

基于色散效应的光纤光栅高速高精度解调方法研究

李政颖 周磊 孙文丰 李子墨 王加琪 郭会勇 王洪海

High speed and high precision demodulation method of fiber grating based on dispersion effect

Li Zheng-Ying Zhou Lei Sun Wen-Feng Li Zi-Mo Wang Jia-Qi Guo Hui-Yong Wang Hong-Hai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 014206 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.014206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I1>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于偏振延时干涉技术的光子波形产生技术研究

Photonic microwave waveform generation based on polarization delay interference

物理学报.2016, 65(22): 224203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224203>

少模光纤的弯曲损耗研究

Study on bending losses of few-mode optical fibers

物理学报.2016, 65(6): 064208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064208>

基于包层模谐振的三包层石英特种光纤温度传感特性研究

Research on the temperature sensing characteristics of triple cladding quartz specialty fiber based on cladding mode resonance

物理学报.2016, 65(2): 024211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024211>

基于色散补偿光纤的高速光纤光栅解调方法

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

物理学报.2015, 64(23): 234207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234207>

具有四模式的低串扰及大群时延多芯微结构光纤的设计

Analysis of a novel four-mode micro-structured fiber with low-level crosstalk and high mode differential group delay

物理学报.2015, 64(23): 234206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234206>

# 基于色散效应的光纤光栅高速高精度解调方法研究\*

李政颖<sup>1)2)†</sup> 周磊<sup>1)</sup> 孙文丰<sup>1)</sup> 李子墨<sup>1)</sup> 王加琪<sup>1)</sup> 郭会勇<sup>2)</sup> 王洪海<sup>2)</sup>

1)(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)

2)(武汉理工大学, 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

(2016年5月24日收到; 2016年9月28日收到修改稿)

利用普通单模光纤(SMF)与色散补偿光纤(DCF)分别具有正色散和负色散系数特性, 实现光纤光栅阵列的高速高精度解调. 系统采用全光纤结构, 仅需发出单一高速光脉冲, 即可根据反射光脉冲时延差同时获取各个光栅的波长与位置信息, 大幅提高了光纤光栅解调速度; 通过建立DCF-SMF双通道和色散差矫正模型, 削弱了温度变化及色散值误差对系统解调精度的影响. 实验表明, 本方法解调速率可达1 MHz, 解调过程受传感网络光纤及双通道温变影响较小, 具有良好稳定性及高精度; 5—75 °C温度扰动实验中, 传感网络传输光纤温变时系统解调均方差16.8 pm, DCF-SMF双通道受温度扰动时系统解调均方差为11.9 pm, 恒温下系统长时间解调时均方差为6.4 pm; 应力实验中, 解调线性度可达0.9998, 解调精度约为8.5 pm.

**关键词:** 光纤传感, 普通单模光纤, 色散补偿光纤, 高速高精度

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

**DOI:** 10.7498/aps.66.014206

## 1 引言

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)因具有灵敏度高、体积小、抗电磁干扰、防腐蚀及易组建准分布式传感网络等优点而广泛应用于军事、交通、建筑和航空等领域<sup>[1,2]</sup>. 但在爆炸冲击波分析、超声波探伤及航空发动机监测等特殊应用领域, 需探测的信号频率一般在kHz<sup>[3]</sup>至MHz<sup>[4]</sup>高频级别, FBG传感器的应用受制于传统波长解调技术. 如何实现超高速光纤光栅中心波长的精确解调, 是FBG在上述特殊领域应用中亟待解决的关键问题之一.

关于FBG光纤光栅的高速解调, 国内外相继进行了积极探索研究. 2008年, 韩国釜山大学Jung等<sup>[5]</sup>利用傅里叶锁模(Fourier domain mode locking, FDML)扫频激光技术, 实现了31.3 kHz的

FBG传感阵列高速解调; 2009年, 日本东京大学Nakazaki等<sup>[6]</sup>实现了基于色散调谐技术的FDML扫频激光器解调法, 解调速度达到40 kHz; 2014年, 美国北卡罗莱纳州立大学van Hoe等<sup>[7]</sup>采用微机电(micro-electro-mechanical system, MEMS)可调谐光检测器实现了13个复用光纤光栅阵列的100 kHz高速解调. 在国内, 2004年, 南开大学光学研究所报道了一种长周期光纤光栅边沿滤波的线性解调法, 该方法基于光强度测量, 解调速率可达数十kHz<sup>[8]</sup>; 2007年, 天津大学李丽等<sup>[9]</sup>采用基于相位载波零差法的非平衡Mach-Zender干涉解调技术实现了10 kHz的解调速率; 2015年, 本课题组<sup>[10]</sup>采用分布反馈式激光器(DFB)进行光谱扫描, 实现了1 nm光谱范围内100 kHz的FBG光纤光栅高速解调.

但上述高速光纤光栅解调方法应用时存在局限性, 如: FDML扫频激光法激光谐振腔较长, 易

\* 国家自然科学基金(批准号: 61575149)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhyli@whut.edu.cn

受外界环境变化干扰, 稳定性不足; 可调谐光检测器法受限于MEMS结构, 调谐速率难以进一步提升; 边沿滤波法基于光强度测量, 光强扰动将影响解调准确性; 干涉仪法受环境干扰较大, 仅能检测动态信号; DFB激光器光谱扫描法仅能实现1 nm范围内高速扫描, 光谱范围太小. 针对上述不足, 本文提出利用色散补偿光纤 (dispersion compensation fiber, DCF) 与普通单模光纤 (single mode fiber, SMF) 在反常色散区分别具有负色散<sup>[11]</sup>与正色散<sup>[12]</sup>系数, 对入射光信号产生不同延迟效应的特性, 实现光纤光栅的高速高精度解调. 系统采用全光纤结构, 无需提前标定各光栅间距及波长扫描, 单一高速光脉冲下即可根据反射光脉冲时延差实现光栅波长与位置信息的同步解耦. 通过构建DCF-SMF反射信号光双通道, 引入参考光栅及色散差值矫正模型, 有效削弱了传感网络光纤温变和双通道温变及色散值误差对系统解调精度的影响, 具有高速、高精度及较好的稳定性等特点, 适用于

准分布式光纤光栅传感系统解调. 本文阐述了该方法的原理, 并进行了实验测试与分析.

## 2 理论分析

### 2.1 解调原理

图1所示为基于光纤色散效应的FBG高速高精度解调系统原理图. 高速脉冲激光器发出宽谱光脉冲被FBG光栅阵列反射, 形成后向窄谱光脉冲经耦合器C1同时进入色散补偿光纤与普通单模光纤中传输, 由于DCF与SMF在反常色散区分别具有负色散和正色散系数, 不同波长的脉冲光信号在双通道中产生不同时延. 匹配DCF与SMF长度, 使SMF中信号相较于DCF中信号稍晚到达耦合器C2, 经汇合后形成图1中C点时延对比信号, 实现光栅信息—时域脉冲转换, 通过测量脉冲时延即可实现光纤光栅波长与位置信息的解调.

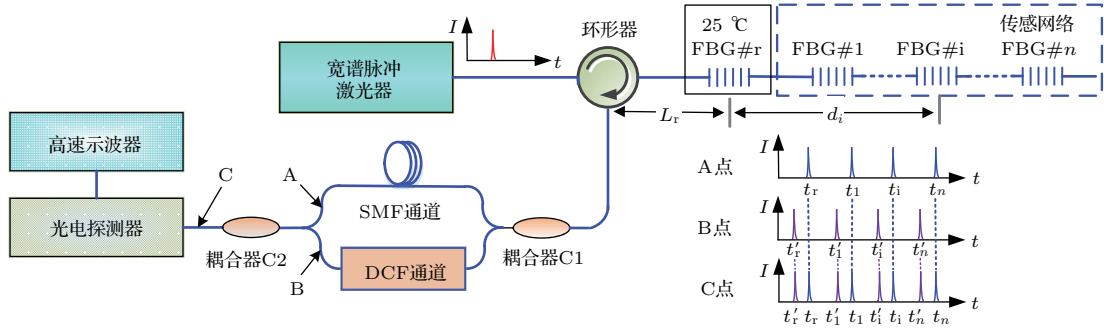


图1 (网刊彩色) 基于光纤色散效应的FBG高速高精度解调系统

Fig. 1. (color online) A high speed and high precision demodulation system of FBG based on fiber dispersion effect.

设 $\tau_{Lr}$ 与 $\tau_{Li}$ 分别为参考光栅FBG# $r$ 与传感光栅FBG# $i$ 反射形成窄谱脉冲光, 从激光器发出经光栅反射至耦合器C1的时间, 则

$$\begin{cases} \tau_{Lr} = L_r n_{\text{eff}} / c \\ \tau_{Li} = L_r n_{\text{eff}} / c + 2d_i n_{\text{eff}} / c \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $L_r$ 为光脉冲从激光器发出经FBG# $r$ 反射到耦合器C1所传输光程,  $d_i$ 为传感网络中FBG# $r$ 与FBG# $i$ 的间距,  $n_{\text{eff}}$ 为光纤纤芯有效折射率,  $c$ 为真空中光速.

在耦合器C1处, 对于进入DCF通道传输的部分光脉冲, 设 $\tau_{DCF_r}$ 与 $\tau_{DCF_i}$ 分别为FBG# $r$ 与FBG# $i$ 反射脉冲光从C1处到达光电探测器的时

间, 则

$$\begin{cases} \tau_{DCF_r} = (L_{DCF} + \Delta L_{DCF}) n_{DCF} / c + \tau_{Dr} \\ \tau_{DCF_i} = (L_{DCF} + \Delta L_{DCF}) n_{DCF} / c + \tau_{Di} \end{cases}, \quad (2)$$

其中,  $(L_{DCF} + \Delta L_{DCF}) n_{DCF} / c$ 为脉冲光在DCF中因传输光程引起延时;  $\tau_{Dr}$ 与 $\tau_{Di}$ 为光脉冲因DCF色散导致延时;  $L_{DCF}$ ,  $n_{DCF}$ ,  $\Delta L_{DCF}$ 分别为DCF的总长度、纤芯有效折射率及DCF因外界扰动如温度波动引起的长度改变.

又根据色散特性,  $\tau_{Di}$ 可表示为

$$\tau_{Di} = \tau_{Dr} + (\lambda_i - \lambda_r) D_{DCF}, \quad (3)$$

式中,  $\lambda_i$ 与 $\lambda_r$ 分别为传感光栅与参考光栅中心波长,  $D_{DCF}$ 为色散补偿光纤总色散. 则由(1), (2),

(3) 式可知, 光脉冲从激光器发出至被参考光栅与传感光栅反射并经 DCF 通道到达光电探测器的总时间  $\tau_r$  与  $\tau_i$  分别为

$$\begin{cases} \tau_r = \tau_{Lr} + \tau_{DCFr} \\ = L_r n_{\text{eff}}/c + (L_{\text{DCF}} + \Delta L_{\text{DCF}})n_{\text{DCF}}/c + \tau_{Dr} \\ \tau_i = \tau_{Li} + \tau_{DCFi} \\ = L_r n_{\text{eff}}/c + 2d_i n_{\text{eff}}/c + (L_{\text{DCF}} + \Delta L_{\text{DCF}}) \\ \times n_{\text{DCF}}/c + \tau_{Dr} + (\lambda_i - \lambda_r)D_{\text{DCF}} \end{cases} \quad (4)$$

则 FBG#i 与 FBG#r 反射光脉冲的时间间隔  $\tau_{ir}$  为

$$\tau_{ir} = \tau_i - \tau_r = 2d_i n_{\text{eff}}/c + (\lambda_i - \lambda_r)D_{\text{DCF}}. \quad (5)$$

(5) 式变形, 则  $\lambda_i$  可表示为

$$\lambda_i = \lambda_r + (\tau_{ir} - 2d_i n_{\text{eff}}/c)/D_{\text{DCF}}. \quad (6)$$

(6) 式中, 恒温控制 FBG#r 确保其中心波长  $\lambda_r$  不变, 由于  $d_i$ ,  $D_{\text{DCF}}$  等近似为定值, 测量变化仅引起  $\lambda_i$  与  $\tau_{ir}$  变化, 因而仅利用 DCF 也可实现 FBG 波长解调. 系统初始化时标定  $\lambda_r$  及  $d_i$ , 则根据脉冲时间间隔  $\tau_{ir}$  即可解调出波长  $\lambda_i$ . 但仅利用 DCF 局限性较大, 当传感网络较长时, FBG#i 与 FBG#r 间距  $d_i$  较大, 此时  $d_i$  受环境影响产生的长度扰动  $\Delta d_i$  不可忽略, 且 (5) 式中  $2d_i n_{\text{eff}}/c \gg D_{\text{DCF}} \Delta \lambda_i$ , 光栅间距  $d_i$  轻微扰动将严重影响波长  $\lambda_i$  的解调精度.

为保证精确性, 消除  $\Delta d_i$  的影响, 可利用 SMF 与 DCF 色散系数不一致的特性, 构建 DCF-SMF 反射脉冲光双通道进行解调. 在耦合器 C1 处, 对于进入 SMF 通道传输的部分光脉冲, 设普通单模光纤总色散为  $D_{\text{SMF}}$ , 则由 (5) 式可得到达光电探测器时 FBG#i 与 FBG#r 反射脉冲光时间间隔  $\tau'_{ir}$  为

$$\tau'_{ir} = \tau'_i - \tau'_r = 2d_i n_{\text{eff}}/c + D_{\text{SMF}}(\lambda_i - \lambda_r). \quad (7)$$

联立 (5) 和 (7) 式, 即可求解得传感光栅 FBG#i 中心波长  $\lambda_i$  及位置信息  $d_i$ :

$$\begin{cases} \lambda_i = \lambda_r + \frac{\tau_{ir} - \tau'_{ir}}{D_{\text{DCF}} - D_{\text{SMF}}}, \\ d_i = [\tau'_{ir} - D_{\text{SMF}}(\lambda_i - \lambda_r)] \times c/2n_{\text{eff}}. \end{cases} \quad (8)$$

由 (8) 式知, 通过构建 DCF-SMF 双通道, 能够消除光栅间距  $\Delta d_i$  扰动的影响, 优化系统精度的同时可同步完成  $\lambda_i$  及  $d_i$  的解耦, 无需提前标定各光栅间距, 增强了实用性. 且 DCF-SMF 受外界扰动产生的长度变化  $\Delta L_{\text{DCF}}$ ,  $\Delta L_{\text{SMF}}$  等由于参考光栅的使

用被抵消, 使得系统的稳定性与精度得到进一步改善.

## 2.2 色散系数矫正

光纤的色散系数  $D$  可由 (9) 式定义<sup>[13]</sup>:

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{\omega^2}{2\pi Lc} \frac{d^2\beta_c}{d\omega^2}, \quad (9)$$

式中,  $\tau$  为群延时;  $L$  为光纤总长度;  $\lambda$ ,  $\omega$ ,  $\beta_c$  分别为波长、角频率及传播常数;  $c$  为真空中光速. 由定义式知, 光纤色散系数单位为 ps/(km·nm), 即单位长度下脉冲展宽时间与光波长相关. 采用脉冲时延法<sup>[14]</sup>对双通道总色散差  $D = D_{\text{DCF}} - D_{\text{SMF}}$  进行测定, 长度约为 15 km 的色散补偿光纤与普通单模光纤构成双通道在 1543—1558 nm 波段色散曲线如图 2 所示.

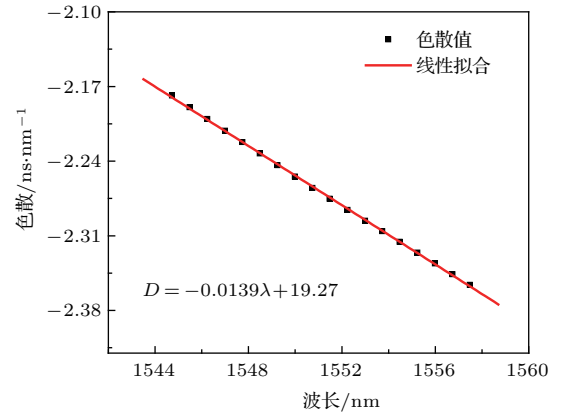


图2 DCF-SMF 色散系数曲线

Fig. 2. The dispersion coefficient curve of DCF-SMF.

图 2 中 DCF-SMF 在不同光波长处对应总色散差不同, 如 1545 nm 与 1557 nm 处分别对应  $-2.18$ ,  $-2.35$  ns/nm. 以 1543 nm 光栅为参考, 根据实验数据 1545, 1557 nm 光栅与参考光栅之间时延差 ( $\tau_{ir} - \tau'_{ir}$ ) 分别约为  $-4.34$ ,  $-31.57$  ns. 若将 DCF-SMF 总色散差近似为定值如  $-2.2$  ns/nm, 利用 (8) 式解调得两光栅波长为 1544.973, 1557.350 nm, 则误差分别为 27, 350 pm. 当光栅波长实际对应色散值与近似值相差较大时, 将产生严重误差, 近似值法仅适用较小动态范围的光栅波长解调.

为确保系统解调精度, 需对总色散差矫正建模. DCF-SMF 双通道色散曲线在上述波段内近似呈线性, 采用线性拟合以降低复杂度, 拟合公式为

$$D = -0.0139\lambda_i + 19.27. \quad (10)$$

根据色散的物理含义, 采用数学积分思想分析色散延时, 则解调(8)式可表示为

$$\int_{\lambda_r}^{\lambda_i} (-0.0139\lambda + 19.27) d\lambda = \tau_{ir} - \tau_{i'r'}, \quad (11)$$

式中,  $\lambda_r$ ,  $\tau_{ir} - \tau_{i'r'}$  均为已知量, 仅  $\lambda_i$  为待求量. 求解该定积分方程即可精确解调光纤光栅波长值. 图3给出了采用色散定值解调与色散模型解调时的误差情况仿真图, 可见随着动态范围的增加定值解调误差越来越大, 而采用色散模型解调则在较大动态范围内仍能与标定值相匹配, 具有良好的精度.

普通单模光纤在1550 nm波段色散数值约17 ps/nm·km<sup>[15]</sup>, 15 km SMF总色散值约为0.25 ns/nm, 相对于DCF约-2 ns/nm的总色散较小, 波长变化对SMF色散值影响较小, 为降低运算复杂度, 位置信息 $d_i$ 仍使用(8)式解调. 通过对色散曲线建模, 采用数学积分思想根据色散时延解调, 可矫正色散差值不准引起的误差, 提高精度的同时可有效增大系统动态范围. 受限于实验光源, 本文仅测量了1543—1558 nm波段色散, 若测量更广波段色散, 采用高阶多项式拟合建立标准色散曲线模型, 则可进一步提升系统动态范围及精度.

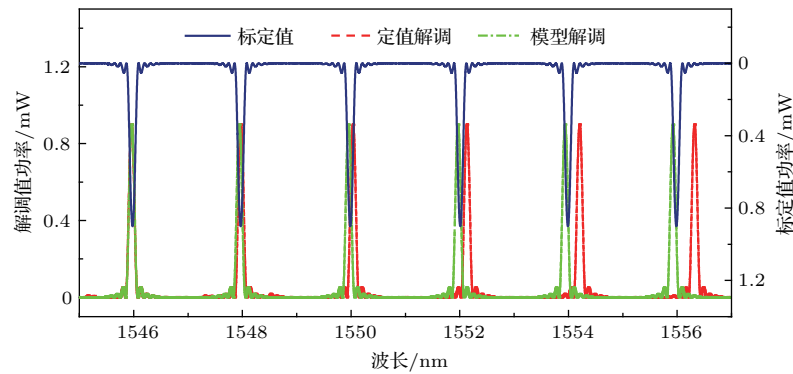


图3 (网刊彩色) 色散定值解调与色散模型解调误差情况仿真图

Fig. 3. (color online) The simulation diagram of demodulation error with dispersion constant value and dispersion model respectively.

### 3 实验系统及结果

图4所示为测试系统框图. 实验采用放大自发辐射光源(ASE), 输出1530—1570 nm宽谱连续光信号; 通过频率1 MHz、脉宽20 ns的高稳定性脉冲发生器驱动半导体光放大器(SOA)进行强度调制形成宽谱脉冲光, 经环形器进入光纤光栅

阵列; 反射光脉冲由耦合器C1分为两束, 一束接入光谱仪做标定, 验证解调可行性及精度; 另一束被掺铒光纤放大器(EDFA)放大进入DCF-SMF双通道, 经光电探测器(PD)转换为电信号, 通过Keysight DSAX93204A、采样率80 GHz、时间分辨率达12.5 ps的高速示波器采集信号. 色散补偿光纤与普通单模光纤长度都约为15 km; 光纤光栅阵列由4个FBG布拉格光栅组成, 反射率均为90%.

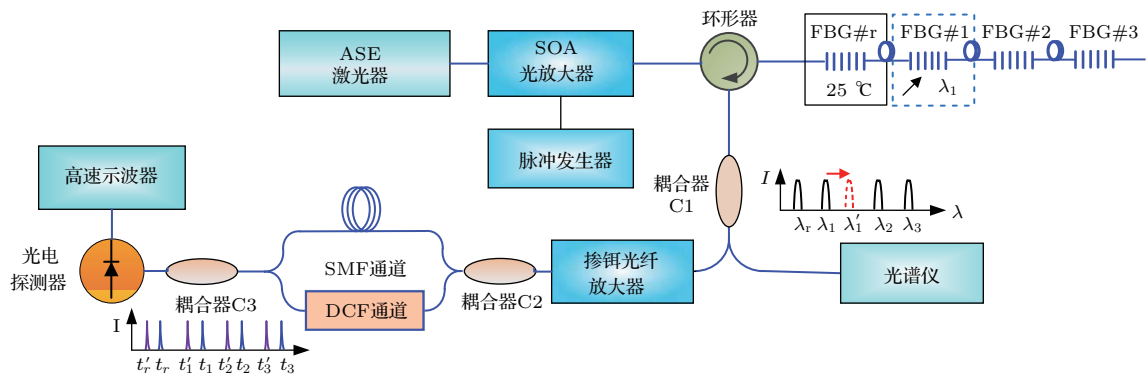


图4 (网刊彩色) 测试系统框图

Fig. 4. (color online) Diagram of testing system.

### 3.1 解调可行性及精度验证

通过应力实验验证DCF-SMF解调可行性及精度. 实验时将FBG#*r*置于25 °C恒温确保其波长 $\lambda_r$ 为1545.719 nm, 利用精密一维调节架夹持FBG#1并施加应力, 使其受到轴向均匀应变. 图5(a)与图5(b)分别为施加应力前后光谱仪光谱及高速示波器波形变化. 初始时, 图5(b)中DCF通道与SMF通道脉冲间隔 $\tau_{ir}$ 与 $\tau_{i'r'}$ 分别为248.47 ns和258.06 ns, 代入波长及位置解调公式得 $\lambda_i = 1549.991$  nm,  $d_i = 26.28$  m, 与光谱仪显示1550.003 nm及实测间距26.25 m基本相同; 当FBG#1受应力作用发生1.89 nm漂移时, 图5(b)时域脉冲也相应漂移, 其中DCF通道与SMF通道分别漂移 $\Delta\tau_{ir} = -3.9$  ns,  $\Delta\tau_{i'r'} = 0.43$  ns, 代入(11)式得 $\lambda'_i = 1551.883$  nm.  $\Delta\lambda_i = 1.892$  nm, 与光谱仪显示变化1.89 nm一致. 证明DCF-SMF双通道法解调光纤光栅中心波长及位置信息具备可行性.

应力实验中精密一维调节架步距50  $\mu\text{m}$ , 从初始位置移动2000  $\mu\text{m}$ , 记录每次移动后光谱仪及高速示波器数据, 利用高斯拟合解调算法解调数据. 脉冲光信号产生频率为1 MHz, 根据示波器单次采样数据进行波长解调, 解调速率达1 MHz. 图6(a)所示为解调结果, 1 MHz解调速率下均方根误差(RMSE)为19.9 pm, 拟合曲线线性度0.9988. 若采用平均算法提高信噪比, 10次平均后解调速率降低为100 kHz, 解调结果如图6(b)所示, RMSE仅为8.5 pm, 拟合曲线线性度提升至0.9998.

单独观察系统对1个光纤光栅的波长解调情况, 进行长时间稳定性测试. 当光纤光栅处于25 °C恒温时, 采集10次平均后的数据10000组, 并利用高斯拟合算法进行解调, 结果如图7所示. 可见, 系统解调结果在中心值1550.007 nm处上下浮动, 且浮动范围随时间增长基本保持一致, 10000次解调结果的均方差(STD)为6.4 pm, 表明系统稳定性良好.

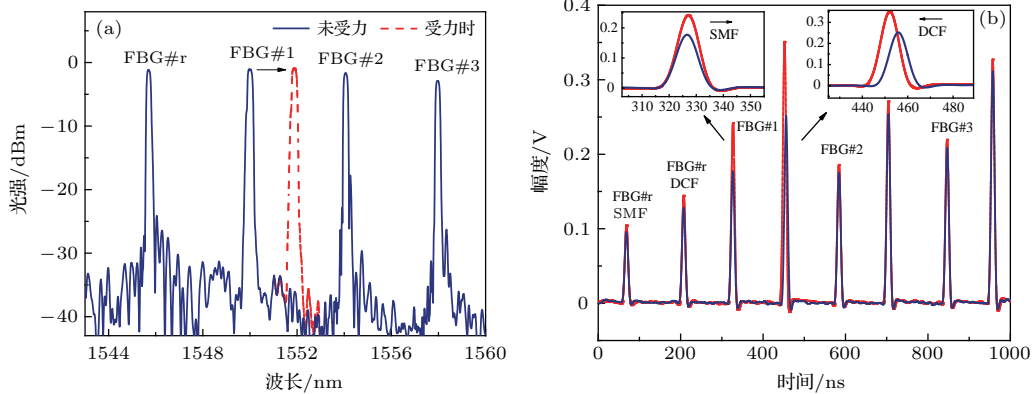


图5 (网刊彩色) 波形变化 (a) 光谱仪光谱; (b) 高速示波器时域波形

Fig. 5. (color online) The change of waveform: (a) Spectrometer spectrum; (b) time domain waveform of high-speed oscilloscope.

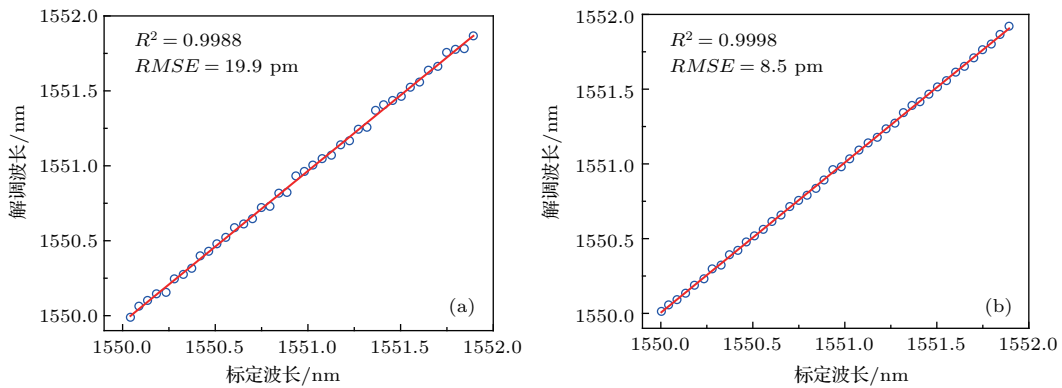


图6 (网刊彩色) 解调结果 (a) 1 MHz 速率; (b) 100 kHz 速率

Fig. 6. (color online) The results of demodulation: (a) Rate of 1 MHz; (b) rate of 100 kHz.

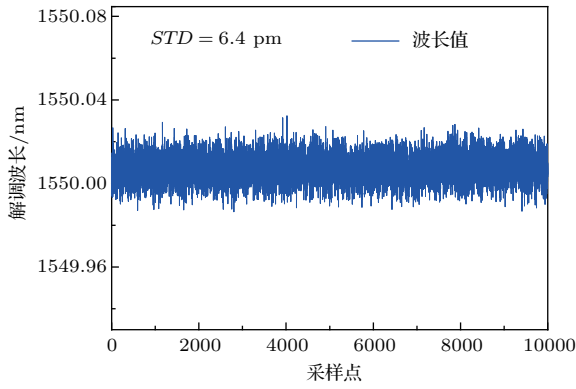


图7 (网刊彩色) 系统稳定性测试结果

Fig. 7. (color online) Results of system stability test.

### 3.2 温度扰动测试

分布式光纤光栅传感系统受环境温变影响易产生较大光栅间距扰动  $\Delta d_i$  及双通道长度扰动  $\Delta L_{DCF}$ ,  $\Delta L_{SMF}$ . 本文引入的参考光栅 FBG#r 及 DCF-SMF 双通道能够削弱上述扰动影响, 确保系统精度及稳定性. 下面通过温度实验模拟外界扰动对系统进行检验.

设定传感网络长度 5 km, 即 FBG#r 与 FBG#i 间距 5 km, 对 FBG#r 恒温控制, 并加载一温度于 FBG#i, 此时两光栅中心波长分别为 1541.972 与 1554.108 nm. 将 FBG#r 与 FBG#i 之间的传输光纤(无光栅)置于温控箱, 设置温度从 5—75 °C, 步进 5 °C 变化, 验证环境温变产生扰动  $\Delta d_i$  时对系统精度的影响情况, 同等条件下解调数据, 结果如图 8 实线所示. 仅利用 DCF 进行上述温度实验, 与 DCF-SMF 双通道对比, 论证光栅间距

扰动  $\Delta d_i$  消除情况, 解调结果如图 8 虚线所示.

图 8 中, DCF-SMF 解调 FBG#i 中心波长时基本不受传感网络光纤温变影响, 近似呈水平线, 采样数据 10 次平均后解调结果  $STD$  为 16.8 pm; 仅利用 DCF 解调受温度影响严重, 呈斜向线性增大趋势, 10 次平均后结果  $STD$  为 3614 pm. 对比可知通过构建 DCF-SMF 双通道, 系统能有效削弱传感网络光纤温变的影响, 解调精度得到提升.

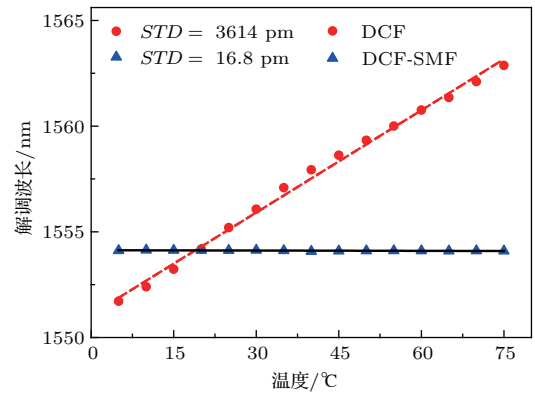


图8 传感网络温度扰动测试结果

Fig. 8. The test result of sensing network with temperature disturbance.

同理, 恒温控制传感网络光栅, 将由长度各约 15 km 的 DCF 与 SMF 所构成解调系统置于温控箱中, 设置温度从 5—75 °C 步进 5 °C 变化, 论证双通道长度扰动  $\Delta L_{DCF}$ ,  $\Delta L_{SMF}$  的消除情况. 绘制高速示波器在 5, 40 及 75 °C 下采集波形, 如图 9 (a) 所示, 同等条件下利用解调算法解调数据, 结果如图 9 (b) 所示.

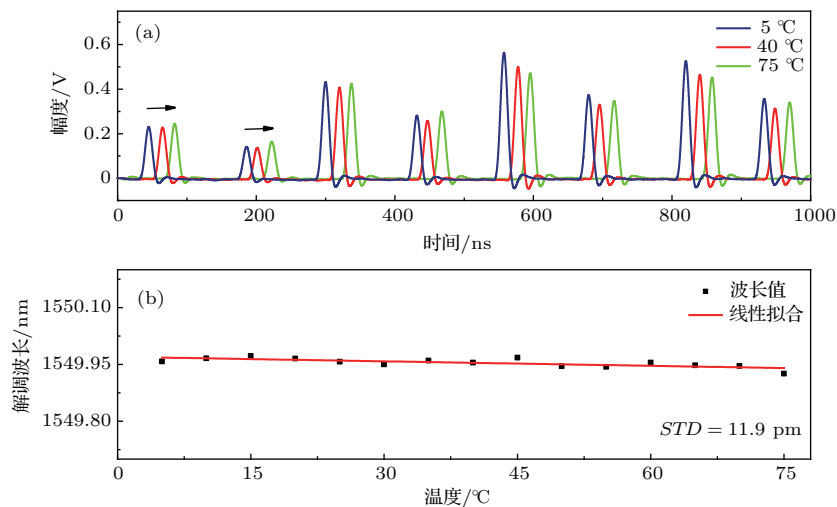


图9 (网刊彩色) 双通道温度扰动测试 (a) 示波器波形; (b) 解调结果

Fig. 9. (color online) Dual-channel temperature disturbance test: (a) Oscilloscope waveform; (b) demodulation results.

由图9(a)高速示波器采集波形可知,温度升高时双通道在热膨胀效应作用下产生长度扰动 $\Delta L_{\text{DCF}}$ ,  $\Delta L_{\text{SMF}}$ ,以及热光效应影响,光脉冲在双通道中传播时间会随温度的升高而逐渐延长.若采用波形初始坐标标定解调,显然温度扰动将严重影响解调精度.本文采用参考光栅,参考两光栅之间时延差解调,可有效避免双通道受温度扰动的影响,提升系统的精度及稳定性.图9(b)中,双通道温度在5—75 °C范围变化时,系统采集数据10次平均后解调结果均方差为11.9 pm,而稳定性测试中系统长时间解调时的均方差为6.4 pm,证明双通道温变产生的扰动能被系统有效削弱,系统抗温度扰动性能良好.

#### 4 实验分析与讨论

上述温度实验中,仅利用DCF解调时出现解调结果随传感网络光纤温度升高而线性增大的现象.下面对该现象产生原因进行探讨.由理论部分(6)式的分析,因 $2d_i n_{\text{eff}}/c \gg D_{\text{DCF}} \Delta \lambda_i$ ,传感网络温度变化引起光栅之间光纤热膨胀及折射率变化,产生间距扰动 $\Delta d_i$ 导致脉冲光传输时延变化,造成解调误差.对脉冲光在传感网络中的传输时延 $2d_i n_{\text{eff}}/c$ ,单位长度的光纤每改变单位温度,则传输时延变化为

$$\begin{aligned} \Delta \tau_T &= \frac{\partial ([2\Delta d_i(T) n_{\text{eff}}(T)]/c)}{\partial T} \\ &= \frac{2}{c} \left( \frac{\partial(\Delta d_i(T))}{\partial T} n_{\text{eff}}(T) + \Delta d_i(T) \frac{\partial(n_{\text{eff}}(T))}{\partial T} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\Delta d_i(T)$ 为长度微元,因光纤长度与折射率都受温度影响,分别写成 $d_i(T)$ 与 $n_{\text{eff}}(T)$ 形式.分析可知,热膨胀效应引起的光纤长度变化为

$$\frac{\partial(\Delta d_i(T))}{\partial T} = \alpha \cdot \Delta d_i(T). \quad (13)$$

而由热光效应引起的光纤有效折射率变化为

$$\frac{\partial(n_{\text{eff}}(T))}{\partial T} = \zeta \cdot n_{\text{eff}}(T). \quad (14)$$

结合(6),(12),(13)和(14)式,可推得传感网络上间距 $d_i$ 的FBG# $r$ 与FBG# $i$ ,每单位长度改变单位温度解调波长变化量 $\Delta \lambda_i$ 为

$$\Delta \lambda_i = \frac{\Delta \tau_T}{D_{\text{DCF}}} = \frac{2\Delta d_i(T) n_{\text{eff}}(T)}{D_{\text{DCF}c}} (\alpha + \zeta), \quad (15)$$

式中,以 $\text{SiO}_2$ 为主要成分的光纤热膨胀系数<sup>[16]</sup> $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,掺锗光纤热光系数 $\zeta = 8.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,分析(15)式可知脉冲传输时延随 $\alpha$ 与 $\zeta$ 线性变化.温度实验时FBG# $i$ 波长不变,因而DCF的色散值 $D_{\text{DCF}}$ 为定值,则传感网络温度变化时 $\Delta \lambda_i$ 也线性变化,与3.2节中的实验现象一致.

对本文所提DCF-SMF解调系统的误差进行分析与讨论.由原理部分的理论公式分析可知,DCF-SMF解调方法误差的主要来源有:DCF-SMF总色散差值不准引起的误差、传感网络光纤温变和双通道温度扰动造成的误差、脉冲发生器信号抖动引起采样偏差导致的误差.其中,前两项因素起决定性作用.由实验结果可知,通过引入色散差值矫正模型、构建双通道及采用参考光栅等方法,可抑制此两项因素对系统的影响,使得解调系统误差得到了有效减小.在削弱了这两项因素影响的情况下,因高速示波器采样率80 GHz,时间分辨率12.5 ps,由色散模型得1550 nm波长处色散差值为 $-2.28 \text{ ns/nm}$ ,则信号抖动引起单位采样偏差导致的误差约为5.5 pm.通过采用高稳定性脉冲发生器及高斯拟合解调算法,由稳定性测试结果6.4 pm可知,信号抖动误差同样被控制在较小的范围.

#### 5 结论

利用普通单模光纤与色散补偿光纤在反常色散区分别具有正色散和负色散系数特性,结合光时域反射技术实现光纤光栅高速高精度解调.系统采用全光纤结构,构建DCF-SMF双通道及引入参考光栅削弱外界扰动因素的影响,建立色散模型矫正双通道色散差值问题引起的解调误差;无需标定各光栅间距及波长扫描,单一高速光脉冲下即可完成光栅波长与位置信息的同步解耦.应力实验中,解调速率可达1 MHz,线性度0.9998,精度约为8.5 pm;5—75 °C温度实验中,传感网络光纤温变时,解调均方差16.8 pm,双通道受温度扰动影响时,解调均方差为11.9 pm,而系统在常温下长时间解调时的均方差为6.4 pm;表明本方法具有高速高精度、良好稳定性及动态范围广等特点,适用于准分布式光纤光栅传感系统高速解调.



## 参考文献

- [1] Qiao X G, Ding F, Jia Z A, Fu H W, Ying X D, Zhou R, Song J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074221 (in Chinese) [乔学光, 丁峰, 贾振安, 傅海威, 营旭东, 周锐, 宋娟 2011 物理学报 **60** 074221]
- [2] Jin J, Lin S, Song N F 2014 *Chin. Phys. B* **23** 014206
- [3] Lee J R, Guan Y S, Tsuda H 2006 *Smart Mater. Struct.* **15** 1429
- [4] 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]
- [5] Jung E J, Kim C S, Jeong M Y, Kim M K, Jeon M Y, Jung W, Chen Z P 2008 *Opt. Express* **16** 16552
- [6] Nakazaki Y, Yamashita S 2009 *Opt. Express* **17** 8310
- [7] van Hoe B, Oman K, Peters K, van Steenberge G, Stan N, Schultz S 2014 *IEEE Sensors 2014* Valencia Spain, November 2–5, 2014 p402
- [8] 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, 董峥嵘, 陈少华, 曾剑, 开桂云, 董孝义, 袁树忠, 赵启大 2004 光学学报 **24** 199]
- [9] Li L, Lin Y C, Shen X Y, Fu L H, Wang W 2007 *J. Trans. Technol.* **20** 994 (in Chinese) [李丽, 林玉池, 沈小燕, 付鲁华, 王为 2007 传感技术学报 **20** 994]
- [10] Liu Q, Wang Y M, Liu S Q, Li Z Y 2015 *J. Optoelectron.·Laser* **26** 1473 (in Chinese) [刘泉, 王一鸣, 刘司琪, 李政颖 2015 光电子·激光 **26** 1473]
- [11] Li P, Shi L, Sun Q, Feng S J, Mao Q H 2015 *Chin. Phys. B* **24** 074207
- [12] Tan S J, Harun S W, Ali N M, Ismail M A, Ahmad H 2013 *Quantum Electron. IEEE J.* **49** 595
- [13] Wang Z F, Liu X M, Hou J 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 1496 (in Chinese) [王泽锋, 刘小明, 侯静 2010 中国激光 **37** 1496]
- [14] Zou X H, Zhang S J, Wang H, Zheng X, Ye S W, Zhang Y L, Liu Y 2014 *J. Optoelectron.·Laser* **25** 932 (in Chinese) [邹新海, 张尚剑, 王恒, 郑秀, 叶胜威, 张雅丽, 刘永 2014 光电子·激光 **25** 932]
- [15] Zhang L C, Hou L T, Zhou G Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 054217 (in Chinese) [张立超, 侯蓝田, 周桂耀 2011 物理学报 **60** 054217]
- [16] Li D S, Liang D K, Pan X W 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 1166 (in Chinese) [李东升, 梁大开, 潘晓文 2005 光学学报 **25** 1166]

# High speed and high precision demodulation method of fiber grating based on dispersion effect\*

Li Zheng-Ying<sup>1)2)†</sup> Zhou Lei<sup>1)</sup> Sun Wen-Feng<sup>1)</sup> Li Zi-Mo<sup>1)</sup> Wang Jia-Qi<sup>1)</sup>  
Guo Hui-Yong<sup>2)</sup> Wang Hong-Hai<sup>2)</sup>

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

2) (National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)  
( Received 24 May 2016; revised manuscript received 28 September 2016 )

## Abstract

Fiber Bragg grating sensor is widely used in military, construction, transportation, aviation and other fields due to its advantages in high sensitivity, high precision, high multiplexing and small volume. However, in some special fields such as ultrasonic flaw detection, high-speed vibration and aeroengine monitoring, the signals are rapidly changing, thus requiring high speed sampling. But the demodulation speed of traditional fiber Bragg grating demodulation techniques is hardly to satisfy the requirements, which seriously limits the application of fiber Bragg grating sensor in these fields. To solve this problem, in this paper we propose a dispersion compensation fiber (DCF)-single mode fiber (SMF) dual-channel demodulation method. Based on the SMF and the DCF with the characteristics of positive and negative dispersion coefficients in the anomalous dispersion region respectively, and combining with the optical time domain reflection technology, high speed and high precision demodulation of fiber grating can be realized. This system adopts the whole fiber structure without wavelength scanning, and the grating wavelength and position information can be obtained according to the pulse delay difference under a single optical pulse. There are three factors that quite influence the system accuracy and need to be solved: the grating space disturbance which is caused by the temperature change of the sensor network fiber; the dual-channel length disturbance caused by the DCF-SMF dual-channel temperature change; the dispersion disturbance caused by the inaccurate dispersion difference of the DCF-SMF. By constructing the DCF-SMF dual-channel, adopting the reference grating and introducing the dispersion difference correction model, these influence factors are solved. The case of temperature disturbance elimination is tested by the 5–75 °C temperature experiments. And the results are as follows: when the temperature of the sensor network fiber changes, the standard deviation of this dual-channel demodulation system is 16.8 pm, while only using the DCF single-channel to form the demodulation system, the standard deviation is 3614 pm. And when the DCF-SMF dual-channel is disturbed by temperature, the standard deviation is 11.9 pm. For a long time demodulation under constant temperature, the standard deviation of this system is 6.4 pm. Thus the influences of the sensor network fiber temperature change and the dual-channel temperature change on the system demodulation accuracy are effectively reduced. The feasibility and accuracy of this method are also verified by the strain experiment. Experimental results show that the highest demodulation rate of this method is 1 MHz, while the linearity can be up to 0.9998, and the accuracy is about 8.5 pm. So the system with the dispersion difference correction model has a high precision. Therefore, this novel demodulation method has advantages of high speed and high precision, good stability and large dynamic range, and it is very applicable to quasi-distributed fiber Bragg grating sensing system.

**Keywords:** optical fiber sensing, single mode fiber, dispersion compensation fiber, high speed and high precision

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

**DOI:** 10.7498/aps.66.014206

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61575149).

† Corresponding author. E-mail: zhyli@whut.edu.cn