

# 高速大容量光纤光栅解调仪的研究

李政颖 周祖德 童杏林 熊 涛 唐智浩 蔡林均 赵 猛

(武汉理工大学信息工程学院光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要** 采用半导体光放大器和可调谐法布里-珀罗滤波器,以环路结构组成高速扫描激光器,结合光耦合器、光环路器和光电二极管等,形成 4 通道大容量高速光纤光栅解调仪。系统采用 2 kHz 的类三角波调制信号,驱动法布里-珀罗滤波器在 50 nm 的光谱范围内进行快速扫描。通过引入光纤梳状滤波器和单峰滤波器组成的参考通路,消除法布里-珀罗滤波器的非线性效应和扫描波长漂移问题,使得解调仪具有很好的稳定性和线性度。高速光纤光栅解调仪的稳定性为 2 pm,分辨率为 1 pm,线性度为 0.99957,测量精度为 5 pm,解调频率为 2 kHz。

**关键词** 光纤光学;光纤传感;光纤布拉格光栅;高速解调;可调谐法布里-珀罗滤波器;非线性

**中图分类号** O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0306007

## Research of High-Speed Large-Capacity Fiber Bragg Grating Demodulator

Li Zhengying Zhou Zude Tong Xinglin Xiong Tao Tang Zhihao  
Cai Linjun Zhao Meng

(Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, School of Information and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

**Abstract** A four-channel large-capacity, high-speed fiber Bragg grating demodulator is proposed. It constitutes of semiconductor optical amplifier and tunable Fabry-Pérot filter which is composed a high-speed scan laser in a loop structure, combining the optical coupler, optical loop circuit and photodiode. A 2 kHz triangular-like modulation signal is used in this system to drive the Fabry-Pérot filter to make fast scan in the range of 50 nm. The nonlinear effect and scan wavelength shift can be eliminated in Fabry-Pérot filter by introducing the reference channel composed by optical fiber comb filter and single-peak filter, leading to the excellent stability and linearity of demodulator. The stability of high-speed fiber Bragg grating demodulator is 2 pm; the resolution is 1 pm; the linearity is 0.99957; the measuring accuracy is 5 pm, the demodulation frequency is 2 kHz.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensing; fiber Bragg grating; high-speed demodulation; tunable Fabry-Pérot filter; nonlinearity

**OCIS codes** 060.3735; 060.2340; 230.7405

## 1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器,具有体积小、波长选择性好和便于波分复用,不会扰乱信号传输等特点,被广泛应用于结构健康监测、大型机械装备监测和恶劣环境物理量监测等方面<sup>[1]</sup>。FBG 可以被封装成各种传感器,用于温度<sup>[2]</sup>、应变<sup>[3,4]</sup>和压力<sup>[5]</sup>等物理量的检测。然而随着技术的不断进步,出于

安全监测的需要,提出了利用 FBG 检测振动<sup>[6]</sup>信息的要求,这就要求光纤光栅解调系统能够高速率、宽范围、高分辨率的测量 FBG 反射波长的变化量。目前国内外研究的解调方法有很多,如匹配光栅法<sup>[7]</sup>、线性滤波法<sup>[8]</sup>、偏振态干涉法<sup>[9]</sup>、电荷耦合器件(CCD)阵列探测法<sup>[10]</sup>和可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器法<sup>[11]</sup>等。但是,从解调速度、光谱范围、分辨

收稿日期: 2011-09-19; 收到修改稿日期: 2011-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51175389,50935005)、中央高校基本科研业务费专项资金(2011-IV-032)和湖北省宽带无线通信与传感器网络重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 李政颖(1981—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zhyli@whut.edu.cn

率和大容量等方面综合比较,可调谐 F-P 滤波器解调技术具有显著的优势。本文采用半导体光放大器(SOA)和可调谐 F-P 滤波器,以环路结构组成高速扫描激光器,结合光耦合器、光环路器和光电二极管等,形成 4 通道大容量高速光纤光栅解调系统。系统采用 2 kHz 的类三角波调制信号,驱动 F-P 滤波器在 50 nm 的光谱范围内进行快速扫描,并利用参考通路消除 F-P 滤波器的非线性效应和解决温度漂移问题,最终实现宽范围高速大容量光纤光栅解调仪。

## 2 高速光纤光栅解调系统

### 2.1 可调谐 F-P 滤波器工作原理

图 1 所示是可调谐 F-P 滤波器的结构示意图,将两光纤端面抛光后镀上高反膜,两光纤端面之间的空气隙作为 F-P 腔。其中一根光纤与固定框架连接在一起,保持静止;另一光纤通过弹性体和压电陶瓷(PZT)连接,弹性体用于给 PZT 加载预应力,PZT 接收驱动电压信号后带动光纤端面运动,从而改变腔长,实现透射波长的调谐。

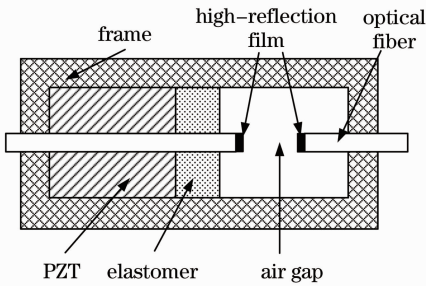


图 1 可调谐 F-P 滤波器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of tunable F-P filter

根据多光束干涉原理,任一对相邻光束的相位差  $\delta$  为

$$\delta = \frac{4\pi n l \cos \theta}{\lambda}, \quad (1)$$

式中  $n$  为 F-P 腔中介质的折射率,  $l$  为腔长,  $\theta$  为入射角,  $\lambda$  为光波波长。可近似认为入射角  $\theta = 0$ , 介质折射率  $n = 1$ , 则透射光的光强分布为

$$I^{(v)}(\lambda) = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} I_0(\lambda), \quad (2)$$

式中  $I_0(\lambda)$  为入射光光强,  $R$  为 F-P 腔两端面的反射率。

由(2)式可知,当光波长  $\lambda$  和 F-P 腔长  $l$  满足如下条件时,透射光强有极大值:

$$l = \frac{N\lambda}{2}, \quad (3)$$

式中  $N$  为干涉级数。透射光干涉条纹的精细度  $S$  为

$$S = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}, \quad (4)$$

由(4)式可知,随着 F-P 腔两端面反射率  $R$  的不断增大,透射光干涉条纹的宽度越来越细。如果从波长选择特性来看,可以认为随着  $R$  的增大,通过 F-P 腔的光越来越少。当  $R$  趋近于 1 时,只有满足相干极大条件即(3)式的光波长附近很小范围内的光才能通过 F-P 腔,故相当于一个光学滤波器。由(3)式可知,如果改变腔长  $l$ ,那么满足干涉极大的光波  $\lambda$  也会随之改变,即通过 F-P 腔的光波长在改变,若通过一定的方式连续地对 F-P 腔长做微小调节,那么滤过的光波长也会连续变化。

提出了一种制作的可调谐 F-P 滤波器的方法,仅将一段光纤放置在 PZT 上,另一段光纤固定不动,整个可调谐 F-P 滤波器结构中只有一个 PZT 来调节腔长,从而能大大降低 PZT 调节 F-P 腔长时 F-P 腔不良耦合的发生率,提高可调谐 F-P 滤波器的性能。

### 2.2 系统原理

系统主要由可调谐 F-P 滤波器驱动部分、光源驱动和恒温部分、检测通路部分、参考通路部分和信号采集与处理部分构成,如图 2 所示。F-P 滤波器在信号驱动下,以 2 kHz 的调制频率,在 50 nm 的光谱范围进行扫描,并与 SOA 以环路结构组成高速扫描激光器,激光器出光,经光分路器分别送入检测通路和参考通路,所得的光信号由光电二极管转换为电信号,高速模数(AD)采集转换后的电信号,送入现场可编程门阵列(FPGA)进行分析与处理。系统中采用是 Altera 公司 Stratix 系列的 FPGA,其系统时钟频率可高达 1 GHz,并集成有数字信号(DSP)模块,可并行实现大量数据的处理与分析。

检测通路由  $1 \times 4$  光分路器、光环行器和光纤光栅传感器组成。进入检测通路的光,经  $1 \times 4$  光分路器和光环行器后,进入 4 路光纤光栅传感器,光栅反射回的光再次经过光环行器后,经光电二极管转换为电信号(图 3 中 CH1 显示其中 1 路检测信号)。系统根据检测信号,并结合参考通路的信号,实时解调出 4 路上各个光栅的波长值。

由于可调谐 F-P 滤波是利用 PZT 调节来改变输出波长,在高速扫描时,PZT 调节具有非线性效应,而且环境温度变化会改变 F-P 滤波器的初始腔长,导致 F-P 滤波器扫描波长随温度变化产生漂

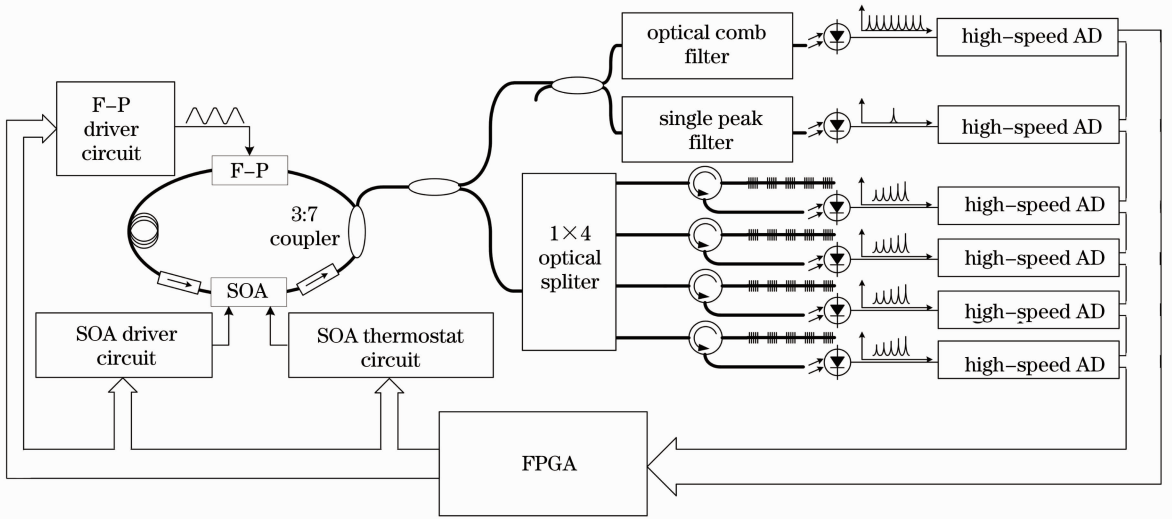


图2 高速大容量布拉格光纤光栅解调系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of high-speed large-capacity fiber Bragg grating interrogation

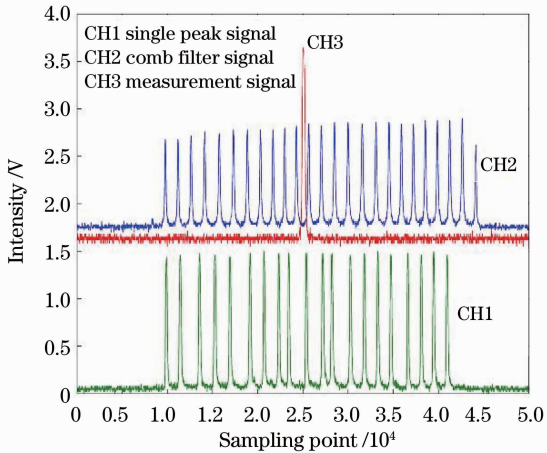


图3 参考通路信号与检测通路信号

Fig. 3 Reference channel signals and measurement channel signals

移,因此在系统中加入参考通路来解决这两个问题。参考通路由梳状滤波器和单峰滤波器组成。其中梳状滤波器的输出谱周期为 2 nm,消光比 20 dB。即在 50 nm 的光谱扫描范围内会有 25 条干涉条纹,如图 3 中 CH2 所示。由于光梳状滤波器几乎不受温度影响,因此这些干涉条纹峰值所对应的波长为定值。利用这已知的 25 个波长值,对检测到的光栅反射波长进行矫正,以消除扫描激光器波长扫描非线性问题。另外,可调谐 F-P 滤波器容易受到温度的影响,而产生漂移,如果漂移大于 1 个梳状滤波器的谱周期,将会严重影响波长解调结果。因此,在参考通路中加入单峰滤波器来解决这一问题。单峰滤波器在 50 nm 范围内,仅输出一个峰值信号(图 3 中 CH3),该峰值对应的波长为定值。当扫描波长随温度变化漂移时,单峰信号所对应的采样点会变化,根

据这一变化实时调整 F-P 滤波器驱动信号的直流偏置,将单峰信号对应的采样点控制在一定范围内,从而消除温度变化对解调系统的影响。引入参考通路,提高了高速扫描下光纤光栅解调仪的精度和稳定性。

### 2.3 可调谐 F-P 滤波器驱动

可调谐 F-P 滤波器中的 PZT 是一种大容量负载,且具有迟滞效应,在高频环境下,不同的驱动信号对 F-P 滤波器有着不同的效果。如图 4 所示,分别用 2 kHz 的三角波和正弦波作为驱动信号,观察梳状滤波器的信号。从图 4(a)中可以看出,三角波驱动下,等波长间距的梳状滤波器信号非常杂乱,25 个干涉峰不是均匀分布在 50 nm 扫描范围内。这是由于三角波是不同频率正弦波的叠加,在高频大容量负载的情况下,多种频率成分会导致 F-P 滤波器的腔长变化极不均匀,从而导致接收到的干涉峰之间间隔不等。从图 4(b)中可以看出,正弦波驱动下得到的梳状滤波器信号有很大的改善。但是,由于正弦信号电压的非线性变化,使得梳状滤波器的干涉峰信号两边疏中间密。可见,在正弦信号驱动下,F-P 滤波器腔长变化有着很强的非线性,在 FBG 传感器解调时,难以通过参考光路完全矫正,大大降低了解调精度。

为了解决这一问题,采用一种类三角波驱动信号,驱动可调谐 F-P 滤波器,如图 5(a)所示。这种类三角波信号的波峰和波谷是一段平滑的曲线,斜坡是一段线性的直线,该驱动信号含有较少的频率成分,可以有效减小 F-P 腔长变化的非线性效应。从图 5 可以看出,25 个干涉峰是等间距地均匀分布

在 50 nm 扫描范围内。用高速光纤光栅解调仪对梳状滤波器信号进行采集,得到 25 个干涉峰峰值所对应的采样点,并用光谱分析仪(AQ6370B)标定 25

个干涉峰的波长,将采样点和标定波长做比较,如图 6 所示,可以看出解调得到的 25 个波峰值有很好的线性关系,其中  $R^2$  为相关度。

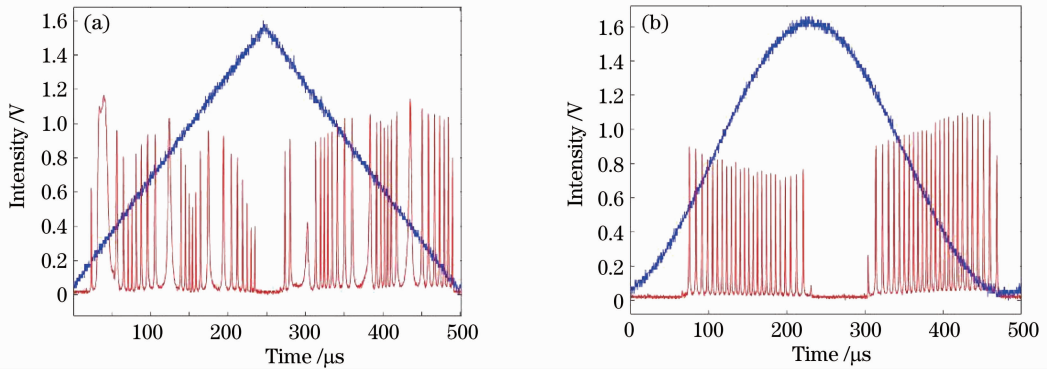


图 4 (a)三角波和(b)正弦波驱动下梳状滤波器输出波形

Fig. 4 Output waveform of comb filter under the drive of (a) triangular wave and (b) sinusoidal wave

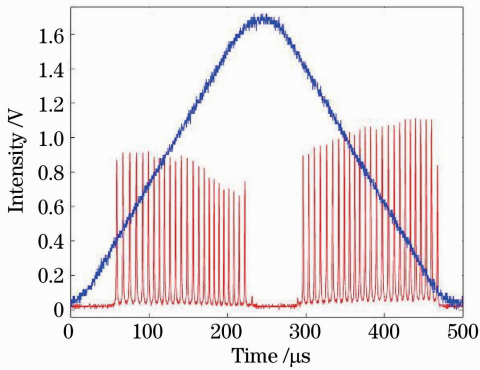


图 5 类三角波驱动下梳状滤波器输出波形

Fig. 5 Output waveform of comb filter under the drive of triangular-like wave

置在恒温箱内,应用高速光纤光栅解调仪来解调不同温度下 FBG 传感器的波长。同时,利用光谱仪实时监控 FBG 传感器波长的变化情况。FBG 传感器对温度灵敏度为 10 pm/°C,且随温度线性变化,因此可根据实验结果来分析光纤光栅解调仪的解调精度和线性度。

控制恒温箱内温度变化范围内 25 °C~105 °C,解调仪采集数据温度间隔为 10 °C,图 7 显示的是 45 °C、65 °C、85 °C 和 105 °C 时,20 个 FBG 传感器反射波长的变化情况。可见,当温度升高时,波长逐渐增大。

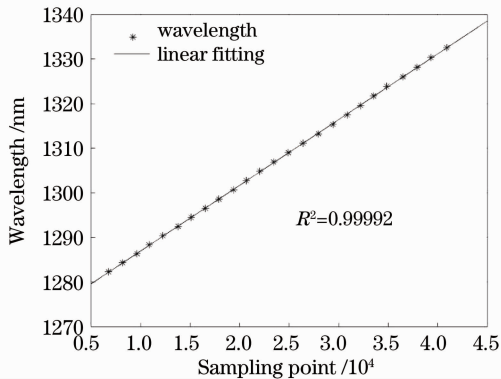


图 6 采样点与标定值比较

Fig. 6 Comparison between sampling points and calibration value

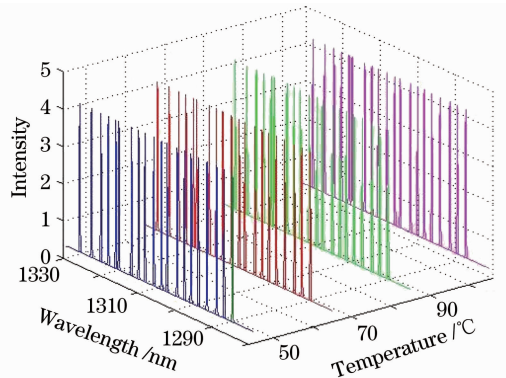


图 7 不同温度下 20 个 FBG 传感器反射波长值  
Fig. 7 20 reflecting wavelength of FBG sensors at different temperature

单独观察 1 个 FBG 传感器的波长变化。当温度恒定在 25 °C 时,该 FBG 传感器的波长解调 10000 次的的数据如图 8 所示, $x$  轴为采样点, $y$  轴为波长值。可见,解调的波长值集中在  $(1287.630 \pm 0.002)$  nm 范围,且 10000 次测量值的均方差为 1 pm。因此,光纤光栅解调仪的稳定性为 2 pm,分辨率为 1 pm。再观

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 解调精度及线性度测试

实验将 20 个级联的不同波长的 FBG 传感器放



察该 FBG 传感器随温度变化时,解调得到的波长变化情况,如图 9 所示,温度每上升 10 ℃,解调波长增加大约 100 pm,且对 9 个测量点做线性拟合,其  $R^2 = 0.9998$ ,具有很好的线性度。

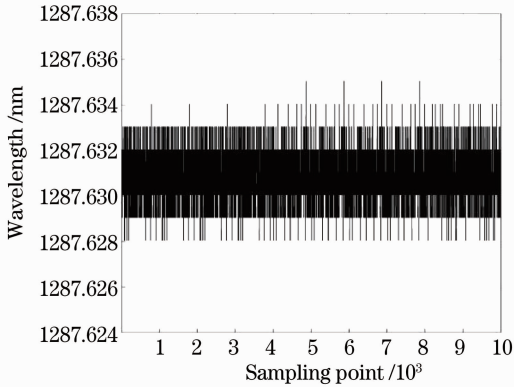


图 8 25 ℃ 时 FBG 传感器波长值

Fig. 8 Wavelength of FBG sensor at 25 ℃

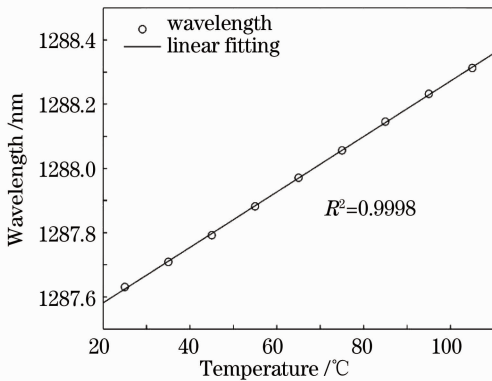


图 9 不同温度下 1 个 FBG 传感器波长值

Fig. 9 Wavelength of one FBG at different temperature

在光纤光栅解调仪每次采集数据的同时,利用光谱分析仪分析 20 个级联 FBG 的反射波长值,并将光纤光栅解调仪分析得到的波长值和光谱仪得到的波长值进行比较,如图 10 所示。图中  $x$  轴为光谱仪测量值, $y$  轴为光纤光栅解调仪测量值。每一个 FBG 传感器有 9 个测量值,级联 20 个 FBG,共 180 个测量值。对 180 个点做线性拟合,其  $R^2 = 0.99957$ ,均方根误差  $E_{RMS}$  为 0.0049 nm,说明在解调仪 50 nm 的解调范围内具有很好的线性度,且测量精度约为 5 pm。

### 3.2 解调频率测试

实验利用光纤光栅振动传感器和振动实验台(丹麦 B&K 公司),通过检测分析光纤光栅振动传感器在不同频率下的传感信号,来测试光纤光栅解调系统

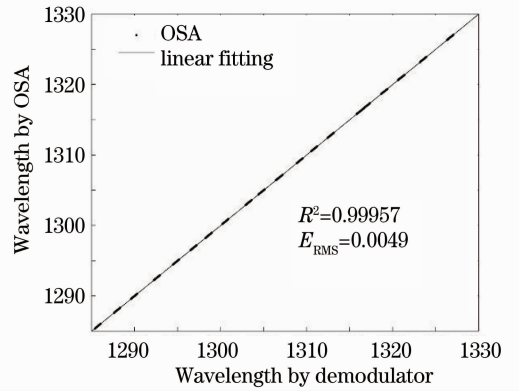


图 10 解调仪与光谱仪测量结果比较

Fig. 10 comparison between measurements of OSA and demodulator

的解调频率。实验分别在 10、200、600、990 Hz 的情况下,应用高速光纤光栅解调仪来解调光纤光栅振动传感器的波长。并对波长值进行快速傅里叶变换,分析振动信号的频谱,如图 11 所示。

图 11(a)是振动实验台工作在 10 Hz 情况下的实验结果,其中图 11(a)上方的波形是波长解调得到的振动传感器的反射波长值,横轴为采样点,纵轴为波长;中间的波形是对波长值进行快速傅里叶变换后,1000 Hz 以内的频谱分布,横轴为频率,纵轴为幅值;下方的波形是在主频附近 100 Hz 内的频谱分布,可更为清晰地观察主频附近的频谱分布情况。

在图 11 中 4 种振动频率下,光纤光栅解调仪分析得到的主频频率值分别是 11、202、601 和 992 Hz,与测试频率值基本吻合。综合振动测试实验情况分析,光纤光栅解调仪可以分析 1000 Hz 的振动信号,因此解调仪的解调频率为 2000 Hz。

## 4 结 论

利用可调谐 F-P 滤波器和半导体光放大器构成扫描激光器,设计实现了能同时解调 4 路光栅信号的高速大容量光纤光栅解调仪。通过引入光纤梳状滤波器和单峰滤波器组成的参考通路,并采用类三角波驱动信号,消除 F-P 滤波器的非线性效应和扫描波长漂移问题,使得解调仪具有很好的稳定性和线性度。从实验结果可以看出,在 50 nm 解调范围内,光纤光栅解调仪的稳定性为 2 pm,分辨率为 1 pm,线性度为 0.99957,测量精度为 5 pm,解调频率为 2 kHz。

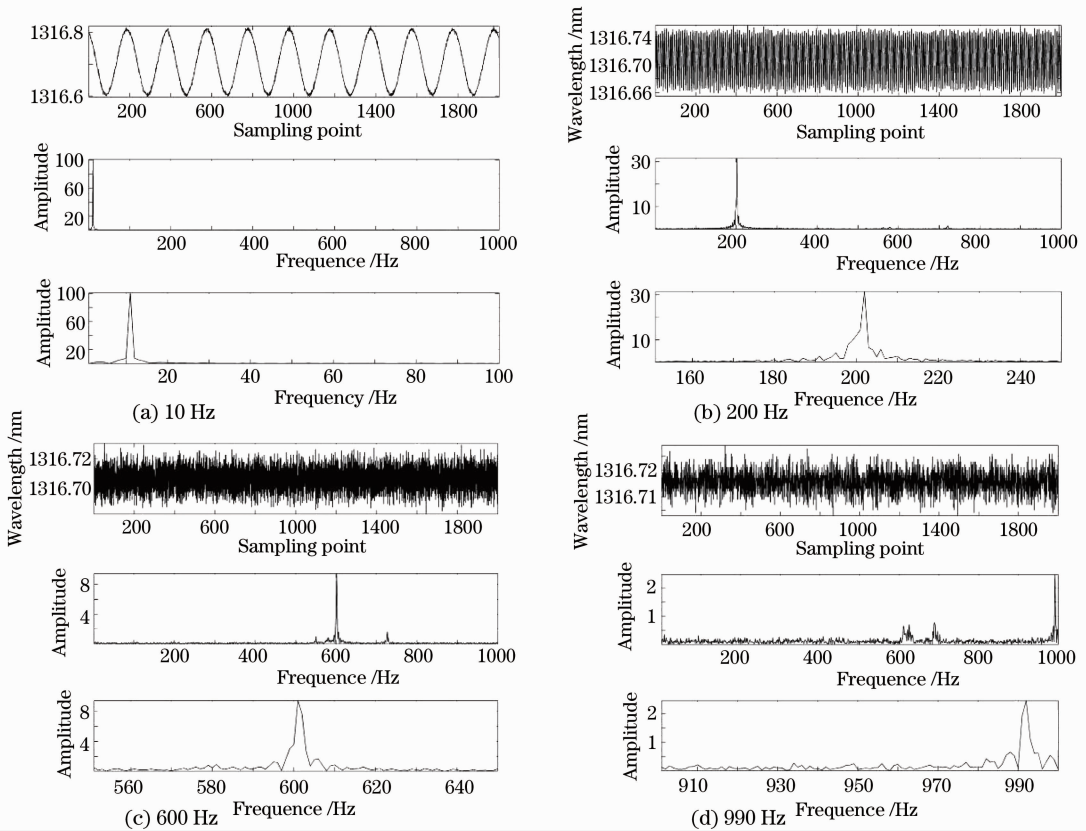


图 11 振动频率为(a)10,(b)200,(c)600,(d)990 Hz 时光纤光栅振动传感器波长值及频谱分析

Fig. 11 Wavelength of FBG vibration sensor and the frequency analysis with (a) 10, (b) 200, (c) 600, (d) 990 Hz vibration frequency

参 考 文 献

- 1 L. Wang, D. Li, J. Ou. Fiber Bragg grating temperature sensor system on a twin-deck continuous rigid frame bridge for long term monitoring [J]. *Adv. Mater. Res.*, 2011, **148-149**: 1611~1618
- 2 Y. Zou, X. Dong. Demodulation of the FBG temperature sensor with the tunable twin-core fiber [J]. *Microwave & Opt. Technol. Lett.*, 2011, **53**(1): 81~84
- 3 Ni Kai, Xu Haisong, Dong Xinyong *et al.*. Temperature independent fiber Bragg grating tilt sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2104~2107
- 倪 凯, 徐海松, 董新永等. 基于光纤布拉格光栅的温度不敏感的倾斜传感器 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2104~2107
- 4 Wu Yonghong, Shao Changjiang, Qu Wenjun *et al.*. Simplified time dependant optical mechanical transformation equation for FBG strain sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1965~1970
- 吴永红, 邵长江, 屈文俊等. 简化的光纤光栅应变传感器光-力转换的时变方程 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1965~1970
- 5 W. Wang, N. Wu, Y. Tian *et al.*. Optical pressure/acoustic sensor with precise Fabry-Perot cavity length control using angle polished fiber [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(19): 16613~16618
- 6 Qiao Xueguang, Ding Feng, Jia Zhen *et al.*. High precision optical fiber Bragg grating demodulation system based on the source filtering for seismic detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2219~2223

- 乔学光, 丁 锋, 贾振安等. 基于光源滤波的高精度光纤光栅地震检波解调系统 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2219~2223
- 7 L. A. Ferreira, J. L. Santes, F. Farah *et al.*. Pseudoheterodyne demodulation technique for fiber Bragg grating sensors using two matched gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(4): 487~489
- 8 Chen Xian, Yu Shangjiang, Yang Jixiang *et al.*. Measurement efficiency of high speed demodulation by linear filtering method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 145~150
- 陈 显, 余尚江, 杨吉祥等. 线性滤波法高速解调技术中的测量有效性研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 145~150
- 9 Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru *et al.*. Fiber grating sensor demodulation method based on polarization interference [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(6): 3988~3994
- 张锦龙, 余重秀, 王葵如等. 基于偏振干涉的光纤光栅传感解调方法 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(6): 3988~3994
- 10 H. Gao, S. Yuan, L. Bo *et al.*. InGaAs spectrometer and F-P filter combined FBG sensing multiplexing technique [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(14): 2282~2285
- 11 Liang Xiao, Liu Tiegeng, Liu Kun *et al.*. Method of real-time calibration for tunable optical filter nonlinearity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1445~1449
- 梁 霄, 刘铁根, 刘 琨等. 一种可调谐光滤波器非线性实时标定方法研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1445~1449

栏目编辑: 何卓铭