

基于双波混频干涉解调的光纤环形激光应变传感系统

江旭海, 陶传义*, 肖建军, 赵琰, 王豪, 王威

重庆理工大学理学院绿色能源材料技术与系统重庆市重点实验室, 重庆 400054

摘要 本文提出一种基于半导体光放大器(SOA)光纤环形激光器的智能光纤动态应变传感系统,并采用自适应光折变双波混频技术对其进行解调,解调过程中无需对准静态应变和温度进行任何主动补偿。当 FBG(Fiber Bragg Grating)传感器的反射光谱因动态应变而发生改变时,则激光输出的波长会相应移动,随后转换为相应的相移并由 InP:Fe 光折变晶体双波混频干涉仪解调。实验结果表明,该传感系统能够测量 50~464 kHz 之间的动态应变且灵敏度高于 $0.5\mu\epsilon \text{ Hz}^{-1}$ (ϵ 为应变)。在 InP:Fe 光折变晶体中同时对三个 FBG 传感器的动态应变进行解调,实验证实双波混频干涉仪的多路复用是切实可行的。

关键词 光纤光学; 光纤环形激光器; 光纤布拉格光栅; 应变; 光折变晶体; 双波混频; 波长解调

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306021

Fiber-Ring Laser Strain Sensing System with Two-Wave Mixing Interferometric Demodulation

Jiang Xuhai, Tao Chuanyi*, Xiao Jianjun, Zhao Yan, Wang Hao, Wang Wei

*Chongqing Key Laboratory of Green Energy Materials Technology and Systems, School of Science,**Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China*

Abstract This paper proposes an intelligent optical fiber dynamic strain sensing system based on a semiconductor optical amplifier (SOA) fiber ring laser, and uses adaptive photorefractive two-wave mixing technology to demodulate it, and there is no need to align the static strain during the demodulation process. And temperature for any active compensation. When the reflection spectrum of the FBG (Fiber Bragg Grating) sensor changes due to dynamic strain, the wavelength of the laser output will move accordingly, then converted to a corresponding phase shift and demodulated by the InP:Fe photorefractive crystal two-wave mixing interferometer. Experimental results show that the sensor system can measure dynamic strains between 50 and 464 kHz and the sensitivity is higher than $0.5\mu\epsilon \text{ Hz}^{-1}$ (ϵ is strain). In the InP:Fe photorefractive crystal, the dynamic strain of three FBG sensors is demodulated at the same time. The experiment proves that the multiplexing of the two-wave mixing interferometer is feasible.

Key words fiber optics; fiber ring laser; fiber Bragg grating; strain; photorefractive crystal; two-wave mixing; wavelength demodulation

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 190.5330; 190.7070

1 引言

航空航天器和机械部件的结构失效会造成巨大的生命和财产损失,而基于压电(Piezoelectric, PZT)传感器的结构健康监测系统存在体积大、不易

嵌入复合材料和易受电磁场干扰等缺点^[1]。与传统的 PZT 传感器相比,光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器具有抗电磁干扰、体积小、重量轻、耐腐蚀、实时性高、灵敏度高、易组成大规模准分布式 FBG 传感网络以及集感知与传输于一体等

收稿日期: 2020-03-01; 修回日期: 2021-04-01; 录用日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51874064)

通信作者: *taochuanyi@cqut.edu.cn

优点^[2],因此 FBG 传感器被广泛用于航空航天和土木工程等领域的结构健康监测^[2-4]。FBG 传感器的传感原理已经非常成熟,即外界的任何扰动都会造成 FBG 的有效折射率或光栅周期发生变化,从而引起 FBG 的中心波长发生漂移。FBG 传感器作为一种波长编码调制器件,在应用过程中如何精确地解调出波长移动的变化量是 FBG 传感器走向实用化需要解决的关键问题之一^[5]。

目前,FBG 传感器的解调方法有扫描解调法、光谱分析解调法和干涉测量解调法三种^[6-9]。其中可调谐光学滤波器^[6]和可调谐窄带光源^[7]等扫描类方法不能同步多路复用,光谱分析解调法^[8]因时分辨率低而不能解调高频的动态应变。在监测突发性撞击信号或声发射的应用过程中需要同时解调多个 FBG 传感器,因此以上两类方法均不适用。光学干涉测量法^[9]一直被认为是 FBG 动态应变解调最灵敏且最理想的方法之一,其解调原理是信号光和参考光通过非平衡干涉仪先将波长调制转换成相位调制,再通过两光间的干涉将相位调制转换成强度调制并使用光电探测器来检测光强的变化。然而,传统的干涉仪在实际的工业应用环境中若想实现高灵敏度的相干解调,则需要解决两个关键问题^[10]。一是使信号光与参考光波前匹配才能产生相干,然而多模光纤干涉传感器中实现波前匹配尤为困难;二是使两相干波前正交(两波前间的相位差为 $\pi/2$),因为只有正交的条件下干涉仪才能实现对微应变的高灵敏线性解调。马赫-曾德尔^[11]和迈克耳孙^[9]传统类干涉仪虽适用于动态应变的解调,但不宜多路复用,而且还需使用比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制器来主动补偿外界的准静态漂移以使干涉仪保持在正交工作的状态。由于每一个传感器都需要一个 PID 控制器,但这会造成多路复用的成本较高。基于光折变晶体的双波混频(Two-Wave Mixing, TWM)干涉仪^[12-13]不仅可以实现波前的自动匹配,还对低频的环境变化具有自适应性(即对低频振动或者温度变化不敏感),因此利用 TWM 在光折变晶体中连续写入的动态全息光栅来取代传统的光合束器,就可以轻松解决传统干涉仪所面临的两个难题。

近年来,基于半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)作为增益介质的光纤激光器的新型 FBG 传感器得到了广泛的研究^[12,14-15]。与传统的掺铒光纤放大器相比,SOA 的非均匀展宽特性可以使激光腔在室温下克服模式竞争,从而产

生多个稳定且增益平坦的激光模式。因此,本文提出一种基于自适应双波混频解调的光纤环形激光动态应变传感系统,传感部分是由 SOA 和 FBG 反射器构成的光纤环形激光器。光纤环形激光器的传感部分输出的光信号被分成泵浦光和信号光,两束光在 InP:Fe 光折变晶体中形成双波混频。FBG 的任何波长移动均会被非平衡干涉仪转换成等效的相位漂移,由动态全息光栅产生的衍射泵浦光与透射信号光高度相干,从而有效将两光束间的相位调制同步转换成强度调制,并使用光电探测器来检测光强的变化。通过实验探究基于自适应双波混频解调的光纤环形激光动态应变传感系统的动态响应特性、多路复用性和自适应性,该传感系统具有较高的灵敏度,可用于监测由振动、撞击或声发射等引起的动态应变。

2 实验装置与工作原理

2.1 实验装置

基于双波混频解调的光纤环形激光应变传感系统如图 1 所示,其中 V_0 为外加直流电压。从半导体光放大器发出的宽带光经过光纤环形器后耦合到 FBG 传感器中,FBG 的反射光经过 1×2 光纤耦合器(90:10)的 90% 端进入环形腔中以循环放大形成激光,经过 10% 端后输出到掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)中。放大后的光被 1×2 光纤耦合器(95:5)分成泵浦光和信号光,其中信号光(5%)经过光纤准直器后垂直进入 InP:Fe 晶体中,而泵浦光(95%)经过准直器后以 6° 的入射角进入 InP:Fe 晶体中。InP:Fe 光折变晶体(电阻率为 $8.10 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$,尺寸为 $4.0 \text{ mm} \times 8.0 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$)分别沿 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 001 \rangle$ 方向切割,两光束的入射面为 $[1\bar{1}0]$ 平面,使用两个半波片(Half Wave Plate, HWP)将两光束的偏振方向调到 $\langle 110 \rangle$ 方向,在 $\langle 001 \rangle$ 方向的两晶面上涂覆银导电环氧树脂以便于施加直流电场。透射信号光经过中性密度片(Neutral Density Filter, ND)衰减后通过光纤准直器耦合到光电探测器中。

2.2 工作原理

配置的 SOA 与多个 FBG 调谐器的结合可以构成环形激光腔,而且能够产生多工作波长的激光光源,这使得 FBG 多路传感成为可能,而且 SOA 的跃迁时间较短,可以响应高达兆赫兹的 FBG 波长移动^[12]。激光腔中的 FBG 既可以作为环形激光器的波长调谐器,又可以作为外界应变的传感元件。

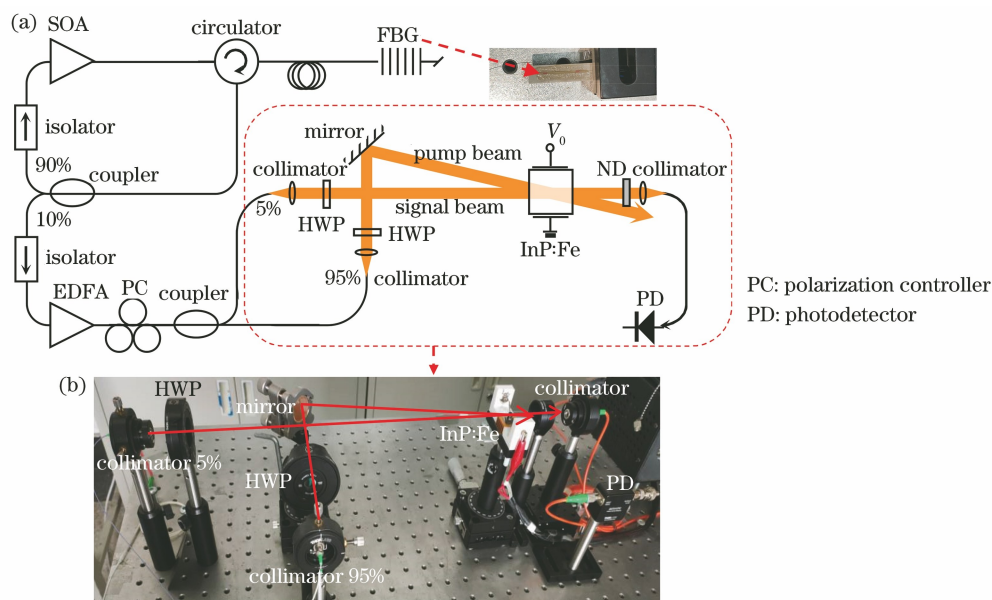


图 1 基于双波混频解调的光纤环形激光应变传感系统。(a)原理;(b)实验装置
Fig. 1 Fiber ring laser strain sensing system based on two-wave mixing demodulation.

(a) Principle; (b) experimental installations

FBG 受到的任何动态应变均被编码为光纤环形激光器输出激光的波长偏移,输出的光信号被 1×2 耦合器(95:5)分成泵浦光和信号光,两束光经过非平衡干涉仪后在 InP:Fe 光折变晶体中连续地写入动态全息光栅,从而形成双波混频干涉解调仪。TWM 干涉仪原理如图 2 所示,其中 DC 为直流。干涉过程:1)信号光和泵浦光在 InP:Fe 晶体中相干后形成干涉图样;2)明暗相间的干涉条纹可以非均匀地激发光生载流子(电子和空穴),载流子向暗区迁移并被空的深缺陷能级捕获,从而形成非均匀内建空间电场;3)该空间电场通过电光效应在 InP:Fe 晶体中产生与照射光栅异相的折射率光栅;4)泵浦光被光折变光栅衍射,从而在透射信号光的方向上产生与之相同空间散斑结构的衍射泵浦光束;5)由外界应变导致的 FBG 波长调制经过非平衡干涉仪后转换成等效的相位调制,而衍射泵浦光和透射信号光在光折变晶体中高度相干,从而有效将相位

调制进一步转换成强度变化。

由于 InP:Fe 晶体的电光系数较小,所以在 $\langle 001 \rangle$ 方向上施加强度为 5.1 kV/cm 的直流电场可以提升折射率光栅的光强度,从而增强衍射泵浦光强^[16]。漂移模式(外加直流电场)下,衍射泵浦光和透射信号光之间的静态相位差约为 $\pi/2$,因此光折变合束器无需任何反馈电子器件来保持两相干光的正交,可以自动实现小相位调制的线性解调。折射率光栅需要经过固有的光折变响应时间 τ 后才能形成,当 FBG 受到动态应变的时间尺度大于 τ 时,光折变晶体可以形成新的折射率光栅来自适应这种低频的动态调制。光折变合束器可以自适应低频的漂移变化,而且对快速的相位调制信号保持完全透明,因此 InP:Fe 光折变晶体相当于一个截止频率 $f_{\text{cut}} = 1/\tau$ 的自适应高通滤波器^[10]。

在未耗尽泵浦光的条件下,Delaye 等^[17]求得了透过 InP:Fe 晶体之后双波混频相干光的复振幅(忽略晶体吸收),表达式为

$$E_d(t) = E_0 \{ \exp[(\gamma L) - 1] + \exp[i\varphi(t)] \}, \quad (1)$$

式中: E_0 为晶体入射处信号光的复振幅; L 为透光方向上的晶体长度; $\varphi(t)$ 为调制信号的相位; γ 为 TWM 复数增益, $\gamma = \gamma' + i\gamma''$, 其中 γ' 为复数增益的实部, γ'' 为复数增益的虚部; t 为时间。扩散模式下, $\gamma'' = 0$, 漂移模式下, $\gamma' = 0$ 。(1)式的第一项代表衍射泵浦光束,第二项代表透射信号光束。对(1)式求模后平方可得透射信号光和衍射泵浦光的相干强

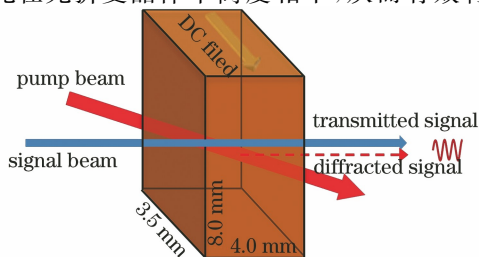


图 2 TWM 干涉仪原理

Fig. 2 Principle of TWM interferometer

度,表达式为

$$I_d(t) = |E_0|^2 \{ \exp(2\gamma'L) + 2\exp(\gamma'L)\sin(\gamma''L)\sin\varphi(t) + 2[\exp(\gamma'L)\cos(\gamma''L) - 1][\cos\varphi(t) - 1] \}. \quad (2)$$

根据(2)式可得,在纯扩散模式($\gamma''=0$)下,TWM解调器对小相位调制 $[\varphi(t)\ll\pi/2]$ 的灵敏度为0,因此只有在外加直流电场的条件下,TWM干涉仪才能灵敏地解调小相位漂移。在小相位调制的近似下,即 $\cos[\varphi(t)]\approx 1$ 和 $\sin[\varphi(t)]\approx\varphi(t)$, (2)式可变为

$$I_d(t) = |E_0|^2 [\exp(2\gamma'L) + 2\exp(\gamma'L)\sin(\gamma''L)\varphi(t)]. \quad (3)$$

(3)式中的 $\exp(2\gamma'L)$ 为解调信号的直流成分, $2\exp(\gamma'L)\sin(\gamma''L)\varphi(t)$ 为解调信号的交流成分。根据(3)式可得,解调信号的幅度与动态相位漂移成正比(线性解调)。当 $\gamma''L=\pi/2$ 时,TWM解调器可获得最佳的灵敏度。在TWM波长解调器中,由外界动态应变导致的FBG波长移动经过非平衡干涉仪后转换成等效的相移漂移 $\varphi(t)$,转换公式为^[13]

$$\varphi(t) = \frac{2\pi d}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B(t), \quad (4)$$

其中

$$\Delta\lambda_B(t) = \lambda_B \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \varepsilon(t), \quad (5)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为动态应变; $\Delta\lambda_B(t)$ 为 $\varepsilon(t)$ 所导致的FBG波长移动; λ_B 为FBG的中心波长; d 为光程差; n_{eff} 为光纤的有效折射率; ν 为泊松比; p_{11} 和 p_{12} 为弹光性张量的分量。根据(4)式可得,光程差越大,则转换后的相位差也越大,即TWM波长解调信号越强。由于光源有一定的带宽,则信号光与泵浦光之间干涉条纹的可见性随着光程差的增加而

剧烈减弱。最优的光程差 d_{opt} 与FBG传感器带宽 $\Delta\lambda$ 间的关系可表示为^[14]

$$d_{\text{opt}} = \frac{\sqrt{\ln 4}}{\pi} \frac{\lambda_B^2}{\Delta\lambda}. \quad (6)$$

从理论上论证了TWM光折变干涉仪可用于FBG波长移动的解调,值得注意的是波长解调器工作的光程差不为0。

3 实验结果与讨论

3.1 波长解调

为了证实双波混频干涉仪可以解调环形激光器输出的FBG光谱移动,将中心波长为1549.89 nm和带宽为0.2 nm的FBG传感器粘贴在由函数发生器驱动的长方型压电陶瓷片上,如图1所示。FBG传感器对准静态变化和动态应变都很敏感,考虑到TWM解调器具有自适应性(只能解调高频的动态应变),因此在FBG传感器上施加频率为1 kHz和幅度为 $4\mu\varepsilon$ (ε 为应变)的动态应变信号,并测量不同光程差(0~6 mm)下波长解调信号的振幅,测试结果如图3所示。在0~250 ms的时间范围内,对InP:Fe晶体施加强度为5.1 kV/cm的直流电场,从而产生光折变光栅。在35~235 ms的时间范围内,通过函数发生器向FBG传感器施加猝发驱动信号。从图3可以看到,当光程差等于0时,尽管TWM的增益最大,但是仅能检测到微弱的波长解调信号;随着光程差的增加,波长解调信号的振幅开始增大,当光程差约为4 mm时,可获得最大振幅的解调信号,与(6)式求得的最佳光程差($d_{\text{opt}}=4.5$ mm)基本吻合;虽然光程差越大转换得到的相位漂移也越大,但是光纤环形激光器的相干性有限(FBG具有一定的带宽),所以随着光程差的进一步增加,TWM增益会呈指数衰减,因此当光程差超过4 mm时,信号幅度迅速减小。

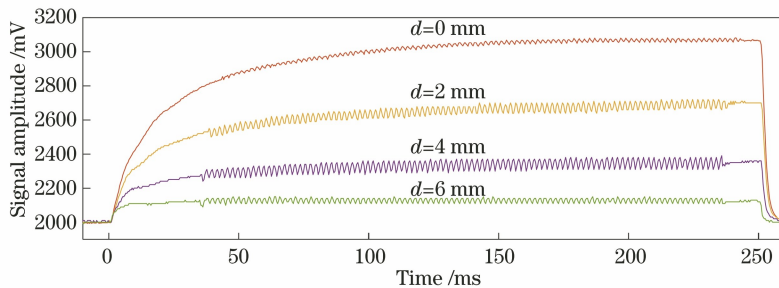


图 3 在电场强度为 5.1 kV/cm 下不同光程差对波长解调信号的影响

Fig. 3 Influence of different optical path difference on wavelength demodulation signal at electric field intensity of 5.1 kV/cm

当光程差为 4 mm 时,外加直流电场对解调信号的影响如图 4 所示。从图 4 可以看到,在 InP:Fe 晶体上施加的直流电场越强, TWM 解调信号的幅度越大。根据(3)式可得, γ' 控制泵浦光和信号光之间的能量耦合, γ'' 负责将相位调制转换为强度调制。由于

外加直流电场可大幅度提升 TWM 能量耦合 (γ')^[16] 的能力,所以在直流电场强度由 3.1 kV/cm 增加到 4.8 kV/cm 的过程中,解调信号的直流电平也随之增加;另外,外加直流电场越大,则 $\gamma'L$ 值越接近于 $\pi/2$, 所以电场越大, TWM 波长解调信号的幅度越大。

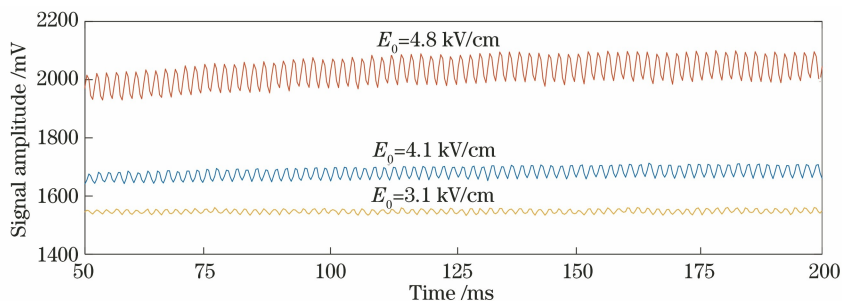


图 4 在光程差为 4 mm 下不同外加电场强度对波长解调信号的影响

Fig. 4 Influence of different applied electric field intensities on wavelength demodulation signals at optical path difference of 4 mm

3.2 动态响应

对环形激光应变传感系统的动态响应特性进行实验研究。使用函数发生器来产生连续的正弦信号以驱动 PZT 陶瓷片,通过设置函数发射器的驱动电压来调节应变的大小。对 FBG 传感器依次施加 0.05, 0.20, 29.00, 83.00, 243.00, 464.00 kHz 的动

态应变,对应的幅度分别为 $10\mu\epsilon$ 、 $5\mu\epsilon$ 、 $2\mu\epsilon$ 、 $2\mu\epsilon$ 、 $0.5\mu\epsilon$ 和 $0.5\mu\epsilon$,解调结果如图 5 所示。从图 5 可以看到, 0.20, 29.00, 83.00, 243.00, 464.00 kHz 这 5 个频率在示波器上可以显示出波形良好的时域信号,并通快速傅立叶变换可以得到相应的频域信号,发现解调得到动态应变的信号频率与 PZT 陶瓷片

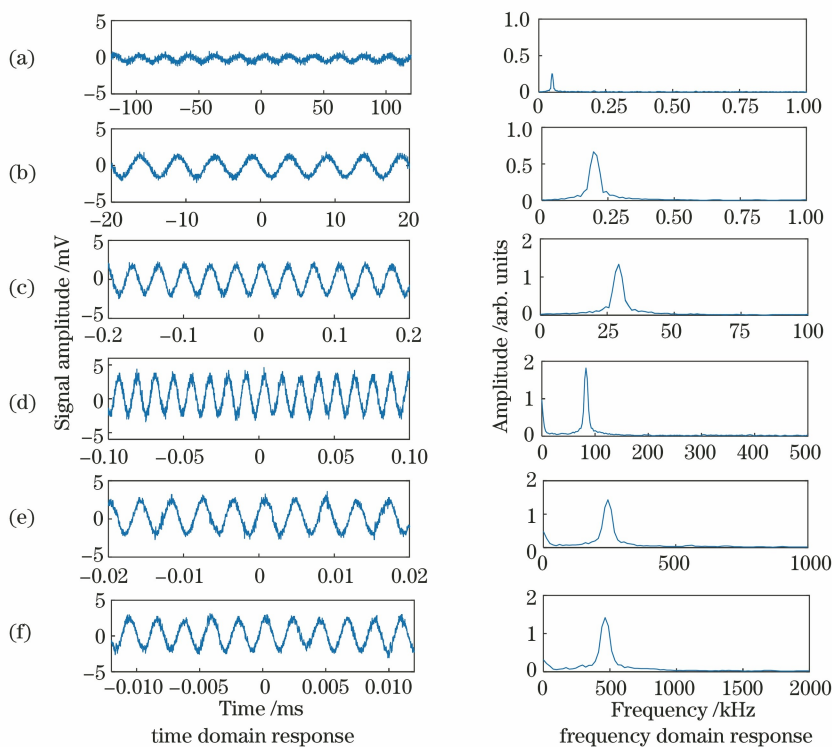


图 5 传感系统对不同频率下动态信号的响应。(a) 0.05 kHz;(b) 0.20 kHz;(c) 29.00 kHz;(d) 83.00 kHz;(e) 243.00 kHz;(f) 464.00 kHz

Fig. 5 Response of sensor system to dynamic signals at different frequencies. (a) 0.05 kHz; (b) 0.20 kHz; (c) 29.00 kHz; (d) 83.00 kHz; (e) 243.00 kHz; (f) 464.00 kHz

受到的驱动频率一致。根据(3)~(5)式可知,施加的应变越大,由 FBG 波长漂移转换得到的等效相移也越大,理论上 TWM 波长解调信号的幅度也越大。然而实验结果表明,50.00 Hz ($10\mu\epsilon$) 频率下 TWM 解调信号的幅度极小(信噪比很低),因此可确定 TWM 自适应干涉解调器的低频截止频率约为 50 Hz,该截止频率足以补偿外界的低频振动和环境温度的漂移。压电陶瓷片在超高频振动的状态下可以产生极小的动态应变,这会形成微小的 FBG 波长漂移量,因此实验中测得 TWM 干涉仪最高解调频率为 464.00 kHz 和幅度为 $0.5\mu\epsilon$ 的微小高频动态信号。该传感系统的灵敏度仅受光探测噪声和散粒噪声的限制,因此实际的灵敏度优于 $0.5\mu\epsilon\text{ Hz}^{-1}$ 。

3.3 撞击事件的监测

使用光纤环形激光应变传感系统探测突发性的撞击事件。在实验中使用光学胶将 FBG 传感器粘贴在 1 mm 厚的铝板上,同时将 PZT 传感器安装在与 FBG 中心相距 20 mm 处并作为实验对照。使用直径为 3 mm 的钢珠从约为 50 cm 高的地方自由落下并撞击铝板(撞击点与 FBG 相距约为 30 cm),撞

击载荷在铝板中激励可以产生兰姆导波模式,产生的超声波波长与板厚度相当。兰姆导波所产生的表面动态应变是通过测量应变所引起的 FBG 波长移动而得的。用于捕获解调信号的示波器是由 PZT 传感器的输出信号触发,将 FBG 传感器响应与粘贴在其附近的 PZT 响应进行比较。图 6 为撞击信号的波形,其中 F 表示最大频率, T 表示到达最大频率处的时间, W_T 表示权重。从图 6 可以看到,光纤环形激光应变传感系统探测到的撞击信号与 PZT 压电传感器的瞬态响应具有良好的 consistency。进一步使用 AGU-Vallen Wavelet 软件分别对 PZT 传感器信号和 FBG 传感器信号进行时频分析,通过对比图 6 小波变换信号发现 PZT 传感器可以检测到最高的频率为 80 kHz,而 FBG 可探测到频率高达 88 kHz 的兰姆导波,因此 FBG 传感器的灵敏度略高于 PZT 传感器。另外,钢珠撞击实验结果表明,FBG 传感系统对撞击声发射的响应具有良好的再现性,始终呈现出与 PZT 传感器信号类似的波形。由于探测系统能够始终处于激活状态,因此该光纤环形激光应变传感系统有望用于结构健康监测中不可预知的撞击事件或声发射的监测。

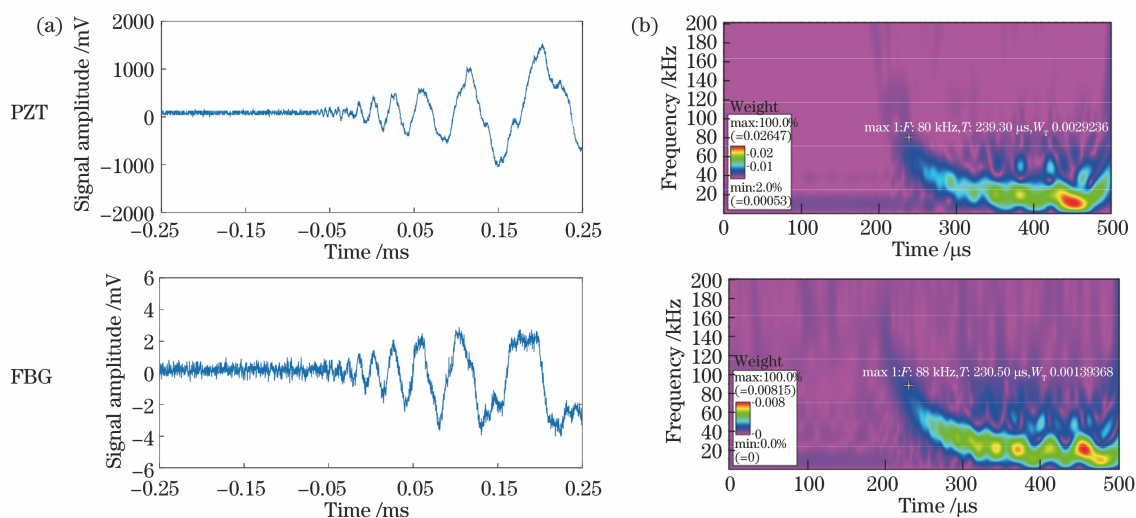


图 6 撞击信号解调实验。(a)不同传感器撞击信号的波形;(b)不同传感器撞击信号的小波分析

Fig. 6 Impact signal demodulation experiment. (a) Waveforms of impact signals from different sensors; (b) wavelet analysis of impact signals from different sensors

3.4 复用解调

使用光折变双波混频技术对多个 FBG 传感器调制的光纤环形激光器的输出信号进行复用解调,实验装置如图 7(a)所示。在 TWM 复用解调器中,使用每个波长在光折变晶体中写入各自的光折变光栅。泵浦光和信号光之间的夹角是固定的,所有波长可共享完全相同的光路,这大大降低了光学装置

的复杂性,既便于实验调节又降低了设备成本。在波长复用 TWM 解调器中,泵浦光和信号光都包含所有的波长通道,其在光折变晶体内相干后形成多个光折变光栅,波长复用装置要求由不同波长所产生的光折变光栅相互独立。为了避免由紧密堆积的光折变折射率光栅引起的串扰,FBG 通道间距既不应太小,但是也不应太大,以便最大化在 C 波段(波

长范围为 1530~1565 nm)的有限带宽内使用的传感器数量。

实验中采用带宽 $\Delta\lambda$ 为 0.2 nm 以及中心波长 $\lambda_1 = 1539.40$ nm、 $\lambda_2 = 1544.94$ nm 和 $\lambda_3 = 1549.89$ nm 三个 FBG 传感器级联在同一根单模光纤中(通道间隔约为 5 nm),这三个 FBG 传感器的输出光谱如图 7(b)所示。TWM 解调器(InP:Fe)输出的透射信号光被光纤准直器从自由空间耦合到光纤中,使用阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG, 频率为 100 GHz)将三个 FBG 传感信号在波长域中进行分离并定向耦合

到各自的光电探测器中,最后输出到示波器上以显示各个 FBG 传感器的信号。将三个带宽均为 0.2 nm 的 FBG 传感器分别粘结在三个 PZT 蜂鸣片上,对三个 FBG 传感器分别施加频率为 2, 5, 19 kHz 和幅度均为 $2\mu\epsilon$ 的正弦动态应变并进行同步探测。解调结果的时域信号和频域信号如图 8 所示。通过 4 个信号的快速傅里叶变换(FFT)频谱图可知三个通道之间的串扰很小,这表明 TWM 解调器与光纤环形激光动态应变传感系统的结合可实现对多个 FBG 动态应变传感器的多路复用自适应解调。

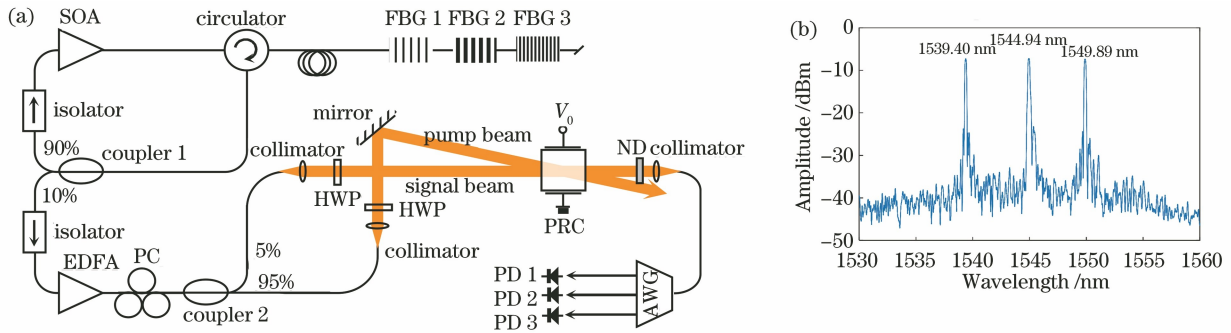


图 7 传感系统的多路复用装置。(a)装置们模拟示意图;(b)环形激光的输出光谱

Fig. 7 Multiplexing device for sensing systems. (a) Schematic of device simulation; (b) output spectrum of ring laser

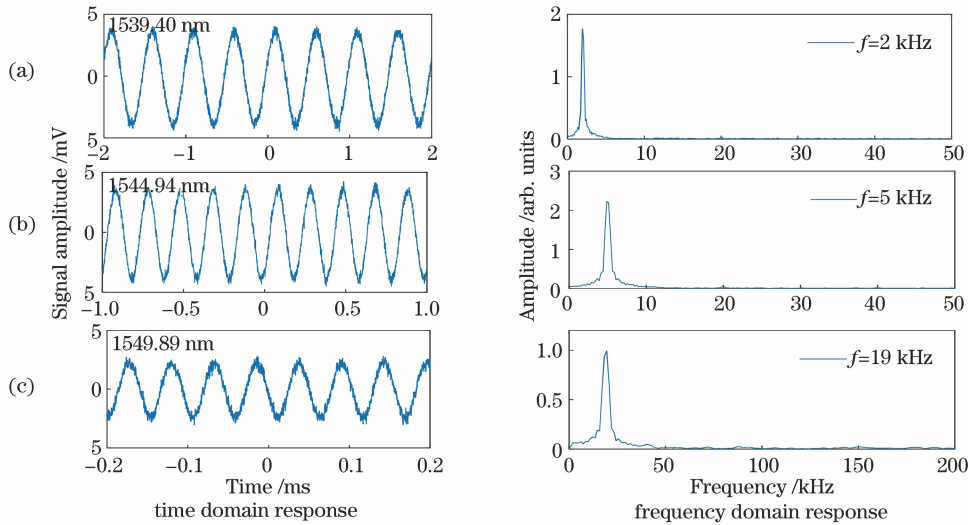


图 8 TWM 解调仪在不同频率下的多路复用解调信号。(a) 2 kHz;(b) 5 kHz;(c) 19 kHz

Fig. 8 Demodulation signal multiplexed by TWM demodulator at different frequencies.

(a) 2 kHz; (b) 5 kHz; (c) 19 kHz

结构健康监测的实际应用中,由于外来撞击、裂纹的产生或扩张、孪生畸变以及材料断裂等损坏性突发结构失效的发生时间和位置均是瞬态且不可预测的,因此需要在被测结构上布置 FBG 传感器网络以实现对被测结构的健康状态实时测量。以上一系列实验结果表明,基于光折变 InP:Fe 晶体“智能”

光合束器的 TWM 干涉仪不仅能够同时解调多个 FBG 传感器,还可自动滤除低频准静态漂移。这意味着使用一个 TWM 解调器可同时解调多个叠加在大准静态漂移背景下的微小动态 FBG 传感信号,这解决了结构健康监测中传统解调方案不易同时解调多个 FBG 传感器,以及自适应大准静态漂移所导

致的解调器偏离最佳工作点的难题。另外,由于 Qiao 等^[18]只对 InP:Fe 晶体的光折变响应时间进行了定性描述,本文也仅通过实验初步测得 TWM 截止频率约为 50 Hz,意味着低于此频率的波长漂移免于被探测。后续研究将建立合理的光折变光栅寿命理论模型并开展实验探究,以提升 TWM 解调仪的自适应性。

4 结 论

提出一种自适应光纤环形激光动态应变传感系统,其输出信号可以通过双波混频干涉仪进行解调,对双波混频干涉仪的解调工作原理进行理论分析和参数优化,给出最佳光程差与 FBG 传感器带宽之间的关系,发现带宽为 0.2 nm 的 FBG 传感器在信号光与泵浦光的光程差约为 4 mm 处,双波混频波长解调信号的幅度最大,同时在光折变晶体上施加的直流电场强度越大,解调信号幅度亦越大。动态响应测试实验结果表明,系统对大准静态应变具有适应性,低频截止频率约为 50 Hz。对使用激光传感系统探测钢珠撞击铝板的撞击信号进行研究,并通过实验证明激光传感系统可多路复用性。由于该系统具有实时性、自适应性和多路复用性,因此非常适合用于测量大准静态漂移背景下叠加的微小动态应变信号。未来如果利用 InP 光子集成技术设计自适应双波混频解调设备,此激光传感系统将在结构健康检测领域的应用中具有巨大的潜力。

参 考 文 献

- [1] Kinet D, Mégret P, Goossen K W, et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 7394-7419.
- [2] Liu T G, Wang S, Jiang J F, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1681-1692.
刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [3] Huang B S, Gao S C, Huang X C, et al. High-sensitivity fiber Fabry-Pérot interferometer strain sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0606002.
黄炳森, 高社成, 黄新成, 等. 高敏光纤法布里-珀罗干涉应变传感器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0606002.

- [4] Zhang X, Hou M S, Liu Z C, et al. Surface reconstruction algorithm of plate-shell structure based on fiber Bragg grating sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 090603.
张旭, 侯茂盛, 刘智超, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的板壳结构曲面重构算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 090603.
- [5] Wu J, Wu H P, Huang J B, et al. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 519-531.
吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展 [J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 519-531.
- [6] Han M, Liu T Q, Hu L L, et al. Intensity-demodulated fiber-ring laser sensor system for acoustic emission detection [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29269-29276.
- [7] Balogun O, Zhu Y N, Krishnaswamy S. Interrogation of a wavelength tunable fiber Bragg grating sensor based ring laser for dynamic strain monitoring [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7648: 764802.
- [8] Davis M A, Kersey A D. Application of a fiber Fourier transform spectrometer to the detection of wavelength-encoded signals from Bragg grating sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1289-1295.
- [9] Tsuda H, Koo J H, Kishi T. Detection of simulated acoustic emission with Michelson interferometric fiber-optic sensors [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2001, 20(1): 55-56.
- [10] Kamshilin A A, Romashko R V, Kulchin Y N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(3): 031101.
- [11] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(1): 72-74.
- [12] Wei H M, Krishnaswamy S. Comparative assessment of erbium fiber ring lasers and reflective SOA linear lasers for fiber Bragg grating dynamic strain sensing [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3867.
- [13] Zhang Z Z, Jia Z Q, Ji G R, et al. Dual demodulation interferometer with two-wave mixing in GaAs photorefractive crystal [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 82-85.
- [14] Wei H M, Tao C Y, Zhu Y N, et al. Fiber Bragg grating dynamic strain sensor using an adaptive reflective semiconductor optical amplifier source [J].

- Applied Optics, 2016, 55(10): 2752-2759.
- [15] Mao L M, Tao C Y, Zhang J, et al. Multiplexed dynamic strain sensing system based on a fiber ring laser using a non-tunable fiber Fabry-Perot filter[J]. Applied Optics, 2020, 59(8): 2375-2379.
- [16] Jiang X H, Tao C Y, Zhao Y, et al. Two-wave mixing gain characteristics of photorefractive InP: Fe under external DC electric field [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1219001.
江旭海, 陶传义, 赵琰, 等. 外加直流场下光折变半导体 InP: Fe 的双波混频增益特性 [J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1219001.
- [17] Delaye P, Blouin A, Drolet D, et al. Detection of ultrasonic motion of a scattering surface by photorefractive InP: Fe under an applied DC field[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1997, 14(7): 1723-1734.
- [18] Qiao Y, Zhou Y, Krishnaswamy S. Adaptive demodulation of dynamic signals from fiber Bragg gratings using two-wave mixing technology [J]. Applied Optics, 2006, 45(21): 5132-5142.