheme is theoretically analyzed, and the vibration signal with a frequency of 500 kHz is effectively demodulated in the experiment, obtaining a sensing distance of 23 km.

Key words optical communications; phase-sensitive optical time-domain reflectometry; high-frequency vibration detection; heterodyne detection; phase demodulation

OCIS codes 060.2870; 060.2840; 290.5870

1 引言

分布式光纤传感器具有监测范围广、分辨率高及抗电磁干扰等优点,在管道、桥梁结构监测等领域具有良好的应用前景^[1-5]。相位敏感光时域反射计(φ -OTDR)作为一种新型的分布式光纤传感技术,在振动测量方面越来越受到人们的关注^[6-9]。

随着 φ -OTDR技术的发展以及实际应用的需要, φ -OTDR系统的振动频率响应逐渐引起了人们的兴趣。采用相干检测和滑动差分技术,Bao 课题

组^[10-11]使系统的最大频率响应达到了 1 kHz,传感距离约为 1.2 km。随后,为了消除偏振引起的信号衰减和噪声,在系统中加入了偏振保持装置,使可检测的频率响应达到了 2.25 kHz,但这极大地增加了系统的复杂度。He 等^[12]使用马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结合频分复用技术,在 3 km 的传感光纤范围内使最大可检测频率达到了 40 kHz;Zhu 等^[8]将 φ -OTDR系统与 MZI 结构相结合,在 1.06 km 的光纤中实现了 3 MHz 的检测频率。虽然系统的频率响应得到了很大的提高,但频率响应受到传感范围的

收稿日期: 2019-10-22; 修回日期: 2019-11-22; 录用日期: 2020-01-10

* E-mail: z_shouwang@zju.edu.cn; ** E-mail: songmp@zju.edu.cn

限制也越来越严重。

为了提高 φ -OTDR 系统的振动频率检测范围, 本文提出一种高频振动信号检测方案, 设计了基于外差检测的 φ -OTDR。采用 I/Q 解调方法, 对检测到的信号在空间上进行差分相位解调, 并基于此对信号进行时域差分运算; 二次差分后, 再对信号进行频谱分析, 检测出了频率为 500 kHz 的高频振动信号。

2 原 理

相干检测 φ -OTDR 系统的原理如图 1 所示。激光器(lasers)发出的光经过耦合器(OC)后分为两束; 一束光经声光调制器(AOM)进行脉冲调制和移频, 产生频移光脉冲, 然后通过环形器(circulator)进入待测光纤; 光脉冲在传感光纤(FUT)中的后向散射光与经过耦合器(OC)的另一束光发生干涉; 最后经光电探测器(PD)得到拍频信号。

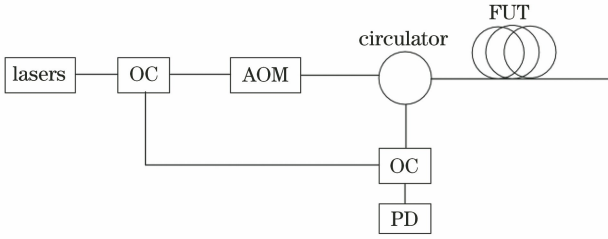


图 1 φ -OTDR 系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of φ -OTDR system

设脉冲发射周期为 T , 在 t 时刻, 待测光纤某一位置 z 处的后向散射光的光场 $E(z, t)$ 可以表示为

$$E(z, t) = A(z) \exp[j\omega t + j\Phi_v(z, t) + j\Phi_0(z)], \quad (1)$$

式中: $t = kT + \frac{2zn}{c}$, $k = 1, 2, 3, \dots, c$ 为真空中的光速; $A(z)$ 为参考光的振幅; ω 为探测光脉冲的角频率; $\Phi_v(z, t)$ 为 t 时刻位置 z 处的振动变化引起的相位改变; $\Phi_0(z)$ 为信号初始相位。

本振信号的光场可表示为

$$E_{L_0}(z, t) = A_{L_0}(z) \exp[j(\omega + \omega_{\text{shift}})t + \varphi_{\text{noise}}], \quad (2)$$

式中: $A_{L_0}(z)$ 为本振光的振幅; ω_{shift} 为 AOM 调制后产生的频移; φ_{noise} 为信号的相位噪声。两束光干涉后, 平衡光电探测器探测到的拍频信号 $I(z, t)$ 可以表示为

$$I(z, t) = A_{L_0}(z)A(z) \cos[\omega_{\text{shift}}t + \Phi_v(z, t) + \Phi_0(z) + \varphi_{\text{noise}}]. \quad (3)$$

当振动频率较低时, 可以通过外差相干检测从

(3) 式中解调出振动信号的相位信息, 即

$$\Phi(z, t) = \varphi_1(z, t) - \varphi_1(z + \delta z, t), \quad (4)$$

式中: $\varphi_1(z, t)$ 为外差相干检测解调出的拍频信号的相位信息; δz 表示两个相邻散射点之间的距离。之后对(4)式进行频谱分析, 就可以得到振动信号的频率。当在待测光纤中施加高频振动时, 因系统性能的限制, 使用上述解调方法无法解调出振动频率。此时, 假定振动发生在传感光纤上某个位置 z_0 处, 在 t 时刻, 因振动频率较高, $t = kT + \frac{(2z - z_0)n}{c}$, 对于光纤上振动位置之后的散射点, 假设振动引起的相位变化可表示为

$$\Phi_v(z, t) = A_v \cos(\omega_v t), \quad (5)$$

式中: A_v 为振动信号的幅度; ω_v 为振动信号的频率。则使用上述的解调方法对相位信息进行初次解调可以得到

$$\Phi(z, kT) = \Phi_v(z, kT) - \Phi_v(z + \delta z, kT) = 2A_v \sin\left(\omega_v \frac{\delta z n}{c}\right) \sin\left\{\omega_v \left[kT + \frac{(2z - \delta z - z_0)n}{c}\right]\right\}. \quad (6)$$

对(6)式在时域上进行差分运算, 可得到

$$d\Phi(z) = \Phi(z, kT) - \Phi[z, (k+1)T] = C \cos\left[\frac{2\omega_v n}{c}z + \frac{(2K+1)T\omega_v}{2} - \frac{\delta z + z_0}{c}\right], \quad (7)$$

式中: C 为常数项系数。(7)式是关于振动频率 ω_v 的函数, 对 $d\Phi(z)$ 进行频谱分析, 就可以得到振动频率。

3 实验结果与分析

φ -OTDR 高频振动检测实验系统如图 2 所示。实验中使用的激光器(lasers)的线宽低于 2 kHz, 激光器发出的光经由一个 10:90 的耦合器分束, 其中 90% 的光作为探测光, 10% 的光作为本地参考光。探测光经 AOM 调制成方波脉冲, 脉冲宽度为 400 ns, 并获得一个 100 MHz 的频移。掺铒光纤放大器(EDFA)被用来放大探测脉冲, 带通滤波器(BPF)被用来滤除 EDFA 产生的自发受激辐射噪声。放大后的探测光通过环形器(circulator)耦合进待测光纤。从待测光纤中返回的瑞利后向散射光与本地参考光发生干涉后被平衡光电探测器检测到。将平衡探测器输出的射频信号与一个 80 MHz 的信号混频, 之后对混频信号进行滤波得到电信号, 再利用 1.25 GSa/s 的数据采集卡对电信号进行采样, 最后通过计算机进行数据处理与分析。信号解

调过程如图 3 所示,其中 I 是光电检测器的输出信号,LPF 为低通滤波器,HPF 为高通滤波器, Φ 为最终解调出的相位。

实验中,在一段待测光纤之后接压电陶瓷

(PZT),通过任意波形发生器(AWG)产生一定频率的电压信号驱动 PZT,从而提供所需检测的振动信号。当振动频率较低时,驱动信号设定为幅度为 20 V、频率为 300 Hz 的正弦信号。

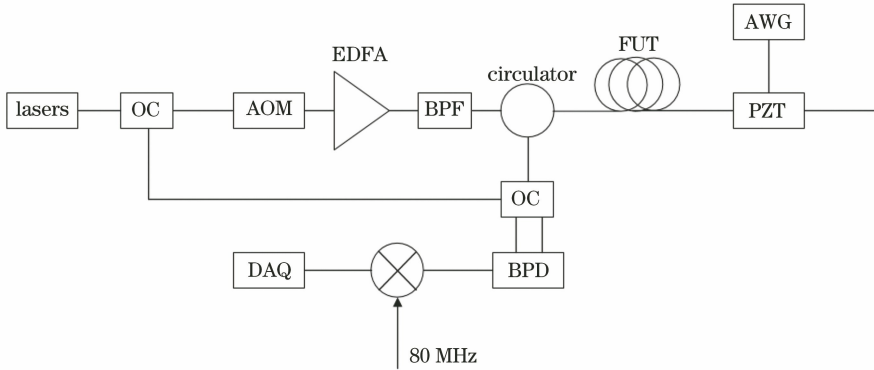


图 2 φ -OTDR 高频振动检测实验系统图

Fig. 2 φ -OTDR high-frequency vibration detection experiment system

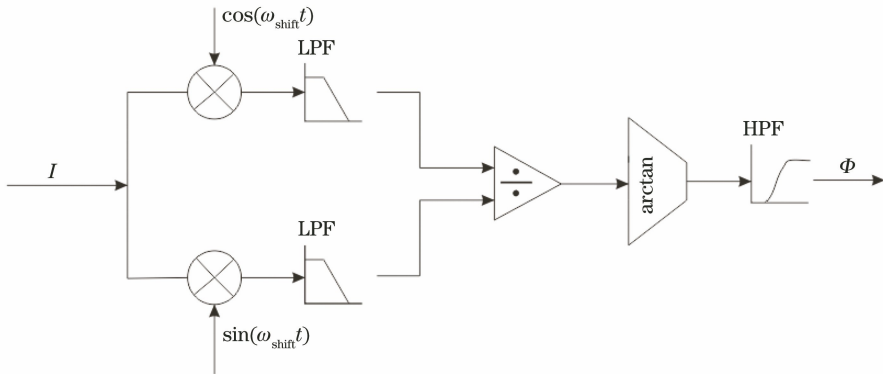


图 3 信号解调过程

Fig. 3 Signal demodulation process

检测得到的原始时域信号如图 4 所示,对图 4 的信号进行傅里叶变换可以得到如图 5 所示的频谱图。从图 5 中可以看出,频谱在 20 MHz 处有一个峰值,这对应于 AOM 带来的 100 MHz 的频率偏移信号和本地 80 MHz 信号混频后产生的差频。但系

统的光源噪声、非理想 AOM 调制、EDFA 噪声和光电检测噪声导致频谱在 20 MHz 附近存在一些噪声谱。

使用 I/Q 相位解调方法对采集到的原始信号进行解调,得到的信号的频谱如图 6 所示。

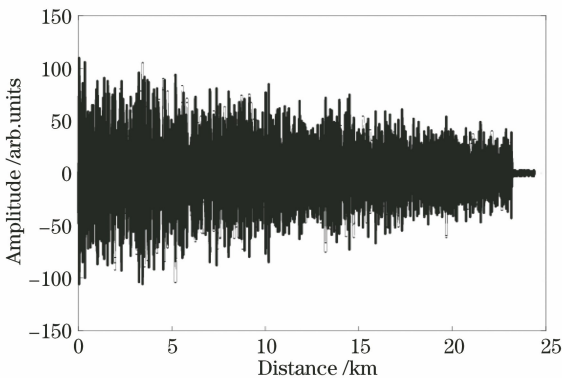


图 4 检测得到的原始时域信号

Fig. 4 Detected original time domain signal

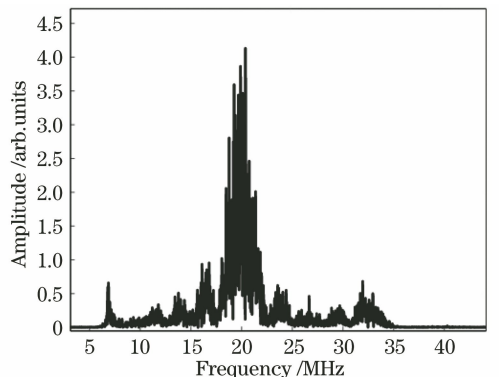


图 5 原始时域信号频谱图

Fig. 5 Spectrum of original time domain signal

从图 6 中可以看到,在距离为 23 km、频率为 300 Hz 的位置处有一个明显的峰,这对应着施加在

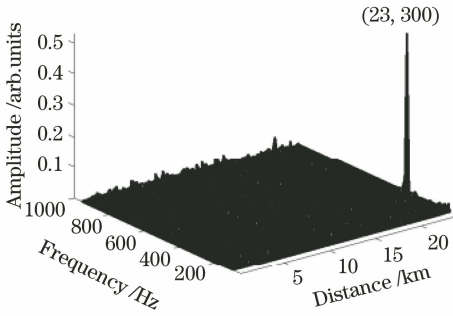


图 6 解调得到的信号频谱

Fig. 6 Signal spectrum after demodulation

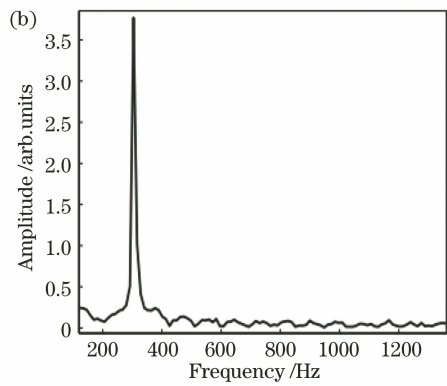
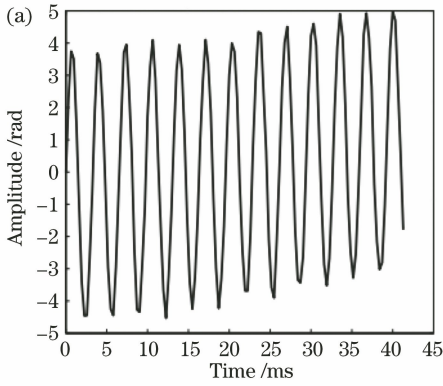


图 7 振动位置处解调后的信号。(a)时域;(b)频域

Fig. 7 Demodulated signals at vibration position. (a) Time domain; (b) frequency domain

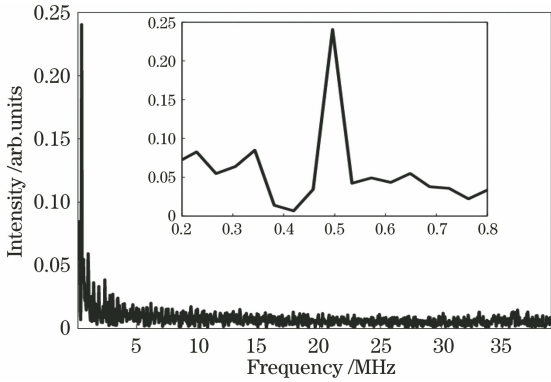


图 8 高频振动检测的频谱图

Fig. 8 Spectrum of high-frequency vibration detection

4 结 论

对于基于外差检测的 φ -OTDR 系统,本文提出了一种高频振动检测方案。利用 I/Q 解调方法对光纤中的高频振动信号进行二次差分相位解调,可以有效地解调出高频率的振动信号。解调结果验证了该方案的有效性,并且系统的传感距离达到了 23 km,该方案有效地提高了系统的振动频率和传感范围。

PZT 上的扰动信号。在振动位置处任取一个点,该处信号的解调结果如图 7 所示。

从图 7(b)中可以看出,振动处的主要频率成分是 300 Hz,即施加在 PZT 上的正弦信号的频率,改变施加在 PZT 上振动信号的频率,同样可以检测得到相应的频率。为了验证高频振动检测方案,将 PZT 驱动信号设为幅度为 12 V、频率为 500 kHz 的正弦波,采用上述高频振动检测方案对信号进行相位解调,解调结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,在 500 kHz 处频谱峰值最高。这一结果和施加在 PZT 上的振动频率是一致的。相继改变 PZT 驱动信号的电压值,可以得到同样的结果。

参 考 文 献

- [1] Ye Q, Pan Z Q, Wang Z Y, et al. Progress of research and applications of phase-sensitive optical time domain reflectometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0600001.
叶青, 潘政清, 王照勇, 等. 相位敏感光时域反射仪研究和应用进展 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0600001.
- [2] Shan Y Y, Dong J Y, Zeng J, et al. A broadband distributed vibration sensing system assisted by a distributed feedback interferometer [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 6800910.
- [3] Song M P, Zhu W J, Xia Q L, et al. 151-km single-end phase-sensitive optical time-domain reflectometer assisted by optical repeater [J]. Optical Engineering, 2018, 57(2): 027104.
- [4] Shao Y Y, Liu H H, Peng, et al. Distributed vibration sensor with laser phase-noise immunity by phase-extraction Φ -OTDR [J]. Photonic Sensors, 2019, 9(3): 223-229.
- [5] Feng K B, Song M P, Xia Q L, et al. High-resolution distributed optical-fiber sensing technology

- based on direct-detecting coherent optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0106002.
- 冯凯滨, 宋牟平, 夏俏兰, 等. 基于直接检测相干光时域反射计的高分辨率分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0106002
- [6] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [7] Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P, et al. Distributed vibration sensing over 125 km with enhanced SNR using phi-OTDR over a URFL cavity [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2628-2632.
- [8] Zhu T, He Q, Xiao X H, et al. Modulated pulses based distributed vibration sensing with high frequency response and spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2953-2963.
- [9] Song M P, Yin C, Lu Y, et al. Four-channel detecting phase demodulation Φ -OTDR based on 3×3 Michelson interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0806001.
- 宋牟平, 尹聪, 陆燕, 等. 基于 3×3 迈克耳孙干涉仪的四路检测相位解调 Φ -OTDR[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0806001.
- [10] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [11] Qin Z G, Zhu T, Chen L, et al. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(15): 1091-1093.
- [12] He H J, Shao L Y, Luo B, et al. Multiple vibrations measurement using phase-sensitive OTDR merged with Mach-Zehnder interferometer based on frequency division multiplexing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4842-4855.