光纤布拉格传感器兰姆波检测的反射谱分析

张海燕，孙修立，石志东，陈 娜，肖悦娱
(上海大学通信与信息工程学院，特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

摘要：传统的兰姆波多采用压电陶瓷换能器激发和接收。建立了新的超声兰姆波无损检测系统，其基本思想是采用布拉格光纤传感器作为兰姆波的接收器。光纤光栅传感的基本原理是通过检测光栅反射的中心波长移动实现对外界参量如超声的测量。超声作用下光纤光栅的反射谱发生变化，对超声作用下光纤光栅的反射谱变化进行了数值分析，结果表明，超声对光栅反射谱的影响与超声波长与光栅长度的比值是高度相关的。只有当这个比值相当大时，反射谱的形状才不会变化而中心波长发生偏移，此时光纤传感器可用来探测兰姆波。这个结论为利用新的兰姆波无损检测系统在布拉格光栅长度的设计和兰姆波波长的选择方面提供了有用的工具。

关键词：兰姆波；布拉格光栅；反射谱
中图分类号：O426.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2009)-05-0605-05
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2009.05.009

Reflection spectrum analysis of fiber Bragg grating sensor as Lamb wave detector

ZHANG Hai-yan, SUN Xiu-li, SHI Zhi-dong, CHEN Na, XIAO Yue-yu
(*School of Communication and Information Engineering*, *Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks*, *Shanghai University*, *Shanghai* 200072, *China*)

Abstract: Piezoceramic transducers have been the most commonly used method for generating and receiving Lamb waves traditionally. A new ultrasonic Lamb wave nondestructive testing (NDT) system is developed in this paper. The basic idea is to use a fiber Bragg grating (FBG) sensor as an acoustic receiver of ultrasonic Lamb waves generated by a piezoceramic transducer. The basic principle of FBG is to measure external force such as ultrasound field by detecting the center wavelength shift of the light reflected from the grating. The reflection spectrum changing of a FBG due to the interations with an ultrasound wave has been numerically analyzed. The results show that the influence of ultrasonic field on grating spectrum is highly correlated to the ratio between the ultrasonic wavelength and the grating length. Only when the ratio is quite larger, the center wavelength of reflection spectrum shifts while the shape of the grating remains unchanged, which provide useful tools for the design of gage length of FBG sensor and the choice of Lamb wave wavelength when the new NDT system is used for Lamb wave detection.

Key words: Lamb wave; fiber Bragg grating; reflection spectrum

1 引 言

复合材料的兰姆波检测已得到各国学者的广泛关注和研究。目前，激励和接收兰姆波信号的换能器基本上都是采用压电陶瓷换能器(PZT)，利用 PZT 的压电效应把机械量变为电量后进行检测。从 80 年代中期，就有人开始探索使用光纤传感器来检测复合材料，这是因为与传统的 PZT 相比，光纤传感器与复合材料有很好的兼容性，通过在复合材料中埋入光纤传感器，组成智能结构系统，可实现复合材料的在线无损检测[1-4]。布拉格光栅(FBG)是光纤传感领域中应用较多的一种传感器，除具有一切光纤的优点外，FBG 还具有自身的特点，如波长编码，在各个领域都有广泛应用，尤其是结构监测方面[5-7]。利用压 PZT 驱动器 / FBG 传感器，可实现新一代航天器先进复合材料结构的损伤监测[8]。

FBG 传感器通过检测光栅反射的中心波长移动实现对外界参量如超声的测量，超声作用下光纤光栅的反射谱发生变化[9-12]。本文建立了超声作用下 FBG 的反射谱计算模型，数值分析了超声波长与 FBG 光栅长度之比对 FBG 反射谱的影响，为 FBG 传感器兰姆波检测时参数的选择提供了理论依据。

收稿日期：2009-03-19；**修回日期**：2009-06-19
基金项目：国家自然科学基金(10874110,10504020)，上海市重点学科和上海市科委重点实验室项目(S30108，08DZ2231100)
作者简介：张海燕(1970-)，女，山东曹县人，博士，副教授，研究方向超声检测，声信号处理。
通讯作者：张海燕, E-mail: hyzh@shu.edu.cn

2 FBG 传感原理

根据光纤耦合模理论，在周期性的光纤布拉格光栅中，被反射的布拉格波长 λ_B 由式(1)给出：

$$\lambda_B = 2n\Lambda \tag{1}$$

其中 n 是光栅有效折射率，Λ 是布拉格光栅周期。FBG 的结构与传感原理如图 1 所示。当一束宽带光入射进布拉格光栅时(图 1(b))，符合谐振条件式(1)的窄带频谱将被反射回来(图 1(c))，其余的光都被透射出去(图 1(d))。光纤光栅传感的基本原理是利用光纤光栅的有效折射率 n 和光栅周期 Λ 对外界被测量(如温度、应力)的敏感特性，将外界被测量的变化转化为其布拉格波长的移动(图 1(e))，通过检测光栅反射的中心波长移动实现对外界被测量的测量。

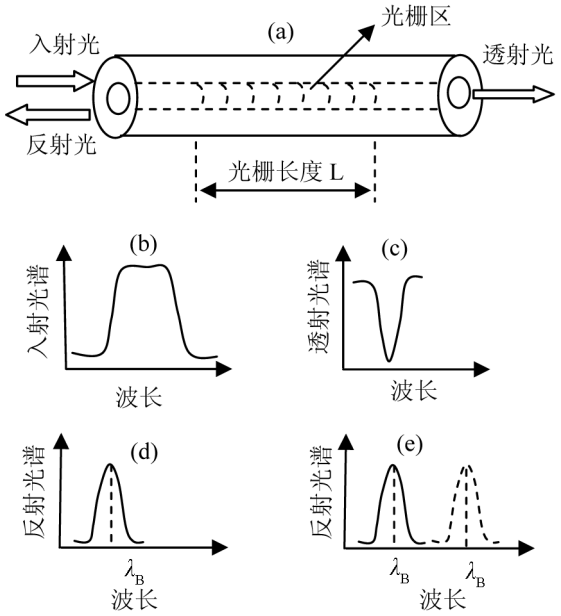

图 1 FBG 结构与传感原理: (a) 光纤光栅结构；(b) 入射光谱；(c) 透射光谱；(d) 反射光谱；(e) 外界作用下的中心波长偏移

Fig.1 The structure and sensing principle of FBG: (a) FBG structure; (b) incident light spectrum; (c) transmitted light spectrum; (d) reflected light spectrum; (e) center wavelength shift under the external forces

3 理论建模

3.1 FBG 传感器兰姆波检测系统

FBG 传感器对作用在整个光栅长度上引起布拉格中心波长偏移的动态应变是非常敏感的。因为材料中传播的兰姆波能产生变化的应变，因而 FBG 传感器可用来探测兰姆波。

图 2 建立了 FBG 作为传感器的新的兰姆波无损检测系统。该系统采用标准的兰姆波激发方式，包括函数发生器、幅值放大器以及 PZT 换能器。由函数发生器激发的输入信号经幅值放大器放大后送入 PZT 发射器，PZT 激发的兰姆波信号在薄板中传播一段距离后由 FBG 传感器接收。经光波长解调系统解调后，把光信号转化为电信号，显示在数字示波器上。含缺陷信号与无缺陷信号的波形在示波器上的表现不同，以此判断板中是否含有缺陷。

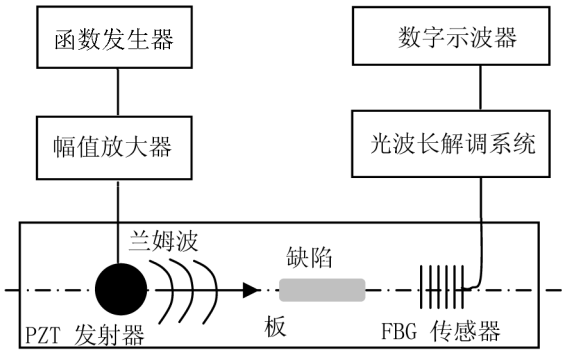

图 2 FBG 作为传感器的兰姆波检测系统

Fig.2 Lamb wave detection system using fiber Bragg grating as sensor

3.2 超声波作用下的 FBG 折射率计算

兰姆波是在一种厚度与激励声波波长为相同数量级的声波导中由纵波和横波合成的特殊形式的应力波。为简化起见，假定一超声纵波沿 FBG 的轴向 z 作用在传感器上[9]，图 3 所示。

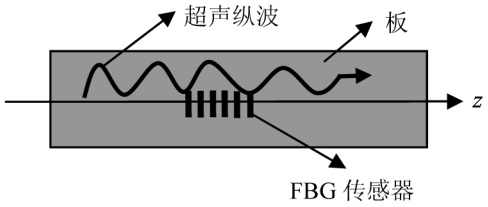

图 3 超声纵波作用下的 FBG 传感器

Fig.3 FBG sensor under the longitudinal ultrasonic waves

光纤内随时间 t 变化的应变分布为：

$$\varepsilon(z,t) = \varepsilon_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{US}} z - \omega_s t\right), z \in [0, L] \tag{2}$$

式(2)中，ε_m 为应变幅值，λ_{US} 和 ω_s 分别是超声纵波的波长和角频率，L 为图 1(a)中 FBG 传感器光栅的长度。

考虑一根由单模光纤制成的 FBG，其有效折射率为：

$$n(z) = n_0 - \Delta n \sin^2\left(\frac{\pi}{\Lambda_0} z\right), \ z \in [0, L] \tag{3}$$

式中 n_0 是光栅纤芯的本征折射率，Δn 是最大调制系数，Λ_0 是光栅周期。

超声对 FBG 的影响主要表现在两个方面：一是由几何效应引起的对光栅周期 Λ 的调制；二是由弹光效应引起的光栅有效折射率 n 的变化。由式(1)

知，这两个方面都会直接引起布拉格波长的改变。在超声作用下，布拉格光栅新的有效折射率为：

$$n'(z',t)=n_0-\Delta n\sin^2\left(\frac{\pi}{\Lambda_0}f^{-1}(z',t)\right)+\Delta n'(z',t) \quad (4)$$

式(4)中的第二项和第三项分别是由几何效应和弹光效应引起的折射率变化，其中：

$$z=f^{-1}(z',t)=\frac{\pi}{1+\varepsilon_m\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{US}}z'-\omega_s t\right)}z' \quad (5)$$

$$\Delta n'(z',t)=-\left(\frac{n_0^3}{2}\right)\times[P_{12}-\nu(P_{11}+P_{12})]\times\varepsilon_m\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_s}z'-\omega_s\right) \quad (6)$$

式(6)中，$P_{i,j}$ 是弹光系数，ν 是泊松比，当布拉格波长 λ_B=1.55μm 时，P_{11}=0.12，P_{12}=0.275，ν=0.17。由于几何形变，沿光纤轴向的某点坐标 z 将会变为新的坐标 z'，其表达式为：

$$z'=z+\int_0^z\varepsilon(\xi)\mathrm{d}\xi=z+\varepsilon_m\frac{\lambda_{US}}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{US}}z-\omega_s t\right)+\varepsilon_m\frac{\lambda_{US}}{2\pi}\sin(\omega_s t)\qquad z\in[0,L] \quad (7)$$

将光纤光栅视作若干层的叠加，层与层之间有交界面，当层的厚度与光纤周期相比非常小时，每一层内的介质折射率可视为相同。由式(4)，可以得到超声作用下各层的有效折射率，进而采用传递矩阵方法[9,12]，可以数值地计算出超声作用下 FBG 的响应。

4　数值分析

数值计算中，取 FBG 纤芯的本征折射率 n_0=1.45，$\Delta n=2\times10^{-3}$，Λ_0=535 nm，L=1mm。图 4 为没有超声波作用下的 FBG 的反射谱。图 5 为 ε_m=1000μstarin(微应变)，t=0 时不同超声波长与 FBG 光栅长度之比下的反射谱。这里仅给出超声场强度为 ε_m=1000μstarin(微应变)时 FBG 反射谱的结果，超声强度对 FBG 反射谱的影响可以参考文献[9,10]。

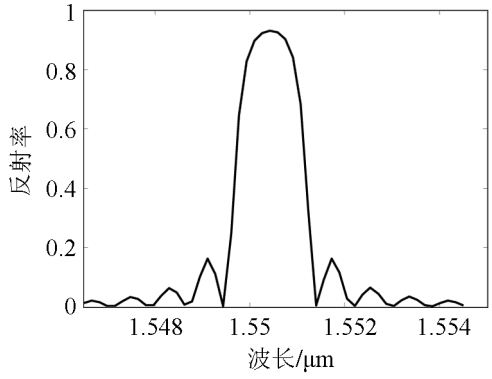

图 4　未加超声波作用的 FBG 频谱

Fig.4 Grating reflectivity spectra without the action of ultrasonic waves

可以看到，与图 4 相比，当 λ_{US}/L=100 时，FBG 反射谱的形状没有变化，但频谱发生了偏移，如图

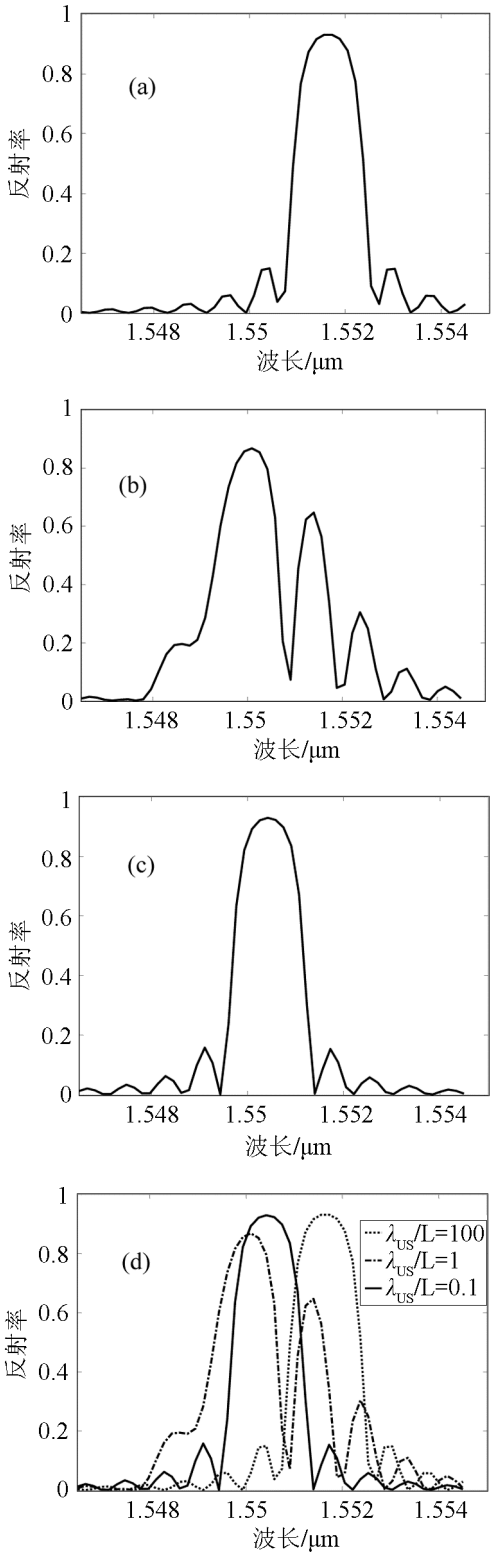

图 5　ε_m =1000μstarin 时超声作用下的 FBG 频谱：(a) λ_{US}/L=100; (b) λ_{US}/L=1; (c) λ_{US}/L=0.1; (d) (a)、(b)、(c)三图组合

Fig.5　Grating reflectivity spectra calculated for ε_m=1000μstarin: (a) λ_{US}/L=100; (b) λ_{US}/L=1;(c) λ_{US}/L=0.1; (d) combination of (a)、(b)、(c)

5(a)所示；当 λ_{US}/L=1时，反射谱变宽，其形状发生了相当大的变化，如图 5(b)所示；当 λ_{US}/L=0.1时，FBG 反射谱的形状和位置均没有发生变化，如图 5(c)所示。将三者组合在一起，可以看到频谱发生偏移的情况，如图 5(d)所示。

既然超声对 FBG 的作用表现为沿光纤轴向 z 随时间变化的应变分布，上述现象可以通过对 FBG 作用的应变进行解释。ε_m =1000μstarin，t=0，L=1mm 时，λ_{US}/L 分别为 100、1、0.1 时，沿光纤轴向光栅长度的应变分布如图 6 所示。可以看到，当 λ_{US}/L=100 时，在光栅长度范围内的应变分布是常数。在均匀应变作用下，光栅的周期变化也是常数，因而 FBG 的反射谱整体发生偏移而形状不变。当 λ_{US}/L=1时，应变沿整个光栅长度变化，因而光栅的周期也沿光纤轴向变化，由光栅理论，这样的啁啾影响了光栅反射谱的形状，导致反射谱变宽而峰值反射率降低。当 λ_{US}/L=0.1时，光栅既承受拉(正)应变，也承受压(负)应变，这两部分应变互相抵消，光栅总体承受的平均应变为零，因而光栅的反射谱形状未发生任何变化。

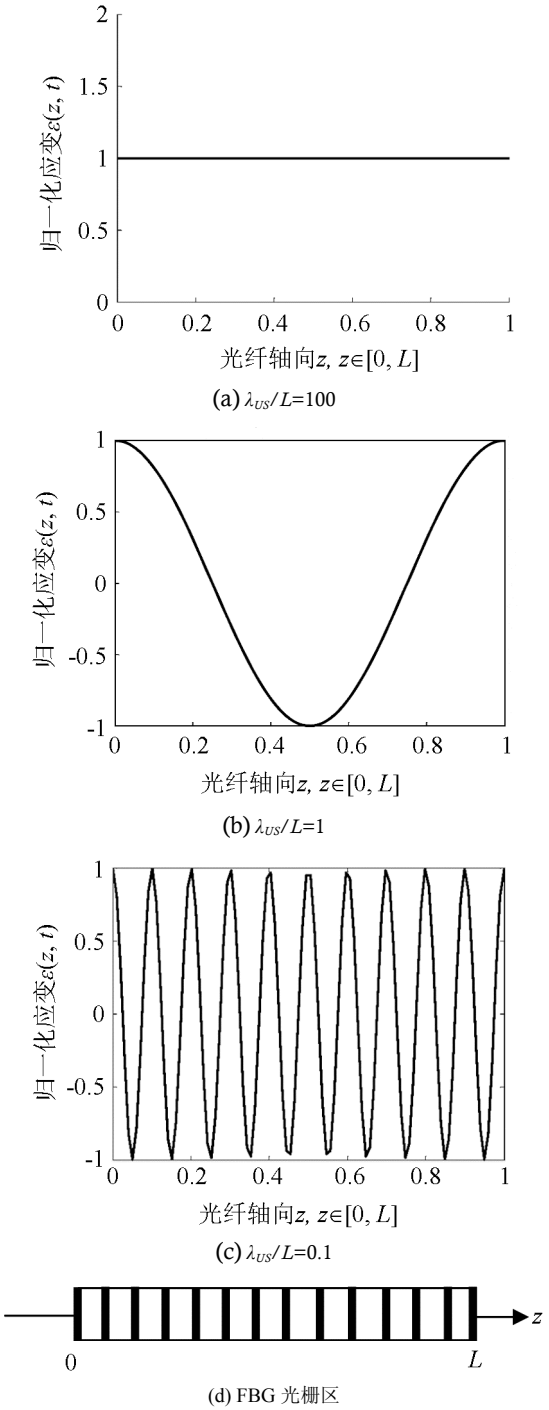

图 6 不同 λ_{US}/L 下沿光纤轴向光栅长度的声应变分布

Fig.6 The acoustic stain distribution along the length of grating of fiber axis for different ratios of λ_{US}/L

5 结 论

当 FBG 传感器用于兰姆波信号的接收时，传感器对由 PZT 发射的超声信号的作用必须灵敏。当 λ_{US}/L=0.1，也即 $\lambda_{US}<L$ 时，反射谱对超声信号的作用实际上是不敏感的；而当 λ_{US}/L=1，也即 $\lambda_{US}=L$ 时反射谱变宽，形状变化，峰值反射率降低，其中心波长的偏移难以识别。这两种情况都不适用于兰姆波检测。而当 λ_{US}/L=100，也即 $\lambda_{US}\gg L$ 时，反射谱的中心波长整体偏移。当中心波长向右偏移时，光栅承受了拉应变，当中心波长向左偏移时，光栅承受了压应变，表现在兰姆波信号上为兰姆波到达时刻波形上升或下降[5]。因此，当 $\lambda_{US}\gg L$ 时，FBG 传感器可用于兰姆波信号的检测。这个结论为利用新的兰姆波无损检测系统在布拉格光栅长度的设计和兰姆波波长的选择方面提供了有用的工具。

下一步将是选择合适的兰姆波模式及其激发频率，设计合理的 FBG 光栅长度，利用文中所建立的兰姆波检测系统所做的实验工作。

参 考 文 献

[1] Kuang K S C, Kenny R, Whelan M P, Cantwell W J, Chalker P R. Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials[J]. Compos. Sci. Technol., 2001, **61**: 1379-1387.

[2] Okabe Y, Tsuji R, Takeda N. Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack location in composites[J]. Composites Part A, 2004, **35**(1): 59-65.

[3] Yashiro S, Takeda N, Okabe T, Sekine H. A new approach to predicting multiple damage states in composite laminates with embedded FBG sensors[J]. Comp. Sci. Technol., 2005, **65**(3/4): 659-667.

[4] 张海燕，孙修立，石志东，陈娜，肖悦娱. 兰姆波检测时光纤非本征法布里-玻罗传感器灵敏度理论分析[J]. 声学技术, 2009, **28**(4): 485-488.
ZHANG Haiyan，SUN Xiuli，SHI Zhidong，CHEN Na，XIAO Yueyu. Sensitivity analysis of extrinsic Fabry-Perot interferometer optical fiber sensor for detecting Lamb waves[J].Technical Acoustics, 2009, **28**(4): 485-488.

[5] Tsuda H, Toyama N, Urabe K, Takatsubo J. Impact damage detection in CFRP using fiber Bragg gratings[J]. Smart Mater. Struct., 2004, **13**: 719-724.

[6] Takeda N, Okabe Y, Kuwahara J, Kojima S, Ogisu T. Development of smart composite structures with small-diameter fiber Bragg grating sensors for damage detection: Quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using Lamb wave sensing[J]. Comp. Sci. Technol., 2005, **65**: 2575-2587.

[7] Betz D, Thursby G, Culshaw B, Staszewski W J. Structural damage location with fiber Bragg grating rosettes and Lamb waves[J]. Structural health monitoring, 2007, **6**(4): 299-308.

[8] Lee J R, Tsuda H, Toyama N. Impact wave and damage detections using a strain-free fiber Bragg grating ultrasonic receiver[J]. NDT and E International, 2007, **40**(26): 85-93.

[9] Minardo A, Cusano A, Bernini R, Zeni L, Giordano M. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves[J]. IEEE Transaction on ultrasonics, ferroelctrics, and frequency control. 2005, **52**(2): 304-312.

[10] 曾山，叶险峰. 超声波作用下的光纤布拉格光栅频谱分析[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2007, **6**(3): 293-296
CENG Shan, YE Xianfeng. Spectral analysis of fiber Bragg grating under ultrasound wave[J]. J. Jiangnan University(Natural science edition), 2007, **6**(3): 293-296.

[11] Ling H Y, Lau K T, Jin Wei, Chan K C. Characterization of dynamic strain measurement using reflection spectrum from a fiber Bragg grating[J]. Optics Communications, 2007, **270**: 25-30.

[12] Coppola G, Minardo A, Cusano A, et al. Analysis of feasibility on the use of fiber Bragg grating sensors as ultrasound detectors[A]. Eric Udd, Daniele Inaudi. Smart structures and materials: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials[C]. Newport Beach, CA, USA: Proceeding of SPIE, 2001, 8328: 224-232.