

基于弱光栅阵列的增强相位敏感光时域反射仪 振动传感系统

黎威^{1,2*}, 张永佳^{1,2}

¹ 武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;

² 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430000

摘要 设计了一种基于弱光纤布拉格光栅阵列的增强相位敏感光时域反射仪(ϕ -OTDR)振动传感系统,以反射率较大的弱光纤光栅反射信号代替 ϕ -OTDR中的瑞利散射信号,利用相邻弱光纤光栅反射信号间干涉信号的强度变化来判断光纤线路上振动事件的情况,并采用时分复用技术对振动点进行精确定位。结果表明,该系统在面向振动信号的检测与解调方面比 ϕ -OTDR更为简便,同时能实现分布式测量,并能解调出频率范围为10~500 Hz的任意振动信号,在周界安防领域具有实际应用价值。

关键词 遥感; 相位敏感光时域反射仪; 弱光栅阵列; 振动; 干涉; 地震检波器

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0810001

Enhanced Phase Sensitive Optical Time-Domain Reflectometer Vibration Sensing System Based on Weak Grating Array

Li Wei^{1,2*}, Zhang Yongjia^{1,2}

¹ National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

² College of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430000, China

Abstract An enhanced phase sensitive optical time-domain reflectometer (ϕ -OTDR) vibration sensing system based on weak fiber Bragg grating arrays is designed. A weak reflection signal from the fiber Bragg grating (FBG) with a relatively large reflectivity is used instead of the Rayleigh scattering signal in the ϕ -OTDR system. The perturbation behaviors in the optical fiber lines are determined based on the intensity variation of the interference signal between the adjacent weak FBG reflection signals and the time division multiplexing technique is used to locate external vibration points precisely. The results show that, by this system, the detection and demodulation of the vibration signal are simpler than those by ϕ -OTDR, the distributed measurement is simultaneously fulfilled, and any vibration signals in the frequency range of 10-500 Hz can be demodulated. The system has the practical application value in perimeter surveillance systems.

Key words remote sensing; phase-sensitive optical time-domain reflectometer; weak grating array; vibration; interference; geophone

OCIS codes 280.4788; 060.3735; 120.7280; 260.3160

1 引 言

分布式光纤传感技术集传输和传感一体化,可实现长达百公里的高温、应变、振动的分布式测量,因此得到了广泛的应用。相位敏感光时域反射仪

(ϕ -OTDR)作为分布式光纤传感技术的新兴代表,近年来在安防、桥梁结构等领域的振动测量中得到了广泛应用^[1-6]。

Yuan等^[7]采用 3×3 耦合器相位解调方案实现了 ϕ -OTDR系统中扰动信号的相位解调,由于 3×3

收稿日期: 2017-12-15; 修回日期: 2018-03-15; 录用日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61290311)

* E-mail: limighty@126.com

耦合器的三路信号输出的相位差互为 120° , 因此该系统可以实现高灵敏度的线性应变和振动探测。Lu 等^[8]通过外差探测增大了 ϕ -OTDR 系统中振动信号的信噪比, 当脉冲宽度为 50 ns、触发频率为 10 kHz 时, 该传感系统在 1 km 的传感光纤上实现了 5 m 的空间分辨率, 其响应振动频率最高达 1 kHz。

Sheng 等^[9]为了获得低干扰报警率并实现干扰事件的识别, 将 ϕ -OTDR 和迈克耳孙干涉仪结合, 实验结果表明, 该系统可将干扰报警率从 13.5% 减小到 1.2%。曹玉龙等^[10]利用传输矩阵相位解调算法, 通过求取 3×3 迈克耳孙干涉仪传输矩阵的基本参数, 建立了差分相位与干涉仪输出光强的对应关系, 使用简单有效的软件运算程序对光纤中的瑞利散射光的差分相位进行解调, 实现了光纤扰动的分布式探测。Wang 等^[11]采用差分信号处理方法获得了振动点的地理位置, 在长度为 6.5 km 的传感光纤上定位误差小于 10 m, 在 1.757 km 处振动点的信噪比达到了 21.6 dB, 通过 Prewitt 边缘检测方法测得振动点处的信噪比最高达 39.07 dB。

通过振动前后的瑞利曲线变化来测算位置信号, 由于瑞利散射系数仅为 10^{-7} m^{-1} , 且受环境噪声的影响, 信号的信噪比较差, 误报率高。为了提高定位精度和检测灵敏度以实现微小振动信号的传感, 研究人员一般对系统的信号进行前期降噪处理, 采用的方法主要有移动平均方法^[12]和小波分析方法^[13-15]。移动平均方法一般是将当前时刻与前一时刻的后向瑞利散射信号连续相减, 这种算法计算量大, 且外界环境发生变化时, 容易出现误差。小波分析方法常用于分析 ϕ -OTDR 系统中的稳态和非稳态振动信号, 虽然经过处理后具有较好的噪声信号区分能力, 但是由于其缺乏平移不变性, 时间和频率

分辨率不能同时达到最优, 得到的降噪信号容易出现失真。无论研究人员采用哪种信号处理方法, 系统的响应速度均会减小, 复杂度均会增大, 限制了应用范围。

提高系统的信噪比是进一步提升光时域反射系统性能的一种重要方法, 而弱光纤光栅具有比瑞利散射系数更大的反射率, 因此本文在用于传感的光纤线路中融合了光纤光栅阵列, 以反射率相对较大的弱光纤光栅反射信号代替 ϕ -OTDR 系统中的瑞利散射信号, 利用相邻弱光纤光栅反射信号间的干涉信号的强度变化来判断光纤线路上的振动情况, 并通过时分复用技术判断外界振动区域的位置。光纤光栅的反射信号强度比瑞利散射光的强度要大得多, 因此所设计的系统具有较高的信噪比, 在信号检测和信号解调方面也相对简单, 成本较低。

2 振动传感系统原理

2.1 基于弱光栅阵列的增强 ϕ -OTDR 振动传感系统原理

基于弱光栅阵列的增强 ϕ -OTDR 振动传感系统的原理如图 1 所示, 通过现场可编程门阵列 (FPGA) 产生的周期脉冲信号调制经过半导体光放大器 (SOA) 的连续光。激光器发出的连续光经过 SOA 后被调制成脉冲光。脉冲光经掺饵光纤放大器 (EDFA) 放大后, 通过环形器 1 端口和 2 端口进入弱光纤布拉格光栅 (FBG) 阵列, 阵列中各光纤光栅的反射光在不同时刻反射回环形器 3 端口, 通过控制输入光脉冲的脉冲宽度, 相邻光纤光栅反射的光在环形器处产生干涉效应。干涉信号经过光电探测器 (PD) 后变为电压信号。FPGA 产生另一个脉冲信号触发数据采集卡以采集 PD 探测的电压信号。

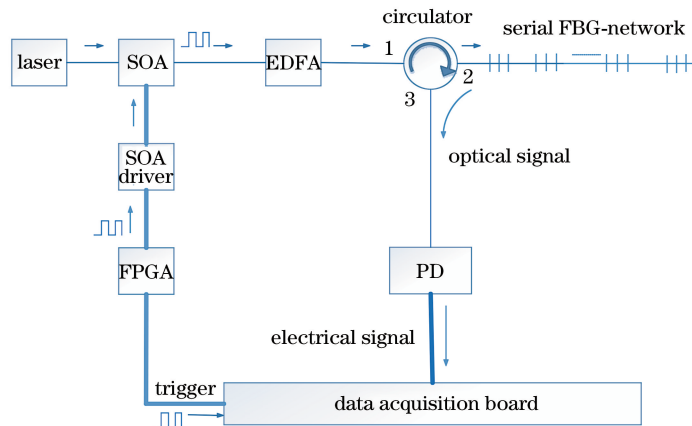


图 1 基于弱光栅阵列的增强 ϕ -OTDR 振动传感系统的原理图

Fig. 1 Schematic of enhanced ϕ -OTDR vibration sensing system based on weak fiber Bragg grating array

相邻光栅反射光的干涉原理如图 2 所示,其中 t 为时间。光源发出的一束脉冲光进入光纤光栅阵列后,由于光栅的位置不同,反射光到达环形器 3 端口处的时间不同,但是相邻两个光栅的反射光有一部分重叠,重叠的反射光在环形器 3 端口处发生干涉。假设阵列中一共有 N 个光栅,则反射回来的干涉光束为 $N-1$ 个,FBG1 的反射光与 FBG2 的反射光有一段时间重合,在环形器处产生干涉,这是输出中的第一个光束。FBG2 的反射光与 FBG3 的反

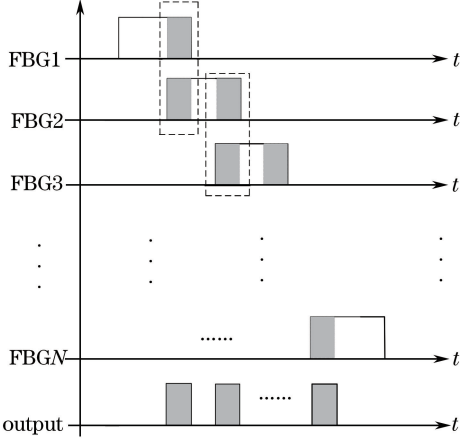


图 2 光纤光栅阵列反射光干涉原理图
Fig. 2 Schematic of reflection light interference from fiber Bragg grating array

射光也有一段时间重合,也会在环形器处产生干涉,这是输出中的第二个光束,依此类推。当扰动发生在两个光栅之间的光纤中时,两个光纤光栅之间的干涉信号的幅值会发生变化,而其他相邻光栅的干涉信号的幅值不会发生变化,可以通过干涉信号的这一特征来判断外界的扰动情况。

光栅阵列反射的光入射到环形器的光场为

$$R_{\text{FBG}} = \sum_{m=1}^N E_0 R_m \exp[i(\omega t + 2n_{\text{eff}} k_0 L_m)] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right), \quad (1)$$

式中 E_0 为激光器发出光的振幅; ω 为光的频率; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数; L_m 为第 m 个光纤光栅到环形器的距离; R_m 为第 m 个光纤光栅的反射率; n_{eff} 为光纤芯的有效折射率; τ_m 为第 m 个光纤光栅相对于第一个光栅的延迟时间; W 为光脉冲宽度;当 $0 \leq [(t - \tau_m)/W] \leq 1$ 时,矩形函数 $\text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right) = 1$ 。

反射光在环形器处发生干涉,其干涉信号的强度为

$$I(t) = R_{\text{FBG}}(t) \cdot R_{\text{FBG}}^*(t), \quad (2)$$

式中 $*$ 代表求共轭。

第 m 个光纤光栅与第 $m+1$ 个光纤光栅反射光的干涉强度为

$$\begin{aligned} I_m(t) &= [R_{m_FBG}(t) + R_{m+1_FBG}(t)] \cdot [R_{m_FBG}(t) + R_{m+1_FBG}(t)]^* = \\ & \left\{ E_0 R_m \exp[i(\omega t + 2n_{\text{eff}} k_0 L_m)] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right) + E_0 R_{m+1} \exp[i(\omega t + 2n_{\text{eff}} k_0 L_{m+1})] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{m+1}}{W}\right) \right\} \cdot \\ & \left\{ E_0 R_m \exp[i(\omega t + 2n_{\text{eff}} k_0 L_m)] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right) + E_0 R_{m+1} \exp[i(\omega t + 2n_{\text{eff}} k_0 L_{m+1})] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{m+1}}{W}\right) \right\}^* = \\ & E_0^2 R_m^2 \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right)^2 + E_0^2 R_{m+1}^2 \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{m+1}}{W}\right)^2 + \\ & 2E_0^2 R_{m+1} R_m \cos[2n_{\text{eff}} k_0 (L_{m+1} - L_m)] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{m+1}}{W}\right), \quad (3) \end{aligned}$$

式中 $R_{m_FBG}(t)$ 为第 m 个 FBG 的反射光在环形器的光场, $R_{m+1_FBG}(t)$ 为第 $m+1$ 个 FBG 的反射光在环形器的光场。(3)式前两项为固定不变的直流分量,第三项为交流分量,其值与 $2n_{\text{eff}} k_0 (L_{m+1} - L_m)$ 有关, $\text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{m+1}}{W}\right)$ 为两个反射光脉冲重合的部分。假设外界扰动引起的相位改变 $\Delta\varphi_s = 2n_{\text{eff}} k_0 (L_{m+1} - L_m)$,则相邻的两个光纤光栅干涉信号可以表示为

$$I_m(t) \propto [A + \cos(\Delta\varphi_s + \Delta\varphi_0)], \quad (4)$$

式中 $\Delta\varphi_0$ 为没有任何外界干扰下,系统固有的相位差, A 为直流分量。当外界有扰动时,干涉信号的幅度会随着相位的改变而改变,可以通过此特征来判断周界安防中是否发生了入侵。

将两个相邻光纤光栅之间的光纤缠绕在压电陶瓷(PZT)上,并用某一个固定频率为 ω 的余弦信号来驱动此 PZT,引起的相位改变量为 $\Delta\varphi_s = \cos(\omega t)$,此时干涉信号可以表示为

$$I_m \propto [A + \cos(\cos \omega t + \Delta\varphi_0)]. \quad (5)$$

将(3)式代入(1)式中,可以得到整个光纤光栅

阵列的干涉信号为

$$I(t) = \sum_{m=1}^N E_0^2 R_m^2 \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right)^2 + \sum_{m=1}^N \sum_{n=m+1}^N E_0^2 R_m R_n \cos[2n_{\text{eff}} k_0 (L_n - L_m)] \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_n}{W}\right). \quad (6)$$

2.2 系统参数设置

当一束脉冲光进入光纤光栅阵列后,光栅的反射光根据所在的位置在不同的时间被反射回来。FPGA 对入射脉冲光的脉冲宽度进行控制,使脉冲宽度大于光在任一相邻两个光纤光栅之间反射所需的时间,且其宽度要小于光在任一相邻三个光纤光栅之间反射所需的时间。只有当脉冲宽度满足这样的条件时,相邻两个光纤光栅的反射光才会发生重叠。对 W 的要求为

$$2\Delta L n_{\text{eff}}/C < W < 3\Delta L n_{\text{eff}}/C, \quad (7)$$

式中 ΔL 为两相邻光栅的间距, C 为真空中的光速。

在大容量光纤光栅传感系统中,需要对光纤中串联的光纤光栅进行连续不断的测量,以持续不断地监测外界环境的变化,故脉冲光需要周期性地进入传感阵列。若光脉冲的周期太短,光纤光栅阵列中靠近尾端的光纤光栅反射光还未抵达环形器时,下一个脉冲光就已经发出,这样会导致光纤光栅阵

列中尾端光栅反射光与阵列中前端的光栅反射光同时抵达环形器 2 端口,使反射光谱发生重叠产生干涉。为了避免这种情况,第一个光脉冲发出后,必须等到该脉冲光在光栅阵列中所有反射光反射到环形器后,才能发射第二个光脉冲。对脉冲周期 T 的要求为

$$T \geq \frac{2n_{\text{eff}}L}{C}, \quad (8)$$

式中 L 为光纤光栅阵列中最后一个光栅到环形器端口 2 的距离。从(8)式可以看出,脉冲周期 T 由光纤光栅阵列的长度决定。若光纤光栅阵列中最后一个光栅距离环形器 2 端口 2 km,则脉冲周期至少要大于 20 μs ,才不会造成两个光栅反射的光谱重叠。

2.3 3×3 耦合器解调实验方案

基于弱光栅阵列的增强 ϕ -OTDR 振动传感信号解调的结构图如图 3 所示,阵列中相邻两个光纤光栅的反射光在环形器端口处发生干涉,干涉信号从端口 3 输出后进入 3×3 光纤耦合器,三个端口的输出相位差互为 $2\pi/3$,随后三个端口的光信号进入三个 PD。与此同时,FPGA 产生另外一个同步脉冲信号触发美国国家仪器(NI)公司的多通道数据采集平台同步采集 PD 探测的干涉信号,随后通过 LabVIEW 软件编程对采集的信号进行相位解调。

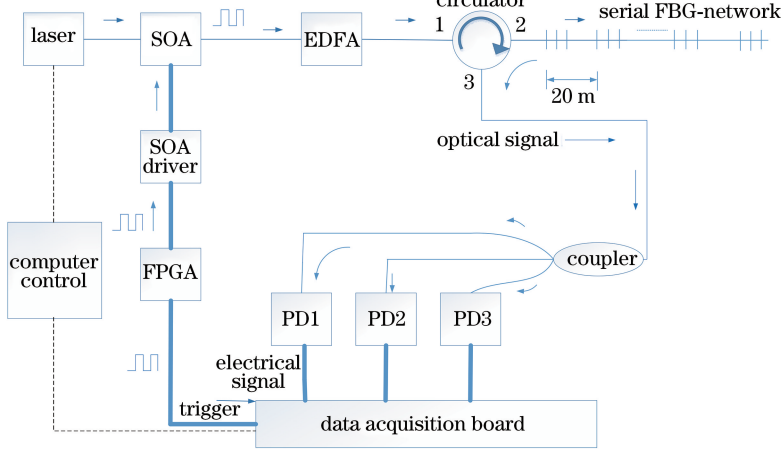


图 3 基于弱光栅阵列的增强 ϕ -OTDR 振动传感信号解调的结构
Fig. 3 Demodulation structure of enhanced ϕ -OTDR vibration sensing signals based on fiber Bragg grating array

FPGA 产生的周期脉冲信号的频率为 10 kHz,脉宽为 300 ns,激光器发出的连续光经 SOA 调制成脉冲光,进入光纤光栅阵列。阵列中串联的一百个光纤光栅为全同光栅,其中心波长为 1550.950 nm,反射率约为 0.08%,3 dB 带宽约为 0.2 nm,每两个光纤光栅之间的间距为 20 m,触发信号的频率为

10 kHz,脉宽为 50 μs 。

考虑到实际耦合器中各端口的不对称性以及各光路的损耗与回波等因素,干涉仪三端口的实际输出光强为

$$I_k = D - I_0 \sin[\varphi(t) + (k - 1) \times (2\pi/3)], \quad k = 1, 2, 3, \quad (9)$$

式中 D 为各路输出的平均光强; I_0 为干涉条纹的峰值强度; k 为输出光路序号; 实际相位差 $\varphi(t) = \varphi_0(t) + \psi(t)$; $\varphi_0(t)$ 为传感器的相位差信号, 即待测信号; $\psi(t)$ 为在实际环境中由于环境变化所产生相位差, 三路信号的相位彼此相差 $2\pi/3$ 。待测信号的相位通过基于 3×3 耦合器的解调方法处理后得到。

3 振动信号解调实验

3.1 频率响应准确性实验

为了验证该传感系统的频率响应特性, 将光纤光栅阵列中相邻两个光栅之间的部分光纤缠绕在 PZT 上, 通过信号发生器产生的正弦信号驱动 PZT。设定正弦信号的幅值为 0.53 V, 频率分别设定为 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 200, 300, 400, 500 Hz, 观测不同频

率下光纤光栅振动传感系统解调信号的频谱。

振动传感系统中待测区域对应的解调信号的傅里叶变换如图 4 所示, 可以看出, 主峰对应的频率与驱动信号的频率相同, 但在低频信号区域以及驱动信号频率的整数倍频率处有谱峰出现。低频信号是由外界环境的变化引起的噪声, 可以通过滤波或者小波分析等信号处理方法去除, 高频部分则是系统的非线性造成的谐波。由此可知, 通过相邻光栅反射光的干涉来判断外界扰动情况的解调实验能够准确解调出外界的振动信号频率。实验所选择的传感区域是相邻两个光纤光栅之间的传感光纤所在区域, 而实验中光纤光栅阵列中一共有 100 个光纤光栅, 因此可用于检测的传感区域有 99 个。如需更多的传感区域, 只需增加光纤光栅阵列中的光栅个数。

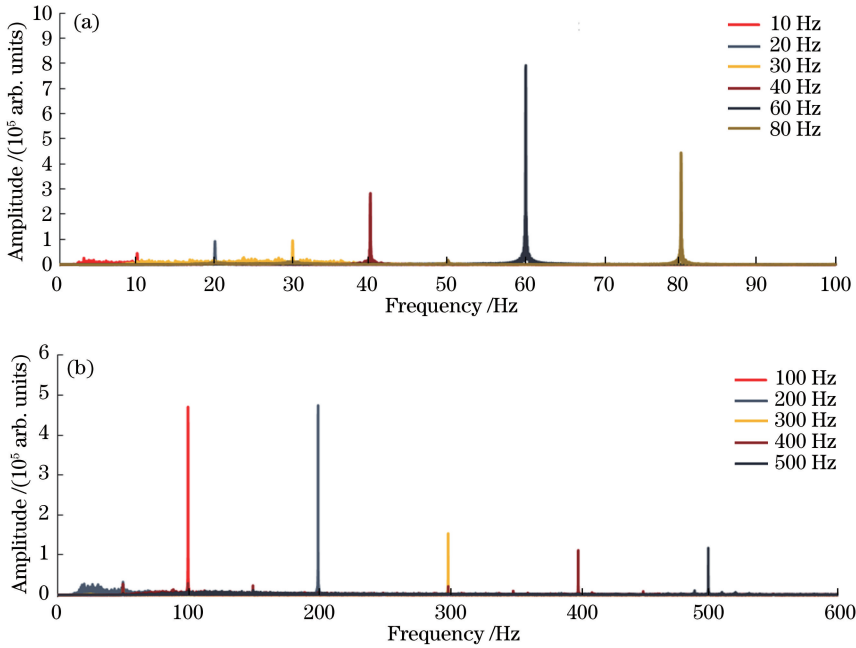


图 4 正弦驱动信号电压为 0.53 V 时, 不同频率下解调信号的频谱。(a) 低频; (b) 高频

Fig. 4 Spectra of demodulated signals at different frequencies when voltage of sinusoidal driving signal is 0.53 V.

(a) Low frequency; (b) high frequency

3.2 解调信号幅度与驱动电压间的关系

将驱动 PZT 的正弦信号频率设为一个固定值, 改变正弦信号的电压幅度, 观测振动传感系统的解调信号的幅度与驱动信号的电压幅度间的关系。图 5 所示为 6 种不同频率下驱动电压幅度与解调信号幅度对应的二维图形, 驱动电压幅度分别为 0.13, 0.33, 0.53, 0.73, 0.93 V。由于解调信号的幅度是在信号最稳定时记录的, 但是其幅度应该是某一段时间内解调信号幅度的平均值, 故存在一定的误差。从图 5 中可以看出, 激振器的驱动电压与解调之后的信号幅度基本成线性关系, 个别偏差可能是外界环境的改变导致

测试的数据有误差, 20, 40, 80, 100, 200, 400 Hz 驱动频率对应的趋势线的拟合程度的指标 R^2 分别为 0.9575、0.9707、0.9987、0.998、0.9668、0.9864。

3.3 振动传感系统与加速度地震检波器的对比实验

设定驱动信号频率分别为 10, 20, 60, 80, 200, 500 Hz, 驱动信号电压分别为 0.13, 0.33, 0.53, 0.73, 0.93 V, 将传感系统解调的信号与地震检波器所测的加速度信号进行对比。实验中共采集了 15 s 的数据, 由于对比数据太多, 只选取不同频率时 (10~500 Hz) 某一个比较平稳的时间段的数据作对比, 结果如图 6 所示。

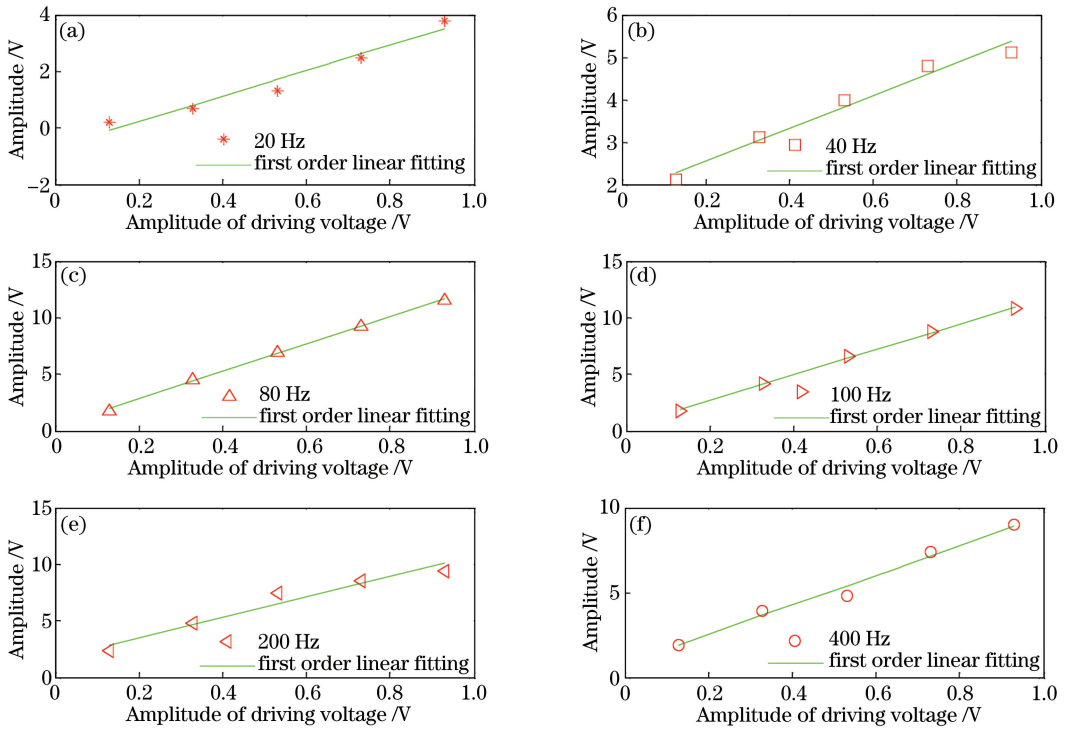


图 5 不同频率下驱动电压幅度与解调信号幅度间的关系。

(a) 20 Hz; (b) 40 Hz; (c) 80 Hz; (d) 100 Hz; (e) 200 Hz; (f) 400 Hz

Fig. 5 Relation between driving voltage amplitude and demodulated signal amplitude at different frequencies.

(a) 20 Hz; (b) 40 Hz; (c) 80 Hz; (d) 100 Hz; (e) 200 Hz; (f) 400 Hz

传感系统的解调信号是相邻光栅反射信号的干涉信号相位的变化 $\Delta\varphi$, 实验证明了 $\Delta\varphi$ 的波形与驱动信号的波形相同, 而地震检波器测试所得到的信号是激振器的顶杆加速度信号。从图 6 中可以看出, 当驱动信号的频率为 20, 60, 80, 200, 500 Hz 时, 两信号波形的频率相同, 幅度不相同。在 10 Hz 时, 传感系统的解调信号频率为 10 Hz, 但是地震检波器测试信号的频率不为 10 Hz, 说明该传感系统的频率响应范围比地震检波器的要宽。

4 结 论

设计了一种基于相邻光栅反射光干涉的分布式光纤光栅振动传感系统, 选择系统中的一个传感区域, 设定驱动信号的频率范围为 10~500 Hz, 通过 3×3 耦合器解调方案对系统采集的数据进行解调, 将解调信号与地震加速度检波器采集到的信号进行对比, 验证了该系统具有较高的灵敏度和较大的带宽。该系统传感区域多, 响应速度快, 空间分辨率高, 准确性好, 可用作大容量干涉型地震检波系统。

参 考 文 献

[1] Ren M, Lu P, Chen L, Theoretical and experimental

analysis of Φ -OTDR based on polarization diversity detection [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(6): 697-700.

[2] Martins H F. Phase-sensitive optical time domain reflectometer assisted by first-order Raman amplification for distributed vibration sensing over 100 km [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(8): 1510-1518.

[3] Fei P, Duan N, Rao Y J, *et al.* Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 26(20): 2055-2057.

[4] Muanenda Y, Oton C J, Faralli S, *et al.* A cost-effective distributed acoustic sensor using a commercial off-the-shelf DFB laser and direct detection phase-OTDR [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-10.

[5] Martins H F. 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.

[6] 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.

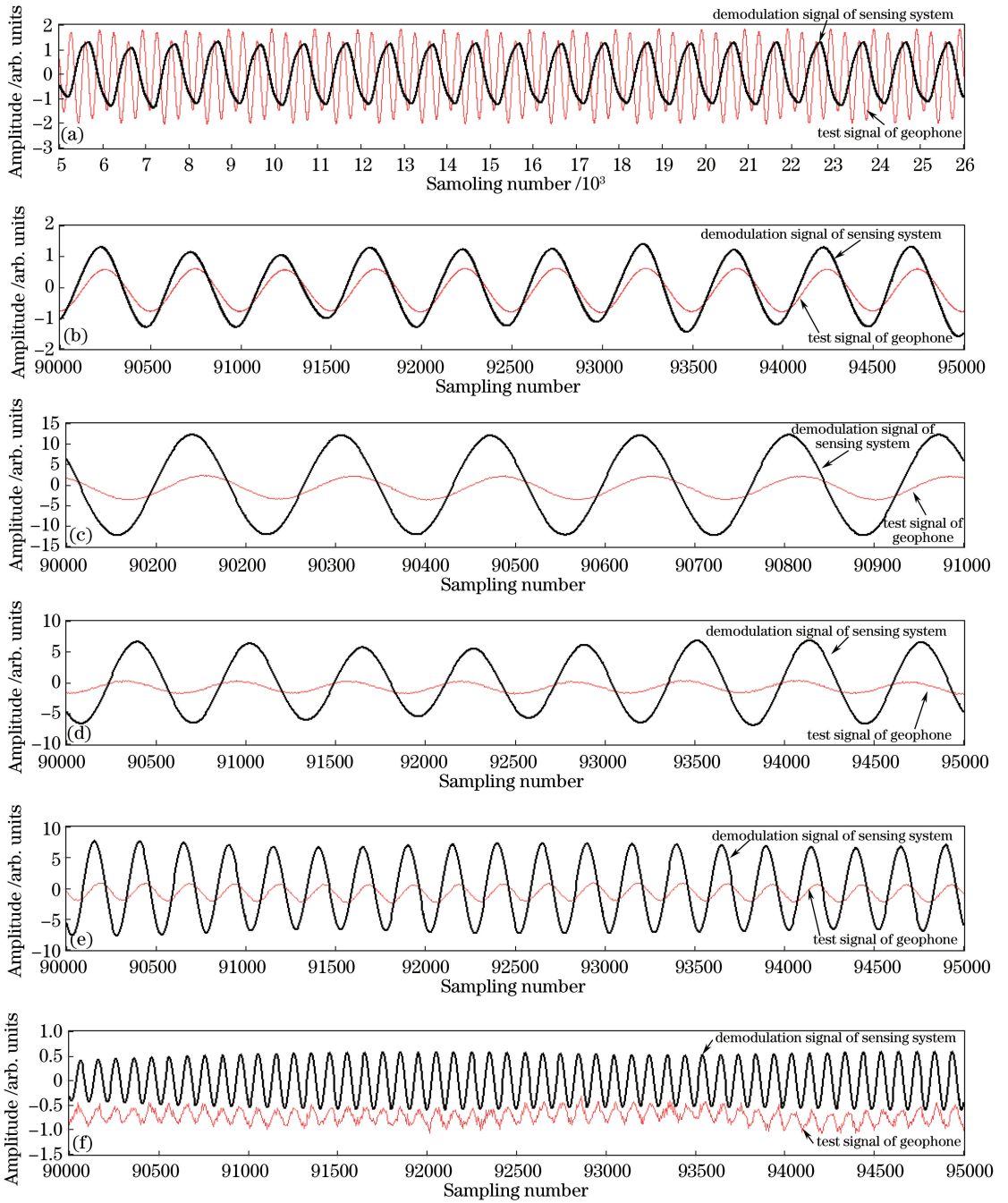


图 6 不同频率下传感系统的解调信号与地震检波器测试信号的对比。

(a) 10 Hz; (b) 20 Hz; (c) 60 Hz; (d) 80 Hz; (e) 200 Hz; (f) 500 Hz

Fig. 6 Comparison between demodulated signal of sensing system and test signal of geophone at different frequencies.

(a) 10 Hz; (b) 20 Hz; (c) 60 Hz; (d) 80 Hz; (e) 200 Hz; (f) 500 Hz

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.

[7] Yuan J G, Zhan C, Sun Q Z, *et al.* A novel distributed sensor using optical fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 6019: 60191C.

[8] Lu Y L, Zhu T L, Chen L, *et al.* Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010,

28(22): 3243-3249.

[9] Sheng L, Sheng X Z, Lou S Q, *et al.* Combination of phase-sensitive OTDR and Michelson interferometer for nuisance alarm rate reducing and event identification [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 6802112.

[10] Cao Y L, Yang F, Xu D, *et al.* Disturbed fiber vibration sensor based on 3×3 Michelson

- interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1010001.
- 曹玉龙, 杨飞, 徐丹, 等. 基于 3×3 迈克耳孙干涉仪的分布式光纤振动传感器 [J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1010001.
- [11] Wang Y, Jin B Q, Wang Y C, *et al.* Real-time distributed vibration monitoring system using Φ -OTDR[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(5): 1333-1341.
- [12] Yang B, Gao W, Xi G. Key technologies for Φ -OTDR-based distributed fiber-optic sensing systems[J]. Study on Optical Communications, 2012, 38(4): 19-22.
- [13] Qin Z Q, 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.
- [14] Qin Z Q, Chen L, Bao X Y. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR [J]. Optics Express, 2012, 20(18): 20459-20465.
- [15] Li W, Zhang J. Wavelet packet denoising method analysis in φ -OTDR distributed vibration sensor [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2017(1): 32-37.
- 黎威, 张健. 基于小波包的相位敏感 OTDR 分布式光纤振动信号降噪方法的研究 [J]. 光电子 • 激光, 2017(1): 32-37.