

面向地壳形变观测的超高分辨率光纤应变传感系统

何祖源 刘庆文 陈嘉庚

Ultrahigh resolution fiber optic strain sensing system for crustal deformation observation

He Zu-Yuan Liu Qing-Wen Chen Jia-Geng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 074208 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.074208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于全相位滤波技术的光纤表面等离子体共振传感解调算法

Optical fiber SPR sensing demodulation algorithm based on all-phase filters

物理学报.2017, 66(7): 074202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074202>

用于气象观测的阵列式温度传感器流体动力学分析与实验研究

Fluid dynamic analysis and experimental study of a temperature sensor array used in meteorological observation

物理学报.2016, 65(9): 094209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094209>

分布式光纤 Sagnac 干涉仪中基于倒谱的多分辨率入侵定位算法

Multi-resolution intrusion localization algorithm through cepstrum in distributed fiber optic Sagnac interferometer

物理学报.2016, 65(4): 044210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044210>

准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器特性研究

Quasi-crystal photonic fiber surface plasmon resonance sensor

物理学报.2015, 64(6): 064213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064213>

一种基于微波谐振测量 Sagnac 效应的新方案

A new scheme of measuring Sagnac effect based on microwave resonant

物理学报.2015, 64(4): 044205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044205>

专题: 光纤传感

面向地壳形变观测的超高分辨率 光纤应变传感系统*

何祖源[†] 刘庆文 陈嘉庚

(上海交通大学, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

(2017年3月8日收到; 2017年3月27日收到修改稿)

超高分辨率光纤应变传感系统是地球物理学中地壳微弱形变观测的有力工具. 相比于传统的地壳应变观测技术, 光纤应变传感器具有测量分辨率高、抗干扰能力强、尺寸小、可复用、易于安装布设等特性, 在建立新型地壳形变监测网络中具有很大的应用潜力. 本文围绕面向地壳形变观测的纳应变级分辨率光纤应变传感器技术, 阐述了应变传感原理与实现超高测量分辨率的机理, 并详细介绍了扫频探测、Pound-Drever-Hall解调技术、边带探测、双回路锁定传感、传感器时分复用等技术及相应的传感器系统实现方案, 最后, 给出了超高分辨率光纤传感器在现场观测的实验结果与分析.

关键词: 光纤传感, 地壳形变测量, 超高分辨率, 光纤布拉格光栅**PACS:** 42.81.Pa, 42.79.Dj, 07.10.Pz**DOI:** 10.7498/aps.66.074208

1 引言

地壳形变观测是地球物理学中针对地质构造过程及地震、火山等地质灾害研究的核心环节之一, 其重要性不言而喻. 相比一般的应用场景, 地质构造过程中待观测的应变信号极其微弱, 且测量周期长、干扰来源复杂, 相应地对传感与测量技术提出了很高要求. 目前, 基于全球定位系统(GPS)的地壳形变观测已广泛应用, 但考虑到其运行方式与定位精度的限制, 该方案仅能提供较大时间与空间尺度上的地壳形变变化情况. 为更精确地获取重点区域的地壳形变信息, 需要建立固定的地壳应变监测站台以进行连续、高精度的地壳应变测量^[1,2]. 传统的地壳应变监测站广泛采用钢筋棒伸缩应变仪技术或激光干涉仪技术^[3,4], 而为达到纳应变级应变测量分辨率, 其传感探头长度需达到几十米至几百米, 不仅限制了其用于应变分布情况观测时的空间分辨率, 该传感器需要布设于深入地下的稳定环

境中, 其巨大的尺寸使得整个系统安装与施工的复杂程度与成本极高, 严重制约了这类应变传感仪器在地壳形变观测中的推广应用.

光纤传感技术自20世纪70年代出现以来, 经过几十年的快速发展, 已逐渐在各类应用场景中发挥着关键甚至不可或缺的作用. 其中, 基于光纤光栅的应变传感器作为光纤传感技术的重要分枝, 因其具有小尺寸、高稳定性、抗电磁干扰、制造工艺成熟、易于复用等特点, 并得益于现代光学与光通信技术的飞速发展, 在传感器性能指标以及工程实用性与稳定性等方面均不断地提升, 已被广泛用于各类振动测量、智能材料以及结构健康检测等应用场景^[5], 也受到了包括地球物理学研究在内的多个交叉学科研究人员的密切关注.

地球物理学应用场景的特殊性对光纤光栅应变传感系统提出了诸多挑战, 包括同时实现纳应变级超高分辨率与大动态范围, 抑制温度变化等环境因素对准静态应变信号的干扰, 传感系统的复用能

* 国家自然科学基金(批准号: 61327812, 61307106, 61620106015)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zuyuanhe@sjtu.edu.cn

力、长期可靠性以及成本等. 本文围绕光纤光栅的准静态超高分辨率光纤应变传感系统, 具体阐述其应变传感机理与光学传感元件的选取, 详细介绍围绕上述难点与挑战展开的一系列的光学系统设计与改进, 包括扫频探测、Pound-Drever-Hall (PDH) 解调、边带探测、双回路锁定传感、传感器时分复用等关键技术, 并给出了超高分辨率光纤应变传感系统用于现场地壳形变信号观测的系统方案与测量结果.

2 高精度光纤应变传感器的传感机理与光学传感元件

2.1 光纤布拉格光栅式应变传感器的传感机理

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 是目前应用最为广泛的光纤传感器件. 光纤光栅反射光的中心波长 (布拉格波长) λ_B 是其所受应变 ε 及温度 T 的线性函数 [6]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi) \Delta T + (1 - p_x)\varepsilon, \quad (1)$$

其中 ΔT 表示布拉格波长变化量, ΔT 表示温度变化, ε 为轴向应变, α 为纤芯材料热胀系数, ξ 为热光系数, p_x 为弹光系数. 由 (1) 式可知, 将光栅放置于待测环境中作为传感元件, 通过观测光栅布拉格波长 λ_B 即可得知光栅上轴向应变变化及温度变化情况, 而 λ_B 的测量分辨率决定了应变及温度的测量分辨率.

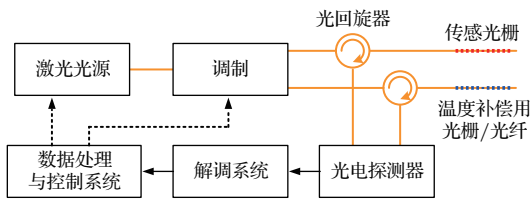


图 1 超高精度光纤光栅应变传感器原理框图

Fig. 1. The schematic configuration of ultrahigh resolution fiber grating strain sensors.

本文中的高精度光纤光栅应变传感器的系统框图如图 1 所示. 由于光纤光栅的布拉格波长同时与温度和应变有关, 为了补偿环境温度变化的影响, 需要在传感光栅的旁边另外布设温度补偿元件, 可以是光纤光栅, 也可以是光纤环等光纤部件. 激光光源发出的激光经过调制后射入传感光栅及

温度补偿光栅; 反射光经过光环行器 (CIR) 进入光电探测器, 经过解调系统后得到激光的中心波长与光栅的布拉格波长的偏差信息, 进而继而获得传感光栅上的应变信息.

通常情况下, 光纤光栅传感器的传感元件采用常规的布拉格光栅, 光源部分采用覆盖光栅布拉格波长变化范围的宽谱光源, 同时解调系统采用光谱仪或光波长计等光学仪器 [7]. 然而这种系统实现方案受限于光源的光谱功率密度、光栅的反射谱宽, 以及光学仪器的波长分辨率, 远远无法达到地壳形变观测所需的纳应变级分辨率. 因此, 提高系统的分辨率与传感精度, 应当从传感元件与探测系统两个方面入手, 合理选择传感元件, 同时设计相应的高精度的探测系统方案, 以满足地壳形变检测场景对传感器的指标需求.

2.2 高精度光纤应变传感器的传感元件的选择

为了实现高应变分辨率, 不仅需要采用具有高光功率密度的窄线宽激光光源和低噪声光电探测器, 对光纤光栅的带宽和光谱形状也有相应的要求 [8]. 常规光纤布拉格光栅的反射谱宽通常大于 0.1 nm, 这样的宽度不能充分利用窄线宽激光器的精密波长调谐能力, 因此, 我们选用基于光纤布拉格光栅的法布里-珀罗干涉仪 (FBG Fabry-Perot interferometer, FFPI) 或 π 相移光纤布拉格光栅 (π -phase-shifted FBG, π -PSFBG) 作为传感元件. 基于光纤布拉格光栅的法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪由一段光纤上的一对同布拉格波长的高反射光纤布拉格光栅构成 [9]. 由法布里-珀罗干涉理论 [9] 可知, 其高反射区在频域将出现多个固定频率间隔的极窄透射峰, 频率间隔与透射峰宽度由光栅间距离与光栅反射率决定; 而 π 相移光纤布拉格光栅可视为一种特殊的光纤布拉格光栅 [10], 在原本为折射率周期变化的高反射率光栅的中间位置引入半个周期的折射率变化延迟, 其频域高反射区中心, 即布拉格波长处将出现单个窄透射峰. 上述光纤 F-P 干涉仪与 π 相移光栅中的谐振峰 (或称之为透射峰) 宽度均可达到小于 1 pm (10^{-12} m) 量级; 而与之相伴随, 其谐振中心两边的复反射系数将表现出快速的相位反转. 传感元件的这一特性为纳应变级甚至更高精度的传感系统设计创造了有利条件. 尺寸方面, 光纤法布里-珀罗干涉仪式传感元件

长度通常为数十毫米至数百毫米, 而 π 相移光栅的长度一般不超过 50 mm, 均远小于传统式地壳形变观测站台中钢钢棒的尺寸.

3 实现高精度应变传感的关键技术与系统方案

由前面的讨论可知, 在选定合适的传感元件后, 实现高精度应变传感的关键在于设计相应的解调系统, 使之能够精确地检测传感元件的频域特性变化量. 本节将以一系列高精度光纤应变传感器的系统实现方案为线索, 详细介绍实现高精度传感器的系统设计中所开发的多项关键技术.

3.1 基于窄线宽激光扫频探测与 PDH 解调技术的解调方案

基于窄线宽激光扫频与 PDH 解调的高精度应变传感器系统方案如图 2 所示^[11]. 窄线宽可调谐激光器 (laser) 作为光源, 光源输出激光经光相位调制器 (PM) 至 50 : 50 光耦合器 (CP), 光耦合器将激光分为功率相等的两路, 此后两路系统采用相同结构. 耦合器的输出分别连接 CIR1 端口, CIR2 端口接光纤 F-P 干涉仪 (FFPI) 的一端, 光纤 F-P 干涉仪的反射光由 2 端口返回至 3 端口, 其后接光电探测器 (PD), 将反射光强度信号转为电信号. 电信号经模数转换后, 由数字信号处理芯片进行混频 (Mul) 及低通滤波 (LPF), 经处理后的信号传输至计算机, 进行应变信息的计算.

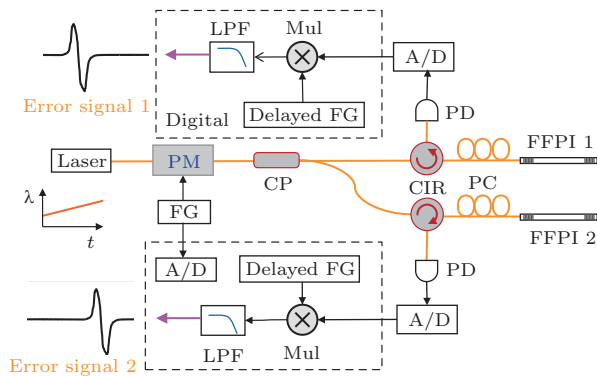


图 2 基于窄线宽激光扫频与 PDH 解调的高精度应变传感器系统方案^[11] FG, 波型发生器; PC, 偏振控制器; A/D, 模数转换器

Fig. 2. System configuration for interrogating a pair of FFPIs with PDH technique^[11]: FG, function generator; PC, polarization controller; A/D, analog to digital convertor.

本系统中采用的光相位调制及光强信号混频低通滤波部分, 即为广泛用于光学系统中激光稳频与高精度光纤传感的 PDH 解调技术^[12]. 在该技术中, 采用经正弦相位调制的单频激光对光学谐振腔进行探测, 由于谐振腔的谐振中心附近的复反射系数表现出显著的相位变化, 入射的相位调制探测光反射后经自干涉表现出同频的强度调制效果, 且当探测激光中心频率低于或高于谐振中心频率时, 该强度调制信号的相位相反. 对该反射光强度信号进行鉴相处理后, 探测激光频率低于或高于谐振中心频率时对应的鉴相输出电信号符号相反, 我们将该输出信号称为鉴频误差信号 (error signal)^[13], 其表征了探测激光频率与待测谐振腔谐振中心频率的偏差. 谐振中心附近完整的误差信号曲线如图 2 中两数字信号处理部分输出所示, 该曲线为以谐振频率点为对称点呈中心对称, 因此在谐振频率处, 误差信号的幅度为 0, 且在谐振频率附近信号幅度与探测激光频偏线性相关. 本方案中, 由于 PDH 解调技术中引入了频率相对较高的调制与解调, 把对反射光强度信号的处理从低频部搬移到高频区, 可显著降低激光器强度噪声、电子器件的低频噪声等带来的干扰.

系统的探头部分包含两个相同参数的 FFPI, 其中一个为传感元件, 另一个为参考元件. 传感器布设时, 待测应变施加在传感元件上, 而参考元件平行放置于传感元件附近且与外界应变隔离. 由于两者参数相同, 其谐振频率变化对温度的灵敏度系数相等. 故当环境温度变化时, 两者的谐振频率值将分别发生相同数量的漂移, 而其差值不变; 若传感元件上的轴向应变发生变化, 则其谐振频率发生相应改变, 但参考元件由于与外界应变隔离其谐振频率不受影响, 因此两谐振频率差发生改变. 也就是说, 参考元件的引入可补偿探头温度变化对应变测量的干扰, 两元件谐振频率的相对量 (差值) 对应待测应变信号. 除此之外, 激光器长期工作时, 其工作波长可能发生漂移, 其对系统的影响也表现为所测得的两谐振频率发生相同漂移, 该项干扰同样可由参考元件有效去除.

系统运行时, 激光器工作在线性扫频模式下并不断重复. 激光器的扫频范围必须大于 FFPI 的自由光谱范围 (FSR), 以保证扫频过程中探测到至少一个谐振峰. 每次扫频完成后, 两 FFPI 反射的光强度信号经 PDH 解调得到两条误差信号曲线, 如

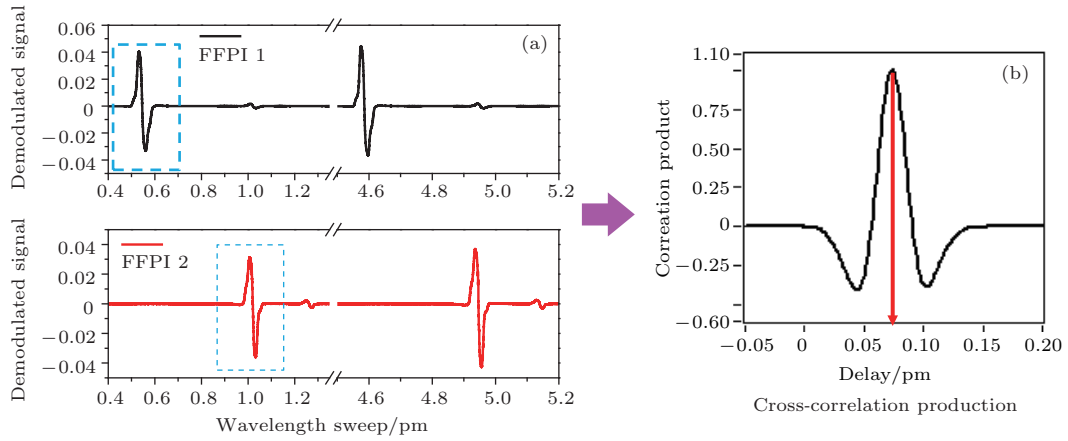


图3 激光器单次扫频测得的误差信号曲线及其互相关结果^[11] (a) 两光纤 F-P 干涉仪经 PDH 解调所得误差信号; (b) 两误差信号的互相关曲线

Fig. 3. (a) Measured PDH demodulation error signals from the FFPIs; (b) their cross-correlation curve^[11].

图3(a)所示. 由于激光器线性扫频, 该曲线横轴可折算为激光波长(在较小的波长范围内, 激光波长变化线性对应激光频率变化, 如1550 nm波长附近, 1 pm的波长差即对应125 MHz频率差), 而两FFPI谐振点的波长差可通过互相关法计算得到^[14]. 如图3(b), 两曲线互相关结果的峰值点对应的横轴坐标即两FFPI谐振点波长差. 该结果除以FFPI的应变灵敏度系数(本实验中为1.2 pm/ $\mu\epsilon$)得到最终的应变变化量.

图4为实验室环境下测得的零应变状态下传感元件与参考元件的谐振波长与两者之差. 如图4(a)所示, 两者的谐振峰中心波长均随环境温度改变而发生漂移, 但由于两元件的温度灵敏度系数相同, 因此其差值保持不变, 如图4(b). 曲线中出现的四处跳变来源于传感元件或参考元件的某个谐振峰漂移出扫频激光的探测范围. 但由于该波长跳变为固定量, 其值等于FFPI两谐振峰间波长差, 即其FSR, 因此对测量结果不产生影响. 去除该模式切换所致的跳变后, 计算175 min内测得数据的标准差, 得其波长分辨率为0.0054 pm, 相应的应变分辨率为4.5 n ϵ . 传感器的测量范围由传感元件的高反射区谱宽决定, 本实验所采用FFPI在频谱上的高反射区宽度大于0.25 nm, 对应的测量范围超过200 $\mu\epsilon$.

另外, 在该方案中, 激光器的扫频线性度与可重复度为影响测量误差的主要因素^[11]. 其中扫频线性度指扫频过程中单位时间内激光绝对频率变化的稳定性, 而可重复度指各次扫频起始时刻激光绝对频率的稳定性; 任何扫频线性度与扫频可重复

度的不理想均会在时间至激光频率折算时引入误差, 直接导致传感器的分辨率与精度下降. 因此, 可针对激光器的扫频性能进行优化, 以进一步提高传感器性能. 如文献[15]中通过单边带光强度调制的外调制式光源对该系统进行改进, 在实验室环境下实现了0.67 n ϵ 的应变分辨率.

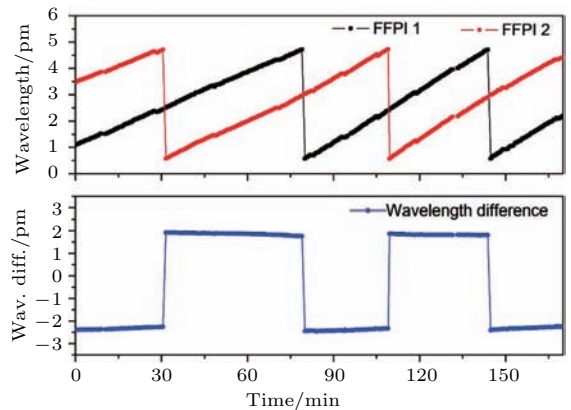


图4 实验中测得的传感元件与参考元件的谐振峰波长及两者差值^[11] (a) 传感元件与参考元件的谐振峰波长; (b) 两谐振峰波长差值

Fig. 4. Experimental results^[11]: (a) Detected resonance wavelengths of two FFPIs, respectively; (b) the resonance difference extracted by cross-correlation.

3.2 基于强度调制边带探测与频率反馈锁定技术的解调方案

由3.1节所述方案及讨论可知, 限制该系统的应变测量分辨率的最主要因素为激光器的扫频线性度与可重复度. 若希望降低或消除此误差, 除可对扫频光源部分进行改进之外, 还可以针对整个系统方案进行改进设计. 为此, 我们提出了基于

强度调制边带探测与频率反馈锁定技术的解调方案^[16], 消除了激光器扫频性能的缺陷对传感器性能的影响。

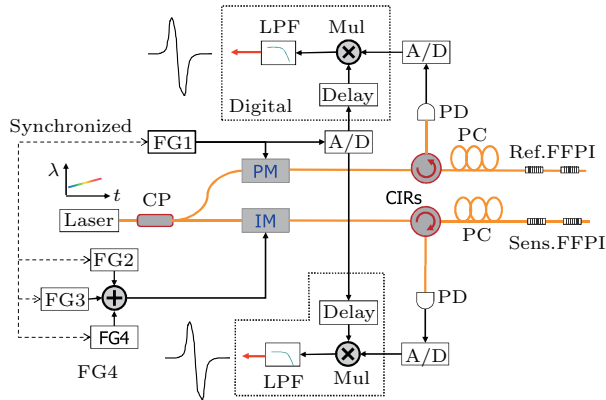


图5 基于强度调制边带探测的高精度应变传感器系统方案^[16]

Fig. 5. System configuration with sideband interrogation method^[16].

强度调制边带探测式高精度应变传感器系统如图5所示. 系统光源部分采用窄线宽可调谐激光器, 激光器输出由光耦合器一分为二, 其中一路(称之为参考路)首先通过光相位调制器(PM), 后经CIR进入参考FFPI(Ref. FFPI); 干涉仪的反射信号再经光环行器至PD, PD输出电信号再经数字域混频及低通滤波后由计算机获取. 光耦合器的另一路输出(称之为传感路)与参考路不同, 其输出光先通过一个光强度调制器(IM)再由另一CIR导入传感FFPI(Sens. FFPI); 在此之后传感路的系统结构与参考路相同. 参考路中的光相位调制器由信号发生器(FG1)产生的角频率为 Ω_M 正弦波驱动, 用于后续的PDH信号解调; 而传感路中的光强度调制器则由多个信号发生器(FG2, FG3, FG4)分别产生的角频率为 $\Omega_S - \Omega_M$, Ω_S , $\Omega_S + \Omega_M$ 的正弦信号叠加后驱动, 同时三路正弦信号的幅度与相位关系满足一定条件^[13,16], 使得调制器输出等效于角频率为 Ω_M 的相位调制与角频率为 Ω_S 的强度调制的叠加, 其频谱如图6所示. 本方案中的传感探头部分与3.1节所述方法一致.

该系统相比3.1节所述方案, 不同之处在于传感路中引入了光强度调制环节^[16]. 频率为 Ω_S 的光强度产生的一阶调制边带等效于对载波进行频率为 $\Omega_S/2\pi$ 的移频. 由前面讨论可知, 传感器的应变读数可由传感元件与参考元件的谐振频率差得到; 若这个频率差正好等于强度调制产生的移

频 $\Omega_S/2\pi$, 在光源扫频过程中的某一时刻, 由载波进行探测的参考FFPI谐振中心与由强度调制边带进行探测的传感FFPI谐振中心将同时出现, 如图6中的情况^[16]. 这样, 待测的两FFPI间谐振频率差就可直接由强度调制频率 Ω_S 得到, 而无需通过扫频时间至激光频率折算, 从而避免了扫频线性度与扫频可重复度的不理想所引入的误差.

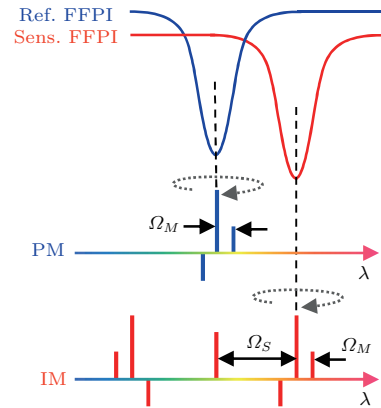


图6 由载波及强度调制边带分别探测两FFPI时的频谱示意图^[16]

Fig. 6. Simultaneous interrogation of the two FFPIs with the carrier and one of the first order sidebands^[16].

上述方法从强度调制频率 Ω_S 得到待测谐振频率差的前提是扫频过程中参考元件谐振中心与传感元件谐振中心同时出现, 即强度调制产生的移频 Ω_S 与谐振中心频率差相等. 因此, 系统工作时, 相位调制频率 Ω_M 始终固定, 强度调制频率 Ω_S 则不断调整. 由于谐振中心频率差随着待测量不断改变, 须引入反馈控制环节使 Ω_S 始终跟随谐振中心频率差的变化. 实际上, 由于待测应变不断变化, 每次扫频中参考元件谐振中心与传感元件谐振中心的出现时间点存在极小的时间差, 扫频完成后根据该时间差对 Ω_S 做相应调整, 即可使得强度调制移频 Ω_S 始终跟随应变变化导致的谐振中心频率差改变. 该控制系统的反馈带宽由激光器扫频的重复频率决定, 即单位时间内激光器完成扫频过程的数目. 不同于3.1节中方案, 本方案中不需要激光扫频范围超过FFPI的FSR, 只需覆盖谐振峰附近的极小范围即可. 因此, 扫频激光器可工作在很高的重复频率下, 与之相应的高反馈带宽把用于反馈的谐振中心出现时间差所引入的测量偏差压制到极低.

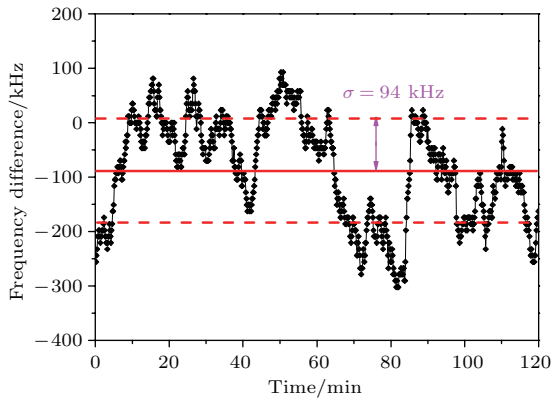


图7 探头处于零应变状态下, 2 h内测得的谐振中心频率差的变化曲线 [16]

Fig. 7. Extracted frequency difference between demodulated signals over 2 h [16].

探头处于零应变状态时, 该系统测得的两FFPI间谐振中心频率差曲线如图7所示. 在120 min的测量时间内, 这段数据的标准差为94 kHz, 对应的应变分辨率为0.8 nε. 关于系统的测量范围, 虽然应变结果由强度调制频率Ω_S算出, 但只要Ω_S的可调节范围大于参考元件的自由光谱范围, 即可由系统自动控制探测光载波在参考元件的不同谐振峰之间切换, 并将Ω_S修正为Ω_S + n·Ω_{FSR}再进行应变换算 [16], 其中n为整数, Ω_{FSR}为参考FFPI的自由光谱范围对应的角频率. 这样的配置使得系统能够实现与3.1节中方案相同的测量范围.

3.3 双反馈回路式高精度光纤应变传感系统

前面介绍的两种扫频式高精度光纤应变传感系统实现方案, 其性能均较大程度地受限于扫频激光器的重复速率. 由于上述方案中所提到的鉴频误差信号本身即可直接反映探测激光与谐振中心的频率偏差, 因此可以基于该误差信号直接对激光频率进行反馈调谐, 以实现激光频率与谐振频率的快速、精确对准. 大多数基于PDH技术的光纤应变传感器即基于此原理 [17-19], 该类系统通常以可调谐光源探测光学谐振腔型传感元件, 并引入相位调制与同步鉴相环节以获取鉴频误差信号, 误差信号输出PID控制器后对激光器进行反馈调谐构成闭环回路, 实现频率锁定. 通常地, PDH式光纤应变传感器能够实现比扫频式光纤应变传感器更高的采样率, 因此常用于高精度动态应变信号传感 [17,18]. 由于静态/准静态应变信号传感需要额外的参考通

道, 而经典的PDH式光纤应变传感器实现方案只可测量单个通道, 因此我们将强度调制边带技术与PDH技术相结合, 提出了双反馈回路式高精度光纤应变传感系统 [20], 以实现更高精度、更高采样率的静态/准静态光纤应变传感器.

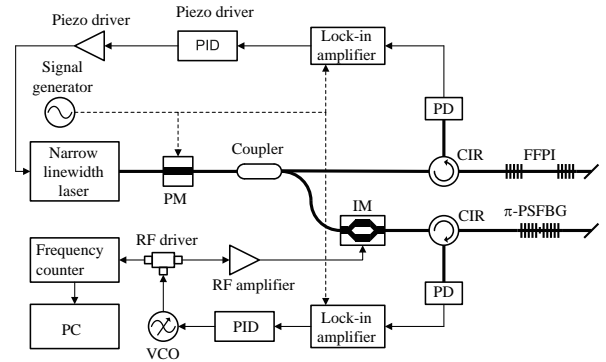


图8 双反馈回路式高精度光纤应变传感系统方案 [20]

Fig. 8. System configuration for dual feedback-loop based high resolution quasi-static strain sensor [20].

双反馈回路式高精度光纤应变传感系统的实现方案如图8所示. 窄线宽可调谐激光器 (narrow linewidth laser) 输出激光经PM后由光耦合器 (coupler) 分为两路, 其中一路经CIR进入作为参考元件的FFPI, 激光被其反射后再次经光环行器进入PD. PD输出电信号由锁定放大器 (lock-in amplifier) 进行鉴相得到参考路的误差信号, 该误差信号进入PID控制器产生激光器反馈信号后, 经线性放大器放大后对激光器进行反馈调谐, 构成了第一闭环回路. 该闭环回路与经典PDH式传感器结构一致, 其功能即借助参考元件的误差信号, 将激光频率锁定在参考元件的某个谐振峰上. 参考FFPI的谐振峰及其误差信号如图9(a)所示.

光耦合器的另一路输出连接光IM, 经强度调制后的激光同样经光环行器后进入作为传感元件的π相移光栅, 其反射光再经环行器后由另一光探测器接收, 其输出电信号由另一锁定放大器完成鉴相, 产生传感路的误差信号. 该误差信号进入另一PID控制器, 产生压控振荡器反馈信号, 即该反馈信号接入压控振荡器 (VCO) 的频率控制端口以调谐其输出的射频信号频率. 压控振荡器输出的射频信号由功分器 (RF divider) 分为两路后, 其中一路经放大后连接至光强度调制器. 这一结构组成了系统的第二闭环回路. 功分器的另一路输出接入射频信号频率计数器 (frequency counter), 其计数结果由计算机获取.

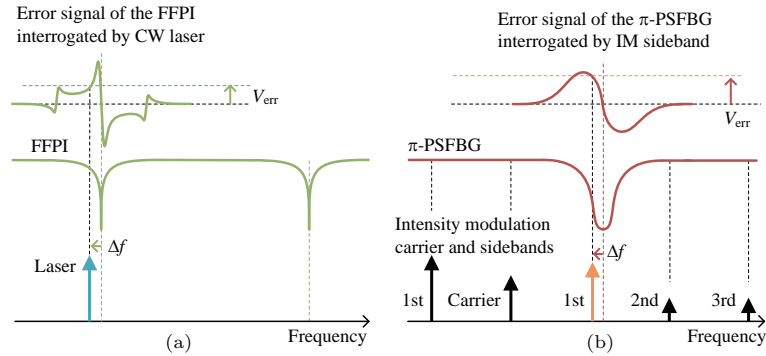


图9 参考元件与传感元件的频谱示意图及其误差信号^[20] (a) 激光载波探测参考元件(光纤 F-P 干涉仪); (b) 强度调制边带探测传感元件(π 相移光栅)

Fig. 9. Error signals from the FFPI and the π -PSFBG in the interrogation^[20]: (a) The phase-modulated laser for the interrogation of the reference FFPI; (b) one first-order sideband of intensity modulation of the laser for the interrogation of the π -PSFBG.

第二闭环回路完成一阶强度调制边带至 π 相移光栅谐振峰的锁定,如图9(b)所示.传感路误差信号表征了强度边带与相移光栅谐振中心的频率差, PID 控制器基于该频率差对压控振荡器输出的射频信号频率进行反馈控制.由于一阶强度调制边带与激光器输出光的频率差即为调制频率,因此对调制频率的反馈调谐可将该一阶边带锁定至 π 相移光栅谐振峰中心.此时,该调制频率即 π 相移光栅谐振频率与参考 FFPI 谐振频率的频率差值,对应传感元件的应变变化.系统中作为参考元件的 FFPI 与作为传感元件的 π 相移光栅采用同种型号光纤,故两者的温度灵敏度系数及应变灵敏度系数均相同.与前述方案类似,当环境温度变化时,两者的谐振频率发生相同改变但其频率差不变,这时第一反馈回路状态改变而第二反馈回路状态不变,消除温漂影响;而当 π 相移光栅上应变发生变化时,两器件的谐振频率差改变,这时第二反馈回路对调制频率进行相应调整,使一阶边带始终锁定在 π 相移光栅的谐振中心.射频信号频率计数器能够快速、精确地获取压控振荡器输出的射频信号频率,经折算后即可得到最终的应变信息.

由于系统中两个反馈回路均为连续调谐,即完全去除了扫频环节,因此系统的反馈带宽得到了显著提高,从而能够得到更高的传感精度与采样速率.图10为该系统工作在500 Samples/s 采样速率下,分别采集频率为1, 10, 100 Hz, 幅度为 $10^{-8}\epsilon$ 的正弦应变信号的功率谱密度曲线.可见,三条曲线分别在1, 10, 100 Hz 频点处出现幅度为 $10^{-8}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 的尖峰,表明该系统的响应带宽高于

100 Hz, 足以覆盖整个次声波频段.系统在1 Hz 频率处的噪声功率谱密度小于 $10^{-10}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$, 在10 Hz 频率处噪声功率谱密度小于 $10^{-11}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$.与3.2节中讨论的情况类似,系统的工作范围同样由参考元件的工作范围决定,其最大应变测量范围大于200 $\mu\epsilon$.即该系统可同时实现高分辨率、高采样速率和大测量范围的静态/准静态应变信号检测.

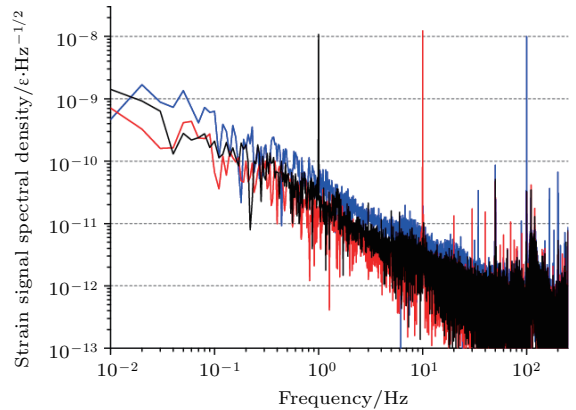


图10 施加不同频率应变信号时传感器测量结果对应的功率谱密度曲线^[20] (黑色曲线为1 Hz 应变信号; 红色曲线为10 Hz 应变信号; 蓝色曲线为100 Hz 应变信号)

Fig. 10. Frequency domain results of measuring sinusoidal strain signals with different frequencies^[20]. The black curve, 1 Hz; red curve, 10 Hz; blue curve, 100 Hz.

3.4 闭环时分复用式多通道高精度光纤应变传感系统

在地壳形变观测中的应变场分布测量、三维应变张量测量等应用场合中,往往需要多个一维线应变传感通道以获取足够信息,因而对传感器的可复用性提出了要求.对于光纤应变传感器,主

要的复用方式可分为波分复用(WDM)与时分复用(TDM)两大类. 与常规光纤光栅应变传感器不同, 高精度光纤应变传感系统由于其自身的复杂性, 对其进行复用的技术难度更大, 实现成本更高. 针对高精度光纤应变传感的波分复用技术已见于报道^[21], 但由于其仅共用光纤传输通道, 各通道仍占用独立的光源与解调系统, 导致其成本过高, 实际应用受到很大限制. 而光纤应变传感器的时分复用可大幅降低其系统成本, 因此近年来也得到了快速发展^[22]. 但截至目前, 常规光纤传感器的时分复用方案均无法直接移植于高精度光纤应变传感器. 因此, 我们基于强度调制边带探测、频率反馈控制、脉冲时分探测等技术, 提出了针对高精度光纤应变传感器的时分复用方案^[23].

由于FFPI, π 相移光纤光栅等用于高精度光纤应变传感的光学元件为高反射率型, 无法直接串联复用, 因此多个传感器的复用通常采用星型结构. 图 11 (a) 为时分复用式高精度光纤应变传感系统的探头阵列示意图. 该探头阵列中包含一个 M 端口光纤耦合器, 耦合器的每路输出均连接长度不等的延时光纤后接入 π 相移光纤光栅. 当单个探测光脉冲进入光纤耦合器后, 由于各光路中耦合器至

光栅的光程不同, 各个光栅产生的反射光脉冲回到耦合器入射端所经历的延时也不同. 只要各光路间光时延的差值均大于脉冲持续时间, 所有的反射光脉冲即可相互不重叠地由耦合器入射端口返回, 构成反射脉冲串. 之后, 根据每条光路各自引入的延时即可区分脉冲串中各个脉冲对应的光栅.

时分复用式高精度光纤应变传感器的系统方案如图 11 (b) 所示. 窄线宽激光器的输出依次连接 PM, IM、声光开关(AOM). 其中, PM 由固定频率正弦电信号驱动以获取鉴频误差信号, TM 由可快速调谐频率的射频信号发生器(RFSG)驱动以产生探测边带, 声光开关由脉冲信号发生器控制以生成探测激光脉冲. 声光开关的输出连接探头阵列, 探头阵列由多个光纤耦合器(couplers)、不同长度的延时光纤(delay fiber rolls)、偏振控制器(PCs), 以及多个相同型号的 π 相移光纤光栅组成. 各个光栅产生的反射光脉冲串再经过光耦合器进入光电探测器(PC)转为电信号. 计算机系统通过数据采集设备(DAQ)获取光电探测器输出信号后对其进行数字域解调, 根据解调结果对射频信号发生器进行调谐, 实现对各个传感通道的闭环控制.

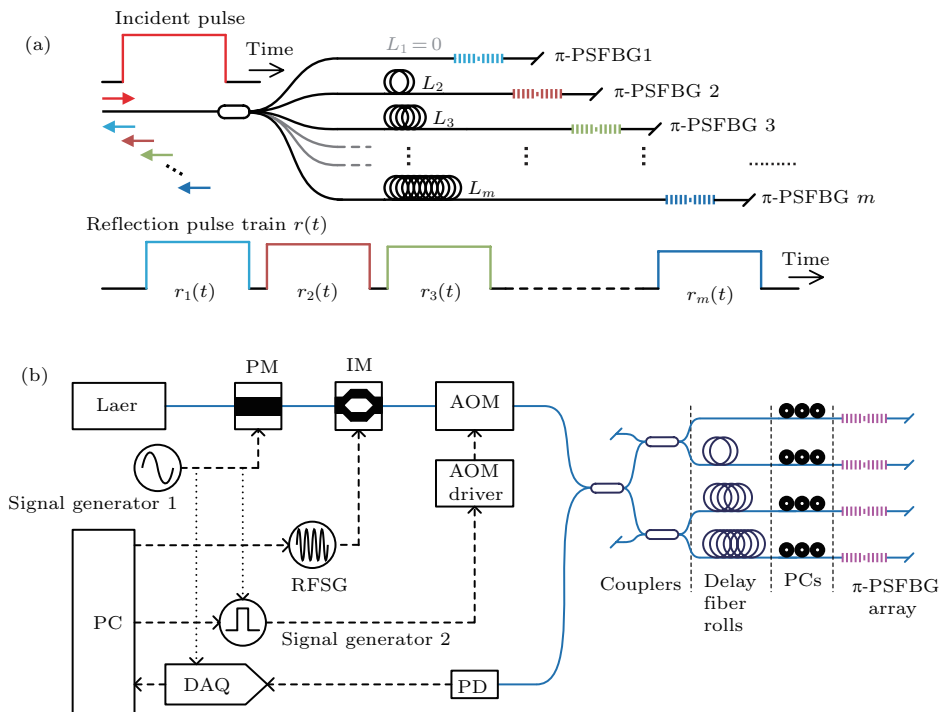


图 11 高精度光纤应变传感器的时分复用原理图^[23] (a) 传感器阵列拓扑结构示意图; (b) 时分复用式高精度光纤应变传感系统方案

Fig. 11. The Time-division multiplexing scheme^[23]: (a) Structure of the sensor array; (b) the interrogation system.

系统通过时分闭环控制的方式实现 M 个传感通道中应变信息的同时采集^[23]. 系统运行时以传感周期为单元对各个传感通道进行采样, 在一个传感周期内进行 M 次脉冲探测. 以每个传感周期内第一次探测为例, 系统控制射频信号以 f_1 的频率驱动强度调制器, 产生的调制边带用于探测 1 号 π 相移光纤光栅的谐振峰. 随后数字采集装置获取整个反射脉冲串, 计算机根据相应的光延时从整个反射脉冲串中截取出 1 号光栅的反射脉冲信号, 并对该段信号进行数字鉴相, 以获取相应的鉴频误差信号 e_1 . 只要探测边带位于谐振频率附近, 即可由 e_1 得到探测边带与相移光纤光栅谐振频率的偏差 Δf_1 . 类似地, 每次脉冲探测均以某个射频信号 f_k 产生调制边带探测 k 号光栅, 并分别获取探测边带与相移光栅谐振中心的频偏 Δf_k . 这样, 在每个传感周期中以一组调制频率 (f_1, f_2, \dots, f_M) 探测所有 M 个 π 相移光纤, 并得到一组相应的频偏 $(\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_M)$. 此后一个传感周期中将之前得到的频偏用于修正原调制频率使探测边带跟随各光栅谐振中心, 即新调制频率 $f'_k = f_k + \Delta f_k$, 而这组新调制频率 $(f'_1, f'_2, \dots, f'_m)$ 又可得到新的一组频偏 $(\Delta f'_1, \Delta f'_2, \dots, \Delta f'_m)$. 系统以此模式连续运行, 对各个探测边带不断进行调整, 使得其均锁定在相应的光栅谐振中心上, 即 M 个时分闭环控制回路. 该过程中得到的 M 个频率序列, 即表征了每个 π 相移光纤光栅的谐振中心频率变化情况.

由于系统中各 π 相移光纤光栅均相同, 因此可从中任取一个作为参考以补偿环境温度漂移, 而不需额外引入参考元件. 剩余 π 相移光纤光栅均可作为传感元件, 进行应变折算时, 将各传感通道对应的频率序列减去参考通道对应的频率序列后, 除以 π 相移光纤光栅的应变灵敏度系数即可. 图 12 为 $M = 4$ 时, 各传感通道测得应变信号的功率谱密度. 测量时取 1 至 3 号光栅为传感元件, 其中 1, 2 号光栅施加恒定应变, 3 号光栅施加频率 1 Hz, 幅度为 40 n ϵ 的正弦应变信号; 对 4 号光栅进行应变隔离作为参考元件. 由图可知, 通道 3 对应曲线在 1 Hz 频点处出现的尖峰与实际信号相符, 且由图中 1 Hz 频点处放大区域知各通道间未观测到串扰. 在 0.1—50 Hz 频段内各个通道的噪声功率谱密度均小于 0.8 n ϵ /√Hz, 同时, 在低于 0.1 Hz 的频段噪声功率谱密度保持在纳应变级. 系统的采样率受限于射频信号发生器的调谐速率, 为 100 Samples/s.

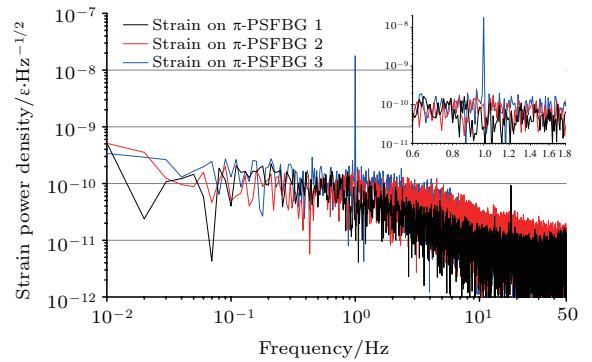


图 12 传感器各通道测量结果的功率谱密度曲线^[23]

Fig. 12. The power density spectra of the measured results^[23].

4 现场实验

基于高精度光纤应变传感器技术, 我们与日本东京大学合作, 在东京大学地震研究所所属的油壶湾地壳形变观测站开展了现场测试^[24]. 该观测站位于日本神奈川县三浦半岛, 距离东京约 60 km. 如图 13 所示, 实验场位于海岸线附近略高于海平面的一处人工设施, 该设施水平深入山体, 其内部安装有三台长度均为 38 m 的伸缩应变计 (如图 13 中 Sect. A 所示位置), 此外该实验场还配备了潮位计等一系列测量设备. 由于潮位不断涨落并与近海海岸发生作用, 海岸线附近的地壳将随之发生微小形变. 为测量这一微小变化, 我们将高精度光纤应变传感器部设于该测试场 (如图 13 中 Sect. B 所示位置), 记录下其测量结果并与伸缩应变计、潮位计等的测量结果进行对比, 以检验分析其实际效果.

现场实验中采用的高精度光纤应变传感系统方案与 3.2 节中所述方案基本一致 (如图 14), 改进之处在于将原方案中作为参考元件的 FFPI 更换为同种类型光纤的光纤环 (fiber ring), 并将传感元件更换为 π 相移光纤光栅, 以进一步提高系统的测量范围^[24]. 其系统工作流程与应变解调原理不再赘述. 作为传感元件的 π 相移光纤光栅在施加预应变张紧后, 两端分别固定于相距 1 m 的两个不锈钢锚, 不锈钢锚插入基岩约 30 cm 固定; 作为参考元件的光纤环与外界应变隔离, 放置于传感元件附近. 设施内部由于深入山体并与外界隔离, 其温度变化极为缓慢 (年温差不大于 1 °C), 且测试期间设施内部及附近无人干扰.

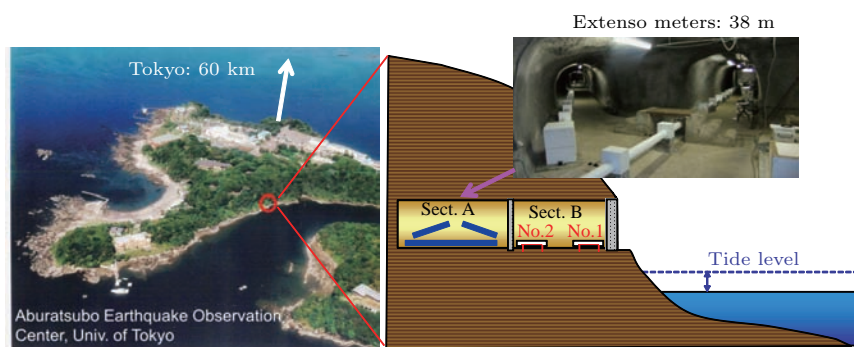


图 13 传感器现场测试场地示意图 [24]

Fig. 13. Field experiment configuration for measurement of crustal deformation at Aburatsubo Bay, Kanagawa, Japan.

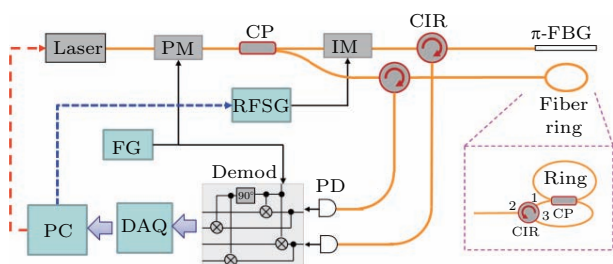


图 14 现场实验中所使用传感器的系统方案 [24]

Fig. 14. System configuration of the sensor in field experiment [24].

图 15 给出了 2014 年 9 月 1 日起至 2014 年 9 月 8 日一周内的测量数据. 其中, 图 15 (a) 为光纤传感器测得应变与实测潮位的比较, 可见两者趋势一致. 另外, 可观察到应变曲线相比潮位曲线存在滞后, 这与潮位造成地壳形变的传递模型相符. 图 15 (b) 为光纤传感器测得应变与伸缩应变计测得应变的比较, 两者的变化趋势一致, 其幅度的差异主要是传感器的基线长度及布设位置不同造成的. 光纤应变传感器的基线长度为 1 m, 其布设位置更靠近海岸线, 因而测量到的海岸基岩形变更大. 伸缩应变计的基线长度为 38 m, 所测量到的应变为该基线范围内应变的平均值. 光纤应变传感器的基线长度远小于伸缩应变计, 表明光纤应变传感器在较小基线长度上实现高精度应变测量的有效性.

此外, 图 16 中还给出了 2015 年 3 月 17 日 23 时 48 分日本千叶县发生里氏 3.9 级地震前后的应变测量数据. 该地震震源深度为 100 km, 震中距实验场约 100 km, 从曲线中可观察到地震波导致的地壳应变剧烈变化. 由于光纤应变传感器的快速响应特性, 其能够同时测量地震波频段的应变信号与更大时间尺度上的准静态应变信号 (如潮汐致地壳应变), 这一点也体现了高精度光纤应变传感器的优良特性.

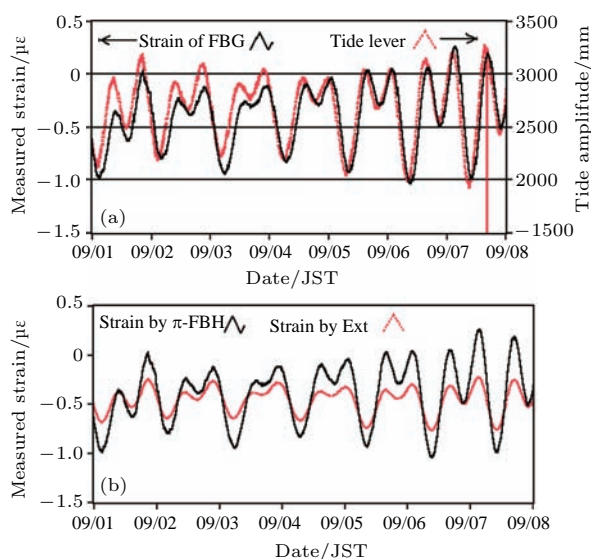


图 15 2014 年 9 月 1 日至 8 日期间日本神奈川县油壶湾地壳型变观测站传感器测得的潮汐致地壳形变数据 [24] (a) 传感器测得应变数据及潮位数据 (9 月 7 日的个别潮汐观测数据缺失, 显示为 0 mm); (b) 传感器测得数据与伸缩计测量结果之对比.

Fig. 15. Field experimental results at Aburatsubo Bay, Kanagawa, Japan, during September 1–8, 2014 [24]: (a) Measured strain data and oceanic tide level over one week (the red line on 7 Sep. is due to the loss of data); (b) comparison of measured data and external extensometer.

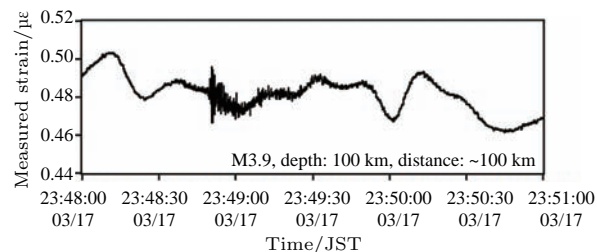


图 16 2015 年 3 月 17 日 23 时 48 分日本千叶县发生里氏 3.9 级地震前后传感器测得的应变数据 [24]

Fig. 16. Data acquired by the sensor around an earthquake (M3.9 at 23 : 48, March 17, 2015 (JST) at Chiba, Japan) [24].

5 结 论

面向地壳形变观测的高精度光纤应变传感器是光纤传感器技术的重要分支. 本文通过介绍一系列的高精度准静态光纤应变传感器的实现方案, 阐述了该研究方向近年来的发展路线, 对其中的关键技术环节进行说明及讨论, 并给出了高精度准静态光纤应变传感器的现场测试效果. 实验结果证明, 该技术相比传统的地壳形变测量技术存在诸多优势, 有望成为地球物理学研究中地壳微弱形变观测等科研方向的新一代有力工具.

参考文献

- [1] Chouet B A 1996 *Nature* **380** 309
- [2] Crescentini L, Amoruso A, Scarpa R 1999 *Science* **286** 2132
- [3] Gladwin M T, Hart R 1985 *Pure Appl. Geophys.* **123** 59
- [4] Berger J, Lovberg R H 1970 *Science* **170** 296
- [5] Rao Y J 1997 *Measur. Sci. Technol.* **8** 355
- [6] Meltz G, Morey W W, Glenn W H 1989 *Opt. Lett.* **14** 823
- [7] Davis M A, Kersey A D 1994 *Elect. Lett.* **30** 75
- [8] Liu Q, Tokunaga T, He Z 2011 *Opt. Exp.* **19** 20214
- [9] Morey W W, Bailey T J, Glenn W H, Meltz G 1992 *Digest of Conference on Optical Fiber Communication* WA2
- [10] Erdogan T 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1277
- [11] Liu Q, Tokunaga T, He Z 2011 *Opt. Lett.* **36** 4044
- [12] Dreve R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. 1983 *Applied Physics B-Photophysics and Laser Chemistry* **31** 97
- [13] Black E D 2001 *Am. J. Phys.* **69** 79
- [14] Huang C, Jing W C, Liu K, Zhang Y M, Peng G D 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 707
- [15] Huang W Z, Zhang W T, Li F 2015 *Opt. Lett.* **40** 1406
- [16] Liu Q, Tokunaga T, He Z 2012 *Opt. Lett.* **37** 434
- [17] Gatti D, Galzerano G, Janner D, Longhi S, Laporta P 2008 *Opt. Exp.* **16** 1945
- [18] Chow J H, McClelland D E, Gray M B, Littler I C M 2005 *Opt. Lett.* **30** 1923
- [19] Lam T T Y, Chow J H, Shaddock D A 2010 *Appl. Opt.* **49** 4029
- [20] Chen J, Liu Q, Fan X, He Z 2016 *Opt. Lett.* **41** 1066
- [21] Littler I C M, Gray M B, Chow J H 2009 *Opt. Express* **17** 11077
- [22] Wang Y M, Hu C C, Liu Q, Guo H Y, Yin G L, Li Z Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 204209 (in Chinese) [王一鸣, 胡陈晨, 刘泉, 郭会勇, 殷广林, 李政颖 2016 物理学报 **65** 204209]
- [23] Chen J, Liu Q, Fan X, He Z 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 2311
- [24] Liu Q, He Z, Tokunaga T 2015 *Opt. Exp.* **23** A428

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

Ultrahigh resolution fiber optic strain sensing system for crustal deformation observation*

He Zu-Yuan[†] Liu Qing-Wen Chen Jia-Geng

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China)

(Received 8 March 2017; revised manuscript received 27 March 2017)

Abstract

Due to the advantages of high resolution, low cost, small size, easy deployment and capability of multiplexed sensing, the recent developed optical fiber grating sensors provide powerful tools for crustal deformation monitoring. This paper reviews the development of several types of fiber-optic sensors with ultrahigh resolution in quasi-static domain. The fiber Bragg grating based Fabry-Perot interferometers and the π -phase-shifted fiber Bragg gratings which are used as sensing components in the high resolution sensors are introduced. Some novel techniques such as interrogating the sensing components with intensity modulation sideband, dual feedback-loop structure for high bandwidth/large measurement range sensing, and the time-domain multiplexing of the high resolution quasi-static strain sensor are discussed in detail. Each sensing scheme with both operation process and achieved performances are given. The implementation of fiber grating sensors for *in-situ* measurement of crustal deformation and the results are also introduced. Compared with the traditional methods used in crustal deformation observation, the high-performance fiber optic strain sensors mentioned in the paper shows great potentials in providing wider measurement approaches in geophysical researches.

Keywords: fiber-optic sensing, crustal deformation measurement, high resolution, fiber Bragg grating

PACS: 42.81.Pa, 42.79.Dj, 07.10.Pz

DOI: [10.7498/aps.66.074208](https://doi.org/10.7498/aps.66.074208)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61327812, 61307106, 61620106015).

[†] Corresponding author. E-mail: zuyuanhe@sjtu.edu.cn