

文章编号 1004-924X(2005)03-0364-07

啾啾效应对 Bragg 波长匹配 解调精度的影响与消除

庄其仁, 龚冬梅, 曾永西

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要:介绍了光纤光栅 Bragg 波长的匹配解调原理,分析了传感光纤光栅和匹配光纤光栅的反射谱相关函数,说明相关函数与光电探测器输出信号具有线性关系。指出基于最大相关原理(光电探测器输出信号极值判断法)的匹配解调只适用于两个光纤光栅具有相同的反射谱型。采用光电探测器输出信号峰值判读时,传感光纤光栅的啾啾效应会引起 Bragg 波长的解调误差。理论分析和实验研究表明,对光电探测器输出信号进行去卷积运算处理可以消除传感光纤光栅啾啾效应对 Bragg 波长解调精度的影响。

关键词:光纤光栅; 匹配解调; 啾啾效应; 去卷积处理

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Influence of chirp effects on FBG wavelength- matched demodulation precision and its elimination

ZHUANG Qi-ren, GONG Dong-mei, ZENG Yong-xi

(College of Information Science and Engineering,
Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The principle of wavelength-matched demodulation of fiber Bragg grating (FBG) is introduced. The correlation functions of reflective spectra of sensor fiber grating and wavelength-matched fiber grating are analyzed. The correlation functions are linearity to photoelectric detector output signals. The wavelength-matched demodulation based on maximum correlation, extremum judgment of photodetector output signal, are only available for alike reflective spectra. When the peak value judgment of photodetector output signal is adopted, chirp effects in the FBG sensor lead to demodulation error of Bragg wavelength. Theoretical analysis and experimental investigation show that the deconvolution of photodetector output signal can eliminate Bragg wavelength demodulation error influenced by chirp effects in the FBG sensor.

Key words: fiber Bragg grating; wavelength-matched demodulation; chirp effect; deconvolution

收稿日期:2004-11-20;修订日期:2005-02-02.

基金项目:国务院侨办科研基金资助项目(No. 02QZR03);福建省自然科学基金资助项目(No. A0410019)

1 引 言

光纤光栅(FBG)传感器利用 Bragg 波长对温度、应力的敏感特性实现传感测量。Bragg 波长的解调技术是 FBG 传感器实用化的关键技术,实际应用中一般不使用光谱仪、单色仪进行解调,而采用诸如 F-P 腔滤波器、匹配光纤光栅、悬臂梁调谐等解调方法^[1-9],这些方法都是基于匹配解调原理,采用强度极值判读实现 Bragg 波长的解调,因此解调器结构简单、体积小,操作方便,易于实用化。但在进行强度极值判读时传感光纤光栅的啁啾效应引起的误差往往被忽视,为此本文就啁啾效应对 Bragg 波长匹配解调精度的影响进行了理论分析与实验研究,并提出相应消除误差的方法。

2 理论分析

2.1 匹配解调原理

常见的 FBG 波长匹配解调有反射型和透射型 2 种,工作原理图如图 1,图中 FBG₁ 为传感光纤光栅,FBG₂ 为匹配解调光纤光栅。这里我们只分析反射型匹配解调原理(透射型匹配解调原理类似)。

光纤光栅反射谱是波长 λ 的复杂函数,当光纤光栅的反射率不是特别高时,其反射谱可近似为高斯型。设匹配解调光纤光栅 FBG₂ 满足均匀调谐要求,则以高斯函数描述的 FBG₂ 归一化反射谱可表示为^[8]

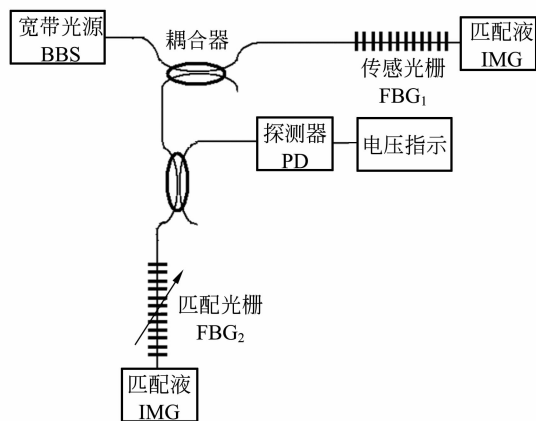
$$G(\lambda) = R_0 \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda_B}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中 R_0 、 λ_B 、 $\Delta\lambda_B$ 分别为光纤光栅的最大反射率、中心反射波长和反射带宽。

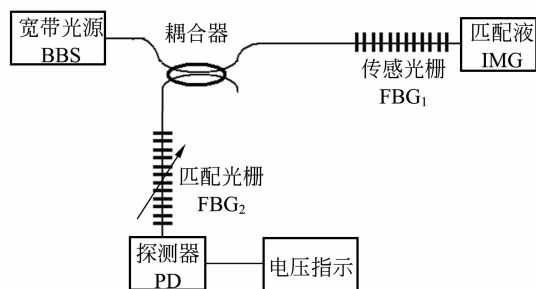
若用 $D(\lambda)$ 表示传感光纤光栅反射谱,则光电探测器接收到的光功率为^[9]:

$$P_D = k \int_{-\infty}^{\infty} G(\lambda) D(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中 k 为与光源、光耦合器及隔离器等有



(a)反射型
(a) Reflective mode



(b)透射型
(b) Transmissive mode

图 1 光纤光栅传感器波长匹配解调原理图
Fig. 1 Wavelength detection scheme of FBG sensor

关的常数。

引入相关系数 ρ_{GD} ^[10]

$$\rho_{GD} = \int_{-\infty}^{\infty} G(\lambda) D(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

则式(2)可写成

$$P_D = k\rho_{GD}, \quad (4)$$

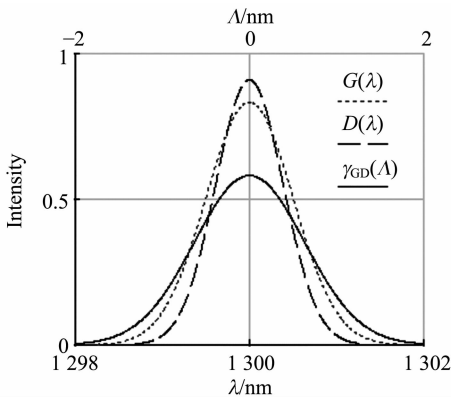
上式表明光电探测器接收到的光功率 P_D , 与匹配解调光纤光栅反射谱 $G(\lambda)$ 和传感光纤光栅反射谱 $D(\lambda)$ 的相关系数 ρ_{GD} 成正比。定义相关函数

$$\gamma_{GD}(\Lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\lambda - \Lambda) D(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

则 $\gamma_{GD}(\Lambda)$ 表示 $G(\lambda)$ 波长右移 Λ 后与 $D(\lambda)$ 的相关系数,与光电探测器接收到的光功

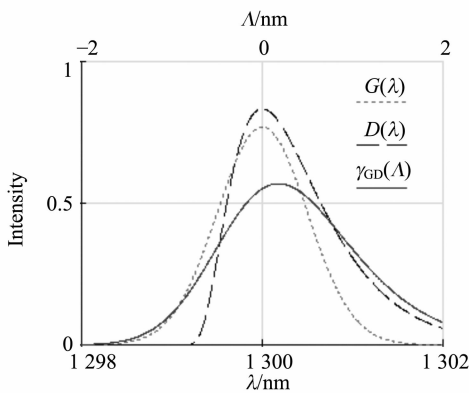
率成正比。现在讨论 $D(\lambda)$ 、 $G(\lambda)$ 和 $\gamma_{GD}(\Delta)$ 峰值波长位置的关系(设 $\Delta=0$ 时, $G(\lambda)$ 、 $D(\lambda)$ 的峰值波长位置是重合的):

(1) $G(\lambda)$ 、 $D(\lambda)$ 具有相同的反射谱型(高斯型), 则由式(5)计算得到的 $\gamma_{GD}(\Delta)$ 在 $\Delta=0$ 有极大值, 说明光电探测器接收到的光功率为最大时, $G(\lambda)$ 没有平移, 峰值波长位置与 $D(\lambda)$ 重合, 见图 2(a), 所以可用解调光纤光栅 FBG_2 的 Bragg 波长代表传感光纤光栅反射谱 $D(\lambda)$ 的峰值波长(波长匹配)。



(a) $D(\lambda)$ 、 $G(\lambda)$ 具有相同的反射谱型

(a) $D(\lambda)$ and $G(\lambda)$ are alike reflective spectra



(b) $D(\lambda)$ 是不对称的啁啾光栅反射谱型、 $G(\lambda)$ 为高斯型

(b) $D(\lambda)$ is asymmetry chirp grating reflective spectra while $G(\lambda)$ is Gauss style.

图2 $D(\lambda)$ 、 $G(\lambda)$ 和 $\gamma_{GD}(\Delta)$ 峰值波长位置的关系

Fig. 2 Relationship of $D(\lambda)$ 、 $G(\lambda)$ and $\gamma_{GD}(\Delta)$

(2) $D(\lambda)$ 为不对称的啁啾光栅反射谱型、 $G(\lambda)$ 为高斯型, 此时它们的相关函数 $\gamma_{GD}(\Delta)$ 的极大值位置不在 $\Delta=0$ 处, 见图 2(b), 说明光电探测器接收到光功率最大位置处, $G(\lambda)$ 需要平移, 结果 $G(\lambda)$ 和 $D(\lambda)$ 峰值波长位置不重合, 所以在光电探测器接收到光功率极大值处, 用解调光纤光栅 FBG_2 的 Bragg 波长表示传感光纤光栅反射谱 $D(\lambda)$ 的峰值波长(Bragg 波长)将产生解调误差。

2.2 传感光纤光栅反射谱不对称对测量精度的影响

啁啾效应引起传感光纤光栅反射谱 $D(\lambda)$ 对峰值的不对称程度, 可用不对称系数, 或偏度(skewness)表示为^[11]:

$$S_d \equiv \frac{E(\lambda - \lambda_0)^3}{\sigma^3}, \quad (6)$$

式中 λ_0 是均值波长, E 是平均值算符, σ 是标准偏差, $\sigma^2 = \int_L (\lambda - \lambda_0)^2 D(\lambda) d\lambda$ 。对于高斯型传感光纤光栅反射谱 $D(\lambda)$, 如图 2(a), 不对称系数 $S_d=0$, 峰值波长与中心波长(平均值)重合, 峰值波长为 1 300.00 nm, 相关函数 $\gamma_{GD}(\Delta)$ 在 $\Delta=0.30$ 达到极大值, 即 $G(\lambda)$ 峰值波长位置不变, 也为 1 300.00 nm, 理论解调误差为 0。对于如图 2(b)所示的反射谱 $D(\lambda)$, 其峰值波长为 1 300.00 nm, 不对称系数 $S_d=1.96$, 相关函数 $\gamma_{GD}(\Delta)$ 在 $\Delta=0.30$ 达到极大值, 此时 $G(\lambda)$ 峰值位置相应移到 1 300.30 nm。说明当 $D(\lambda)$ 不对称系数为 $S_d=1.96$ 时, 理论解调误差为 0.30 nm。模拟计算结果表明, 传感光纤光栅反射谱 $D(\lambda)$ 不对称系数 S_d 越大, 用匹配光纤光栅 Bragg 波长表示传感光纤光栅 Bragg 波长产生的解调误差越大。

2.3 利用去卷积运算消除测量误差

对于已知解调光纤光栅 FBG_2 的反射谱 $G(\lambda)$, 可以将光电探测器接收到的光功

率谱,即相关函数 $\gamma_{DG}(\Delta)$,通过逆运算求出传感光纤光栅反射谱 $D(\lambda)$,从而准确确定 $D(\lambda)$ 的峰值位置。

一般地,相关运算可通过现有的线性卷积运算软件实现,它们的时域关系为^[10]:

$$\gamma_{GD}(\Delta) = G(-\lambda) * D(\lambda), \quad (7)$$

例如,利用 MATLAB 中的去卷积命令 deconv,可求出

$$D(\lambda) = \text{deconv}(\gamma_{DG}(\Delta), G(-\lambda))$$

若 $G(\lambda)$ 为中心对称谱型(高斯型),当中心移到原点后, $G(-\lambda) = G(\lambda)$,求 $D(\lambda)$ 变为简单的去卷积运算。

3 实验结果与讨论

悬臂梁结构传感器应用广泛^[12],所以实验采用悬臂梁调谐光纤光栅位移(压力)传感器,其结构如图 3 所示。设梁的厚度为 h ,长度为 L ,当梁的自由端在外力 p 作用下发生位移 d 时,梁发生弯曲。梁的一面受拉伸作用产生拉应变,另一面受压缩作用产生压应变,将光纤光栅粘于悬臂梁上距离固定端 x 处,当不考虑光栅长度时,则应变引起的光纤光栅 Bragg 波长移动 $\Delta\lambda_B$ 与悬臂梁自由端位移 d 的关系为^[13]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - \nu_e) \times 3(L-x) \times h \times d / (2L^3), \quad (8)$$

式中 ν_e 为光纤的弹光系数。在线性范围内,悬臂梁自由端位移 d 与压力 p 成正比。

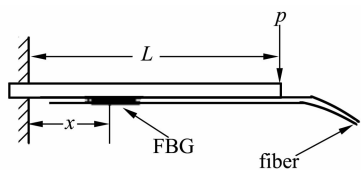


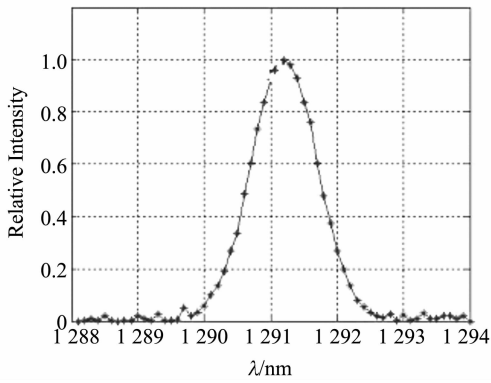
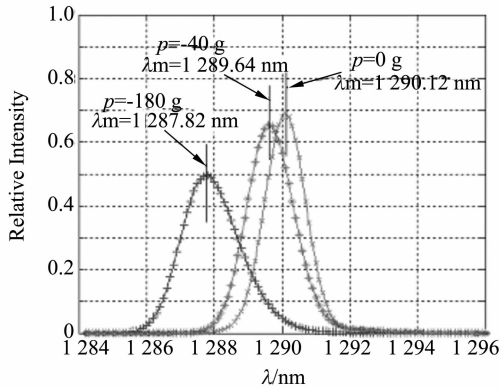
图3 悬臂梁调谐光纤光栅结构示意图

Fig. 3 Structure demodulation diagram of cantilever beam turning wavelength of fiber grating

当考虑光栅长度时,对于等截面悬臂梁,梁表面应力沿轴向呈梯度分布,使得光栅的不同格栅被展宽的程度不同,且不同位置由弹光效应引起的折射率变化量也有差异,两者共同作用使得原本均匀周期的光栅变成啁啾光栅,光纤光栅上不同位置的 Bragg 反射波长的相对漂移量不同。由式(8)也可以看出,由于光栅有一定长度,所以 x 不是固定值,波长移动 $\Delta\lambda_B$ 与 x 有关,造成反射谱的半宽增加。

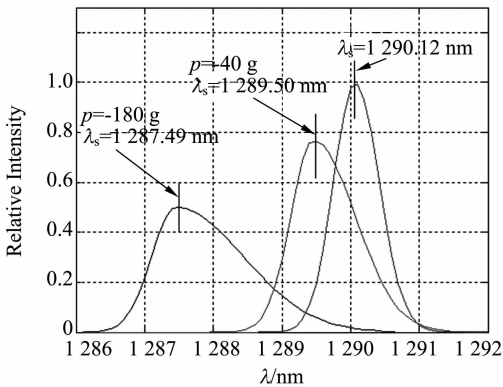
实验原理图如图 1(a),采用螺旋千分尺通过线性机构产生纵向形变来调节匹配解调光栅 FBG_2 ,螺旋千分尺的刻度与匹配光栅 Bragg 波长的对应关系已事先做成表格,因此通过查表可从螺旋千分尺上读到波长值。用光谱仪测得匹配解调光栅 FBG_2 的反射谱 $G(\lambda)$ 并等间隔采样得到如图 4(a)所示曲线。图 4(b)是 3 种不同压力下,光电探测器输出相对强度随匹配光栅 Bragg 波长移动的关系曲线,可以看出,随着压力的增加,曲线逐渐展宽,在压力 $p = -180$ g 时出现明显的不对称。对图 4(b)中 3 条曲线进行去卷积处理,得到如图 4(c)所示的 3 条曲线,可以看到去卷积后曲线的不对称更明显。在上述 3 种压力下,用光谱仪直接测量的传感光纤光栅反射谱见图 5,可见图 4(c)和图 5 所示的曲线很相似,并且 3 个峰值波长 λ_S 和 λ_B 非常接近(最大偏差 0.02 nm)。而在去卷积运算处理前,当压力 $p = -180$ g 时,光电探测器输出最大时螺旋千分尺指示波长 λ_m 与光谱仪测量 λ_B 相差较大,为 0.32 nm。

表 1 是一组不同压力 p 下,采用 3 种方法得到的传感光纤光栅的解调 Bragg 波长对比,它们是光电探测器输出最大时螺旋千分尺指示波长(去卷积处理前峰值波长) λ_m 、光电探测器输出信号经过去卷积运算处理后的峰值波长 λ_S 、用光谱仪直接测量的峰值波长 λ_B 。同时对去卷积运算处理

(a) 匹配光纤光栅 FBG_2 的反射谱 $G(\lambda)$ (a) Reflective spectrum $G(\lambda)$ of matched fiber grating FBG_2 

(b) 去卷积处理前光电探测器输出曲线

(b) Output curve of photoelectric detector before deconvolution

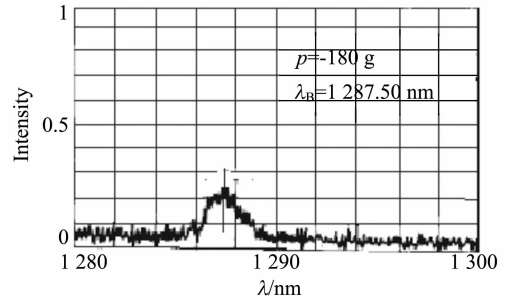
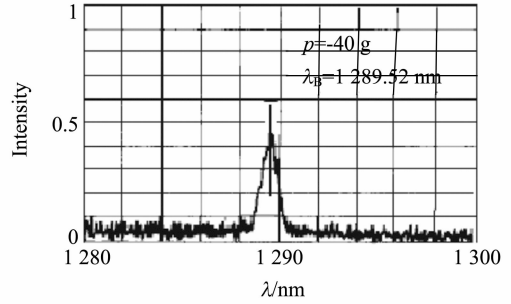
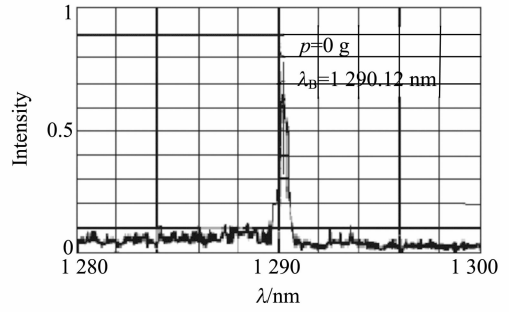


(c) 去卷积处理后输出曲线

(c) Output curve after deconvolution

图 4 去卷积处理前后输出曲线

Fig. 4 Output curve before and after deconvolution

图 5 光谱仪直接测量的传感光纤光栅 FBG_1 反射谱Fig. 5 Reflective spectra of FBG_1 measured by spectrometer

前绝对误差 $\lambda_m - \lambda_B$ 和处理后绝对误差 $\lambda_s - \lambda_B$ 进行比较。从表中可以看出,随着压力增大,去卷积运算处理前绝对误差 $\lambda_m - \lambda_B$ 的绝对值随着增大,而处理后绝对误差 $\lambda_s - \lambda_B$ 保持在很小的值,可见经过去卷积运算处理后的峰值波长 λ_s 大大减小了与光谱仪直接测量的峰值波长 λ_B 的偏差。

去卷积的方法最初用于图像恢复,在空间超分辨中亦得到应用^[14]。信号的频谱经去卷积处理后系统的分辨率可以很高^[15]。对光电探测器输出信号进行去卷积运算处理,最大的优点就是可以提高 Bragg 波长的解调分辨率和准确度,还原传感光

纤光栅的反射谱。但去卷积运算处理也有其缺点^[16],首先是对信噪比低的小信号,会出现虚拟调制,但可通过幅度平滑处理加以改善;其次是受采样率的限制,实际上去卷积的分辨能力不会超过 $1/f_s$,其中 f_s 为采样频率,为了提高分辨率,可适当采用插值计算方法;再者去卷积运算需要一定时

间,难以进行信号实时处理。不过对于光纤光栅传感器,一般测量的是慢变信号,可以满足要求。而作为解调信号的FBG₂的反射谱 $G(\lambda)$ 可用精确定标^[17]后的光谱仪测量并进行高密度数据采集,所以影响去卷积处理精度的主要因素是传感FBG₁的反射谱 $D(\lambda)$ 的信号强度和采样分辨率。

表1 传感光纤光栅的解调 Bragg 波长对比

Tab.1 Comparison of interrogated Bragg wavelength of FBG sensor

压力 $p(g)$	去卷积处理前 峰值波长 λ_m (nm)	去卷积处理后 峰值波长 λ_s (nm)	光谱仪测量 峰值波长 λ_B (nm)	处理前绝对误差 $\lambda_m - \lambda_B$ (nm)	处理后绝对误差 $\lambda_s - \lambda_B$ (nm)
0	1 290.12	1 290.12	1 290.12	0	0
-20	1 289.88	1 289.80	1 289.82	0.06	-0.02
-40	1 289.64	1 289.50	1 289.52	0.14	-0.02
-60	1 289.36	1 289.18	1 289.22	0.14	-0.04
-80	1 289.16	1 288.93	1 288.94	0.22	-0.01
-100	1 288.88	1 288.61	1 288.64	0.24	-0.03
-120	1 288.60	1 288.35	1 288.36	0.24	-0.01
-140	1 288.38	1 288.09	1 288.08	0.30	+0.01
-160	1 288.08	1 287.74	1 287.78	0.30	-0.04
-180	1 287.82	1 287.49	1 287.50	0.32	-0.01

4 结 论

光纤光栅匹配解调是基于传感光纤光栅和匹配光纤光栅的反射谱(或透射谱)相关最大原理来实现 Bragg 波长解调的。当传感光纤光栅由于啁啾效应而使其反射谱

出现不对称时,上述解调方法将出现误差。传感光纤光栅反射谱不对称系数越大,用匹配光纤光栅 Bragg 波长表示传感光纤光栅 Bragg 波长产生的解调误差越大。对光电探测器输出信号曲线进行去卷积运算处理,可以消除啁啾效应对 Bragg 波长匹配解调精度的影响。

参考文献:

- [1] KERSEY A D. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Opt. Lett.*, 1993, 18(16):1370.
- [2] NING Y N, MELDRUM A, SHI W J, *et al.* Bragg grating sensing instrument using a tunable Fabry-Perot filter to detect wavelength variations[J]. *Meas. Sci. and Technol.*, 1998, 9(6):599-606.
- [3] LOBO A B, FERREIRA L A, SANTOS J L, *et al.* Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme[J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36(4):934-939.
- [4] 唐炜, 史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(1):79-83.
TANG W, SHI Y K. Optical fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(1):79-83. (in Chinese)
- [5] 刘志国, 张艺兵, 开桂云, 等. 新型光纤光栅线性调谐方法[J]. *光学学报*, 1998, 18(12):1731-1734.
LIU ZH G, ZHANG Y B, KAI G Y, *et al.* A new method for fiber grating linear tuning[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(12):1731-1734. (in Chinese)
- [6] 余有龙, 刘志国, 董孝义, 等. 基于悬臂梁的光纤光栅线性调谐[J]. *光学学报*, 1999, 19(5): 621-625.
YU Y L, LIU ZH G, DONG X Y, *et al.* Linear tuning of fiber Bragg grating based on a cantile-

- ver[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999,19(5): 621-625. (in Chinese)
- [7] 刘云启,刘志国,郭转运,等. 利用调谐滤波技术的光纤光栅复用传感器[J]. *光学学报*, 2000, 20(8):1084-1088.
LIU Y Q, LIU ZH G, GUO ZH Y, *et al.* Multiplexed fiber Bragg grating sensor using tunable FBG filter technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000,20(8):1084-1088. (in Chinese)
- [8] LOBO A B, FERREIRA L A, SANTOS J L, *et al.* Analysis of the reflective matched fiber Bragg rating sensing interrogation scheme[J]. *Appl. Opt.*, 1997,36(4):934-939.
- [9] 刘云启,刘志国,郭转运,等. 光纤光栅传感器的调谐滤波检测技术[J]. *光学学报*, 2001,21(1):88-92.
LIU Y Q, LIU ZH G, GUO ZH Y, *et al.* Theoretical and experimental researches on tunable filtering detection technique of fiber grating sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001,21(1):88-92. (in Chinese)
- [10] 胡广书. 数字信号处理:理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,1997:22-27.
HU G SH. *Digital signal processing: theory and algorithm and realization* [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 1997:22-27. (in Chinese)
- [11] 汪胡桢. 现代工程数学手册(第Ⅳ卷):概率论-随机变量的数字特征[M]. 武汉:华中工学院出版社,1985: 36-59.
WANG H ZH, *et al.* *Advanced engineering math-manual: numeric characteristic of probability-random variable* [M]. Wuhan:Publishing House of Huazhong Technical College, 1985: 36-59. (in Chinese)
- [12] 温志渝,费龙,钟先信,等. 集成硅微悬臂梁融合式传感器制造技术[J]. *光学精密工程*. 1995, 3(2):47-50.
WEN ZH Y, FEI L, ZHONG X X, *et al.* Productive technique for integrated micro-machining silicon cantilever hybrid sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995,3(2):47-50. (in Chinese)
- [13] 关柏鸥,刘志国,开桂云,等. 基于悬臂梁结构的光纤光栅位移传感研究[J]. *光子学报*, 1999, 28(11):983-984.
GUAN B O, LIU ZH G, KAI G Y, *et al.* Fiber Bragg grating displacement sensor based on a cantilever beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(11):983-984. (in Chinese)
- [14] 丁义元,杨建宇,张卫华,等. 改进实孔径雷达角分辨力的广义逆滤波方法[J]. *电子学报*, 1993, 21(9):15-19.
DING Y Y, YANG J Y, ZHANG W H, *et al.* Improvement of angular resolution of real aperture radar via generalized inverse filtering[J]. *Acta Electronic Sinica*, 1993,21(9):15-19. (in Chinese)
- [15] 朱力,王盛利,单荣光. 去卷积实现雷达方位超分辨方法的实验研究[J]. *现代雷达*, 1998,20(3): 57-60.
ZHU L, WANG SH L, SHAN R G. An experimental study on method of radar azimuth super-resolution using deconvolution[J]. *Modern Radar*, 1998,20(3): 57-60. (in Chinese)
- [16] 倪晋麟,储晓彬,林幼权. 基于去卷积距离超分辨方法的机理及限制条件[J]. *系统工程与电子技术*, 2000,22(3): 62-64.
NI J L, CHU X B, LIN Y Q. The principle and limitation of the range super-resolution algorithms based on deconvolution[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000,22(3): 62-64. (in Chinese)
- [17] 徐中民,禹秉熙. 对 PC2000-PC/104 型光谱仪的波长定标[J]. *光学精密工程*, 2004,12(1):11-14.
XU ZH M, YU B X. Wavelength calibration for PC2000-PC/104 spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004,12(1):11-14. (in Chinese)

作者简介:庄其仁(1960—),男,福建泉州人,华侨大学信息科学与工程学院研究员,主要研究方向,光电检测技术、光纤传感技术。E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn