

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209535

# 光纤光栅传感器阵列在撞击定位监测中的应用\*

王威<sup>1</sup>,陶传义<sup>1,2</sup>,朱悦青<sup>1</sup>,高晓凤<sup>1</sup>,成俊桦<sup>1</sup>

(1. 重庆理工大学理学院 重庆 400054; 2. 重庆理工大学绿色能源材料技术与系统重庆市重点实验室 重庆 400054)

**摘要:**本文提出基于半导体环形激光器的光纤传感阵列系统,用于在铝板上撞击定位监测。采用光纤法布里-珀罗(F-P)标准具对光纤布拉格光栅(FBG)传感器信号进行解调。施加在FBG传感器的应变被编码为FBG反射光的波长位移,然后由自由光谱范围为50 GHz的光纤F-P标准具转换为强度调制。通过波分复用技术,光纤F-P标准具可同时解调多个FBG信号,光纤传感阵列系统安装在厚度为1 mm的铝板上,50 g的小钢球在20 cm的高度自由下落撞击铝板产生声发射信号。利用时频小波分析,从测量的FBG传感器瞬态响应中获得的Lamb波的群速度频散曲线,并根据三角定位算法,确定撞击点的坐标。经过撞击试验,通过本系统和定位算法的平均定位精度误差在30.89 mm,达到了较好的精度。

**关键词:** FBG阵列;小波分析;定位算法;光纤法布里-珀罗标准具;撞击监测

中图分类号: TH744 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.40

## Application of fiber Bragg grating sensor array in impact location monitoring

Wang Wei<sup>1</sup>, Tao Chuanyi<sup>1,2</sup>, Zhu Yueqing<sup>1</sup>, Gao Xiaofeng<sup>1</sup>, Cheng Junhua<sup>1</sup>

(1. School of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Green Energy Materials Technology and Systems, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** In this article, an optical fiber sensing array system based on semiconductor ring laser is proposed for impact location monitoring on aluminum plate. A fiber Fabry-Perot etalon is used to demodulate the signal of fiber Bragg grating sensor (FBG). The strain applied to the FBG is encoded as the wavelength shift of the reflected light of the FBG sensor. Then, it is converted into intensity modulation by the optic Fabry-Perot etalon with a FSR of 50 GHz. The optic F-P etalon can demodulate multiple FBG signals at the same time via wavelength division multiplexing. The optical fiber sensing array system is installed on an aluminum plate with a thickness of 1 mm. A 50 g small steel ball falls freely at a height of 20 cm and strikes the aluminum plate to generate acoustic emission signals. By using time-frequency wavelet analysis, the group velocity dispersion curve of Lamb wave is obtained from the measured transient response of the FBG sensor, and the coordinates of the impact point are determined according to the triangular positioning algorithm. Through the impact test, the average positioning accuracy error of the system and positioning algorithm is 30.89 mm, which achieves good accuracy.

**Keywords:** FBG array; wavelet analysis; localization algorithm; optic Fabry-Perot etalon; impact monitoring

## 0 引言

声发射是广泛应用于结构健康无损检测的技术,该技术依赖于材料在断裂或其他产生应变的过程中所产生的瞬态声波。声发射的主要优点是可以通过声发射的激励信号波到材料上的传感器的到达时间的差异来定位<sup>[1]</sup>。而定位的精度取决于时差的精度和材料波速的测

定。光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器作为一个新型的传感器,可以用于测量压力、温度、应变等物理量<sup>[2]</sup>。相比较传统的压电式传感器(piezoelectric transducer, PZT),由于它响应频带宽、体积小、重量轻、可绕曲、不受电磁干扰、耐高温(>600℃)、可复用性以及光纤内稳定传输信号等优势,在工程检测、航空领域、医疗、石油化工等领域受到广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。压电式传感器由于其带宽较宽,常用于应力波的检测,如在混凝土结

收稿日期:2022-03-31 Received Date: 2022-03-31

\* 基金项目:国家自然科学基金(51874064)、重庆理工大学研究生创新项目(gzlcx20223299, gzlcx20223290)资助

构和金属结构中的损伤检验中,有着大量的应用<sup>[5]</sup>。但是由于压电式传感器不易多路复用导致占用监视通道较多,采用电缆传输信号导致体积重量较重,容易受到电磁干扰等不足,限制了其在航空领域的应用。

FBG 声发射传感系统在检测损伤应用中,可分为主动式检测和被动式检测。主动式检测是一个超声波发射器在测量物体上发射声波,声波在物体内传播到已知距离的 FBG 传感器捕获信号,通过对 FBG 动态应变解调之后的信号与未受损结构的原始基线波形进行对比,判断物体是否存在损伤,与基线波形的任何偏差均被解释为结构损坏引起的异常,主动式检测技术对工作环境、温度以及传感器特性的变化是非常敏感的<sup>[6-9]</sup>。因此,主动式测量技术主要用于测量物体的损伤而不是用于实时监测撞击信号,属于事后检测。被动式检测是将 FBG 传感器嵌入物体内部,实时检测物体受到撞击或者冲击的信号,用于及时发现物体的损伤或者应变。被动式检测系统主要有 3 个主要的要求:1) 始终处于监测状态,因为事件发生的时间不可预测;2) 适应由结构可能受到的温度波动或者准静态应变引起的低频温度漂移,该漂移可使声发射或撞击应力波的通常较小的应变信号变得模糊;3) 可以多路复用以容纳大量的传感器覆盖监测物体结构,因为事件发生的位置同样不可预测。因此,研究多组 FBG 传感器被动式捕获动态应变信号精确定位损伤位置就变得非常有意义。对于高频动态应变的检测,FBG 传感器的应用常常受到限制<sup>[10-11]</sup>。FBG 传感器的调制是用内置在光纤核心周期性折射率来调制的,而 FBG 的反射光的波长是由折射率调制的节距所决定的。施加在 FBG 上的动态应变改变了折射率调制,从而使得 FBG 反射光的中心波长发生变化。在应用中,对于 FBG 动态应变信号多路复用性的解调和探测分辨率成了研究人员需要解决的关键问题。Mao 等<sup>[12]</sup>提出基于一种不可调谐的光纤法布里-珀罗滤波器,研究一种基于边缘滤波的强度解调原理来解调 FBG 的动态应变信号,对高频动态应变和超声信号都获得了非常高的检测能力和较高分辨率。本文通过光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 标准具实现 FBG 传感器复用解调。

陈思博等<sup>[13]</sup>针对航空板结构检测的需求,使用分形计盒维数板结构分布式光纤冲击荷载的方法,利用偏最小二乘回归法进行数据拟合,定位识别误差在 4~8 cm。李彤韡等<sup>[14]</sup>针对机翼结构低速冲击载荷定位需求,提出了基于时差辨识的冲击载荷定位方法,定位平均误差为 8.4 cm。以上的方法定位对于大器件材料精度不够,定位识别误差较大。为了改进定位精度,提出基于多个 FBG 传感器通过光纤 F-P 标准具解调,采用小波分析的方法,计算 Lamb 波<sup>[15-16]</sup>群速度的各频率的相对时间差,提升定位的精度,并检验了此技术定位的精度,从而实现了在平板材料中的较为精确的定位。

## 1 理论分析

### 1.1 解调原理

采用光学法布里-珀罗 (F-P) 标准具对光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器信号进行解调的原理在文献<sup>[11]</sup>已经报道,这里简要说明。由于 FBG 的反射光谱和高斯分布形状基本相似,设 FBG 的反射光谱函数为  $G(\lambda)$ <sup>[17]</sup>:

$$G(\lambda) = G_0 e^{-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\sigma_0^2}} \quad (1)$$

式中:  $\lambda_B$  为 FBG 的中心波长; FBG 反射光谱的带宽为  $\sigma_0$ ,  $G_0$  为 FBG 在中心波长  $\lambda_B$  处的反射率。对于 F-P 标准具的透射方程可以表示为:

$$T_{\text{FP}}(\lambda) = \frac{T^2}{(1+R)^2} \times \left[ 1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left( \varphi + \frac{2n\pi L \cos \theta}{\lambda} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

其中,  $T$  和  $R$  分别为 F-P 标准具的透射率和反射率;  $\varphi$  为 F-P 腔表面引起的相位变化;  $L$  和  $n$  分别为 F-P 腔的腔长和折射率;  $\theta$  为信号光进入 F-P 腔的入射角。接收到信号的光功率的函数是 FBG 反射谱与 F-P 标准具透射方程的积分,故输出信号光的强度为:

$$P(\lambda) \propto \int_0^{+\infty} G(\lambda) T_{\text{FP}}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

此光信号可以通过光电探测器转换为电信号。FBG 传感器阵列的反射光谱如图 1 所示,可以看出,实验所用 FBG 传感器阵列的中心波长分别为 1 539.8、1 545.1 和 1 550.1 nm。3 个 FBG 传感器的反射光功率是分布均匀的,且线宽为 0.2 nm,而 F-P 标准具之间的相邻谐振峰为 0.4 nm, FBG 反射光与 F-P 腔的光谱有部分重叠。当 FBG 传感器受到应变时, FBG 的中心波长会发生偏移,偏移的反射光进入到 F-P 腔,重叠部分的信号发生变化,产生新的信号光,导致输出的信号光强度发生变化,通过这样输出信号光强度的变化判断 FBG 的应变信号。

### 1.2 定位算法

本实验定位撞击点采用的是三角定位算法,此算法是基于利用撞击在铝板上激发 Lamb 波模态,通过 3 个不同 FBG 传感器的动态应变改变中心波长漂移来计算 Lamb 波群速度到 3 个 FBG 传感器的相对距离,以 3 个传感器组所在点为圆心,半径为计算所得的撞击点与传感器距离  $d$  画圆,三圆相交即为撞击点计算值,如图 2 所示。

Lamb 波为在自由边界板中弹性扰动传播,分为横波和纵波在两个平行表面结构中相互耦合的应力波<sup>[18]</sup>。Lamb 波有两种基本模式,分别为对称型模式 (S 模式) 和反对称型模式 (A 模式)。两种模式的应力波又包含不同

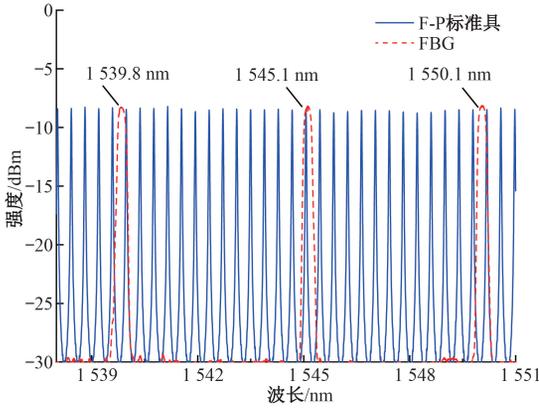


图1 FBG传感器阵列的反射光谱

Fig. 1 Reflection spectrum of FBG sensor array

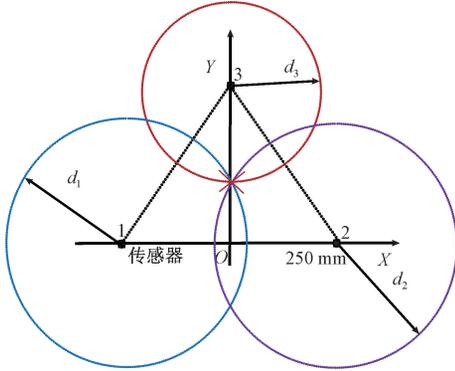


图2 三角定位算法原理

Fig. 2 Principle of the triangulation algorithm

频率和相速度的若干波形,分别用  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$  和  $S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$  表示。考虑到非对称性 Lamb 波  $A_0$  模式的色散现象,本文将 FBG 传感器捕获的信号通过小波变换拟合与理论的 Lamb 波  $A_0$  模式的群速度进行对比,撞击点到 FBG 传感器的距离  $d$ ,用小波变换后的数据所代替:

$$d = t_0(f_0) C_g(f_0) \quad (4)$$

其中,  $C_g$  是在  $f_0$  频率对应的群速度;  $t_0(f_0)$  为 FBG 传感器响应的小波变换所测量的发射源与传感器之间的时间差。因板波在各个频率高度分散,所有频率的分量在撞击点和传感器之间的距离是一样的,所以:

$$d = t_0(f_0) C_g(f_0) = t_1(f_1) C_g(f_1) = \dots = t_n(f_n) C_g(f_n) \quad (5)$$

式中:  $N+1$  个点为频散曲线上频率的总个数;  $t_0(f_0)$  与  $t_n(f_n)$  之间的差值为频率  $f_0$  与频率  $f_n$  之间的绝对延迟; 频率  $f_0$  为频散曲线上的任意一频率,频率  $f_1$  为频率  $f_0$  之后的一个频率;同理,频率  $f_n$  为频率  $f_0$  之后的第  $n$  个频率。因为  $t_0(f_0)$  为频率  $f_0$  的未知时滞,故难以算出撞击

点的位置。故将式(5)重新改写,利用已知的相对时间差  $\Delta t$  求得<sup>[19]</sup>:

$$d = t_0(f_0) C_g(f_0) =$$

$$[t_0(f_0) + (t_n(f_n) - t_0(f_0))] C_g(f_n) \quad (6)$$

$$d = t_0(f_0) C_g(f_0) = [t_0(f_0 + \Delta t_n)] C_g(f_n) \quad (7)$$

式中:  $\Delta t_n = t_n(f_n) - t_0(f_0)$ 。

$$t_0(f_0) = \frac{[\Delta t_n] C_g(f_n)}{C_g(f_0) - C_g(f_n)} \quad (8)$$

式中:  $\Delta t_n$  是从实验数据经小波变换中获得的,是色散曲线中频率  $f_n$  和  $f_0$  的相对时间差。而群速度  $C_g$  由铝板上 Lamb 波群速度频散曲线得出。群速度频散方程为:

$$\frac{\tanh \frac{\beta d}{2}}{\tanh \frac{\alpha d}{2}} = \frac{(\alpha^2 + \beta^2)^2}{4\varepsilon^2 \alpha \beta} \quad (9)$$

$$\frac{\tanh \frac{\beta d}{2}}{\tanh \frac{\alpha d}{2}} = \frac{4\varepsilon^2 \alpha \beta}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} \quad (10)$$

式中:  $\varepsilon = 2\pi f / C_p$ ,  $\alpha = \varepsilon [1 - (C_p / C_l)^2]^{1/2}$ ,  $\beta = \varepsilon [1 - (C_p / C_t)^2]^{1/2}$ ,  $d$  为铝板厚度,  $f$  为 Lamb 波的频率,  $C_p$  为 Lamb 波的相速度,  $C_l$  为铝板纵波速度,  $C_t$  为铝板横波速度。本系统采用的铝板纵波和横波速度的参数值为:  $C_l = 6370$  m/s,  $C_t = 6160$  m/s, 其中相速度与群速度关系为:  $C_g = dw/dk$ ,  $C_p = w/k$  (其中  $k$  为波数,  $w$  为角频率,  $w = 2\pi f$ ), 通过式(9)、(10)可以看出,  $k$  与  $w$  的关系是非线性的,故  $C_g = dw/dk$  不是常数,即  $C_g$  对应不同的频率有着不同的值,且一个  $C_g$  值可能对应多个  $w$  和  $k$  的曲线。Lamb 波的这种特性在  $C_g - f \cdot d$  平面内就表示为一系列的曲线。选取无截止频率(在截止频率以上模态可以传播)的模态作为  $A_0$  模和  $S_0$  模,其后相邻的模态分别为  $A_1, A_2, \dots, A_n$  和  $S_1, S_2, \dots, S_n$ 。根据以上关系求出铝板群速度频散曲线如图3所示。

## 2 实验验证

### 2.1 实验装置

本文所提出的基于 F-P 标准具解调的环形阵列激光传感系统实验装置如图4所示。3个级联的 FBG 传感器连接到环形器。基于 F-P 标准具解调的环形阵列激光传感系统采用半导体光放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)发射光源,光源经  $1 \times 2$  环形器后进入到 FBG 传感阵列,FBG 传感阵列反射的信号光透过光纤耦合器(90:10)一端(90%)接入 50 GHz 的 F-P 标准具对 FBG 反射信号光解调,再由光隔离器(isolator)隔离反向

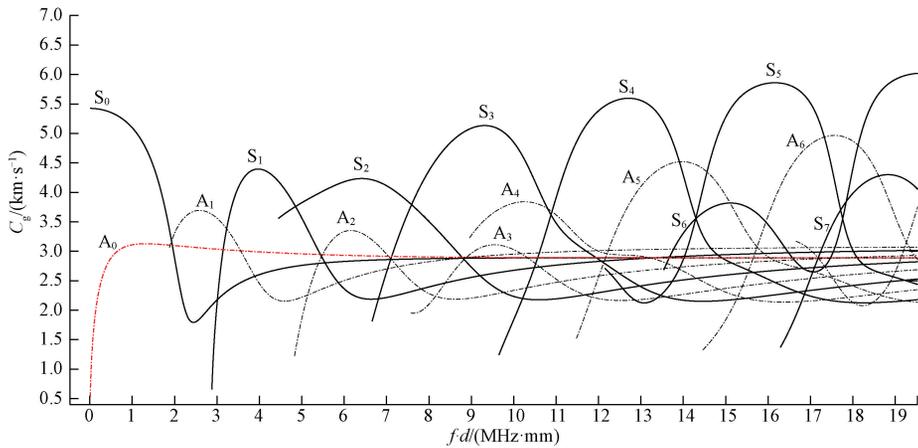


图 3 铝板 Lamb 波群速度频散曲线

Fig. 3 Lamb wave group velocity dispersion curve of aluminum plate

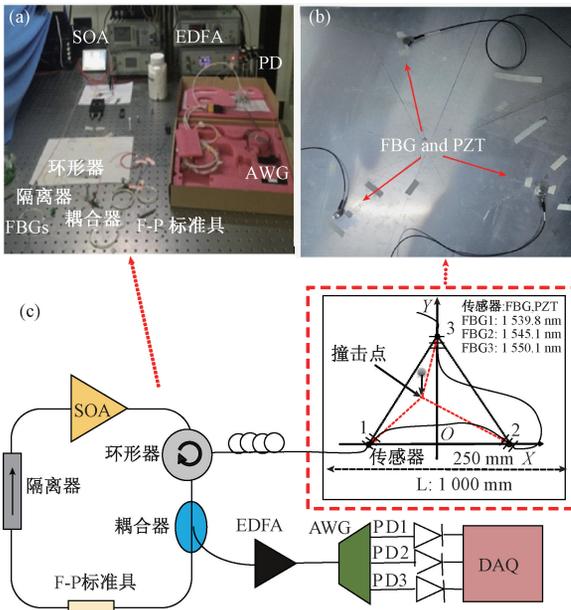


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental device

传输的信号光,使环内信号光单向传输接入 SOA 形成环。环内循环放大解调后的反射信号光经光纤耦合器另一端(10%)进入掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)进行功率放大。反射信号光经 EDFA 放大后通过阵列波导光栅(arrayed waveguide grating, AWG)分成 3 个波长的通道,通过光电转换器(photoelectric detector, PD)转化为输出信号输入到数字采集系统(data acquisition, DAQ)。

本实验装置传感系统部分实物布置和 FBG 传感器阵列在铝板上实物布置如图 4(a)、(b)所示,FBG 传感器阵列呈正三角形布置在 1 000 mm×1 000 mm×1 mm 的铝

板中心。同时,将压电式传感器固定在紧靠 FBG 传感器附近,用于信号的对照。

FBG 传感器和压电传感器在铝板上的布置图如图 4(c)所示,其中以三角形底部中心处为坐标原点,传感器 FBG1(1 539.8 nm)放置处坐标为(-250 mm, 0 mm),传感器 FBG2(1 545.1 nm)放置处坐标为(250 mm, 0 mm),传感器 FBG3(1 550.1 nm)放置处坐标为(0 mm, 250√3 mm)。

### 2.2 实验结果

FBG 传感器阵列和 PZT 传感器阵列在铝板同一位置撞击的时间响应信号如图 5 所示,其中 PZT 传感器在铝板上(0 mm, 100 mm)处的时间响应信号如图 5(a)所示,FBG 传感器在铝板上(0 mm, 100 mm)处的时间响应信号如图 5(b)所示。50 g 的小钢球在铝板垂直上方 20 cm 处,通过自由下落撞击在铝板坐标为(0 mm, 100 mm)处的 FBG 传感器和压电传感器接收的时间响应信号。从图 5 中看出压电传感器信号强度大于 FBG 传感器信号强度,但是 FBG 传感器接收的信号与压电传感器的信号形状基本相同,说明本实验装置可以多路复用解调,反映复杂信号的细节。由于撞击点离 FBG3 位置较远,FBG1 和 FBG2 与撞击点的位置距离相同,故图中所示 FBG1 和 FBG2 的信号强度基本相同,且大于 FBG3 的信号强度。

FBG 传感器在坐标为(-200 mm, 0 mm)的撞击信号的小波变换和时频图如图 6 所示,通过时频图,可以得到不同频率下的时间值。在图中选取 150 kHz 为  $f_0$ , 40 kHz 为  $f_n$ ,并得出该频率下到达传感器的时间分别为: 947 μs、987 μs。根据图 3 群速度频散曲线得出  $f_0$  和  $f_n$  的群速度分别为: 2.05 km/s、1.136 km/s。将数据代入

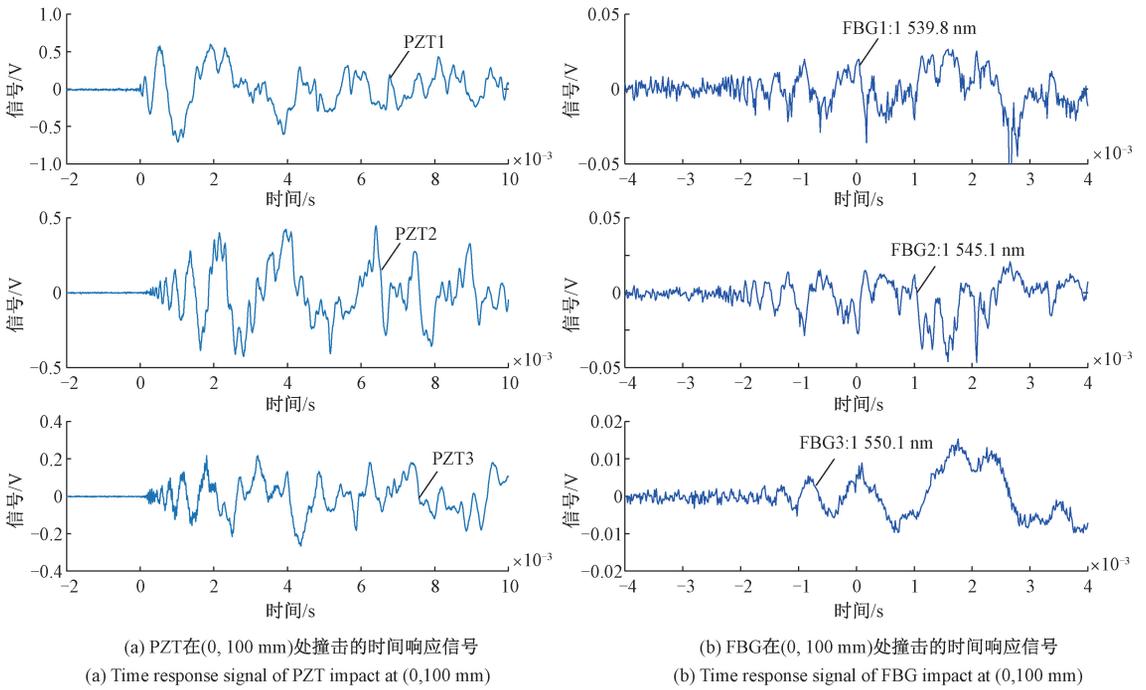


图5 FBG传感器阵列和PZT传感器阵列对同一位置发生撞击的时间响应信号

Fig. 5 Time response signal of FBG sensors array and PZT sensors array impacting the same position

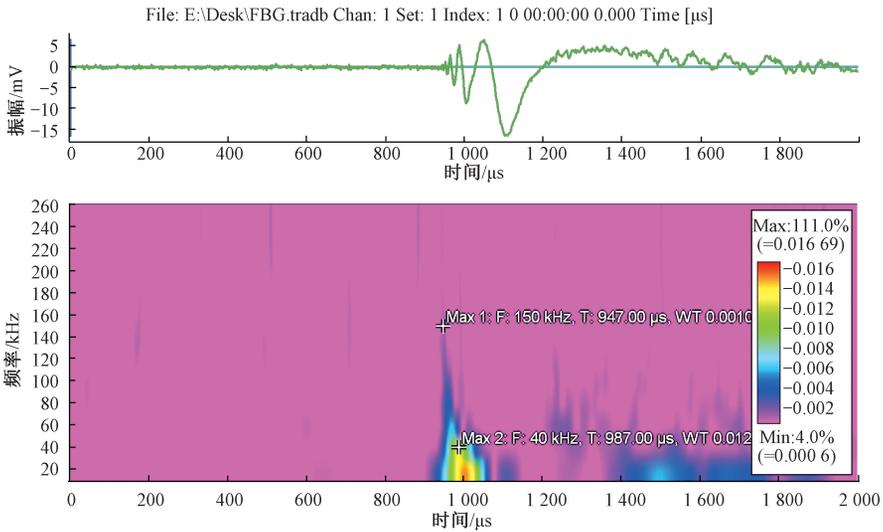


图6 FBG传感器对撞击信号的小波变换

Fig. 6 Wavelet transform of impact signal by FBG sensor

式(9)和(10)得出,  $d_1$  为 101.92 mm。同理得出其余两个 FBG 传感器信号距离  $d_2$  为 403.40 mm、 $d_3$  为 431.63 mm。由此, 求出撞击点坐标为 (-152.34 mm, 29.16 mm), 而实际撞击坐标位置为 (-200 mm, 0 mm), 误差较大, 但是在理想误差的范围内。

FBG 传感器和 PZT 传感器在铝板上的撞击定位结果如图 7 所示。从图 7 FBG 传感器与 PZT 传感器定位结果对比可以看出, 通过本文提出的基于 F-P 标准具解调

的环形阵列激光传感系统以及定位算法用于声发射源定位, 结果与实际位置的误差大多在 30 mm 左右, 最大误差仅在 55 mm 左右, 相比较于 PZT 传感器定位精度略显大, 但对于工程应用来说已具有良好的精确度。

本系统采用了 3 个级联的 FBG 传感器来验证撞击探测能力, FBG 传感器布局在铝板上, 通过与 PZT 传感器定位精度对比得出系统的性能, 对于本系统的具体参数如表 1 所示。

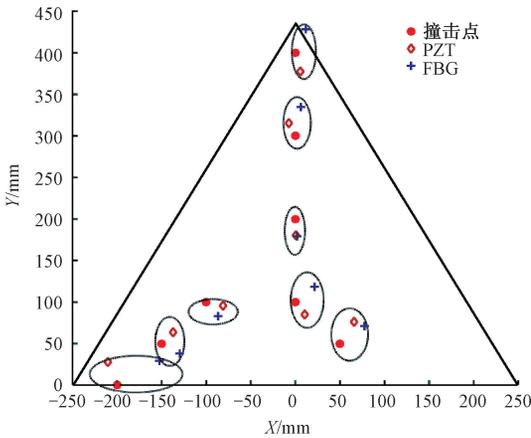


图 7 FBG 传感器与 PZT 传感器定位结果对比

Fig. 7 Comparison of positioning results between FBG sensors and PZT sensors

表 1 系统的具体参数

Table 1 Specific parameters of the system

性能参数	单位	参数值
工作波长	nm	1 530~1 565
频率范围	Hz	600~500 000
频率分辨率	kHz	1
通道数	-	40
定位精度	mm	≤55

本系统 FBG 传感器定位结果误差产生的原因主要在于,FBG 传感器对于来自不同方向 Lamb 波接收的灵敏度不一样、三角定位算法存在的系统误差以及在铝板上设置 FBG 坐标的实验误差,在后续的工作中,将采用双 FBG 传感器在同一个定位点处“八字”型布置或者“V”型布置接收动态应变信号以解决不同方向接收的灵敏度问题,考虑换用 25 GHz 的 F-P 标准具来提升解调动态应变信号的灵敏度,多次测量 FBG 在铝板上的坐标,减少实验误差,通过对比选用更加精确的定位算法以提升系统的定位精度。

### 3 结 论

本文提出了基于 F-P 标准具解调的环形阵列激光传感系统,对该系统重要组成部分 F-P 标准具的解调进行了原理分析,当 FBG 传感器受到外界应力变化时,中心波长发生偏移,经过 F-P 标准具的发射光信号的强度发生变化,将 FBG 的应变信号变为强度变化信号。通过三角定位算法的计算,对声发射源定位的绝对误差在 30 mm 左右,对于 FBG 传感器而言,定位结果精度较好。

总体而言,本系统具有抗电磁干扰、重量轻的优势在化工领域、航空航天等领域具有一定的实用价值和现实意义。

### 参考文献

[ 1 ] DOWNS K S, HAMSTAD M A. Wave propagation effects relative to AE source distinction of wideband AE signals from a composite pressure vessel[J]. Journal of Acoustic Emission, 1996, 14(3): S61-S67.

[ 2 ] 宋世德,张作才,王晓娜. 光纤布拉格光栅水下钢筋腐蚀传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1002-1008.

SONG SH D, ZHANG Z C, WANG X N. Optical fiber grating sensor for monitoring corrosion of reinforcing steel under water[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7): 1002-1008.

[ 3 ] SEIM H, UDD E, SCHULZ W, et al. Development and deployment of fiber optic highway and bridge monitoring systems[C]. Proceedings of SPIE, 2000, 3995(6): 479-482.

[ 4 ] ANSARI F. Fiber optics sensors for construction materials and bridges[J]. Continuous Structures, 1998, 10(4): 265-265.

[ 5 ] 刘孝禹,饶玉龙,张继承,等. 基于压电传感器的木材轴压损伤监测[J]. 压电与声光, 2020, 42(5): 681-682.

LIU X Y, RAO Y L, ZHANG J CH, et al. Wood axial compressive damage monitoring based on piezoelectric sensor [J]. Piezoelectric and Acousto-Optic, 2020, 42(5): 681-682.

[ 6 ] PARK H W, SOHN H, LAW K H, et al. Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 302(1): 50-66.

[ 7 ] PARK G, FARRAR C R, SCALEA F L, et al. Performance assessment and validation of piezoelectric active-sensor in structural health monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(6): 1673-1683.

[ 8 ] KIRIKERA G R, SUN L, KIL H G, et al. Matched ultrasonic transducers and assessment of transducer performance for robust structural health monitoring applications[C]. AIP Conference Proceedings, 2008, 975(1): 1436-1444.

[ 9 ] PETCULESCU G, KRISHNASWAMY S, ACHENBACH J D. Group delay measurements using modally selective Lamb wave transducers for detection and sizing of delaminations in composites [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(1): 015007.

[ 10 ] FOMITCHOV P, KRISHNASWAMY S. Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor [J]. Optical

- Engineering, 2003, 42: 956-963.
- [11] BETZ D C, THURSBY G, CULSHAW B, et al. Structural damage location with fiber Bragg grating rosettes and lamb waves [J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6(4):299-308.
- [12] 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.
- [13] 陈思博, 潘晓文, 刘金福. 基于偏最小二乘法分形计盒维数的冲击定位方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(2): 97-102.  
CHEN S B, PAN X W, LIU J F. Impact location method based on fractal box counting dimension of partial least squares method [J]. Vibration and Impact, 2021, 40 (2): 97-102.
- [14] 李彤韡, 曾捷, 张景川, 等. 基于时差辨识的机翼模型光纤冲击定位方法[J]. 光电子·激光, 2017, 28(12):1337-1343.  
LI T W, ZENG J, ZHANG J CH, et al. Optical fiber impact location method of wing model based on time difference identification [J]. Optoelectronics Laser, 2017, 28(12): 1337-1343.
- [15] 张维刚, 戴美泽, 郭世行, 等. 兰姆波频散方程的理论求解及实验研究[J]. 声学技术, 2016, 35(5): 403-407.  
ZHANG W G, DAI M Z, GUO SH X, et al. Theoretical solution and experimental study of Lamb wave dispersion equation [J]. Acoustic Technology, 2016, 35 (5): 403-407.
- [16] 沈意平, 唐斌龙, 王送来, 等. 压电纤维布置结构对Lamb波方向识别的影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(1):154-161.  
SHEN Y P, TANG F L, WANG S L, et al. Study on the influence of piezoelectric fiber configurations on Lamb wave direction identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41 (1): 154-161.
- [17] WEI Z, CHEN W, LEI X, et al. Accuracy evaluation of demodulation results of fiber Bragg grating sensors[J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9212-9220.
- [18] 阎石, 张海凤, 蒙彦宇. Lamb波频散曲线的数值计算及试验验证[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2010,27(1):1-4.  
YAN SH, ZHANG H F, MENG Y Y. Numerical calculation and experimental verification of Lamb wave dispersion curve [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2010, 27 (1): 1-4.
- [19] KIRIKERA G R, BALOGUN O, KRISHNASWAMY S. Adaptive fiber Bragg grating sensor network for structural health monitoring; Applications to impact monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2011,10(1):5-16.

### 作者简介



王威,2018年于重庆理工大学获得学士学位,现为重庆理工大学硕士生,主要研究方向为光纤传感技术。

E-mail: smartwang.wei@qq.com

Wang Wei received his B.Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2018.

He is currently a master student at Chongqing University of Technology. His main research interest is optical fiber sensing technology.



陶传义(通信作者),分别在2005年、2007年和2011年于重庆大学获得学士、硕士和博士学位,现为重庆理工大学教授、硕士生导师,主要研究方向为光纤传感系统与智能结构。

E-mail: taochuanyi@cqut.edu.cn

Tao Chuanyi (Corresponding author) received his B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees all from Chongqing University in 2005, 2007, and 2011, respectively. He is currently a professor and a master advisor at Chongqing University of Technology. His main research interests include optical fiber sensing systems and smart structures.