

基于二阶保偏光纤 Sagnac 环光纤激光器的振动检测研究*

周锐^{1)†} 张菁¹⁾ 忽满利¹⁾ 冯忠耀¹⁾ 高宏¹⁾²⁾ 杨扬¹⁾ 张敬花¹⁾ 乔学光¹⁾²⁾

1) (西北大学物理系, 西安 710069)

2) (西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065)

(2011 年 1 月 21 日收到; 2011 年 3 月 8 日收到修改稿)

提出了一种可用于振动检测的新型光纤光栅传感技术. 用偏振控制器和高双折射保偏光纤构建成 Sagnac 环, 结合掺铒光纤、单模光纤和隔离器, 形成了单波长光纤激光器, 由粘有光纤 Bragg 光栅的悬臂梁作为传感探头, 并利用 Sagnac 环本身的线性边缘, 解调振动信号. 阐述了 Sagnac 环原理及其产生的边缘效应, 并进行了数值模拟计算, 对振动信号进行了检测实验, 检测系统从 L_1 到 $L_1 + L_2$ 之间对应的周期可调, 灵敏度高达 $38.2 \mu\text{W}/\text{nm}$, 线性度为 0.9996, 动态范围在 40—70 dB, 可满足振动传感检测的技术参数要求.

关键词: 光纤光学, 振动检测, 保偏光纤 Sagnac 环, 光纤激光器

PACS: 42.81.-i, 42.81.Gs, 42.55.Wd

1 引言

振动检测是一项非常重要的检测技术, 在建筑监测、地层勘探等工业中有广泛的应用与需求^[1,2]. 在地层勘探方面, 通常以光纤光栅为传感器置于井下, 接受由人工激励的振动信号, 在地面将此信号检测出来, 即可根据振动信号的传播谱特性得知地下的岩石、油气层分布. 与传统的电子传感技术相比, 光纤光栅传感技术以其抗电磁干扰、抗腐蚀、复用能力、尺寸紧凑和灵活性, 以及井下复杂环境的强大适应能力, 引起人们的极大兴趣. 光纤光栅是整个系统的最前端, 目前已设计出各式各样的传感器, 但是解调技术是整个传感系统的关键技术, 其精确度和响应速度决定着整个系统的性能好坏. 边缘滤波解调法是一种常用的解调方法, 它能实现实时解调, 非常适合用于解调振动信号. 但是它的缺点比较明显, 其一是在较宽的光谱波段内没有斜率大、线性度高的边缘; 其二是宽带光源提供的功率较小, 信噪比低, 很难探测到微弱的信号变化^[3-7].

本文提出了一种基于二阶高双折射保偏光

纤 Sagnac 环光纤激光器的振动检测技术. Sagnac 环提供了良好的边缘, 采用激光光源可以有更大的输出功率, 而将光源、边缘滤波器和传感器置于同一个环形腔内, 结构简单. 详细研究了高双折射保偏光纤 Sagnac 环光纤激光器, 通过实验论证了系统应用于光纤振动检测的可行性.

2 理论分析

2.1 保偏光纤 Sagnac 环

根据传输光的偏振态, 单模光纤可分为保偏光纤和非保偏光纤, 光在保偏光纤中传播时偏振态保持不变, 而且正交偏振态的折射率不同, 导致传输速度不同, 于是在传播过程中传播模式产生相位差, 即双折射. 由双折射参数 $B = \beta_x - \beta_y$, β 为正交模式的传播常数. 当光纤中的 $B > 10^{-4}$, 则称为高双折射保偏光纤 (Hi-Bi PMF). 它是在制造光纤过程中人为引入高双折射物质构成纤芯, 使得两个正交基模 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 传播常数有很大的差别, 改变光纤的几何形状或者在纤芯内形成强内应力是

* 国家自然科学基金 (批准号: 60727004, 61077060)、国家 863 计划 (批准号: 2007AA03Z413, 2009AA06 Z203)、教育部科技创新工程重大项目 (批准号: Z08119)、科技部国际科技合作项目 (批准号: 2008CR1063)、陕西省重大科技创新项目 (2009ZKC01-19, 2008ZDGC-14) 和西北大学研究生创新教育项目 (批准号: 09YZZ53) 资助的课题.

† E-mail: rayzhou2008@gmail.com

形成高双折射率的有效方法,常见的高双折射保偏光纤有椭圆纤芯光纤、D型光纤、熊猫型光纤和蝴蝶结光纤^[8].由单段高双折射保偏光纤、偏振控制器(PC)和3 dB耦合器构成的Sagnac光纤环如图1.入射光 E_i 从1端输入,被3 dB耦合器分为 E_3 , E_4 ,PC起到调制转换光场偏振态的作用,相当于把双折射的快轴转到慢轴,或者将慢轴转到快轴上.一个快轴光入射,被耦合器分为两个方向的快轴光沿着环传输, E_3 经过PC后被调制到慢轴上经过AB段长度为 L 的保偏光纤, E_4 先经过 L 再经过PC被调制到慢轴上,在耦合器处相干输出,则产生了位相差.利用Jones矩阵对其传播过程进行相关的运算,得到其透射率和反射率为^[9-12]

$$T = \sin^2 \theta \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

$$R = 1 - T, \quad (2)$$

其中, θ 为PC旋转角度与保偏光纤熔接到环内的偏振角之和, $\varphi = 2\pi\Delta nL/\lambda = 2\pi L/L_B$ 为光的不同偏振态在快慢轴上传播相同距离产生的相位差, $\Delta n = |n_f - n_s|$ 为高双折射光纤快慢轴之间的等效折射率差, $L_B = \lambda/\Delta n$ 为拍长,是描述单模光纤中不同偏振态的模式双折射最重要的参量.从(1)和(2)式可知,反射率和透射率均是波长 λ 的函数,与入射光的偏振态无关.检测系统应用Sagnac环的透射光谱,所以我们利用MATLAB7.0对其透射谱

进行模拟,取值为: $L = 0.5$ m, $L_B = 3.1$ mm,即等效折射率差 $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$,如图1(b).易知,对某一种固定的高双折射光纤,在温度不变的环境下拍长是恒定的,即快慢轴有固定的有效折射率差,偏振控制器的偏转角控制着透射率的消光比,保偏光纤长度决定了输出光谱的周期.

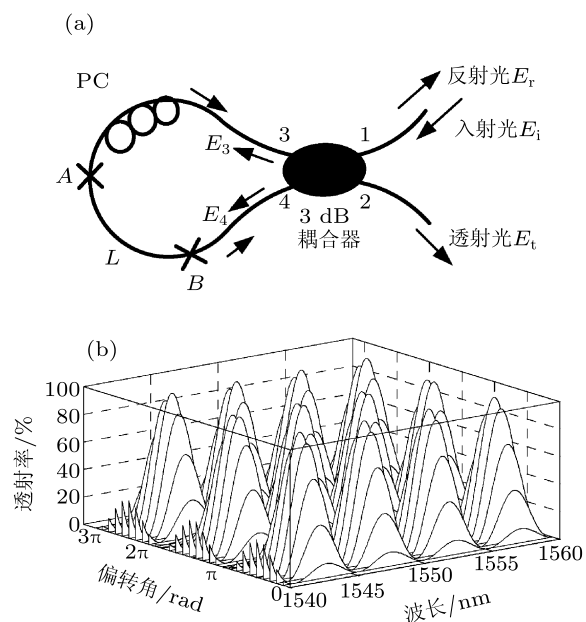


图1 单段保偏光纤 Sagnac 环 (a) 结构图; (b) 透射率随偏转角和波长变化图

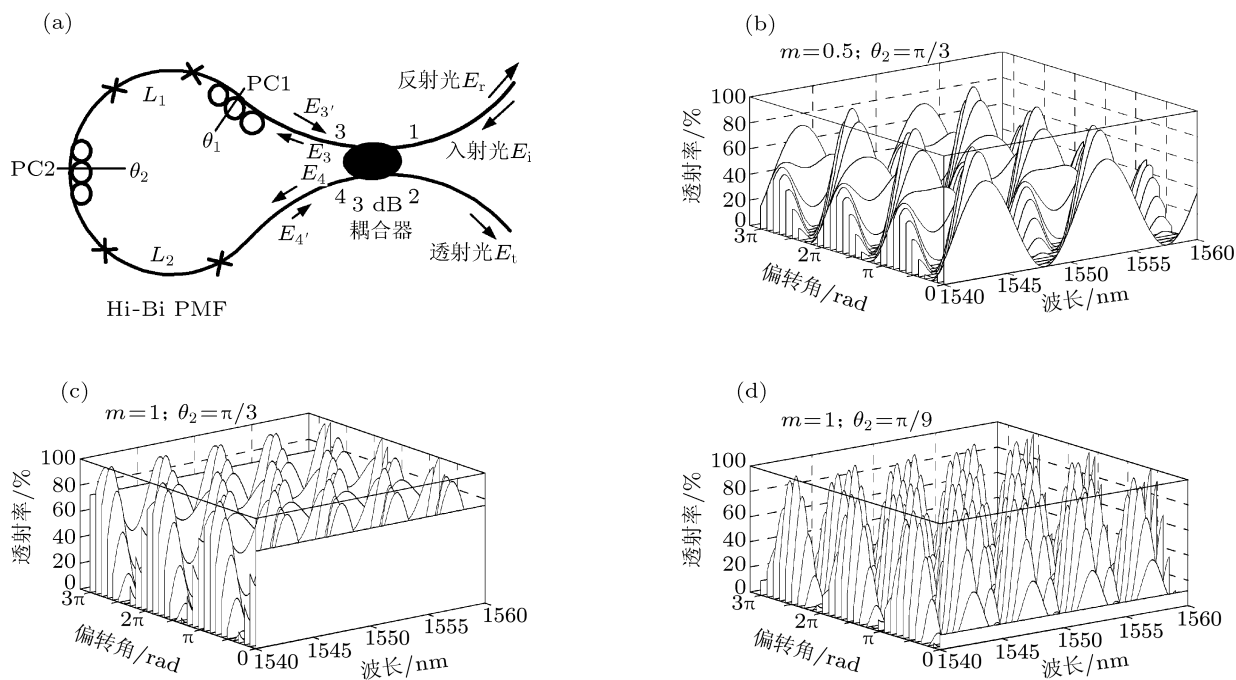


图2 二阶高双折射保偏光纤 Sagnac 环 (a) 结构图; (b), (c), (d) 数值模拟结果 (b) $m = 0.5$, $\theta_2 = \pi/3$; (c) $m = 1$, $\theta_2 = \pi/3$; (d) $m = 1$, $\theta_2 = \pi/9$

由图 1(b) 也可明显看到, 尽管消光比随着 PC 的偏转角而变化, 但是, 周期是不可变化的, 这样不能满足对不同周期的需求. 本文运用的是由两段保偏光纤和两个 PC 组成的一个二阶高双折射光纤 Solc - Sagnac 环, 如图 2(a) 所示. 光传输原理和过程与单段保偏光纤 Sagnac 环一样, 设两段保偏光纤长度分别为 $L_1 = L$, $L_2 = mL$, 相位和与差分别为: $\varphi_1 = 2\pi\Delta n(m+1)L$, $\varphi_2 = 2\pi\Delta n(m-1)L$, 则透射率为

$$T = [\cos \varphi_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \varphi_2 \sin \theta_2 \cos \theta_1]^2, \quad (3)$$

其中, θ_1, θ_2 分别为两个偏振控制器 PC1, PC2 的旋转角度和光纤熔接到环内产生的偏振角之和. 对二阶保偏光纤 Sagnac 环透射谱进行模拟, 保偏光纤取值不变, 对 m, θ_2 取不同的值, 如图 2 所示.

从图 2 可知, 二阶高双折射保偏光纤 Sagnac 环的输出相当于两个单段保偏光纤 Sagnac 环单独作用相互叠加的结果. m 取值越大, 即接入的第二段光纤越长, 则周期越短, θ_2 越接近 $\pi/2$, 消光比越小. 通过调整 PC, 可以得到所需要的 $L_1 - L_1 + L_2$ 之间对应的周期和最大的消光比.

2.2 掺铒激光的 (FBG) 选模原理

基于激光的振动传感检测系统与基于宽带光源在概念上有很大的差异, 激光在检测振动信号时, 作为传感探头的 FBG 是激光器件的一部分, 起到选模的作用. 掺铒光纤光源是在抽运光作用下, E_r^{+3} 吸收 1480 nm 波长抽运光后, E_r^{+3} 能级跃迁形成粒子数反转 ($n_2 > n_1$), 在诱导光作用下由能级 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 的跃迁产生放大的自发辐射形成荧光光源 (C 波段或者 C+L 波段的宽带光源). C 波段 ASE 是由 $^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{15/2}$ 主能级的 Stark 分裂能级的高能级之间跃迁产生, 而 L 波段的 ASE 是由 $^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{15/2}$ 主能级的 Stark 分裂能级的低能级之间的跃迁产生的. 一般先在掺铒光纤的近端产生 C 波段的 ASE, 产生的 C 波段的 ASE 作为二次抽运源被后端铒光纤中的 E_r^{+3} 吸收, 从而形成 L 波段的 ASE 谱^[13], 如图 3 所示. 在 ASE 输出端接上 Sagnac 环, ASE 经 Sagnac 环滤波调制, 成梳状谱. 然后再加上 FBG, 由于 FBG 具有带宽窄、反射率高、中心波长有传感特征 (温度和应变), 所以能选择出高相关的模式. 假设 ASE 光源功率为 I_0 , Sagnac 环的透射率为 T_S , FBG 的反射率为 R_B , 则在没有谐振腔的情况下, 输出功率为

$$I = \int_0^\infty I_0(\lambda) \times T_S(\lambda) \times R_B(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

由于光源输出功率很低 (< 40 mW), Sagnac 环的透射率最大为 0.2, FBG 的反射率很大 ($> 80\%$), 但是带宽很窄 (0.2—0.3 nm), 而且还有其它器件的损耗, 所以功率很低 (微瓦级). 当它们连成环形谐振腔, 则可以在谐振腔中振荡形成激光. FBG 在谐振腔中起到选模的作用, 激光的输出光谱带宽就是 FBG 的带宽.

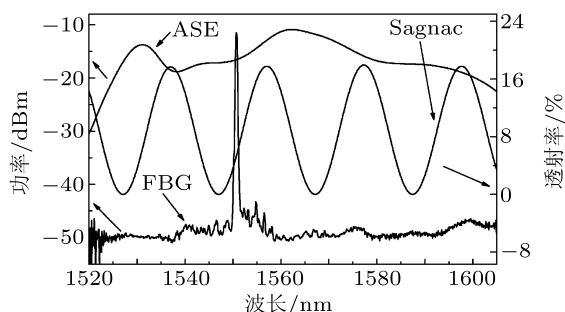


图 3 ASE 光源经 Sagnac 环滤波后被 FBG 选模的示意图

2.3 边缘滤波解调原理

由于整个光谱功率被 Sagnac 环滤波调制成斜边, 假如 FBG 中心波长对应的边缘功率密度函数为

$$P(\lambda) = k\lambda + k_0, \quad (5)$$

其中 k 为斜率. 设 FBG 反射率为 R , 3 dB 带宽为 $\Delta\lambda_B$, 中心波长为 λ_B , 则反射光谱近似为 Gauss 分布, 即

$$R_B(\lambda) = R \exp \left[-4 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2} \ln 2 \right], \quad (6)$$

则 (4) 式可表达为

$$I(\lambda_B) = \int_0^\infty (k\lambda + k_0) R \exp \left[-4 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2} \ln 2 \right] d\lambda. \quad (7)$$

由于 FBG 的 3 dB 带宽远小于该边缘波长范围, 即 $P(\lambda) = P(\lambda_B)$, 可以用 $\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-ax^2) dx = \sqrt{\pi/a}$ 进行简化, 得:

$$I(\lambda_B) = \frac{1}{2} R (k\lambda_B + k_0) \Delta\lambda_B \sqrt{\pi/\ln 2}. \quad (8)$$

当 FBG 受振动调制时, 中心波长会蓝移或者红移, 即 $\lambda_B \rightarrow \lambda_B + \Delta\lambda$, 则得:

$$\Delta I = \frac{1}{2} \Delta\lambda_B R k \sqrt{\pi/\ln 2} \cdot \Delta\lambda = k' \Delta\lambda. \quad (9)$$

由 (9) 式可知, 激光的输出功率大小会随波长漂移而发生线性变化. 又由于在等强度悬

臂梁上, 应变与 Bragg 波长的漂移呈线性关系, 即 $\Delta\lambda = k''\Delta\varepsilon$, k'' 为波长的应变灵敏度系数. 所以当悬臂梁被激励信号调制而产生应变时, 激光的输出功率也会随激励信号呈线性变化, 即如果激励信号是正弦信号, 则激光输出功率谱也为正弦.

3 实验

3.1 二阶保偏光纤 Sagnac 环滤波特征测试

作为整个系统的核心部件, 二阶保偏光纤 Sagnac 环的搭建和测试非常关键. 我们按照图 5 搭建了 Sagnac 环, 并用 AQ6319 光谱分析仪测试,

在 600—1700 nm 分辨率为 0.01 nm. 由文献 [14] 知, 保偏光纤对温度比较敏感, 双折射参量越大, 对温度越敏感, 而且与两段保偏光纤的长度相关. 所以我们采用 TEC 进行温度控制, 将保偏光纤贴于恒温板上进行实验, 测得数据如图 4.

从图 4(a) 可知, 二阶保偏光纤 Sagnac 环的透射率是被两个大的正弦 (或者余弦) 包络调制, 与理论模拟符合. 而且从图 4(b) 可知, 它通过调整两个偏振控制器可以自由得到从 L_1 到 $L_1 + L_2$ 之间对应的周期, 也就是相当于两个独立的 Sagnac 环, 通过一个偏振控制器来调节偏振态连接的角度. 当 PC 把两段保偏光纤调节到偏振态平行的状态, 则 L_1 , L_2 两段相当于一根 $L_1 + L_2$ 的保偏光纤在起作用.

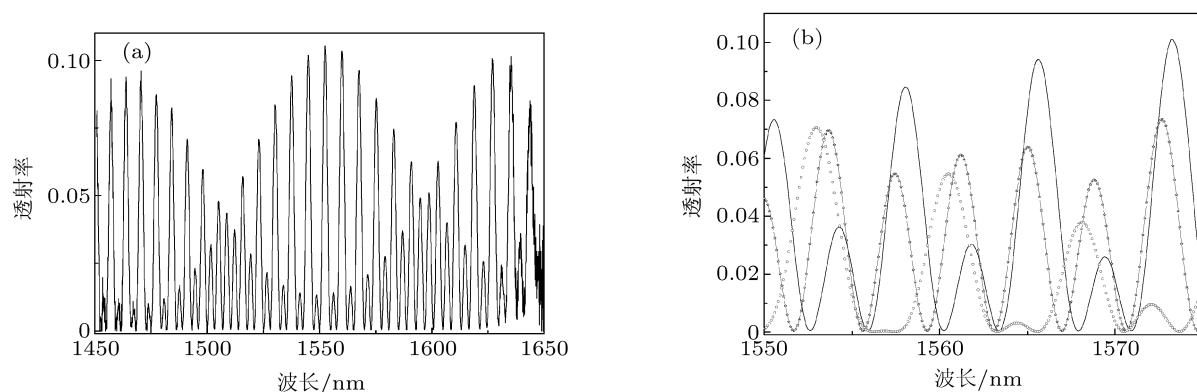


图 4 二阶保偏光纤 Sagnac 环滤波特征 (a) 200 nm 波长范围; (b) 25 nm 波长范围

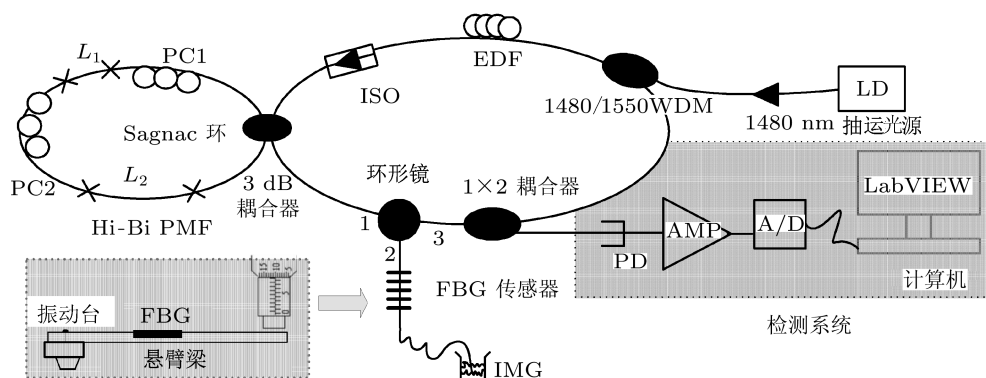


图 5 光纤振动检测系统实验装置

3.2 实验装置

在实验中设计的检测系统如图 5 所示. 由 1480 nm 的抽运光源从 1480/1550 的波分复用器输入, 输入 30 m 的掺铒光纤 (EDF), 经光纤隔离

器 (ISO) 进入 Sagnac 环的一端, 另一端接到环形器的 1 端, 2 端接到 FBG (中心波长为 1550.8 nm, 带宽 0.25 nm, 反射率 0.85), 将 FBG 粘在等强度悬臂梁 (由具有高强度、硬度、弹性极限和疲劳极限、弹性滞后小等性能的铍青铜材料制成) 上, 并固定

到振动台 (Shaker) 上 (WS-30-40 小型精密振动台, 频率范围 1—5 kHz). 为了防止光纤的端面反射而影响传感信号和激光的稳定输出, 将光纤尾端浸入匹配液 (IMG). 在环形器的 3 端通过一个 1×2 的耦合器, 将 90% 的功率保留在谐振腔内以形成振荡增益, 10% 的功率输出作为被解调信号.

在解调系统中, 用光电探测器 (PD)(GT322D InGaAs PIN 光电二极管, 光谱响应范围 900—1700 nm, 室温下响应度为 0.95 A/W, 暗电流为 0.3 nA, 响应时间为 0.3 ns) 接受待解调的振动信号. 由于基于激光的系统, 输出信号比较强 (0.1 mV 数量级), 利用简单的放大电路即可完成信号放大. 通过数据采集卡输入到计算机上, 用 LabVIEW 软件进行数字信号采集和处理.

3.3 实验结果及分析

为了测试系统的精度和灵敏度, 先进行静态测量. 如图 5 所示, 用螺旋测微器来使悬臂梁微变, 从而 FBG 中心波长会向长波或短波方向漂移, 使 FBG 尾端经衰减后在光谱仪上观测波长的改变量, 在 1×2 耦合器的输出端用光功率计 (PM31H 型, InGaAs 探测器, 800—1700 nm: -50 — $+23$ dBm, 分辨率可达 0.001 dB). 可得到如图 6 所示结果.

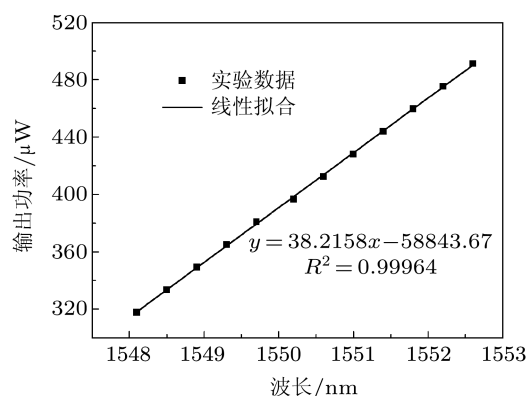


图 6 输出功率与波长变化的关系

由图 6 我们可知, 该系统的灵敏度达 $38.2 \mu\text{W}/\text{nm}$, 远比宽带光源的灵敏度高 ($\approx 10 \mu\text{W}/\text{nm}$), 线性度达 0.9996, 而且输出功率很高, 达几百微瓦, 经光电转换只需简单的放大甚至不需放大即可处理, 可以减少由放大器和放大芯片带来的噪声, 使整个检测系统信噪比得到显著提高.

在动态实验中, 我们用振动台产生振动信号, 并采用正弦波激励方式, 如图 7(a), 为振动台本身产生的信号. 采集卡为单点接地终端配置方式, 采用 100 kHz 的采样频率和 10 k 采样点数, 经 Butterworth 无限脉冲响应低通 IIR 型滤波器数字滤波,

对 1 kHz 以上进行 50 阶滤波, 保证了系统具有很高的测量精度和分辨率, 结果如图 7(b). 通过原信号和解调出来的信号相比较, 可知此系统是可以应用于振动系统信号检测的.

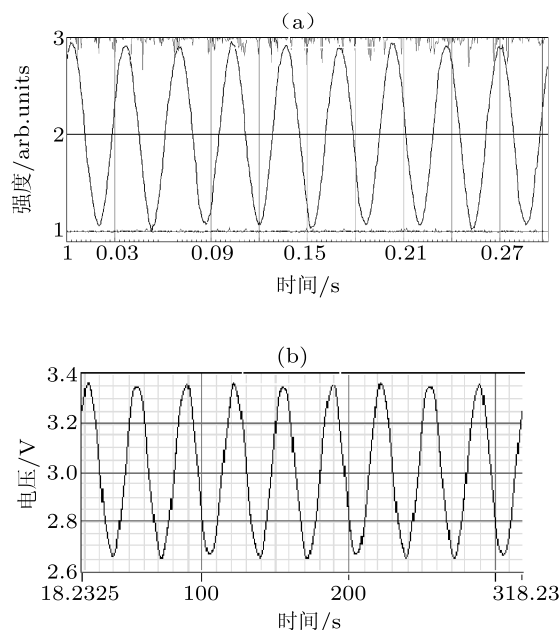


图 7 原振动信号与检测到的信号比较图采样频率 = 2000.0, H_2 示波通道从 1 至 2 (a) 原振动信号; (b) 检测到的信号

在此基础上, 我们从 0.5—200 Hz 对多个频率振动信号进行了检测, 其中 20, 100, 178 Hz 检测结果如图 8 所示.

图 8 为 3 个频率下的时域和频域分布图, 其中 (a), (b), (c) 为时域分布, 由于使用低频传感器, 有些波形出现翻转或者振幅大小略有差别, 不过基本还属于正弦信号, 说明此检测系统可以应用于振动信号的检测. 从频域图可以直接检测到信号的频率, 由纵坐标可知, 此检测系统的动态范围为 40—70 dB. 从图 8(d) 看到, 在 20 Hz 时出现倍频现象, 这是由于它较接近悬臂梁的固有频率, 而且为了使悬臂梁与振动台同步振动, 需要在悬臂梁的末端加上一定重量的质量块, 这样的结果就是悬臂梁振动过程中相当于两端被固定, 在梁中间会产生驻波而出现倍频. 不过倍频出现的强度并不太大, 总小于主频率, 还是可以从终端很方便地获取解调结果. 当远离固有频率时, 倍频现象消失, 如图 8(e), (f) 所示. 本系统的最高解调频率取决于激光建立稳定输出的时间, 如果我们取整个光路的长度 $L = 10 \text{ m}$, 激光振荡 $n = 100$ 次可以稳定输出, 则可以检测的上限频率为 $f_h = c/nL = 10^6 \text{ Hz}$, 能够满足振动探测的需要. 但是, 由于目前制作的光纤光栅振动传感

器固有频率较低 (0.5—200 Hz), 因此对于更高频率的实验验证, 还需要光纤光栅振动传感器的进一步

改进与完善.

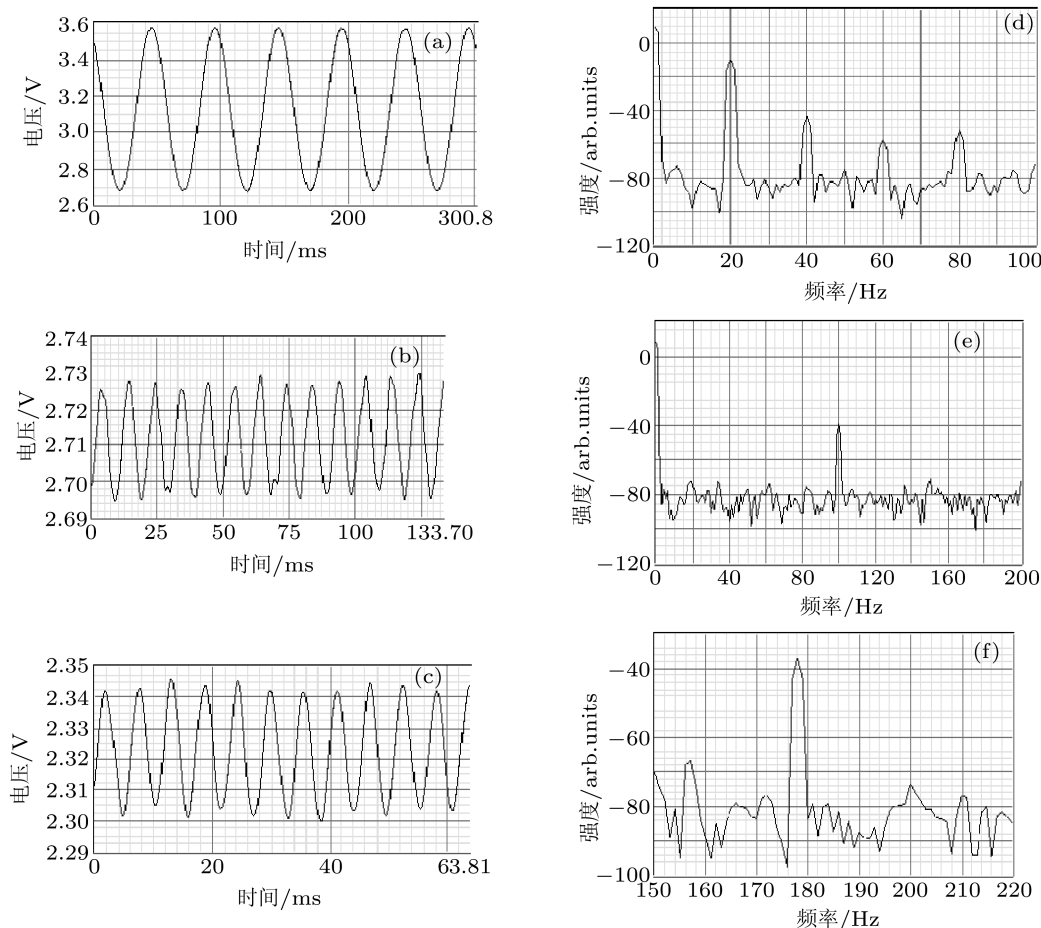


图8 检测到的振动信号强度在各频率下时域 (a)—(c) 和频域 (d)—(f) 分布图 (a), (d) 20 Hz; (b), (e) 100 Hz; (c), (f) 178 Hz

4 结论

研究了二阶高双折射保偏光纤 Sagnac 环的滤波特征, 并在理论分析和实验认证的基础上提出了基于此二阶 Sagnac 环光纤激光器的振动检测技术. 通过数值模拟和实验测量, 我们得知二阶保偏

光纤 Sagnac 环具有很好的线性滤波特征, 而且呈梳状分布于各个波段, 通过偏振控制器可以调整从 L_1 到 $L_1 + L_2$ 之间对应的周期大小, 由此激光器构成的检测系统的灵敏度达 $38.2 \mu\text{W}/\text{nm}$, 线性度达 0.9996, 动态范围为 40—70 dB, 能满足振动传感检测的技术参数要求.

- [1] Sun Q Z, Liu D M, Wang J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5903 (in Chinese) [孙琪真, 刘德明, 王健 2007 物理学报 **56** 5903]
- [2] Garcia-Souto J A, Lamela-Rivera H 2006 *Opt. Express* **14** 9679
- [3] Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 (in Chinese) [王义平, 饶云江, 冉曾令, 朱涛 2003 物理学报 **52** 1432]
- [4] Qiao X G, Jia Z A, Fu H W, Li M, Zhou H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 494 (in Chinese) [乔学光, 贾振安, 傅海威, 李明, 周红 2004 物理学报 **53** 494]
- [5] Xue L F, Zhao Q D, Liu J G, Guo T, Huang G L, Liu L H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2804 (in Chinese) [薛力芳, 赵启大, 刘建国,

- 郭团, 黄桂岭, 刘丽辉 2006 物理学报 **55** 2804]
- [6] Zhang J L, Yu C X, Wang K R, Zhao D X, Lin M M, Li C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3988 (in Chinese) [张锦龙, 余重秀, 王葵如, 赵德新, 林妹妹, 李成 2009 物理学报 **58** 3988]
- [7] Zhang C, Rao Y J, Jia X H, Chang L, Ran Z L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5523 (in Chinese) [张超, 饶云江, 贾新鸿, 苒亮, 冉曾令 2010 物理学报 **59** 5523]
- [8] Jiang Y 2009 *Advanced Optical Fiber Sensing Technology* (Beijing: Science Press) p8 (in Chinese) [江毅 2009 高级光纤传感技术 (北京: 科学出版社) 第 8 页]
- [9] Chung S, Kim J, Yu B, Lee B 2001 *IEEE Phot. Technol. Lett.* **13**

12

- [10] Wang J, Zheng K, Peng J, Liu L, Li J, Jian S 2009 *Opt. Express* **17** 10573
- [11] Feng C X 2009 *MS Dissertation* (Beijin: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [冯彩霞 2009 硕士学位论文 (北京: 北京交通大学)]
- [12] Wang J, Zheng K, Li J, Liu L S, Chen G X, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7695 (in Chinese) [王静, 郑凯, 李坚, 刘利松, 陈根

祥, 简水生 2009 物理学报 **58** 7695]

- [13] Yan F P, Mao X Q, Wang L, Fu Y J, Wei H, Zheng K, Gong T R, Liu P, Tao P L, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6295 (in Chinese) [延凤平, 毛向桥, 王琳, 傅永军, 魏淮, 郑凯, 龚桃荣, 刘鹏, 陶沛琳, 简水生 2009 物理学报 **58** 6295]
- [14] Lim K S, Pua C H, Harun S W, Ahmad H 2010 *Opt. Laser Technol.* **42** 377

A vibration detection system based on two-stage polarization maintaining fiber Sagnac loop fiber laser*

Zhou Rui^{1)†} Zhang Jing¹⁾ Hu Man-Li¹⁾ Feng Zhong-Yao¹⁾ Gao Hong¹⁾²⁾ Yang Yang¹⁾ Zhang Jing-Hua¹⁾ Qiao Xue-Guang¹⁾²⁾

¹⁾ (Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

²⁾ (Ministry of Education Key Laboratory of Photoelectricity Gas-oil Logging and Detecting, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(Received 21 January 2011; revised manuscript received 8 March 2011)

Abstract

A novel fiber grating sensing technique utilized for vibration detection is proposed and experimentally demonstrated. A single wavelength laser is formed by polarization controllers and polarization maintaining fiber (PMF) to construct the high birefringence (Hi-Bi) Sagnac loop, PMF combined with erbium-doped fiber, single mode fiber and polarizer. The cantilever glued to an FBG is used as a sensor probe, and the linear edge of Sagnac ring laser are used to demodulate fiber optic seismic vibration signal. Sagnac ring theory and its edge effects are described in detail, and numerical simulation and experiment show that the vibration signal detection system is adjusted periodically in a range from L_1 to $L_1 + L_2$, sensitivity goes up to $38.2 \mu\text{W/nm}$ of discrimination, the linearity is 0.9996, and the dynamic range is 40—70 dB, these meeting the requirements for vibration detection technical parameters.

Keywords: optical fiber, vibration detection, Hi-Bi PMF Sagnac loop, fiber laser

PACS: 42.81.-i, 42.81.Gs, 42.55.Wd, 42.81.Pa

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60727004, 61077060), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2007AA03Z413, 2009AA06Z203), the Science and Technology Innovation Project of Key Projects of Education Ministry of China (Grant No. Z08119), the Ministry of Science and International Cooperation Projects, China (Grant No. 2008CR1063), the Major Scientific and Technological Innovation Projects in Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2009ZKC01-19, 2008ZDGC-14), the NWU Graduate Innovation and Creativity Funds (Grant No. 09YZZ53).

† E-mail: rayzhou2008@gmail.com