

文章编号 1004-924X(2009)11-2672-06

FBG 旁瓣对复用解调的影响及旁瓣抑制方法

陈伟民, 张娅玲, 章 鹏, 张 亮

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 光电工程学院, 重庆 400044)

摘要:为了解决光纤光栅传感器性能蜕化对复用解调结果的影响,基于光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器的解调原理,分析了FBG光栅串联复用时反射谱旁瓣对解调结果的影响。通过理论推导及模拟仿真,发现FBG传感器性能蜕化时存在反射谱的带宽变大、峰值降低以及旁瓣增大等现象。分析了反射谱旁瓣以及链路连接损耗对FBG复用解调结果产生的影响,并针对这个问题,提出了利用浮动解调阈值以及抑制反射谱旁瓣的方法来减少解调结果的出错率。最后,实验证实了相关理论的正确性与方法的可行性,结果表明,利用本文提出的方法可将FBG复用解调结果的出错率由原来的11.36%降低为0,极大地提高了应变测量结果的准确性。

关键词:光纤布拉格光栅;应变传感器;串联复用;旁瓣;蜕化

中图分类号:TN253 文献标识码:A

Affects of sidelobes of FBG on multiplexing demodulation and suppression methods for sidelobes

CHEN Wei-min, ZHANG Ya-ling, ZHANG Peng, ZHANG Liang

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System,
Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: With the aim to resolve the influence of the performance degeneration of FBG sensors on multiplexed demodulation, the affects of reflection sidelobes on the demodulation of a series multiplexing FBG sensor was analyzed based on the demodulation theory of FBG strain sensors. When the performance of the FBG sensors was degenerated, it was found that the bandwidth of the reflection spectrum was broadened, the peak value fell, and the reflection sidelobe was augmented by both theoretical deduction and simulation. The effects of reflection sidelobes and the link-connected loss on the FBG multiplexed demodulation were analyzed in detail, then the floating demodulation threshold and suppressing reflection sidelobe were presented to resolve the effect and to reduce the error rate of the multiplexing demodulation. Finally, the theory is validated and the method is demonstrated experimentally. Experimental results show that the error rate of the multiplexing demodulation reduces from 11.36% to 0, and the accuracy of the measurement result is greatly improved.

Key words: Fiber Bragg Grating(FBG); strain sensor; series multiplexing; sidelobe; degeneration

收稿日期:2008-10-22;修订日期:2008-11-27.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA04Z433);国家科技支撑计划资助项目(No. 2007BAE15B04)

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器作为光纤传感器很重要的一个分支,广泛应用于大型结构设施的健康监测。FBG 应变传感器是通过传感器输出反射光波长分布特性的分析计算来实现应变测量的,因而具有抗干扰能力强、结构简单、稳定性好的优点^[1-5]。但是,均匀光纤布拉格光栅的反射谱中,除了光栅的主反射带之外,还存在反射谱旁瓣。在正常情况下,多传感器串联复用不影响解调结果。然而,在实际工程应用中,由于光纤光栅本身的质量比较差或者外界环境的影响会使得 FBG 传感器的性能蜕化,出现反射光谱的带宽变大、峰值降低以及旁瓣增大等现象,从而导致解调异常。目前,国内外学者多从解调方法、解调精度等方面对光纤光栅传感器展开研究,而传感器性能蜕化引起的反射谱旁瓣增大等现象并没有引起广泛关注。事实上,对于有许多旁瓣的 FBG 传感器的反射谱,FBG 解调仪将把某些超过解调阈值的旁瓣当作峰值,这样,就会出现解调出的测量峰值波长多于实际传感器数量,从而出现布拉格波长峰值错位现象,导致 FBG 应变传感系统无法得到正确的应变测量值。因此,有必要针对 FBG 应变传感器研究反射谱旁瓣对其的影响,以便能提出相应的解决方法。

本文分析了 FBG 光栅串联复用反射谱旁瓣对解调结果的影响,提出了利用浮动解调阈值以及抑制反射谱旁瓣的方法来减少解调结果出错率,并通过实验验证了相关理论的正确性与方法的可行性。

2 FBG 应变传感器的解调原理

基于 F-P 滤波器的解调方法原理^[6]如图 1 所示,从宽谱光源发出的光经隔离器传送到各个 FBG 传感器,每个 FBG 传感器将各自波长的光束反射回来并经过耦合器引入到 F-P 滤波器中,通过锯齿波驱动 F-P 滤波器,获得整个光纤的反射光谱,并从中测得各个 FBG 传感器的反射峰波长,实现 FBG 传感器的波长解调。

当外界应力引起其中任一 FBG_i 的栅距 Λ_i 或有效折射率 n_{eff} 产生变化时,被光纤光栅反射的

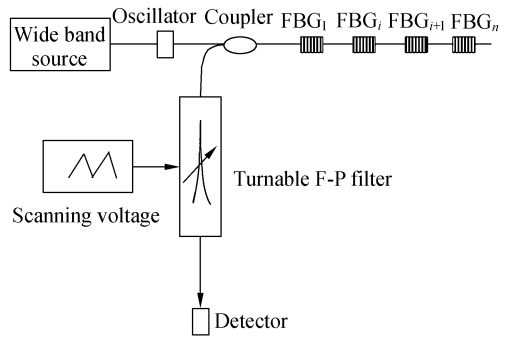


图 1 FBG 传感器的解调原理图

Fig. 1 Demodulation scheme of FBG sensor

布拉格波长 λ_{B} 亦产生相应变化。假设相邻两只传感器受到相反的应变作用,结果如图 2 所示。因此通过求出被光纤光栅反射回的光波长变化量 $\Delta\lambda_{\text{B}}$ 就可以求出应变值,其公式如下^[7]:

$$\Delta\lambda_{\text{B}} = \lambda_{\text{B}}(1 - P_e)\epsilon, \quad (1)$$

其中, P_e 为光纤的弹光系数; ϵ 为轴向应变。

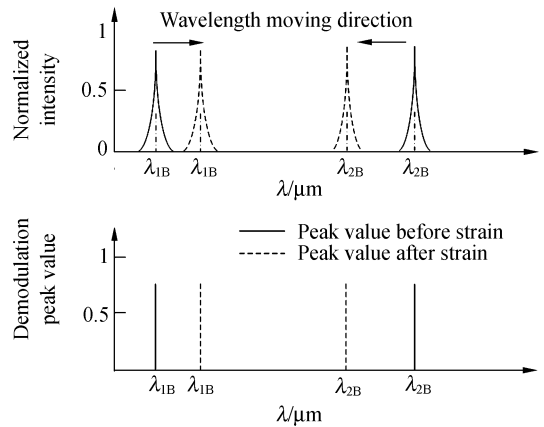


图 2 反射波长随应变的变化

Fig. 2 Reflection wavelength of FBG varies with strain

3 反射谱旁瓣对解调结果影响的研究

3.1 反射谱旁瓣对解调结果的影响

如果 FBG 传感器由于本身的质量不好、或者在使用的过程中外界环境的影响使得传感器自身的性能蜕化,就会出现如图 3 所示的反射谱带宽变大、峰值降低、旁瓣增大的现象,其谱带增宽的反射率 R 可表示为^[8]:

$$R = \frac{\sinh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}{-\zeta^{+2} + \cosh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}, \quad (2)$$

式中,自耦合系数 $\zeta^+ = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \bar{\Delta} n_{\text{eff}}$, 其中, $\bar{\Delta} n_{\text{eff}}$ 是平均折射率的变化, 在此为常数; λ_B 是光栅的中心反射波长; 互耦合系数 $\kappa = \frac{\pi}{\lambda} s \bar{\Delta} n_{\text{eff}}$, 其中 s 表示条纹可见度, 在 $0.5 \sim 1$ 之间取值。

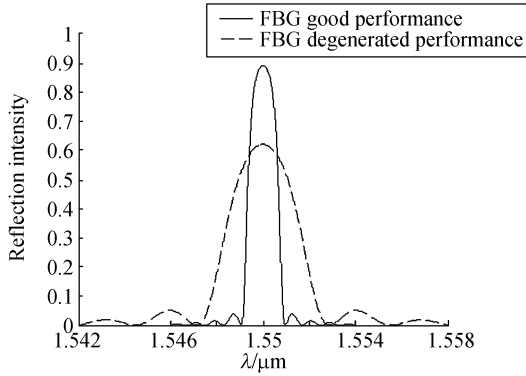


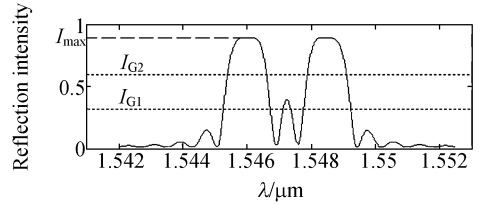
图 3 单只 FBG 的反射谱

Fig. 3 Reflection spectrum of single FBG

由于反射旁瓣的光强是反射峰值的几十分之一、甚至上百分之一, 因此对于单只 FBG 传感器反射旁瓣并不会影响 FBG 传感器的解调结果。

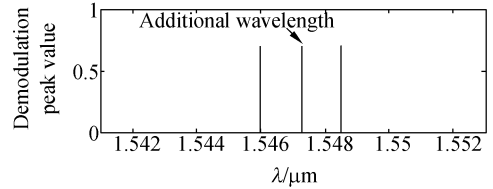
但是在实际的结构健康监测中, 一般采用两只以上串联分布的 FBG 传感器进行结构监测, 当两只传感器的波峰相距较远的情况下, 解调得到正确的波长值(如图 4 所示)。然而, 当两只 FBG

传感器受到相反的应变作用而产生光谱靠近到一定程度时, 它们反射旁瓣的光强相互叠加而大幅度增强, 从而使得原有的两个光谱峰值中间额外增加了一个峰值(如图 5(a)所示)。当解调系统对此叠加光谱解调时, 会识别出该旁瓣叠加的附加次峰, 形成图 5(b)所示的解调出的测量峰值波长多于实际传感器数量的意外结果。



(a) 反射光谱图

(a) Reflection spectrum



(b) 解调波长分布图

(b) Demodulation wavelength distribution

图 5 反射旁瓣重叠的光谱

Fig. 5 Spectra of reflection sidelobe overlapped

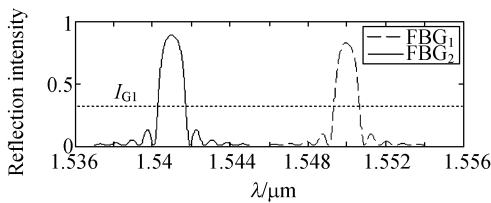
当解调仪的光源增强、链路连接损耗大幅降低时, 在图 5(a)所示的解调阈值 I_{G1} 下, 旁瓣叠加的附加次峰影响波长解调的结果。假设 I_G 为浮动阈值, I_{max} 为布拉格波长反射光强的峰值, ζ 为阈值门限 ($0 < \zeta < 1$), 则浮动阈值的公式描述如下:

$$I_G = \zeta \cdot I_{\text{max}}, \quad (3)$$

采用公式(3)浮动解调阈值的方法, 将阈值设置为图 5(a)的阈值 I_{G2} 以解决这种旁瓣叠加导致的测量峰值波长多于实际传感器数量的问题。

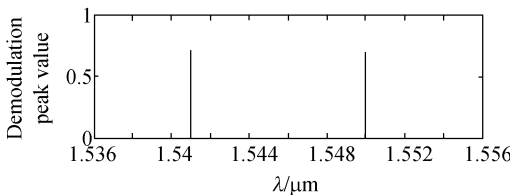
3.2 反射谱旁瓣及其传感器链路连接质量对解调结果的影响

两只 FBG 应变传感器焊接串联分布时, 焊接处不可避免地存在损耗。在工程应用中, 如果接头防护不好, 再加上环境的腐蚀, 损耗相当大。当波峰相距较远时, 仍然可以得到正确的反射光谱图以及波长解调结果(如图 6 所示)。但是当两只 FBG 传感器受到相反的应变作用而光谱靠近到



(a) 反射光谱图

(a) Reflection spectrum



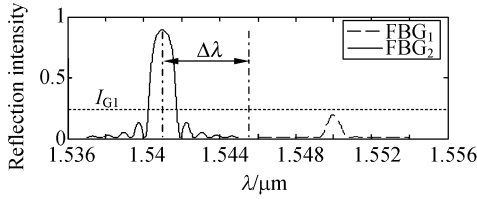
(b) 解调波长分布图

(b) Demodulation wavelength distribution

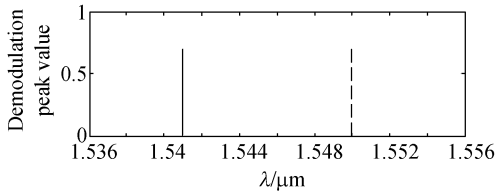
图 4 波峰相距较远的反射光谱

Fig. 4 Reflection spectra with peak of more distance

一定程度时,反射旁瓣的光强叠加到损耗的光谱上,从而使得连接损耗很大的光谱峰值旁边额外增加了一个峰值(如图 7(a)所示)。当解调系统对此叠加光谱解调时,会识别出附加峰值,形成图 7(b)所示的解调出的测量峰值波长存在测量误差 $\Delta\lambda_0$ 的错误结果。

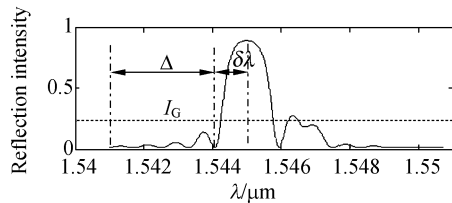


(a) 反射光谱图
(a) Reflection spectrum

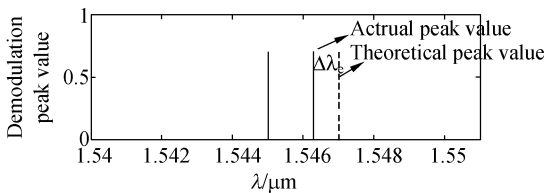


(b) 解调波长分布图
(b) Demodulation wavelength distribution

图 6 连接损耗很大时波峰相距较远的反射光谱
Fig. 6 Reflection spectrum with peak of more distance as connection loss is great



(a) 反射光谱图
(a) Reflection spectrum



(b) 解调峰值分布图
(b) Demodulation peak value distribution

图 7 连接损耗很大时反射旁瓣叠加光谱
Fig. 7 Spectra of reflection sidelobe overlapped as connection loss is great

为了减小反射旁瓣以及连接损耗对解调结果的影响,焊接过程中需要实时观察反射光谱图,以保证每个 FBG 传感器反射光谱的焊接损耗影响很小。其次,在工程应用中应加强接头的防护,避免环境的腐蚀。另外,还需根据宽带光源的带宽以及传感器中心波长的工作范围,确定 FBG 串联的最大值。假设光源带宽为 B ,测量范围为 $\Delta\lambda_i$,中心波长半宽为 $\delta\lambda_i$,旁瓣宽度为 Δ_i ,传感器安装产生的附加应变对应的波长变化量为 $\Delta\lambda_0$,FBG 串联的最大值为 N ,则有:

$$B = 2\left(\sum_{i=1}^N \Delta\lambda_i + \delta\lambda_i + \Delta_i + \Delta\lambda_0\right), \quad (4)$$

考虑中心波长半宽 $\delta\lambda_i$ 以及旁瓣宽度 Δ_i 的情况,根据公式(4)得到 FBG 串联的最大值 N ,从而避免传感器性能蜕化,链路连接损耗很大时反射光谱旁瓣叠加的影响。

3.3 实验研究

在重庆菜园坝长江大桥的结构健康监测系统中,光纤光栅应变传感系统的解调仪器采用上海森首光电科技有限公司的 SEN-01-1131-S09 光纤光栅解调仪,其内置 ASE 宽带光源,波长测量为 1 525~1 565 pm,波长分辨率为 $\delta\lambda = 1$ pm;桥梁应变监测中,将 4 只串联的 FBG 应变传感器首尾串接在一根光纤上进行反射式同步测量,图 8 所示为传感器布点剖面图。

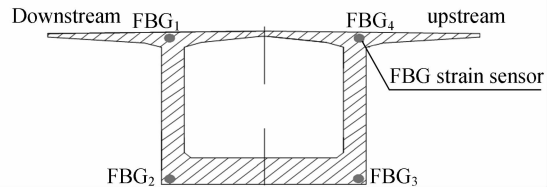


图 8 FBG 应变传感器断面图
Fig. 8 Section map of FBG strain sensor

由于外界环境的影响,P17 墩 Y 构悬臂的 4 只传感器(中心布拉格波长分别为: $\lambda_{1B} = 1 529.426$ nm、 $\lambda_{2B} = 1 534.335$ nm、 $\lambda_{3B} = 1 536.832$ nm、 $\lambda_{4B} = 1 542.574$ nm)出现性能蜕化的现象,在没有采取措施抑制反射谱旁瓣对解调结果影响的情况下,会得到解调异常的反射光谱图。其中,图 9 是由于 FBG₃ 与 FBG₄ 的焊接损耗大,导致没有解调出 FBG₄ 的峰值波长($\lambda_{4B} = 1 542.574$ nm)的反射光谱图;图 10 是光源强度增大时反射旁瓣对解调结果的影响,从而识别

出反射旁瓣叠加得到的 $\lambda = 1\ 532.012\ \text{nm}$ 的峰值, 这样就会出现解调出的测量峰值波长多于实际传感器数量的结果, 从而使得 FBG₂、FBG₃ 以及 FBG₄ 出现布拉格波长解调错位现象, 得到较大的波长变化量 $\Delta\lambda_B$, 再根据公式(1)得到被测对象结构的错误信息。

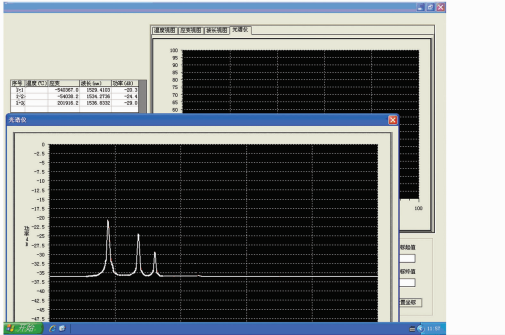


图 9 连接损耗大时的反射谱

Fig. 9 Spectrum with great connection loss

11.36%。在采用浮动解调阈值 I_c 以及考虑中心波长半宽 $\delta\lambda$, 时得到 FBG 串联的最大值 N 之后, 在相同的条件下进行解调测量, 解调结果就不会再受反射旁瓣的影响(如图 11 所示), 可以准确地解调出各个传感器的布拉格波长值, 出错率为 0%。由此可见采用上述方法能够抑制反射谱旁瓣对 FBG 传感器解调结果的影响, 提高光纤光栅传感系统的测量准确度。

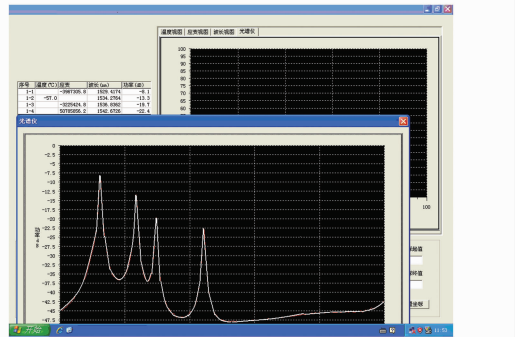


图 11 解调结果正确的光谱图

Fig. 11 Spectrogram of demodulation results

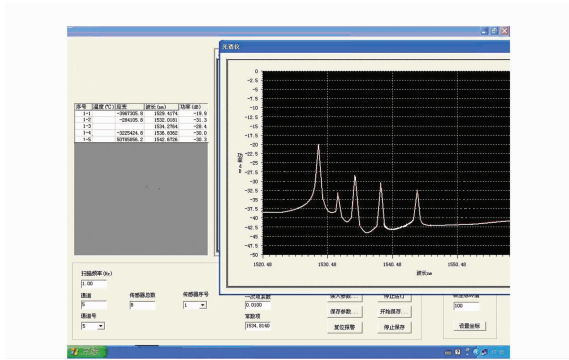


图 10 光源强度增大时反射旁瓣对解调结果的影响

Fig. 10 Effect of reflection sidelobe on demodulation in enhancing light intensity

4 结 论

由于光纤 Bragg 光栅传感器的反射谱旁瓣叠加时, 会导致反射谱旁瓣峰值大于固定的解调阈值, 而当传感器链路连接损耗大时, 某些反射峰值会小于固定阈值, 从而影响解调结果, 导致应变测量结果出现错误。本文分析了反射谱旁瓣以及链路连接损耗对复用解调结果的影响, 提出了利用浮动解调阈值及抑制反射谱旁瓣的方法来减少对解调结果的影响。理论分析、模拟仿真以及实验都证明, 利用该方法可以将解调结果出错率由 11.36% 降低至 0, 完全解决了旁瓣对解调结果的影响, 从而提高了应变测量结果的准确性。

采用光纤光栅解调仪在一个月内对此 4 只串联的光纤光栅传感器进行 10 000 次解调测量, 共出现解调异常结果 1136 次, 出错率高达

参考文献:

[1] 谢芳, 王慧琴. 用光纤 F-P 滤波器解调的光纤光栅传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2003, 14(2): 359-362.
XIE F, WANG H Q. A fiber Bragg grating sensing system with a fiber F-P wavelength filter [J].

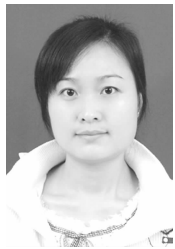
Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14(2): 359-362. (in Chinese)
[2] 桑新柱, 余重秀, 颜纷纷, 等. 基于光纤布拉格光栅的化学传感器[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 771-774.
SANG X ZH, YU CH X, YAN B B, *et al.*. Chemical sensor based on a fiber Bragg grating [J]. *Opt.*

- Precision Eng.*, 2006, 14 (5):771-774. (in Chinese)
- [3] 郭明金,姜德生,袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. *光学精密工程*, 2007, 15 (3):326-330.
GUO M J, JIANG D SH, YUAN H C. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (3): 326-330. (in Chinese)
- [4] 桑新柱,余重秀,王葵如,等. 高非线性光子晶体光纤中布拉格光栅的制作[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6):633-636.
SANG X ZH, YU CH X, WANG K R, *et al.*. Fabrication of Bragg grating in a highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):633-636. (in Chinese)
- [5] 金远强,刘丽华,马惠萍,等. 用于高速转轴径向振动检测的光纤传感技术[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1):95-99.
JIN Y Q, LIU L H, MA H P, *et al.*. Fiber sensor used in detecting radial vibration of high rotating speed shaft[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 95-99. (in Chinese)
- [6] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(16):1370-1372.
- [7] 李川,张以谟,刘铁根,等. 应变调谐的光纤 Bragg 光栅的滤波研究[J]. *光电子·激光*, 2002, 13(12): 1237-1240.
LI C, ZHANG Y M, LIU T G, *et al.*. Filtering researches of strain-tuned fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(12): 1237-1240. (in Chinese)
- [8] 李川,张以谟,赵永贵. 光纤光栅:原理、技术与传感应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
LI CH, ZHANG Y M, ZHAO Y G. *Fiber Grating: Principles, Techniques and Sensing Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)

作者简介:



陈伟民(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光电技术、精密仪器、光纤传感等方面的研究。E-mail: wm-chen0802@126.com



张娅玲(1982—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事光纤传感以及光电信息获取及处理方面的研究。E-mail: zhyljshb@163.com



章鹏(1970—),男,湖北荆州人,博士,副教授,主要从事光纤传感及信号处理方面的研究。E-mail: zhangpeng@cqu.edu.cn



张亮(1986—),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事图像信息获取和处理技术方面的研究。E-mail: zhliang1986@163.com