

文章编号:1001-5078(2018)07-0885-06

· 光纤及光通讯技术 ·

基于非切趾短 FBG 光栅的小信号测量方法

李 扬^{1,2}, 刘 锋^{1,2}, 宋言明^{1,2}, 祝连庆^{1,2}

(1. 北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016;

2. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100016)

摘 要:为解决基于图像传感器的 FBG 解调系统精细测量的问题,提出了使用非切趾 FBG 测量弱信号的方法。设计出了非切趾 FBG 反射谱近似模型,采用对数放大的方法提高非切趾 FBG 的旁瓣,在较宽的光栅频谱范围内,进行光谱相关解调并给出解调算法。基于蒙特卡洛方法对非切趾光栅测量仿真,并搭建实验系统对非切趾 FBG、宽带高斯光栅进行对比测量实验。研究表明,基于非切趾 FBG 的弱信号测量方法可有效提高波长测量精度,通过相关解调,可使测量精度达到宽带光栅的 2 倍。

关键词: 光纤布拉格光栅;弱信号;非切趾光栅;蒙特卡洛方法

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.07.016

Weak signal measurement method based on short non apodized FBG

LI Yang^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, SONG Yan-ming^{1,2}, ZHU Lian-qing^{1,2}

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instrument,

Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China;

2. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: In order to solve the problem of fine measurement of FBG demodulation system in image sensor, a weak signal measurement method based on non apodized FBG is proposed. A non apodized FBG reflection spectrum approximation model was established, and the method of logarithmic amplification was used to improve the sidelobe of non apodized grating, the spectral was demodulated in a wide range of grating spectrum and the demodulation algorithm was given. Based on the Monte Carlo method, the non apodization grating was measured and simulated, and the experimental system was built to compare the measurement of the non apodization grating and the wide spectrum Gauss grating. The results show that the measurement method of weak signal based on non apodized FBG can effectively improve the accuracy of wavelength measurement. By correlation demodulation, the measurement accuracy can reach 2 times of wide spectrum grating.

Key words: FBG; weak signal; non apodized grating; Monte Carlo method

基金项目: 教育部长江学者与创新团队发展计划 (No. IRT-16R07); 北京市科技计划项目 (No. Z151100003615010); 北京市教委 2015 年度创新能力提升计划项目 (No. TJSHG201510772016) 资助。

作者简介: 李 扬 (1994 -), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感等方面研究。E-mail: 798645137@qq.com

通讯作者: 祝连庆 (1963 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密测量技术, 光纤传感技术, 光纤激光器技术及生物医学检测技术与仪器。E-mail: zhulianqing@sina.com

收稿日期: 2017-10-25; **修订日期:** 2017-11-08

1 引言

光纤布拉格光栅^[1-2] (Fiber Bragg Grating, FBG)是近几年来发展极为迅速、应用极为广泛的光无源器件之一。由于FBG具有许多独特的优点,如抗电磁干扰、易于制作、尺寸小等,人们将其用于测量各种物理参量。光纤布拉格光栅的出现,使许多复杂的全光纤通信网和传感网成为可能,极大地拓宽了光纤技术的应用范围^[3]。

随着外界应变、温度等因素的变化,光纤光栅的反射或透射谱的中心波长会随之变化,因此可以用中心波长来间接反映外界的应变、温度等变量,所以光纤光栅传感器的核心技术是中心波长的解调^[4]。

基于图像传感器的FBG解调系统,由于像素数量有限,无法对光栅的反射谱进行精细测量,波长测量精度在数皮米,影响了对弱信号的测量^[5]。虽然利用宽带光栅和多次测量取平均的方法,可以提高测量精度,但是谱域的平移给各像素幅值的增大有限,易受到噪声的影响^[6-8]。因此,设计高精度测量的解调方法具有重大的意义。

本文从FBG解调系统在高速测量弱信号应用需求和限制技术应用的主要因素出发,提出使用非切趾光栅测量弱信号的方法。利用对数放大的方法提高非切趾光栅的旁瓣,以此增加测量像素的数量,并且利用相关解调的方法,使得非切趾光栅测量精度可以达到宽带光栅的2倍,验证了非切趾光栅测量弱信号方法的有效性。

2 基于非切趾光栅高精度测量方法

2.1 非切趾光纤光栅的频谱展宽效应

忽略光栅径向边缘的散射影响,光栅对光的反射可借助下面表达式进行分析:

$$I = \sum_{k=1}^n \eta^{2k} \alpha e^{jk\theta_\lambda} \quad (1)$$

式中, k 为光栅条纹的序号; n 为光栅总条数; η 为单层光栅透过率; α 为单层光栅的反射率; θ_λ 为波长为 λ 的光在每两层光栅间所经历的相位改变。当 θ_λ 为 2π 时,所有的反射波均为同相叠加,得到最大反射率,即反射谱的中心峰值。当波长变短时,相位延迟将大于 2π ,每个反射光矢量将偏离原位,如图1所示。当最后一层光栅的反射回到入射点处时,相位延迟正好是 $2k\pi + \pi$,如图2所示。此时,最远端的光栅的反射波与第一层光栅反射波的相位正好相反,产

生抵消。当相位延迟继续增加时,最远光栅反射波的相位将大于 π ,如图3所示,抵消光强的效果会逐渐减弱,光强逐渐增加。对光强随波长变化进行数值计算结果如图4所示。

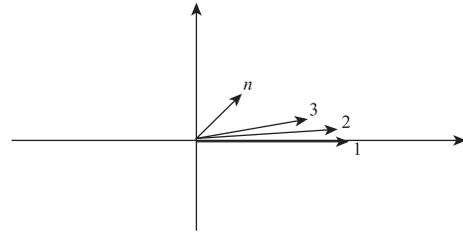


图1 波长变短时反射光矢量情况

Fig. 1 The reflected light vector with shorter wavelength

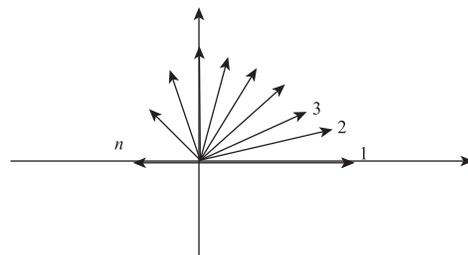


图2 最后一层光栅的反射回到入射点情况

Fig. 2 The last layer of reflection grating to the incident point

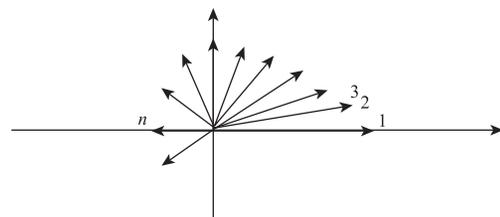


图3 最远光栅反射波的相位情况

Fig. 3 The phase of the farthest grating reflected wave

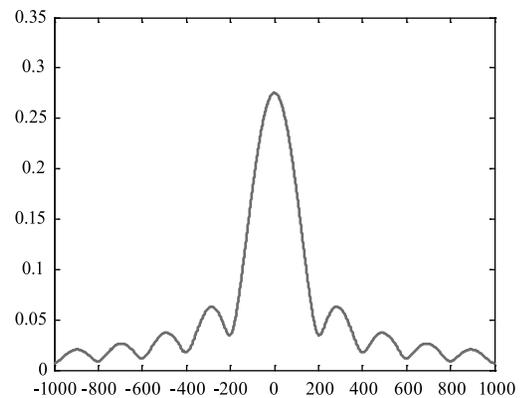


图4 光强随波长变化情况

Fig. 4 The change of light intensity with the vary of wavelength

图5和6是在不同情况下非切趾光栅的反射谱图形。非切趾光栅的反射谱中包含旁瓣,相当于弱

光栅的反射谱。可以看出,在线性尺度下旁瓣峰值不到主瓣峰值的 1/5,在对数尺度下旁瓣峰值可达主瓣峰值的 1/2。因此对非切趾光栅反射谱信号进行对数放大,可增大旁瓣与主瓣的比值,实现测量像素的增加,使旁瓣获得与主瓣相同的效果,提高测量精度。

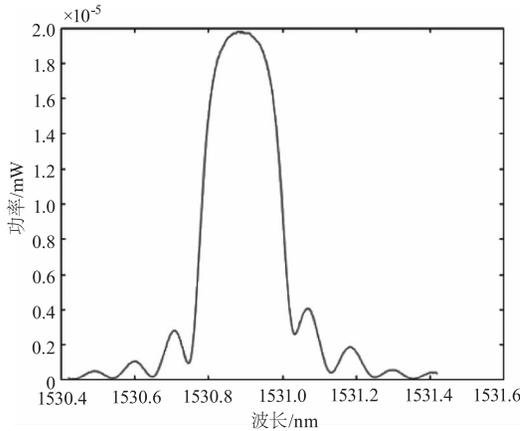


图5 线性尺度下非切趾光栅的光谱图

Fig. 5 Spectra of non apodization gratings at linear scale

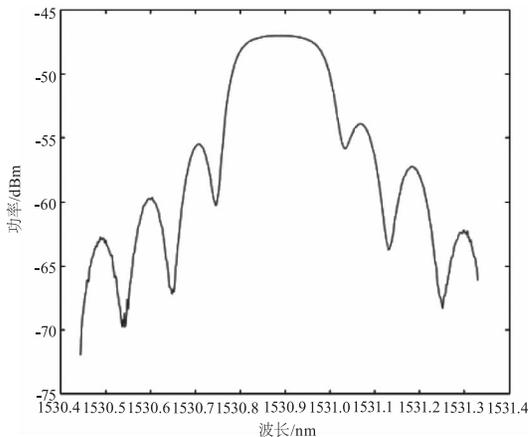


图6 对数尺度下非切趾光栅的光谱图

Fig. 6 Spectra of non apodized grating at logarithmic scale

2.2 宽带光栅与非切趾光栅测量的性能仿真与比较

2.2.1 高斯拟合与互相关函数

传统 FBG 波长解调时,往往采用高斯拟合。实验中获得的光谱曲线是由离散点构成的,设这些离散数据点集为 $(x)(y)$,曲线拟合是寻找变量 x 和 y 之间的函数关系 $y = f(x)$ 。采用高斯拟合光谱曲线是假设原始光谱是由若干个单峰谱带相互叠加形成的,以高斯函数系作为光谱曲线的基本函数形式,即将 $y = f(x)$ 设定为高斯函数系,其中每一个高斯函数均由 3 个参数决定,峰高 A 、峰位 B 和峰宽 C 。高斯

函数系写作:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n A_i \exp\left[-2.773 \left(\frac{x - B_i}{C_i}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$H = H_0 \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{\sigma^2}\right] \quad (3)$$

对上式进行两边取对数得:

$$\ln H = -\frac{(x - x_0)^2}{\sigma^2} + \ln H_0 \quad (4)$$

令:

$$y = \ln \frac{H}{H_0}, a = -\frac{1}{\sigma^2}, b = \frac{2x_0}{\sigma^2}, c = -\frac{x_0^2}{\sigma^2} \quad (5)$$

式(4)可转化为:

$$y = ax^2 + bx = c \quad (6)$$

运用最小二乘法来进行进一步的计算:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)^2 \quad (7)$$

使得 S 取得最小即可,使 a, b, c 求偏导得到方

程组:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i &= a \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) + b \left(\sum_{i=1}^n x_i\right) + nc \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i &= a \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right) + b \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) + c \left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i &= a \left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right) + b \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right) + c \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) \end{aligned} \quad (8)$$

解方程组求得系数 a, b, c 。最后由 a, b 可得

$$x_0 = -b/2a。$$

回归分析得到的数据,就是反射谱反映出的高斯拟合曲线。运用高斯曲线拟合求取宽带光栅反射光谱的中心波长值具有完美的精确的准确性。但是,非切趾光栅存在旁瓣,光栅反射面构成的谱线同基本常用的标准函数曲线差别较大,而光栅反射峰单次的有效采样点很少,此时若继续使用高斯拟合算法解调会造成较高误差。本论文提出新的相关解调算法,能够更为精确地解调出波长漂移量。

在信号处理领域中,互相关是用来表示两个信号之间相似性的一个度量,通常通过与已知信号比较用于寻找未知信号中的特性。它是两个信号之间相对于时间的一个函数,也被称为滑动点积。互相关函数定义为:

$$R_{1,2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1 f_2(t + \tau) dt \quad (9)$$

它反映的是两个函数在不同的相对位置上互相匹配的程度。利用互相关运算进行光栅解调的方法,是事先采集光谱原始信号,然后与实测离散的像素点数据进行相关匹配,当达最佳匹配时,原始标准信号所移位的距离即为待解调波长相对于原始标准信号波长的改变量,从而得到待测波长。

2.2.2 宽带光栅和非切趾光栅的性能比较

为对宽带光栅和非切趾光栅进行测量效果评估,进行了基于蒙特卡罗方法的仿真验证。图 7 是宽带光栅对数反射谱,由于该信号为 2 pm 的分辨率,通过样条插值提高样本分辨率,将信号分辨率提高到 0.2 pm,如图 8 所示。对非切趾光栅也进行同样的处理,如图 9 所示。

根据互相关进行光栅解调的方法,只有信号的上升沿和下降沿用于相关解调的计算。在相同的波长范围内,非切趾光栅可用于相关解调计算的有效光谱信号远多于宽带光栅,因此,利用非切趾光栅的解调精度大于宽带光栅的解调精度。解调过程中,通过相关计算,得到精确到 0.2 pm 的适配结果。

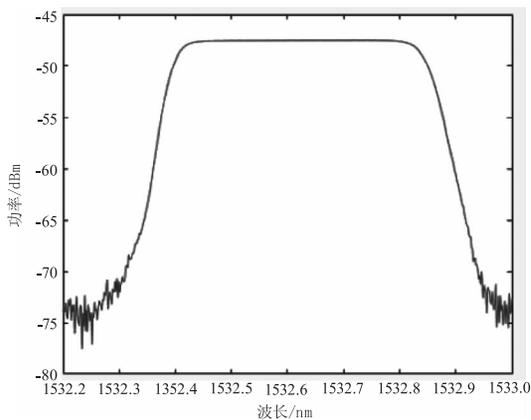


图 7 实测宽带光栅的对数反射谱

Fig. 7 Logarithmic reflection spectrum measured with wide grating

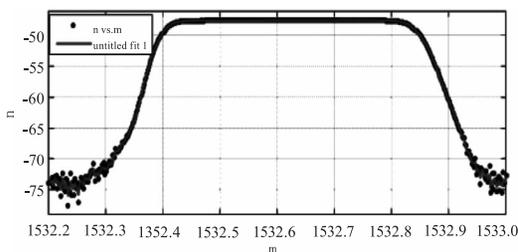


图 8 样条插值提高宽带光栅反射谱信号分辨率

Fig. 8 Improving the resolution of wide grating reflection spectrum by spline interpolation

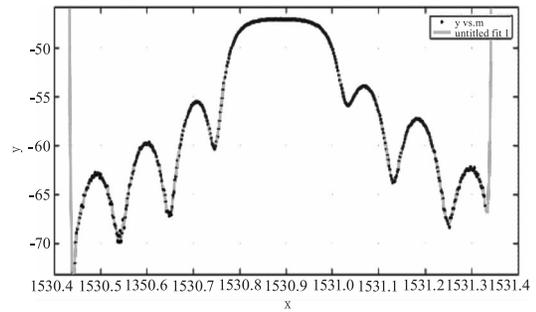


图 9 样条插值提高非切趾光栅反射谱信号分辨率

Fig. 9 Improving the resolution of non apodization grating reflection spectrum signal by spline interpolation

2.2.3 基于蒙特卡洛方法的温度测量仿真实验

蒙特卡洛方法的解题过程可以归结为三个主要步骤:构造或描述概率过程;实现从已知概率分布抽样;建立各种估计量^[9-10]。仿真程序流程如图 10 所示。

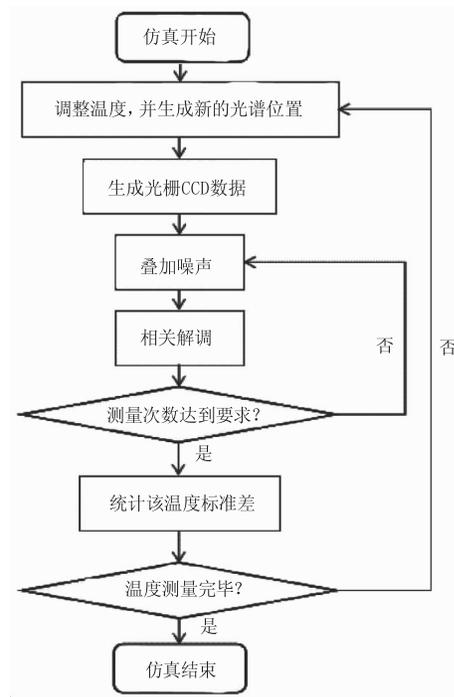


图 10 仿真程序流程图

Fig. 10 Flow chart of simulation program

图 11 是两种光栅在 100 °C 范围内,300 次测量的波长标准差。

由图中看出,非切趾光栅的波长标准差比宽带光栅的要小,即非切趾光栅的测量精度比宽带光栅要高。非切趾光栅,不仅具有宽带光栅的像素多的优点,还具有随波长变化时反射率变化较快,可以有效抑制噪声的优点。由图可知测量精度可达宽带光栅的两倍。

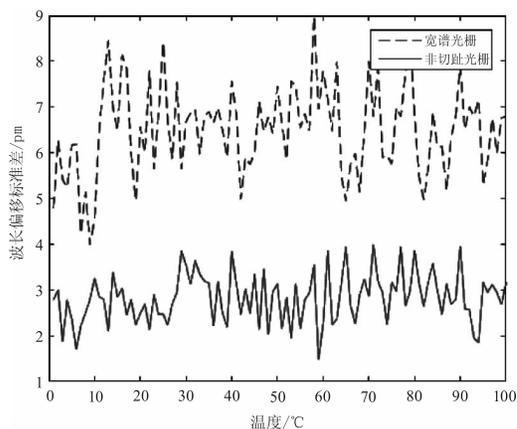


图 11 波长标准差计算结果

Fig. 11 Calculation results of standard deviation of wavelength

3 基于相干解调的非切趾光栅高精度测量实验

为验证仿真结果,设计了光栅应变的测量实验,本实验采用的是通过对数放大的方法进行趾信号的增强,实验装置如示意图 12 所示。光源采用 TUNICS T100S - HP 可调谐激光器^[11],设置扫描波段 1530 ~ 1533 nm,利用光纤探测器 PD 将反射光谱信号转换为电信号,输入对数放大采集电路。此时非切趾光栅反射谱的波长和功率分别对应采样时间和电压。

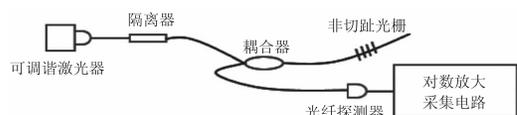


图 12 实验装置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of experimental device

采集的数据显示信号如图 13 所示,其中左边是非切趾光栅反射谱,最大的旁瓣峰值可达主瓣峰值的 1/2,右侧是宽带光栅反射谱。当应力作用于光栅使得中心波长发生偏移时,对应的时间也会发生偏移。

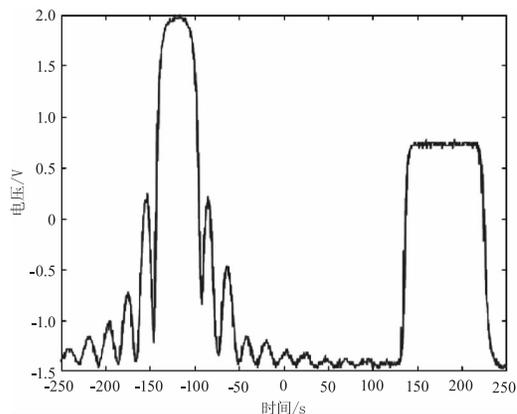


图 13 对数放大后的反射谱

Fig. 13 Reflection spectrum after logarithmic amplification

实验采用的应变由压电陶瓷产生,压电陶瓷能够将机械能和电能互相转换。图 14 和图 15 分别为 2 V 电压激励下,宽带光栅应变信号和非切趾光栅应变信号的测量结果。

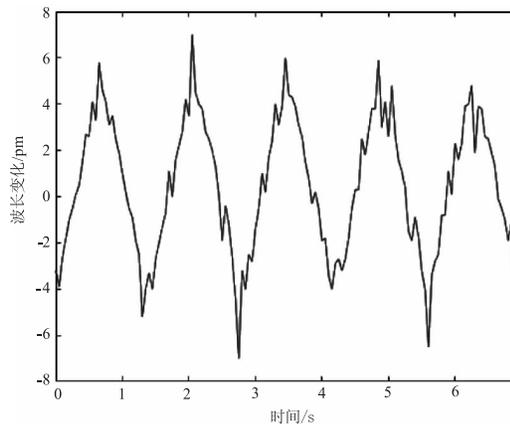


图 14 宽带光栅应变信号

Fig. 14 Strain signal of wide grating

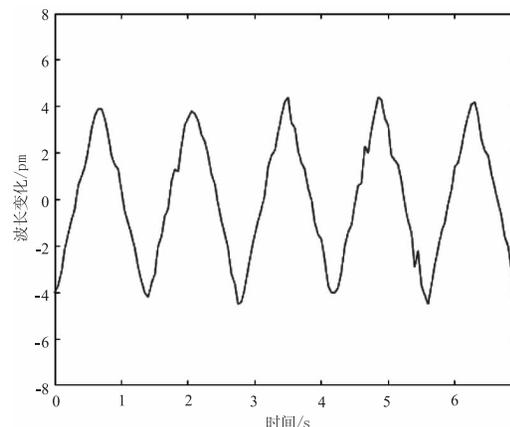


图 15 非切趾光栅应变信号

Fig. 15 Strain signal of non apodization grating

由图中看出,在利用相关解调时,非切趾光栅表现出更高的精度。

4 结论

本论文提出利用非切趾光栅测量微弱信号的方法,并采用相关解调算法,对非切趾光栅和宽带光栅进行了对比研究。结果表明,由于宽带光栅反射率的变化率随波长变化较小,且只有一个上升沿和一个下降沿,可有效参与计算的像素数量并不多,无法有效提高测量精度。非切趾光栅反射谱的宽度大于宽带光栅,覆盖了更多的像素,而且在整个谱型中充斥着多个上升沿与下降沿,可有效参与计算的像素数量显著增多,极大提高测量精度。在利用相关解调时,非切趾光栅测量精度达到宽带光栅测量精度的 2 倍左右。

参考文献:

- [1] ZHANG Dengpan, WANG Jin, WANG Yongjie. Real-time calibration technique of fiber Bragg grating demodulation system based on FBGA [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45 (7): 825 - 829. (in Chinese)
张登攀, 王璠, 王永杰. 基于 FBGA 光纤光栅解调系统的实时校准方法 [J]. *激光与红外*, 2015, 45 (7): 825 - 829.
- [2] Matsuhara M, Hill K O, Watanabe A. Optical-waveguide filters: Synthesis [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1975, 65 (65): 804 - 809.
- [3] YUAN Junwei, DONG Xinyong, WANG Lulu, et al. Weak reflectivity FBG array based random distributed feedback Er-doped fiber laser [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26 (1): 20 - 24. (in Chinese)
袁俊伟, 董新永, 王鹿鹿, 等. 基于弱反射 FBG 串的随机分布反馈掺铒光纤激光器 [J]. *光电子 · 激光*, 2015, 26 (1): 20 - 24.
- [4] LIU Shulin, LU Jiyun. Tunable linear chirp method of fiber Bragg grating based on bending lever [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47 (4): 485 - 489. (in Chinese)
柳树林, 芦吉云. 基于弯曲压杆的光纤光栅可调谐线性啁啾化 [J]. *激光与红外*, 2017, 47 (4): 485 - 489.
- [5] LIU Qinpeng, QIAO Xueguang, JIA Zhenan, et al. A fiber grating pressure sensor with high pressure-resistance [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36 (6): 495 - 497. (in Chinese)
刘钦朋, 乔学光, 贾振安, 等. 一种耐高压光纤布拉格光栅压力传感器 [J]. *激光与红外*, 2006, 36 (6): 495 - 497.
- [6] LI Zhengying, ZHOU Zude, TONG Xinglin, et al. Research of high-speed large-capacity fiber bragg grating demodulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32 (3): 52 - 57. (in Chinese)
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32 (3): 52 - 57.
- [7] SUN Qing. Study on high-speed fiber Bragg grating demodulation system based on diffraction grating [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
孙庆. 基于衍射光栅的高速光纤光栅解调系统的研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [8] Wiedemair C, Sterken C, Eenmae T, et al. VizieR online data catalog: CCD photometry of CY Aqr 2012 - 2015 (Wiedemair +, 2016) [J]. *VizieR Online Data Catalog*, 2016: 350.
- [9] YAN Jiujiang, WAN Hui, Shi Fujun, et al. Research on the performance of laser marking based on P - V two factors [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46 (5): 537 - 541. (in Chinese)
闫久江, 万辉, 史富君, 等. 基于 P - V 双因素的网络激光标刻性能研究 [J]. *激光与红外*, 2016, 46 (5): 537 - 541.
- [10] SHAO Wei. Monte carlo methods and their applications in some statistical model [D]. Ji'nan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
邵伟. 蒙特卡洛方法及在一些统计模型中的应用 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [11] WANG Xiaona, WANG Qi, CHENG Yuehua, et al. Research on fiber optic sensor demodulator based on scanning fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38 (1): 82 - 86. (in Chinese)
王晓娜, 王琦, 陈乐华, 等. 基于扫描光纤激光器的光纤传感解调仪研究 [J]. *光子学报*, 2009, 38 (1): 82 - 86.