

光纤布拉格光栅地听器设计研究

白 龙 杨华勇 罗 洪

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 近年来,对地声信号的探测技术在石油天然气勘探、地面和近海岸安全警界、海洋远距离目标探测和地下管道监测等领域得到飞速发展。为实现对低频地声信号的高品质探测,设计了一种双光栅对称推挽式结构的光纤布拉格光栅地听器,进行了结构理论、仿真分析、优化设计和三维结构扩展的研究。结果表明,该结构地听器具有较高的灵敏度,可达 765.6 pm/g;在 1~120 Hz 之间,灵敏度动态响应特性良好;具有温度自补偿功能和较好的方向性;能够方便的扩展到三维结构;具有较好的对低频地声信号探测性能。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;地听器;加速度

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.110601

Study on Fiber Bragg Grating-Based Geophone

Bai Long Yang Huayong Luo Hong

(College of Optoelectronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract In recent years, geophysical detecting technologies develop increasingly in fields, such as petroleum and natural gas exploration, safety alert of ground and coast, target detection in the ocean and underground pipeline monitoring. To realize high precision detection of low-frequency geophysical signals, a novel kind of geophone based on fiber Bragg grating (FBG) with symmetrical push-pull structure is designed. In-depth studies are made on structural theories, simulation analysis, optimization design and three-dimensional structure. Results show that the geophone has high sensitivity up to 765.6 pm/g, and dynamic response character of 1~120 Hz is good. Furthermore, it has the function of temperature self-compensation, good direction characters, and can easy to realize three-dimensional structure. So the geophone has the ability of detecting low-frequency geophysical signals.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; geophone; acceleration

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.3735

1 引言

地声是一种由震源发出,在地球内部传播的波。对地声学的研究已经成为一门比较热门的学科,是地球物理学和声学的交叉学科,主要研究地声信号的传输、探测以及在海洋物理^[1]、地震探测^[2]、石油勘探^[3]和安全监测^[4]等领域的应用问题。地听器对于地声探测起着关键的作用,决定着探测的灵敏度、可探测的频率范围等。但是,传统的地听器普遍存在着灵敏度低、动态范围小、漏电和供电困难等问题,限制了地声探测技术的发展^[5,6]。近年来,基于光纤传感技术的光纤地听器以其抗电磁干扰、体积小、质量轻、动态范围宽、精度高以及能在恶劣环境下工作的优势得到了迅猛发展^[7,8]。光纤布拉格(Bragg)光栅(FBG)地听器是一种新型的波长调制型光纤加速度传感器,除具有上述优点外,还具有光路简单、检测方法灵活^[9]、对光源强度波动及外界干扰不敏感^[10]以及便于组成传感网络^[11]等特点,因此成为地声探测的新方法和未来发展的方向。

2 FBG 的传感原理

FBG 的传感原理如图 1 所示,图中 I_i 、 I_r 、 I_t 分别代表入射光强、反射光强、透射光强; Λ 为 Bragg 光栅的

收稿日期: 2012-05-24; 收到修改稿日期: 2012-06-29; 网络出版日期: 2012-08-30

作者简介: 白 龙(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感相关方面的研究。E-mail: bailong0827@126.com

导师简介: 杨华勇(1974—),男,博士,教授,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: yanghuayong@21cn.com

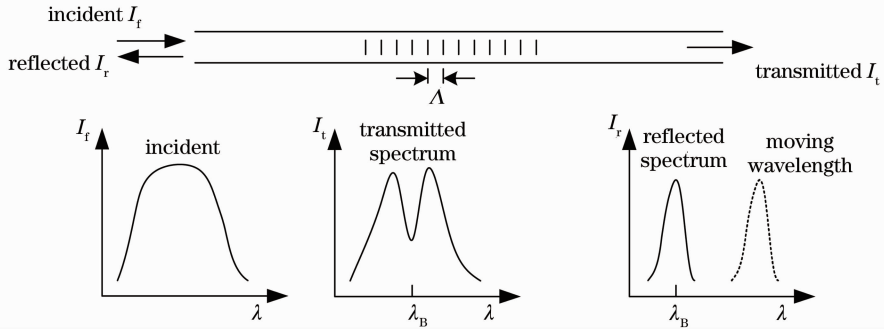


图1 光纤 Bragg 光栅传感原理图

Fig. 1 Principle diagram of FBG sensing

周期, λ_B 为 Bragg 波长。根据光纤耦合模理论, 当宽带光在光纤光栅中传输时, 产生模式耦合, 满足 Bragg 条件的光被反射^[12]。Bragg 条件为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为光纤纤芯有效折射率。 Λ 和 n_{eff} 受到外界环境的影响(温度、应力)而发生变化, 导致符合 Bragg 条件的波长发生漂移 $\Delta\lambda_B$, 由(1)式可得

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda. \quad (2)$$

轴向应力变化引起的 Bragg 波长漂移为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon, \quad (3)$$

式中 p_e 为有效弹光系数, ϵ 为应变变量。

温度引起的 Bragg 波长漂移为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \beta)\Delta T, \quad (4)$$

式中 α 为材料的热膨胀系数, β 为热光系数, ΔT 为温度变化量。

FBG 传感器就是基于(3)式间接测量地声参量的, 可以利用所设计的探头结构把振幅、加速度等参量转化为轴向应变变量, 进而转化为 FBG 的 Bragg 波长变化, 利用解调仪检测波长的改变量就可以实现对地声信号的探测。

3 FBG 地听器的设计

3.1 数学模型及幅频特性分析

FBG 地听器的力学原理主要是基于质量惯性模型, 理想情况下, 每个传感探头就是一个标准的质量惯性体系, 如图 2 所示。它是一个由惯性元件 M、弹性体 K 和阻尼器 C 组成的二阶单自由度系统。

在地听器受到地声信号而产生振动时, 由牛顿第二定律可知, 作用在传感器惯性元件 M 上的各力(惯性力、阻压力、弹性力以及外力)之和为零。在外界信号振动的强迫力 $F(t)$ 作用下, 系统的运动方程为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F(t), \quad (5)$$

式中 m 为惯性组件质量, c 为阻尼系数, k 为弹性组件弹性系数, x 为惯性组件位移。

由(5)式的拉普拉斯变换可推导出传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{k}{s^2/\omega_0^2 + 2\zeta s/\omega_0 + 1}, \quad (6)$$

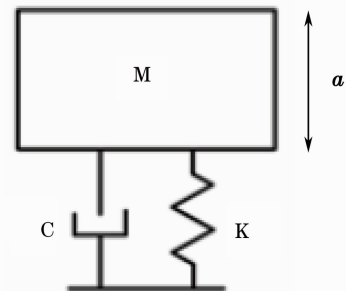


图2 FBG 地听器力学模型

Fig. 2 Mechanical model of FBG-based geophone

式中 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 为系统的固有本征角频率 ($\omega = 2\pi f$), $\xi =$

$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{c}{m}}$ 为系统的阻尼比。传感器的幅频响应函数为

$$|H(\omega)| = \frac{k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (7)$$

根据幅频响应函数得到幅频特性曲线如图 3 所示, 在曲线中, 实际曲线偏离纵轴 $y=1$ 的程度, 决定了传感器幅值的误差大小, 经分析可以得出, 加速度传感器的频率特性可用两个特征参数 ξ 和 ω_0 来评估。在 ξ 一定情况下, ω_0 越大输出特性平坦区越宽, 动态特性也越好, 因此传感器的固有频率 ω_0 应远大于输入信号的最高工作频率 ω , 一般应满足 $\omega/\omega_0 \leq 0.6$; 在确定固有频率 ω_0 后, 当 $\xi = 0.6 \sim 0.7$ 时, 具有最宽的幅频特性平坦区, 因此传感器要工作在临界阻尼或欠阻尼状态下^[16,17]。

3.2 地听器结构设计及工作原理

所设计的地听器为双光栅对称推挽式结构, 如图 4 所示。质量块位于两个对称弹性体块之间, 由连接座粘贴固定, 两个光纤光栅分别封装在上下弹性体内中轴线处, 两弹性体块分别与支撑底座对接粘固, 从而组成双光栅对称推挽式结构。

初始状态下, 质量块在重力和弹性柱体的回复力相互作用下, 处于平衡状态。当系统受到平行于柱体轴向的加速度矢量 \mathbf{a} 作用时, 质量块由于惯性作用对两弹性柱体分别施加以拉伸和压缩力, 嵌入其中的两个 FBG 的 Bragg 波长受到调制, 中心波长产生漂移 $\Delta\lambda$, 通过解调系统解调出, 即可得到所需加速度信息。

由于采用对称推挽式结构, 弹性体内两个 FBG 感受的振动应变变量是等幅反向的, 且所处的环境相同, 因此可以通过解调求得两个光栅的 Bragg 波长差来消除温度漂移的影响; 当作用力垂直于弹性柱体时, 两弹性柱体产生相同的形变, 两光栅的波长差不变, 这时, 地听器所敏感的只是加速度弹性轴向上的分量, 因此可以在一定程度上抑制横向交叉敏感, 具有良好的方向性。综上所述, 此结构地听器具有温度自补偿功能和良好的方向性。

3.3 理论分析

整个系统可认为是一个弹簧振子。设系统加速度为 \mathbf{a} , 其大小为 a , 整个弹性系统的弹性系数为 k , 质量块质量为 m , 单个弹性柱体的杨氏模量为 E_1 , 半径为 R_1 , 高为 h , 光纤的杨氏模量为 E_2 , 半径为 R_2 , 两光纤光栅的中心波长分别为 λ_{B1} 和 λ_{B2} , 质量块对单个弹性柱体的作用力为 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}/2$ 。

根据弹性力学, 杨氏模量的定义为^[18]

$$E = \frac{F/\pi R^2}{\Delta h/h} \quad (8)$$

由胡克定律和(8)式可得整个弹性系统的弹性系数为

$$k = 2\pi(E_1 R_1^2 + E_2 R_2^2)/h \quad (9)$$

由于弹性体的弹性系数远远大于光纤的弹性系数, 所以忽略光纤的弹性系数, 近似得到系统的弹性系数为

$$k = 2\pi E_1 R_1^2/h \quad (10)$$

可以得到系统固有频率为

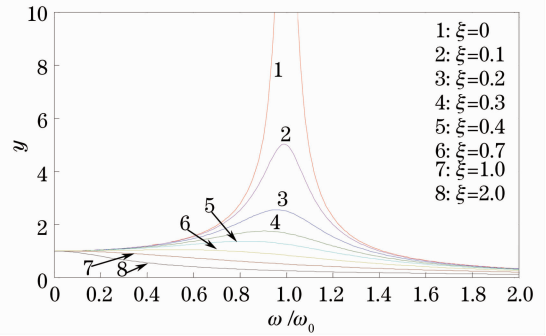


图 3 FBG 地听器的幅频特性曲线

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristic of FBG-based geophone

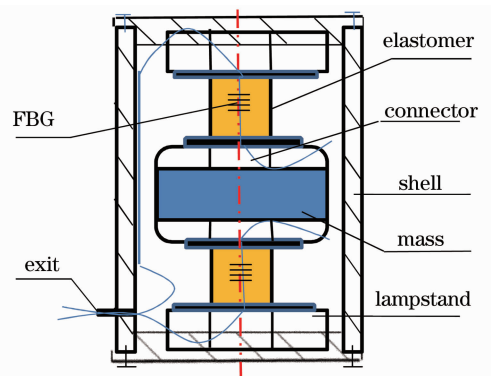


图 4 对称推挽式结构图

Fig. 4 Symmetrical push-pull structure diagram

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi E_1 R_1^2}{mh}}. \quad (11)$$

由于上下两个弹性体受到大小相等、方向相反的惯性力作用,因此会产生大小相等的应变变量 ϵ ,即

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h} = \frac{ma/2}{\pi E_1 R_1^2} = \frac{a}{(2\pi f_0)^2 h}. \quad (12)$$

由(3)式及对于石英光纤 p_e 取 0.22 可得

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = -\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = 0.78 \frac{a}{(2\pi f_0)^2 h}, \quad (13)$$

式中 $\Delta\lambda_{B1}$ 和 $\Delta\lambda_{B2}$ 为相应的 Bragg 波长偏移量,则两个光栅总的波长偏移量为

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2} = 0.78 \frac{\lambda_{B1} + \lambda_{B2}}{2} \frac{a}{(2\pi f_0)^2 h}. \quad (14)$$

可得该结构 FBG 地听器的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{a} = 0.78 \frac{\lambda_{B1} + \lambda_{B2}}{2h(2\pi f_0)^2}. \quad (15)$$

实际系统工作在非静力加速度作用下,即当声振动频率为 f 时,加速度灵敏度响应是随频率变化的,其变化规律的经验公式^[19]为

$$S(\omega) = \frac{\Delta\lambda_B(0)}{a} f_0^2 / \sqrt{(f^2 - f_0^2)^2 + \left(\frac{ff_0}{Q}\right)^2}, \quad (16)$$

式中 f_0 为(11)式所表示的谐振频率, $\frac{\Delta\lambda_B(0)}{a}$ 为(15)式表示的静力加速度灵敏度, Q 为与阻尼有关的品质因子。

4 结构仿真分析及参数优化

对地听器探头的结构参数进行优化的总体思路是:在满足频率动态范围的条件下,根据仿真分析合理设计探头尺寸,尽量使灵敏度系数最大。图 5 为参数设计关系图。

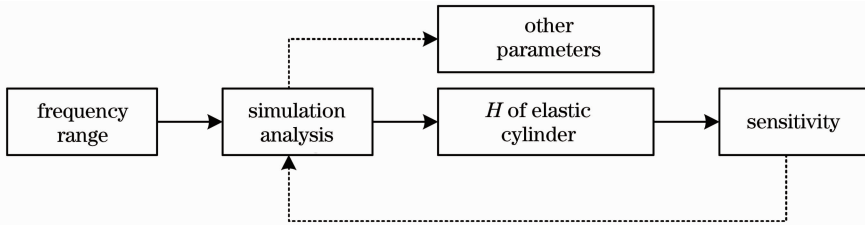


图 5 结构参数设计流程图

Fig. 5 Flowchart of the parameter design

低频地声信号的频率范围约为 1~120 Hz,认为这基本覆盖了所要探测的低频信号的范围。取最高工作频率 $f_{\max} = 120$ Hz,根据前面分析的最高工作频率和固有频率的关系,可得 $f_0 = 200$ Hz。

由(15)式,认为两个光栅的中心波长近似相等,取 $\lambda_{B1} = \lambda_{B2} = 1550$ nm, $f_0 = 200$ Hz,可得到灵敏度 S 和弹性柱体高度 h 的关系曲线,如图 6 所示。

结合图 6,从理论上可知在满足光栅长度的条件下, h 较小时灵敏度高,但是考虑探头尺寸和嵌入光栅时的操作等因素,选取 $h = 0.02$ m,从图中可以看出对应的灵敏度为 765.6 pm/g。

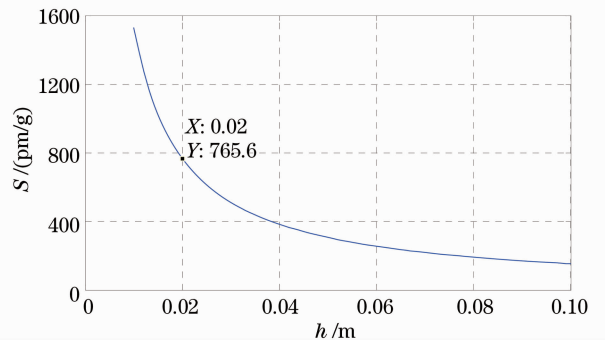


图 6 灵敏度 S 与柱高 h 的关系曲线

Fig. 6 Relation curve of S and h

从(11)式中可以看出,要实现所设定的固有频率,需要合理的选择弹性柱体杨氏模量 E_1 、半径 R_1 和质

量块质量 m 。选取常用的聚氨酯作为弹性体材料,其杨氏模量 E 大小约为 80 MPa。将 ω_0 、 h 、 E_1 代入(11)式,得到质量块质量 m 和柱体半径 R_1 的关系曲线,如图 7 所示。

根据曲线关系图 7,考虑弹性柱体的尺寸,选取柱体半径为 0.005 m,此时对应的质量块质量为 0.3979 kg。

确定所有的探头结构参数,在符合探测频率范围和灵敏度需要的前提下,对探头结构尺寸进行了优化。优化后的探头尺寸为:质量块质量 $m=0.3979$ kg,弹性柱体高 $h=0.02$ m,柱体半径 $R=0.005$ m。

下面对所设计的地听器灵敏度动态响应特性进行仿真分析。图 8 为 1~240 Hz 之间灵敏度响应特性曲线。其中加速度灵敏度用分贝来表示,0 dB 对应 1 pm/g。

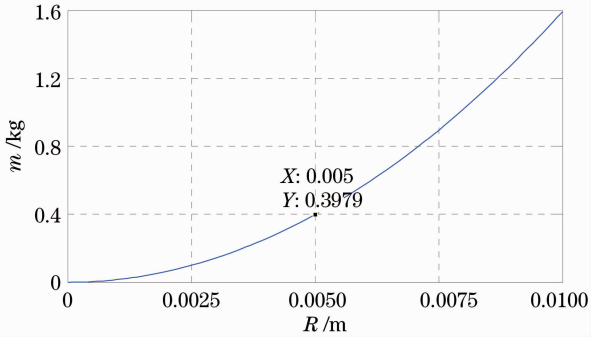


图 7 质量块质量 m 与柱体半径 R 关系曲线

Fig.7 Relation curve of m and R

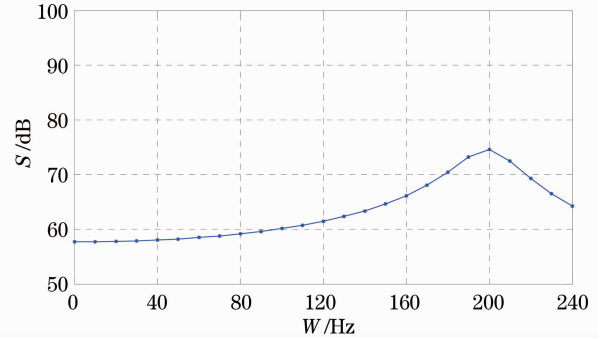


图 8 灵敏度动态响应曲线

Fig.8 Sensitivity curve of dynamic response

从图 8 中可以看出,地听器在 1~120 Hz 之间的灵敏度稳定性很好,具有良好的低频探测能力。因此,通过仿真分析、对参数进行优化,设计出了对称推挽式结构的地听器。其灵敏度约为 765.6 pm/g,固有频率为 200 Hz,在 1~120 Hz 范围内灵敏度动态特性良好。

5 三维结构地听器研究

5.1 三维结构设计及工作原理

对称推挽式结构的地听器可以方便地扩展到三维结构,如图 9 所示,中间正方体为质量块,6 个弹性体两端分别与质量块和壳体相连,预加应力的光栅嵌入弹性体内。当外界目标产生振动信号时,质量块感知加速度,产生一个惯性力,作用在 6 个光纤光栅上,从而使 6 个光纤光栅产生应变,光栅的中心波长也产生变化,只要解调出每个方向的惯性力对每一个光栅的反射中心波长的变化 $\Delta\lambda_{ij}$,就会求出每个方向上的加速度分量大小 a_i ,从而测得空间加速度 a ,从加速度信息中可获得所需信息。

5.2 理论分析

在三维结构的一个轴向上,如在 x 轴上,由(3)式、(13)式和(15)式可以得到

$$a_x = \frac{2EA}{0.78} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_5 + \lambda_6}, \quad (17)$$

式中 E 和 A 分别是弹性体的杨氏模量的大小和横截面积, λ_5 和 λ_6 分别为 x 轴上的两光栅的中心波长, $\Delta\lambda$ 为两光栅的 Bragg 波长变化总和($\Delta\lambda = |\Delta\lambda_5 - \Delta\lambda_6|$)。在三维情况下,沿一个轴方向的惯性力对 3 个轴向上的光栅的中心波长都会产生影响,于是可以得到

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \frac{EA}{0.78} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{xx} & \Delta\lambda_{xy} & \Delta\lambda_{xz} \\ \Delta\lambda_{yx} & \Delta\lambda_{yy} & \Delta\lambda_{yz} \\ \Delta\lambda_{zx} & \Delta\lambda_{zy} & \Delta\lambda_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/(\lambda_5 + \lambda_6) \\ 1/(\lambda_3 + \lambda_4) \\ 1/(\lambda_1 + \lambda_2) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中 $\Delta\lambda_{xx}$ 、 $\Delta\lambda_{xy}$ 和 $\Delta\lambda_{xz}$ 分别为沿 x 轴的惯性力对每个轴方向上的两光栅 Bragg 波长的总变化量,以此类推。

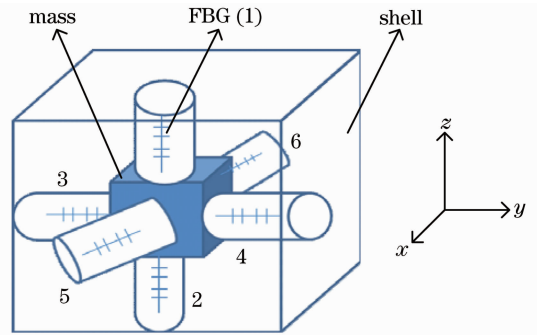


图 9 三维地听器探头结构

Fig.9 Assumption diagram of three-dimensional geophone's probe

$\lambda_{5,6}$, $\lambda_{3,4}$ 和 $\lambda_{1,2}$ 分别为 3 个轴向上的光栅的中心波长。通过光纤光栅解调系统分别解调 3 个轴向上光栅的中心波长的变化量 $\Delta\lambda_{ij}$, 可以得到每个轴向上的加速度 a_i , 从而可以得到三维空间加速度 \mathbf{a} 。

6 结 论

设计了一种双光栅对称推挽式结构的地听器, 研究表明该结构地听器具有灵敏度高、能够进行温度自补偿、方向性较好以及便于扩展到三维等特点, 具备较好的低频探测能力, 能够应用于地声探测领域。

参 考 文 献

- Zhou Xiaoxiao. Study on Acoustic Signal Processing Method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009
周晓晓. 地声信号处理方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009
- Liu Huaishan, Sun Gengwen. Progress of target alert technology based on ground sound wave [J]. *National Security Geophysical Series (IV) Geophysical Environment Detection and Target Information Acquisition and Processing*, 2008, 50~56
刘怀山, 孙更文. 基于地下声波的水下目标预警综述[J]. 国家安全地球物理丛书(四)——地球物理环境探测和目标信息获取与处理, 2008. 50~56
- Wang Shanlic, Xiang Guanghua, Hu Manli *et al.*. Design of a novel FBG vibration sensor[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(4): 515~519
王善鲤, 向光华, 忽满利 等. 一种新型光纤 Bragg 光栅振动传感器的设计[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(4): 515~519
- Ma Chao, Qiao Xueguang, Jia Zhengang *et al.*. Research and application of fiber Bragg grating geophone[J]. *Progress in Geophysics*, 2008, **23**(2): 622~626
马 超, 乔学光, 贾振安 等. 光纤布拉格光栅地震检波器的研究与应用[J]. 地球物理学进展, 2008, **23**(2): 622~626
- Tian Shixiu, Kong Fanyong, Li Jinxi *et al.*. A geophone with high sensitivity[J]. *J. Seismological Research*, 1985, **8**(3): 395~406
田时秀, 孔凡永, 李金锡 等. 高灵敏度地听器[J]. 地震研究, 1985, **8**(3): 395~406
- Liu Yuliang, He Jun, Wang Yongjie *et al.*. Progress of seismic wave detection by fiber-optic sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 21~28
刘育梁, 何 俊, 王永杰 等. 光纤地震波探测的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(11): 21~28
- A. Mita, I. Yokoi. Fiber Bragg grating accelerometer for structural health monitoring[C]. *Motion and Vibration Control*, 2000
- Yan Zhang, Sanguo Li, Zhifan Yin *et al.*. Unattended ground sensor based on fiber Bragg grating technology[C]. *SPIE*, 2005, **5796**: 133~140
- Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Pérot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406006
张 乐, 吴 波, 叶 雯 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏光纤振动传感器[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0406006
- Chen Liuhua, Lin Qiao, Li Shu *et al.*. Large dynamic range micro optical accelerometer based on grating translation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1473~1477
陈柳华, 林 巧, 李 书 等. 基于光栅平移的大量程光学加速度计[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1473~1477
- Liu Qinpeng, Qiao Xueguang, Zhao Jianlin *et al.*. Temperature insensitive acceleration sensing technology based on phase of double fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205006
刘钦朋, 乔学光, 赵建林 等. 双光栅 π 相位差温度不敏感加速度传感技术研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0205006
- Zeng Nan. Research on the Key Technology of Fiber Optic Accelerometers[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005
曾 楠. 光纤加速度传感器若干关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2005
- Chen Daxiong. Study of FBG Accelerometer Dynamic Characters[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004
陈大雄. 光纤 Bragg 光栅加速度传感器动态特性的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004
- Tao Guo, Xianglin Zhang, Xinru Liu *et al.*. A new type of fiber Bragg grating based seismic geophone [J]. *Appl. Geophysics*, 2009, **6**(1): 84~92
- J. Wu, V. Masek, M. Cada. The possible use of fiber Bragg grating based accelerometers for seismic measurements[C]. *Electrical and Computer Engineering*, 2009. 860~863

- 16 Jinghua Zhang, Xueguang Qiao, Manli Hu *et al.*. Flexensional fiber Bragg grating based accelerometer for low frequency vibration measurement[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(9): 090607
- 17 Limin Sun, Yang Shen, Chungeng Cao. A novel FBG-based accelerometer with high sensitivity and temperature self-compensation[C]. *SPIE*, 2009, **7292**: 7291214
- 18 Wentao Zhang, Xuecheng Li, Faxiang Zhang *et al.*. Underwater fiber laser geophone: theory and experiment[C]. *SPIE*, 2009, **7634**: 76341
- 19 Yu Yang. Study of Low Frequency Seismic Sensor System Based FBG[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010
于 洋. 低频 FBG 振动传感系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010