

基于色散补偿光纤的高速光纤光栅解调方法

李政颖 孙文丰 李子墨 王洪海

A demodulation method of high-speed fiber Bragg grating based on dispersion-compensating fiber

Li Zheng-Ying Sun Wen-Feng Li Zi-Mo Wang Hong-Hai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 234207 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.234207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低差分模式时延少模光纤的有限元分析及设计

Finite element analysis and design of few mode fiber with low differential mode delay

物理学报.2015, 64(6): 064212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064212>

拉锥型啁啾光纤光栅滤波器的研究

Study on tapered chirped fiber grating filter

物理学报.2013, 62(21): 214213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214213>

V型高双折射光子晶体光纤超连续谱产生的实验研究

Supercontinuum experimental study of V-type photonic crystal fiber with high birefringence

物理学报.2013, 62(21): 214212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214212>

微结构芯大模场平顶光纤及其传输特性分析

Investigation on large-mode-area flat-topped optical fiber with microstructured core and its transmission characteristics

物理学报.2013, 62(17): 174211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.174211>

微纳光纤端面反射特性的实验测量方法

Measurement of end-face reflection property of micro-nano fibers

物理学报.2013, 62(14): 144216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144216>

# 基于色散补偿光纤的高速光纤光栅解调方法\*

李政颖<sup>1)2)</sup> 孙文丰<sup>1)2)†</sup> 李子墨<sup>1)2)</sup> 王洪海<sup>1)</sup>

1)(武汉理工大学, 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

2)(武汉理工大学, 光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 武汉 430070)

(2015年5月26日收到; 2015年7月10日收到修改稿)

本文提出并论证了一种光纤光栅高速解调的新方法, 利用色散补偿光纤的色散效应, 将光纤光栅的波长漂移信息转换成时域信息. 采用脉冲激光器作为光源, 仅需一个光脉冲可获取单根光纤上所有光纤光栅的反射光脉冲, 再根据各个光栅反射回光脉冲的延时变化即可实现波长的解调. 本方法可用于准分布光纤光栅传感网络解调, 系统采用全光纤结构, 无需波长扫描, 大大提高了解调速度. 本文搭建了测试系统进行实验验证, 对3个光纤光栅组成的准分布式传感网络进行了解调, 实验结果表明, 解调出的光纤光栅布喇格波长线性度好, 解调速度最高可达1 MHz, 采样数据取10次平均后解调线性度可达0.9969, 解调误差约为27.8 pm.

**关键词:** 光纤光栅, 波长解调, 色散, 高速

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Pa, 42.81.Uv

**DOI:** 10.7498/aps.64.234207

## 1 引言

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 作为一种新型传感器, 由于其体积小、易复用、抗电磁干扰、耐腐蚀等优点已在各个领域中得到广泛的应用<sup>[1]</sup>, 但在一些特殊领域, 其应用受制于目前的波长解调技术. 例如, 在机械损伤探测中, 需要对多点的超声波信号进行检测, 超声波频率范围在20 kHz至800 kHz<sup>[2]</sup>, 甚至上MHz<sup>[3]</sup>, 这就需要光纤光栅波长解调技术对多点分布式传感网络具有超高速的解调能力. 同样, 光纤光栅传感技术已在航空发动机等旋转型机械设备监测得到应用, 然而受限于波长解调的速率, 一般只能对2 kHz以内频段进行研究<sup>[4]</sup>, 但叶片的振动频率会随转速的提高而升高, 且叶片的高阶振动频率高达数十kHz<sup>[5]</sup>, 因此需要更高的光纤光栅解调频率, 同时旋转机械对传输的光信号光强影响很大, 这就要求波长解调方法不能受到光强扰动的影响.

目前常用的光纤光栅波长解调技术包括: 可调谐F-P滤波器法、电荷耦合器 (Charge-coupled

Device, CCD) 阵列法、边缘滤波法、匹配光栅法和干涉法等. 可调谐F-P滤波器法具有很好的动、静态解调能力, 适用于准分布式光纤光栅传感网络, 但受限于移动器件可调谐F-P滤波器的调谐速度, 解调频率低于2 kHz<sup>[6]</sup>; CCD阵列法没有移动器件, 解调精度高, 稳定性好, 但解调频率最高仅能达数千Hz<sup>[7]</sup>. 边缘滤波法解调是基于光强变化进行解调, 其速度可到200 kHz以上, 但一般仅能实现单个光栅的相对波长解调, 且光强的扰动会严重影响测量的精度<sup>[8,9]</sup>; 匹配光栅法结构简单, 但不适用于准分布式光纤光栅阵列解调, 而且解调速率一般低于100 Hz<sup>[10]</sup>. 干涉法采用全光纤结构, 易于实现小型化, 解调分辨率高, 可实现高频动态信号检测, 但解调范围极小, 且测量精度受环境影响较大<sup>[11]</sup>.

针对上述解调方法的不足, 本文提出一种光纤光栅波长高速解调的新方法, 利用色散补偿光纤 (dispersion compensation fiber, DCF) 的色散延迟<sup>[12,13]</sup>效应进行波长-时间的转换. 仅需一个光脉冲即可同时获取传感光纤上所有FBG的波长信息, 可用于准分布式光纤光栅传感网络解调. 该方

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61575149, 61205072) 和湖北省自然科学基金 (批准号: 2012FFA104) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sunwenfeng@whut.edu.cn

法采用全光纤结构设计, 没有波长扫描器件, 从而大大提高波长解调速度, 且解调过程不受光强扰动影响. 本文对该解调方法进行了原理阐述, 并通过实验说明了该方法的具体实现过程, 给出了实验结果.

## 2 理论分析

基于色散补偿光纤的光纤光栅解调原理框图如图 1 所示, 脉冲激光器发出脉冲光信号入射到传感光纤, 与 FBG 布拉格波长相匹配的信号光被依次反射回来, 形成一组脉冲光信号, 反射脉冲光信号的波长即为对应 FBG 的布拉格波长. 光在通过长距离色散补偿光纤时会产生较大色散, 即不同波长的光会出现不同的延时, 实现波长-时间的转换, 通过测量脉冲光的延时变化即可实现 FBG 波长的解调.

脉冲光从激光器发出, 被参考光栅 FBG#r 反射回 A 点, 所需时间为

$$t_{Lr} = 2L_r n_{\text{eff}}/c, \quad (1)$$

式中,  $L_r$  为参考光栅 FBG#r 至光环形器的距离,  $n_{\text{eff}}$  为光纤纤芯的有效折射率,  $c$  为真空中的光速. 参考光栅 FBG#r 的反射脉冲光由 A 点通过 DCF 到达光电探测器时间为

$$t_{\text{DCF}r} = (L_{\text{DCF}} + \Delta L_{\text{DCF}})n_{\text{DCF}}/c + t_{\text{Ddcfr}}, \quad (2)$$

式中, 前一项为脉冲光因 DCF 传输光程导致的延时,  $L_{\text{DCF}}$ ,  $n_{\text{DCF}}$  分别为 DCF 的长度和纤芯折射率,  $\Delta L_{\text{DCF}}$  为 DCF 长度受环境影响产生的扰动, 后一项  $t_{\text{Ddcfr}}$  为 FBG#r 因 DCF 的色散效应导致的延时. 则脉冲光从激光器发出至被 FBG#r 反射回光电探测器, 总时间为

$$\begin{aligned} t_r &= t_{Lr} + t_{\text{DCF}r} \\ &= 2L_r n_{\text{eff}}/c + (L_{\text{DCF}} + \Delta L_{\text{DCF}})n_{\text{DCF}}/c \end{aligned}$$

$$+ t_{\text{Ddcfr}}. \quad (3)$$

脉冲光从激光器发出, 被传感光栅 FBG#i 反射回 A 点, 所需时间为  $t_{Li}$

$$t_{Li} = 2(L_r + d_i)n_{\text{eff}}/c, \quad (4)$$

式中,  $d_i$  为传感光纤上 FBG#r 与 FBG#i 的距离. 传感光栅 FBG#i 的反射脉冲光由 A 点通过 DCF 到达光电探测器时间为

$$\begin{aligned} t_{\text{DCF}i} &= (L_{\text{DCF}} + \Delta L_{\text{DCF}})n_{\text{DCF}}/c + t_{\text{Ddcfr}} \\ &+ D_{\text{DCF}}(\lambda_i - \lambda_r), \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $D_{\text{DCF}}$  为 DCF 的总色散,  $\lambda_i$ ,  $\lambda_r$  分别为传感光栅 FBG#i 和参考光栅 FBG#r 的布拉格波长. 则脉冲光从激光器发出至被 FBG#i 反射回光电探测器, 总时间为

$$\begin{aligned} t_i &= t_{Li} + t_{\text{DCF}i} \\ &= 2(L_r + d_i)n_{\text{eff}}/c + (L_{\text{DCF}} + \Delta L_{\text{DCF}})n_{\text{DCF}}/c \\ &+ t_{\text{Ddcfr}} + D_{\text{DCF}}(\lambda_i - \lambda_r). \end{aligned} \quad (6)$$

通过示波器采集光电探测器上的信号, 可以得到分别由 FBG#i, FBG#r 反射形成脉冲光信号的时间间隔为

$$\tau_{ir} = t_i - t_r = 2d_i n_{\text{eff}}/c + D_{\text{DCF}}(\lambda_i - \lambda_r). \quad (7)$$

可见, 系统通过加入参考光栅 FBG#r,  $\tau_{ir}$  中消除了 DCF 长度扰动  $\Delta L_{\text{DCF}}$  产生的影响. 通过恒温控制保证参考光栅  $\lambda_r$  的稳定, 根据 (7) 式可知, 当传感光栅 FBG#i 的波长  $\lambda_i$  发生变化时, 会导致  $\tau_{ir}$  产生变化,

$$\Delta\lambda = \Delta\tau_{ir}/D_{\text{DCF}}, \quad (8)$$

式中,  $\Delta\lambda_i$  为  $\lambda_i$  的变化量,  $\Delta\tau_{ir}$  为  $\tau_{ir}$  的变化量. 系统初始化时对 FBG#i 进行  $\tau_{ir}$  的标定, 通过计算时间间隔  $\Delta\tau_{ir}$  即可实现光纤光栅波长变化的解调.

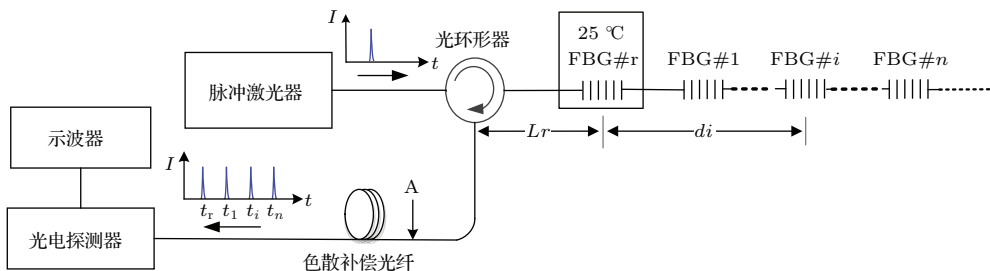


图 1 (网刊彩色) 基于色散补偿光纤的光纤光栅解调系统

Fig. 1. (color online) FBG Demodulation System Based on DCF.

由(8)式可知,系统的波长采样分辨率取决于 $\tau_{ir}$ 的测量分辨率以及DCF的总色散 $D_{DCF}$ .若采用80 GHz的采样率,则时间分辨率为12.5 ps. DCF的总色散 $D_{DCF} = D_C \times L_{DCF}$ ,其中 $D_C$ 为DCF的色散系数,其典型值为 $-130$  ps/nm·km;受限于DCF较高的传输损耗0.6 dB/km,其长度可取15 km,则DCF总色散为 $-2$  ns/nm.在上述条件下,系统的波长采样分辨率约为6.25 pm.本方法是利用波长-时间的转换关系实现波长的解调,与光强无关,避免了光强波动对测量精度产生影响,且可实现高速光纤光栅波长解调,适用范围广.

### 3 实验结果及分析

通过搭建测试系统验证本方法的可行性,采用的系统框图如图2所示.放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)光源输出宽谱连续光信号,通过脉冲发生器驱动的半导体光放大器进行强度调制形成脉冲光,通过光环行器进入传感光栅阵列.反射光经耦合器分为两束,一束传输至光谱仪用于测量光栅的实际波长,用作数据对比分析,

另一束经掺铒光纤放大器后通过DCF到达光电探测器转化为电信号,通过高速示波器对信号进行采集.

ASE光源输出波长范围为1530—1570 nm;脉冲发生器产生频率为1 MHz,脉宽为12 ns的脉冲;DCF总色散为 $-2.2$  ns/nm;高速示波器采用Keysight DSAX93204A,采样率为80 GHz,时间分辨率达12.5 ps. FBG#r进行 $25^\circ\text{C}$ 恒温控制,保证其布拉格波长稳定在1547.98 nm,传感阵列由3个反射率均为90%,波长分别为1552.14 nm, 1554.31 nm和1557.99 nm的FBG组成.实验前对3个传感FBG至FBG#r的时间间隔 $\tau_{ir}$ 进行标定,分别为259.17 ns, 527.62 ns和742.32 ns.

通过应力实验验证解调方法实现波长-时间的转换,实验中仅对FBG#2施加应力,使其布拉格波长发生漂移,测量其对应脉冲的延时变化.图3(a)为加应力前后光谱仪采集得到的光栅反射光谱,图3(b)为加应力前后示波器采集到的时域波形,可以看出FBG#2布拉格波长向右漂移了1.6 nm,示波器采集到其对应的脉冲向左漂移了3.6 ns,与理论值 $-2.2 \times 1.6 = -3.52$  ns基本一致.

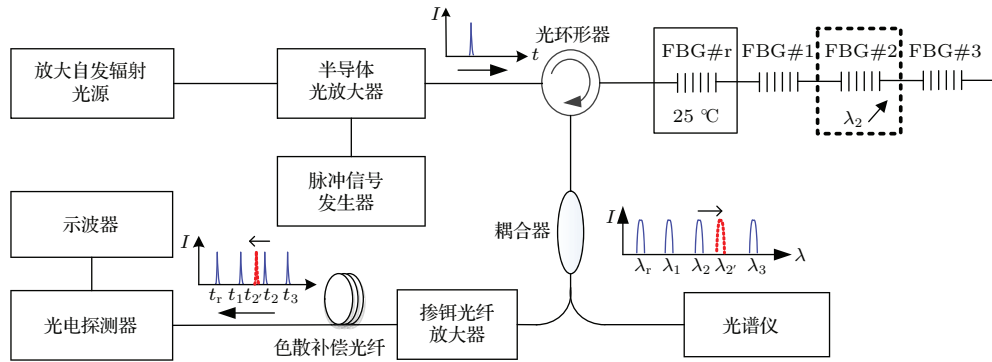


图2 (网刊彩色) 测试系统框图

Fig. 2. (color online) Diagram of testing system.

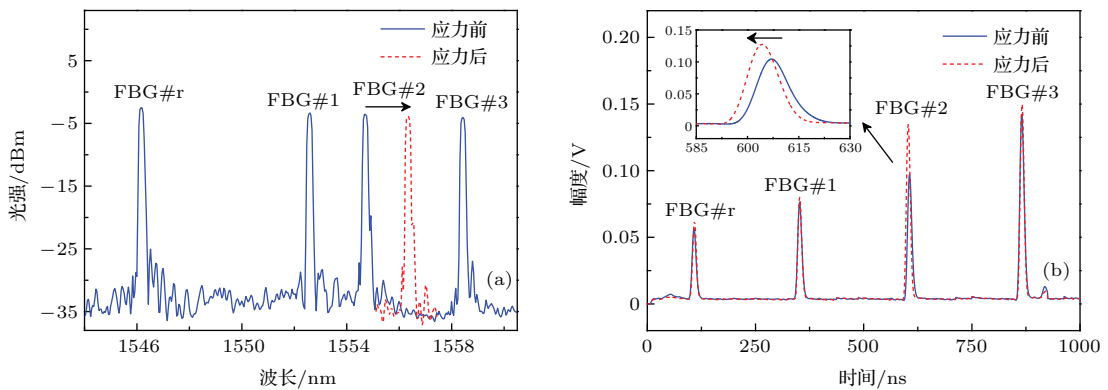


图3 (网刊彩色) 波长-时间转换 (a) 光栅反射光谱; (b) 时域波形

Fig. 3. (color online) The conversion from wavelength to time delay: (a) Bragg grating reflective spectral; (b) Time domain waveform.

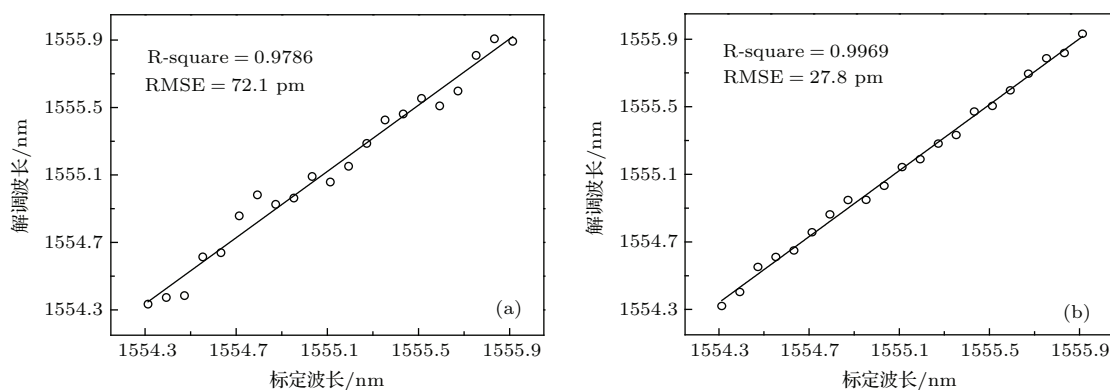


图4 (网刊彩色) 应力实验解调结果 (a) 单次采样; (b) 平均10次

Fig. 4. (color online) The result of stressing experiments: (a) Single sampling; (b) Average of ten times.

通过应力实验测试解调系统的性能, 实验中对FBG#2施加应力, 考虑到传感光栅的机械强度, 应力变化范围为 $0 \mu\epsilon$ 到 $2000 \mu\epsilon$ , 间隔为 $100 \mu\epsilon$ . 分别采用本解调系统与光谱仪对同一应变条件下FBG#2的波长进行测量. 激光器产生光脉冲周期为1 MHz, 因此根据示波器单次采样数据进行波长解调, 系统解调速度为1 MHz, 解调结果如图4(a)所示, 拟合曲线的拟合优度为0.9786, 解调误差为72.1 pm. 若使用平均算法提高信号信噪比, 对采样数据进行10次平均后进行波长解调, 系统解调速度为100 kHz, 解调结果如图4(b)所示, 拟合优度提高至0.9969, 解调误差仅有27.8 pm.

## 4 结 论

本文针对现有解调方法的不足, 提出并验证了一种基于色散补偿光纤的光纤光栅高速解调方法, 本方法仅需一个光脉冲周期, 通过采集的光纤光栅反射光脉冲时域波形, 计算脉冲间时间间隔, 即可实现传感光纤上所有FBG的波长解调. 系统采用了全光纤结构设计, 无需波长扫描, 大大提高了解调速度, 且解调过程不受光强影响. 实验测试表明, 本方法解调速度高达1 MHz, 可实现准分布式测量. 同时, 本文所提出的解调系统存在改进之处, 由于环境温度的扰动会使得脉冲光在传感光纤的传输时延发生变化, 从而导致波长解调产生误差, 因此如何实现位置信息和波长信息的解耦, 避免温度扰动对波长解调的影响, 提高波长分辨率和解调精度是下一步研究工作的重点.

## 参考文献

- [1] Guan M Z, Wang X Z, Xin C J, Zhou Y H, Ma L Z 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 17401
- [2] Lee J R, Guan Y S, Tsuda H 2006 *Smart Mater. Struct.* **15** 1429
- [3] Meng L J, Tan Y G, Zhou Z D, Liang B k, Yang W Y 2013 *Chin. Mech. Eng.* **24** 980 (in Chinese) [孟丽君, 谭跃刚, 周祖德, 梁宝逵, 杨文玉 2013 中国机械工程 **24** 980]
- [4] Jiang X X 2014 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Wuhan University of Technology) (in Chinese) [蒋熙馨 2014 博士学位论文(武汉: 武汉理工大学)]
- [5] Escaler X, Egusquiza E, Farhat M, Avellan F, Coussirat M 2006 *Mech. Syst. Signal Pr.* **20** 983
- [6] Li Z Y, Zhou Z D, Tong X L, Xiong T, Tang Z H, Cai L J, Zhao M 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0306007
- [7] Koo K P, Kersey A D 1995 *J. Lightw. Technol.* **7** 1243
- [8] Qiao X G, Ding F, Jia Z A, Fu H W, Yin X D, Zhou R, Song J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074221 (in Chinese) [乔学光, 丁锋, 贾振安, 傅海威, 营旭东, 周锐, 宋娟 2011 物理学报 **60** 074221]
- [9] Liu B, Tong Z R, Chen S H, Zeng J, Kai G Y, Dong X Y, Yuan S Z, Zhao Q D 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 199 (in Chinese) [刘波, 童峥嵘, 陈少华, 曾剑, 开桂云, 董孝义, 袁树忠, 赵启大 2004 光学学报 **24** 199]
- [10] Zhang D S, Guo D, Luo P, Jiang D S 2007 *J. Trans. Technol.* **20** 311 (in Chinese) [张东生, 郭丹, 罗裴, 姜德生 2007 传感技术学报 **20** 311]
- [11] Zhang J L, Yu C X, Wang K R, Zhao D X, Lin M M, Li W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3988 (in Chinese) [张锦龙, 余重秀, 王葵如, 赵德新, 林妹妹, 李成 2009 物理学报 **58** 3988]
- [12] Zhang X Q, Zhang X X, Cheng K, Xiang A P 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064207
- [13] Tian F, Zhang X G, Weng X, Xi L X, Zhang Y A, Zhang W B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 080702

# A demodulation method of high-speed fiber Bragg grating based on dispersion-compensating fiber\*

Li Zheng-Ying<sup>1)2)</sup> Sun Wen-Feng<sup>1)2)†</sup> Li Zi-Mo<sup>1)2)</sup> Wang Hong-Hai<sup>1)</sup>

1) (National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

2) (Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

( Received 26 May 2015; revised manuscript received 10 July 2015 )

## Abstract

Fiber Bragg grating sensing is one of the most attractive researches in the field of optical fiber sensing. It has made considerable progress due to its advantages in high multiplexing, high precision, small size, light weight, good corrosion resistance and immunity to electromagnetic interference. However, the traditional fiber Bragg grating demodulation technology can hardly achieve high-speed demodulation of multiplexing gratings, which seriously limits its extensive application. A novel high-speed fiber Bragg grating demodulation method is proposed and demonstrated in this paper. Large dispersion will be generated when light going through the long-distance dispersion compensation fiber. Based on the dispersion effect of dispersion compensation fiber, a light beam of different wavelength will generate different time delay, and the wavelength shift of the fiber Bragg grating sensor is then transformed into time domain, and ultimately the fiber Bragg grating wavelength demodulation can be realized by measuring the delay of grating reflective light pulse. The reflective light pulse train of all the cascade fiber Bragg grating sensors can be obtained only through one pulse of light source. This method can be applied in all-fiber structure without wavelength scanning so that it can promote the demodulation speed greatly and can be applied to the demodulation of quasi-distributed fiber Bragg grating sensor network. Disturbing influence of dispersion compensating fibers can be eliminated by introducing the reference grating, and the demodulation process is immune to light intensity disturbance. A test system is set up to demodulate a quasi-distributed sensor network which is made up of three fiber Bragg grating sensors. Results show that the linearity of the demodulated wavelength is good and the demodulation speed can be up to 1 MHz. The demodulation linearity is about 0.9969, and the error is about 27.8 pm after 10 times average. The novel demodulation method proposed in this paper has been tested through theoretical analysis and experimental demonstration, its feasibility to realize high-speed demodulation of fiber grating has been proved, but significant improvements still can be made in the demodulation system. The next step of research work will focus on how to realize decoupling between the location information and the wavelength, to avoid the influence of temperature disturbance on wavelength demodulation, so as to further improve the wavelength resolution and demodulation accuracy.

**Keywords:** fiber Bragg grating, wavelength demodulation, dispersion, high speed

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Pa, 42.81.Uv

**DOI:** 10.7498/aps.64.234207

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575149, 61205072) and the Natural Science Foundation of Hubei Province, China under (Grant No. 2012FFA104).

† Corresponding author. E-mail: [sunwenfeng@whut.edu.cn](mailto:sunwenfeng@whut.edu.cn)