

高精度准分布式光纤光栅地震检波解调系统的研究*

乔学光²⁾¹⁾ 丁锋^{1)3)†} 贾振安¹⁾ 傅海威¹⁾ 菅旭东¹⁾ 周锐²⁾ 宋娟¹⁾

1) (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)

2) (西北大学, 西安 710069)

3) (中国石化中原油田石油化工总厂, 濮阳 457061)

(2010年3月17日收到; 2010年8月20日收到修改稿)

提出了一种利用光纤超荧光光源的线性边带做边缘滤波器进行多点多参量实时测量的地震波信号解调系统. 由于光源波长检测灵敏度对解调系统的灵敏度起决定作用, 故对光源进行了优化设计, 使得光源所用的线性段斜率得到了大幅度提高. 所设计的解调系统以光源在吸收峰 1530 nm 处的两段斜边将系统分为两个部分, 各部分对应 4 个通道. 通过对其中两个通道进行地震检波模拟测量, 传感解调系统的两部分静态波长灵敏度分别为 887.5 mV/nm 和 -971.7 mV/nm, 应变分辨力分别达到了 0.95 $\mu\epsilon$ 和 0.86 $\mu\epsilon$. 解调系统采用全光结构, 解调灵敏度高, 稳定性好, 性价比高且反应速度快, 可实现对地震信号的多点多参量实时检测.

关键词: 光纤光学, 地震检波解调, 边沿滤波器, 光纤光源

PACS: 42.81. -i, 42.81. Pa, 42.81. Uv

1. 引言

石油天然气是国计民生的重要能源. 随着我国经济规模的扩大和发展速度长期保持在较高水平的增长, 我国石油资源短缺状况比较严峻, 石油供需矛盾日益加剧. 从长远看, 除了通过勘探扩大石油储量之外, 努力提高已开发油田采收率, 充分利用可采石油资源是一项势在必行且十分紧迫的任务. 地震勘探是以人工地震反射波为被测信号的一种最有效、应用最广泛的地球物理勘探方法, 主要用于石油、金属矿藏、煤炭、工程地质、水文地质和地热等的探测^[1]. 随着光纤光栅技术的成熟, 光纤 Bragg 光栅地震检波器开始应用于地震勘探中, 以其可靠性好、抗电磁干扰、抗腐蚀、能在复杂的化学环境下工作等明显优势越来越引起人们的重视^[2-7]. 光纤光栅地震检波器是通过检测光栅反射回来的布拉格波长的变化, 得到外界被测信号的信

息. 光纤光栅的传感信息是以波长编码的, 因此研究具有高灵敏度、光能利用率高、操作简单、价格低廉且适用于工程应用的波长检测技术对于光纤光栅传感器的最终应用具有重要的意义^[8-10].

本文提出了一种利用光源在 1530 nm 附近有一个较为凸起的峰, 对其进行放大并利用其产生的高斜率斜边做边缘滤波器构成准分布式实时监测的光纤光栅地震检波解调系统. 利于光源光功率高的优点, 实现了准分布式多布点多参量实时解调. 系统以光源两斜边为解调元件, 各建立了 4 个测量通道, 由于两组通道内是并联关系, 故检测的灵敏度都是相同的, 并实验验证了地震检波解调技术及系统的可行性.

2. 理论分析

边缘滤波器是指具有一定单值边沿的滤波器. 图 1 为基于边缘滤波器的线性解调原理示意图, 图中的

* 国家自然科学基金(批准号:60727004, 61077060), 国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA03Z413, 2009AA06Z203), 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), 中石油创新基金(批准号:2008D-5006-03-08)和陕西重大科技创新项目(批准号:2009ZKC01-19/2008ZDGC-14)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: dingfeng_ty@yahoo.cn

斜线是边缘滤波器的传递函数曲线. 滤波函数为

$$P(\lambda) = k\lambda + B, \quad (1)$$

式中, k 为边缘滤波器斜率, B 为常数, 均可通过实验测定. 反射率为 R_0 的布拉格光栅反射光谱近似为高斯分布, 即

$$R(\lambda, \lambda_B) = R_0 \exp \left[-4 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2} \ln 2 \right], \quad (2)$$

其中, $\Delta\lambda_B$ 为 FBG 的半峰全宽, λ_B 为中心波长. 被 FBG 反射, 并经过边缘滤波器后的光强为

$$I(\lambda_B) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_0(k\lambda + B) \times \exp \left[-4 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2} \ln 2 \right] d\lambda. \quad (3)$$

因 $R(\lambda, \lambda_B)$ 的光谱线宽远小于该线性波长范围, 故由 $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ax^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$, 有

$$I(\lambda_B) = BR_0 \sqrt{\frac{\pi\Delta\lambda_B^2}{4\ln 2}} + kR_0\lambda_B \sqrt{\frac{\pi\Delta\lambda_B^2}{4\ln 2}}. \quad (4)$$

由(4)式可知, 经 FBG 反射的光强 $I(\lambda_B)$ 与 FBG 的中心波长 λ_B 成线性关系. 因此, 通过测量反射光强 $I(\lambda_B)$ 即可求的 FBG 的中心波长 λ_B 的值.

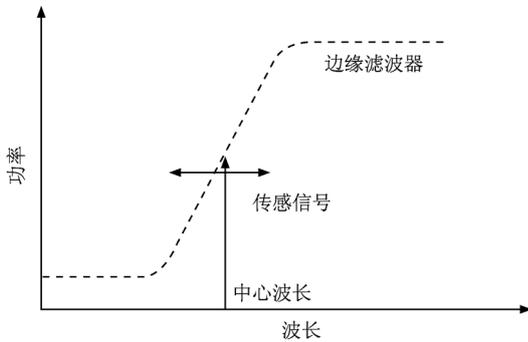


图1 边缘滤波器线性解调原理

当 FBG 受到扰动时, FBG 中心波长变为 $\lambda'_B = \lambda_B + \Delta\lambda$, 其中心波长变化量 $\Delta\lambda$ 与反射光强变化量 ΔI 之间的关系也是线性的, 为

$$\Delta I(\Delta\lambda) = kR_0 \sqrt{\frac{\pi\Delta\lambda_B^2}{4\ln 2}} \Delta\lambda. \quad (5)$$

当扰动作用在 FBG 上时, 应变与布拉格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, 则(5)式可写成

$$\Delta I(\Delta\varepsilon) = kR_0 \sqrt{\frac{\pi\Delta\lambda_B^2}{4\ln 2}} k' \Delta\varepsilon. \quad (6)$$

(6) 式为反射光强变化量 ΔI 与动态应变变化量 $\Delta\varepsilon$ 之间呈线性关系.

当扰动为周期性的正弦信号时, 即 $y = A \sin \omega t$, 则引起的传感光栅波长变化为 $\Delta\lambda = \xi \sin \omega t$, ξ 为振动幅度, ω 为振动频率, 则(5)式可写成

$$\Delta I = kR_0 \sqrt{\frac{\pi\Delta\lambda_B^2}{4\ln 2}} \xi \sin \omega t. \quad (7)$$

(7) 式为反射光强变化量与交变量间关系也呈线性关系.

3. 实验原理

我们对光源进行了专门的设计, 掺铒光纤光源主要由光抽运功率、掺铒光纤长度和工作方式决定. 掺铒光纤越长, 输出功率的谱线在长波方向将抬起, 在短波方向将有所降低, 从而实现宽带平坦的光源; 掺铒光纤越短, 在长波方向也就有所降低, 但在 1530 nm 附近的峰值会更凸起, 这样在两边形成的线性边带更陡, 光强随波长变化的灵敏度也就更高. 为获得高的输出光功率和稳定性, 解调系统中的超荧光光源采用双程后向结构. 我们对不同长度的掺铒光纤和不同抽运光功率激励下光源的输出光谱进行了比较, 实验结果发现, 7 m 时输出的斜边线性度最好, 故本实验的光源选用掺铒光纤长度为 7 m, 输出光谱如图 2 示. 可以看出光源在 1530.2 nm 两边均有一段类线性的部分, 其输出的光功率谱随波长变化而线性变化, 在一定波长范围内光功率和波长的关系是线性的, 利用这一特点可以实现解调功能. 我们对光源光谱的上升沿 1525.4—1528.4 nm 和下降沿 1531.9—1534.4 nm 范围内进行了线性拟合, 拟合曲线如图 3 (a), (b) 所示. 上升沿的线性拟合度 $R^2 = 0.9995$, 光强随波长变化的灵敏度 $K = 0.0147 \text{ mW/nm}$; 下降沿的线性拟

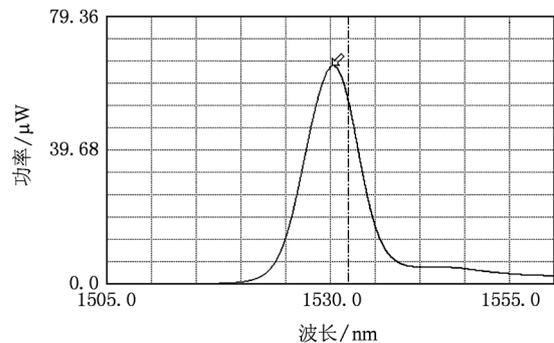


图2 超荧光光源谱密度图

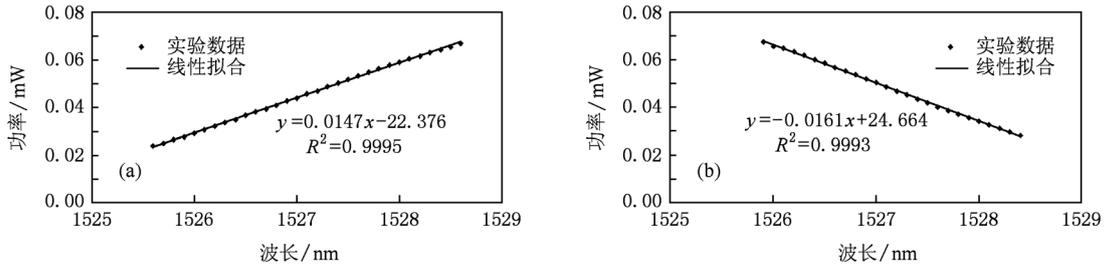


图3 光源光谱拟合曲线 (a) 上升沿;(b) 下降沿

合度 $R^2 = 0.9993$, 光强随波长变化的灵敏度 $K = -0.0161 \text{ mW/nm}$.

图4 为准分布式光纤光栅传感系统实验原理示意图. 实验由专门研制的掺铒光纤光源、耦合器、9个 1×2 耦合器(分束比为 30:70)、2个 1×4 耦合器(分束比为 20:80)、8支传感光栅(4支光栅布拉格波长靠近光源上升沿的中心位置;4支光栅布拉格波长靠近光源下降沿的中心位置)、8个光电探测器 PIN、数据采集卡 DAQ(16 bit 模拟输

入通道,250 kS/s)和计算机组成. 光纤超荧光光源发出的光经过光隔离器 ISO 和 30/70 耦合器将光源分为两束,再经过 2 个 $1/4$ 耦合器入射到 8 个通道的传感光纤光栅,传感光栅反射后形成窄带光谱被光电探测器 PIN 接收并被转化为相应的电流,该电流经电流电压转换电路转化为电压,再经低噪声放大滤波电路和数据采集系统最后进入计算机处理系统,经过一系列数据处理即可得到测量结果.

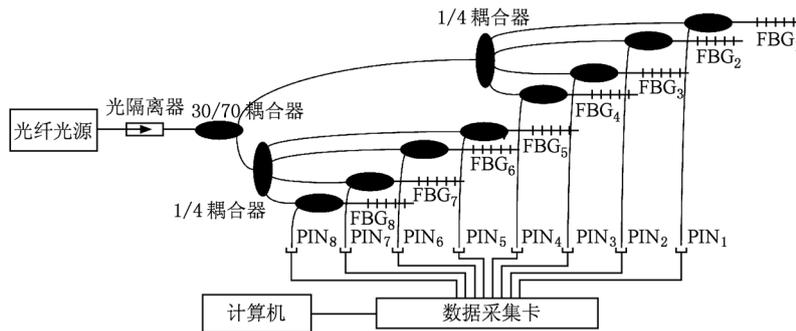


图4 准分布式光纤光栅传感系统实验原理示意图

系统具有以下特征:1) 掺铒光纤光源既是传感系统的光源,又是线性滤波器;2) 系统光被 1×2 耦合器分为 2 束,从而使系统被分为 2 个解调部分(即用光源的 2 个斜边分别作滤波器),各自又被 1×4 耦合器分为 4 束,作为 4 个传感通道;3) 各个通道各有一个传感光栅,可作为不同被测量(应变、温度、压力等)的敏感器件;4) 系统 2 部分的光功率是平均分布的,使得到达 2 部分各自的 4 个传感光栅的功率是相等的,有利于传感信号的解调.

实验时采用光源的波长调谐范围为 1525.4—1528.4 nm 和 1531.9—1534.4 nm,为了验证上述实验的可行性,我们仅对上下两部分的 FBG_1 通道和

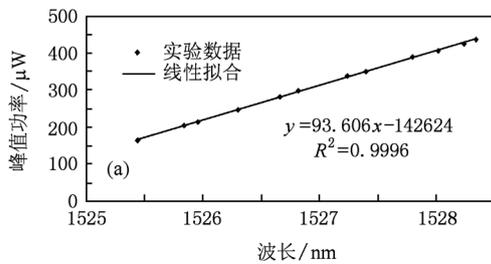
FBG_5 通道进行解调实验. 选择的 FBG_1 的布拉格波长为 1525.26 nm, FBG_5 的布拉格波长为 1532.07 nm. 我们将 2 支光栅粘贴在结构不同的等强度悬臂梁上,黏贴时并施加预应力使 2 支光栅的布拉格波长均在光源两斜边的中心位置附近. 在室温为 18.7℃,对黏贴后的光栅进行测量, FBG_1 的布拉格波长变为 1526.9 nm, FBG_5 的布拉格波长变为 1533.24 nm, $\Delta\lambda_{\text{B}} = 0.18 \text{ nm}$. 2 只光电探测器均为 GT322D InGaAs PIN 光电二极管,光谱响应范围 800—1700 nm,其响应度为 0.9 A/W,暗电流仅为 0.3 nA,响应时间为 0.3 ns,保证了测量转换电路的快速响应.

4. 实验验证及结果分析

4.1. 静态实验

静态测量时,我们通过对 FBG_1 通道和 FBG_5 通道施加不同的应力来改变悬臂梁结构地震检波器的挠度使悬臂梁发生微弯,从而使光纤光栅布拉格波长产生蓝移或红移,进而改变了光强的大小.在光谱仪(Anritsu 公司的 MS9710C 光谱仪,分辨力为 0.01 nm)中观测波长的漂移值和反射波的峰值功率,结果如图 5 所示.

FBG_1 通道数据拟合曲线如图 5(a) 示,其拟合曲线方程为 $y = 93.606x - 142624$,线性拟合度 $R^2 = 0.9996$.



FBG_5 通道数据拟合曲线如图 5(b) 示,其拟合曲线方程为 $y = -193.5x + 297220$,线性拟合度 $R^2 = 0.9995$.

由图 5 中可以看出,两通道的中心波长的漂移值与反射峰的峰值功率呈很好的线性关系.由线性拟合度可以看出,与光源的拟合度之间有偏差,主要的误差来源于随机误差(由光源的长期稳定度、光电检测器的热噪声及放大电路噪声产生)及耦合器的分光比误差.经过对传感解调系统分辨率的计算,解调的两部分静态波长灵敏度分别为 887.5 mV/nm 和 -971.7 mV/nm .经测量分析系统可分辨的最小稳定电压均约为 1 mV ,故波长的分辨力分别达到 1.1 pm 和 1 pm ,由 $\Delta\lambda_B/\lambda_B = 0.78\varepsilon$ 可得,对应的应变分辨力分别为 $0.95\mu\varepsilon$ 和 $0.86\mu\varepsilon$.

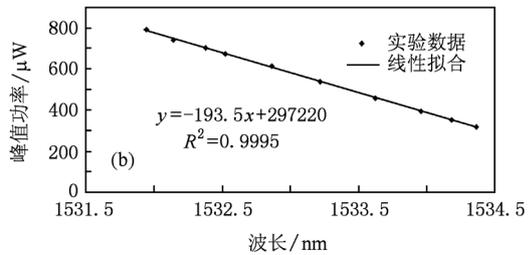


图 5 反射峰值功率与波长的拟合曲线 (a) FBG_1 功率与波长拟合曲线;(b) FBG_5 功率与波长拟合曲线

4.2. 动态实验

动态测量时,用小型精密振动台(型号 WS-Z30-40,工作频率 $0.5\text{—}3500 \text{ Hz}$,最大位移 $\pm 5 \text{ mm}$,最大加速度 $\pm 10 \text{ g}$)作地震波模拟振源,通过软件控制使其输出不同频率不同电压幅度的正弦信号来作地震波信号,把两支悬臂梁传感器固定在振动台台面上,实验时认为振动台台面与传感器同步振动,即没有迟滞现象.由于测试电路的放大倍数设置的差异,两路输出的电压基准有所不同,这样可以区分得到电压的时域谱图,便于观察.我们对 $10\text{—}48 \text{ Hz}$ 频率(幅度大小不一)的振动信号进行了测试.用 NI 公司的 USB-6211 型数据采集卡对光电转换输出的模拟电压信号采样,并将输出的数字信号传送到用 LabVIEW 软件编写的数据处理和显示测试系统中,对采集到的数据进行实时监测和分析.图 6 中仅给出了 20 Hz 和 30 Hz 的时域图和对应的频谱图.

图 6 中深色和浅色曲线分别为两通道输出的谱线图,图 6(a), (b) 是时域图, (c), (d) 是频域图.从

图 6(a), (b) 可以看出,检测到的电压信号基本都是正弦信号,说明所设计的准分布式光纤 Bragg 光栅地震检波解调系统用于测试多点地震波信号是可行的;在同一振动频率、幅度下,上下两时域曲线的幅度有所不同,这是因为传感器的结构不同.图 6(c), (d) 给出了两个频率下所对应的频谱图,可以看出频率均单一且主频强度最大,由横坐标可知正好是所加频率的频率值;由纵坐标可以看出系统的动态测量范围约为 $40\text{—}60 \text{ dB}$.两组波形的频谱噪声基本相同,说明两组电路设计的信噪比是相同的,这样有利于信号的采集和灵敏度分析.

该地震检波解调系统中,上下两部分内的 4 个通道各属于并联关系,光源的功率被均匀分配到各自的测量点,所以两部分的各自 4 通道的检测灵敏度和动态范围都是相同的.本解调系统除了测量地震波的应变变量外,还可以测量其他物理量,也可混合测量,从而实现分布式多点多参量实时测量的目的.由于采用全光纤结构设计,故解调速度主要取决于光电探测器的带宽及数据采集卡的转换速度,

故解调速度约为 $4 \mu\text{s}$. 本测量系统的测量点数目主要由光源的功率和光电探测器的最小可探测功率

决定,故在光功率足够大的情况下,系统的测量点还可以继续增多.

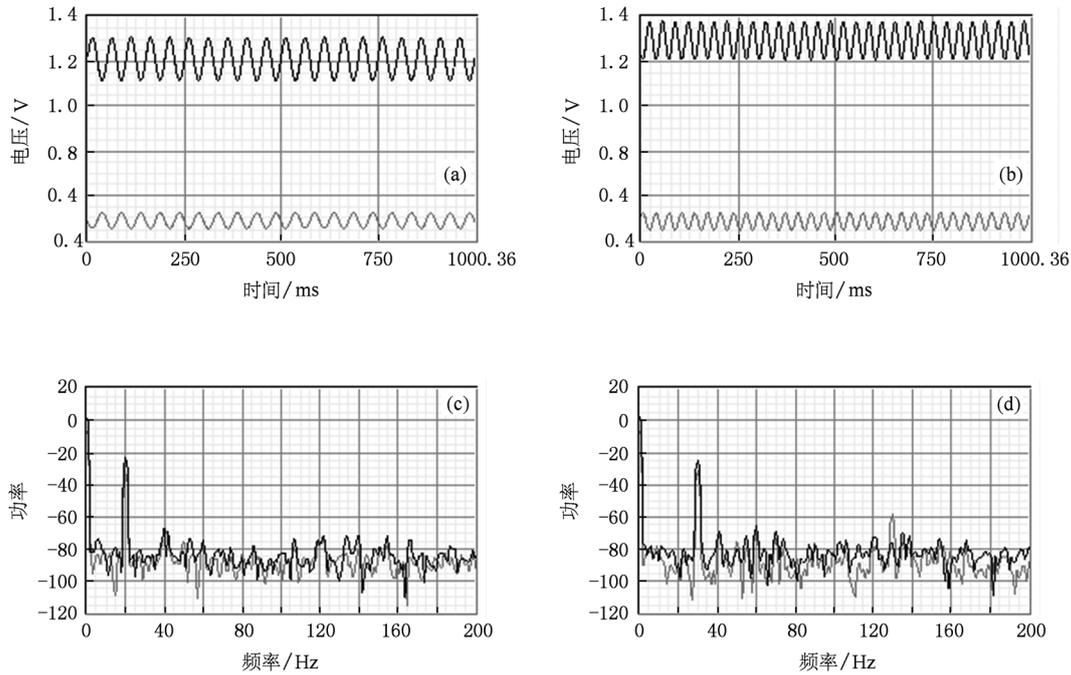


图6 检测光强的电压值随采样时间变化的时域和频谱分布图 (a)20 Hz;(b)30 Hz;(c)20 Hz;(d)30 Hz

5. 结 论

本文提出了一种成本低、可多布点多参量实时监测测量的地震波信号的解调系统. 对光源进行了研究与设计,大幅度提高了光源的斜率和线性度,保证了系统的具有高测量灵敏度. 通过对系

统进行合理布局,实现的准分布式光纤光栅传感解调. 通过对地震检波的模拟测量,传感解调系统的上升沿和下降沿两部分静态波长灵敏度分别为 887.5 mV/nm 和 -971.7 mV/nm ,应变分辨力分别达到 $0.95 \mu\epsilon$ 和 $0.86 \mu\epsilon$. 系统采用全光结构,解调精度高,稳定性好,性价比高且反应速度快,可实现对地震信号的多点多参量实时检测.

[1] Nellen P M, Mauron P, Frank A 2003 *Sensors and Actuators* **103** 364
 [2] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J 1997 *Lightwave Technology* **15** 1442
 [3] Sun J L 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2382 (in Chinese) [孙家林 2001 物理学报 **50** 2382]
 [4] 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]
 [5] 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]
 [6] Zhu T, Rao Y J, Mo Q J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 249 (in

Chinese) [朱 涛、饶云江、莫秋菊 2006 物理学报 **55** 249]
 [7] Xue L F, Zhao D Q, 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]
 [8] 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]
 [9] Shu X W, Huang D X, Deng G H, Shi W, Jiang S 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1731 (in Chinese) [舒学文、黄德修、邓桂华、施 伟、江 山 2000 物理学报 **49** 1731]
 [10] 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、裴 亮、冉曾令 2010 物理学报 **59** 5523]

High-accuracy quasi-distributed optical fiber Bragg grating seismic demodulation system*

Qiao Xue-Guang²⁾¹⁾ Ding Feng^{1)3)†} Jia Zhen-An¹⁾ Fu Hai-Wei¹⁾ Ying Xu-Dong¹⁾ Zhou Rui²⁾ Song Juan¹⁾

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

2) (Northwest University, Xi'an 710069, China)

3) (Zhongyuan Oilfield Petro Chemical Complex of Sinopec, Puyang 457061, China)

(Received 17 March 2010; revised manuscript received 20 August 2010)

Abstract

A new earthquake detection demodulation system for monitoring several points and several parameters at the same time is proposed by using the linear sideband of super-fluorescent fiber source as an edge filter. The sensitivity of whole demodulation system is determined by the detecting sensitivity of source light. Through the optimization of light, the slope of light linear part is improved greatly. According to the rising and the falling of light, the system is divided into two parts each with four channels. Through the stimulation experiments of all the channels, the static wavelength sensitivities of the two parts are 887.5 mV/nm and -971.7 mV/nm, and their strain resolutions reach 0.95 $\mu\epsilon$ and 0.86 $\mu\epsilon$ respectively. This demodulation system has high sensitivity, good stability, quick demodulation speed, *etc.* It is the most important is that it can realize real-time detection for several points and several parameters at the same time.

Keywords: fiber optics, seismic detection, edge filter, fiber light source

PACS: 42.81. -i, 42.81. Pa, 42.81. Uv

* 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 (Grant No. 2008CR1063), the Science and Technology Innovation Foundation of CNPC (Grant No. 2008D-5006-03-08), and the Major Scientific and Technological Innovation Projects in Shaanxi Province (Grant Nos. 2009ZKC01-19/2008ZDGC-14).

† Corresponding author. E-mail: dingfeng_ty@yahoo.cn