

基于连续扫频光时域反射的全同弱光栅高速解调方法

王一鸣 胡陈晨 刘泉 郭会勇 殷广林 李政颖

High speed demodulation method of identical weak fiber Bragg gratings based on wavelength-sweep optical time-domain reflectometry

Wang Yi-Ming Hu Chen-Chen Liu Quan Guo Hui-Yong Yin Guang-Lin Li Zheng-Ying

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 204209 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.204209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多光谱可见光通信信道串扰分析

[Analysis of channel crosstalk in muliti-spectrum visible light communication system](#)

物理学报.2016, 65(9): 094208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094208>

混沌与湍流大气中的光通信

[Optical communication in turbid and turbulent atmosphere](#)

物理学报.2016, 65(8): 084207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084207>

100Gb/s 归零码信号的 2R 再生

[A study of 100 Gb/s 2R regeneration for return-to-zero code signal](#)

物理学报.2016, 65(5): 054208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054208>

基于太赫兹光非对称解复用器结构的低开关能量、高线性度全光采样门实验研究

[Experimental study on a low switching energy and high-linearity all-optical sampler based on terahertz optical asymmetric demultiplexer](#)

物理学报.2015, 64(15): 154213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154213>

复合抛物面聚光器作为可见光通信光学天线的设计研究与性能分析

[Design research and performance analysis of compound parabolic concentrators as optical antennas in visible light communication](#)

物理学报.2015, 64(12): 124212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124212>

基于连续扫频光时域反射的全同弱光栅 高速解调方法*

王一鸣¹⁾ 胡陈晨²⁾ 刘泉¹⁾ 郭会勇²⁾ 殷广林²⁾ 李政颖^{1)2)†}

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4月25日收到; 2016年7月21日收到修改稿)

具有大容量复用能力的全同弱反射光栅已成为光纤传感领域的研究热点, 然而现有的全同弱光栅时分复用解调技术存在解调复杂和响应时间长等问题. 针对此问题, 本文提出了一种连续扫频光时域反射的高速解调新方法. 不同于光时域反射的脉冲光, 本方法采用的是连续光扫频, 利用光传输延时来实现不同位置的全同光栅在时域上的分离, 利用光谱扫频实现光栅波长信息的解调, 在系统解调工作阶段, 一次扫频就能同时获取所有光栅的位置信息和完整的反射光谱波长信息. 针对光谱高速扫频情况下光传输延时所引入的光栅波长解调误差, 本文提出在系统初始阶段采用延时校准方法, 通过不同的光谱扫频速度, 获取各个光栅固有的延时间参量, 确定各光栅位置, 消除光传输延时, 完成各光栅的波长解调. 实验对18个全同弱光栅组成的传感网络进行了初始校准、静态温度和动态振动实验, 结果表明, 对全同弱光栅的解调误差小于15 pm, 分辨率1 pm, 线性度达0.998, 系统可分析60 kHz内的频谱信息, 解调频率高达120 kHz.

关键词: 全同弱反射光栅, 连续扫频光, 高速解调, 延迟校准

PACS: 42.79.Sz, 42.60.Fc, 42.55.-f

DOI: 10.7498/aps.65.204209

1 引言

光纤光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 传感器具有抗电磁干扰能力强、低损耗、适合长距离传输、耐腐蚀、体积小、检测灵敏度高传统电传感器所无法替代的优良特性, 已广泛地应用于民用工程、航空、船舶、电力、石油、建筑物结构健康监测、复杂机械系统动态监测等领域^[1,2]. 随着科学的发展和时代的进步, 大容量、低成本、高速解调是光纤光栅传感技术今后的重要发展方向^[3,4].

传统的光纤光栅传感网络, 光栅反射率高 (>10%), 多采用波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM) 技术^[5], 由于FBG波长调制的特性, 每个光栅都需要占用一定的波长带宽, 且彼此之间不能出现频域的重叠, 因此, WDM技术

受到光源谱宽度的限制, 复用光栅数量有限. 文献^[6—8]提出了基于FDML扫频激光器的高速解调系统, 但都采用了不同波长的光栅组成的WDM形式, 光栅数目受到激光器光谱宽度的限制, 可复用数目十分有限. 为了突破复用容量限制, 研究学者提出了全同弱反射光栅^[9], 该光纤光栅具有相同的反射波长, 和极低的反射率 ($\leq 1\%$), 不同于WDM形式, 全同弱反射光栅可构建大规模时分复用 (time division multiplexing, TDM) 传感网^[10,11].

近十多年来, 国内外在全同弱光栅解调方面开展了积极的探索, 文献^[12]采用光时域反射 (optical time domain reflectometry, OTDR) 技术来解调TDM传感网络, 该方法利用一次脉冲光可获得所有光栅的位置信息, 但需要发出多个不同波长

* 国家自然科学基金 (批准号: 61575149, 61290311) 和国家国际科技合作专项 (批准号: 2015DFA70340) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhyli@whut.edu.cn

的脉冲光才能获得光栅的光谱信息, 所需扫描时间较长, 解调速度较慢^[13,14]. 文献^[15]采用基于双半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA) 和 CCD (charge coupled device) 图像传感器来构建大容量全同弱反射光栅解调系统进行 TDM 传感网络解调, 其中一个 SOA 作为脉冲激光器, 通过改变另一个 SOA 的驱动周期来匹配不同位置的光栅, 再利用 CCD 进行波长解调, 虽然可以通过一次脉冲光获得光栅的光谱信息, 但一次光脉冲仅能匹配一个光栅, 随着复用光栅数量的增加, 系统的响应时间将大大降低. 文献^[16]提出了基于傅里叶域模式锁定的环形腔结构, 采用了 TDM 形式, 解决了弱反射光栅反射光强弱, 信号信噪比差的问题, 只是该方法也是光栅传感器轮询式定位, 响应时间长.

针对全同弱光栅传感网络解调复杂和响应时间长的问题, 本文提出了基于连续扫频光时域反射 (wavelength-sweep optical time-domain reflectometry, WSOTDR) 方法的高速解调系统, 不同于 OTDR 的脉冲光, 系统使用的是连续光, 利用光传输延时来实现不同位置的全同光栅在时域上的分离, 在系统解调阶段, 一次扫频就可区分出全部光栅的位置, 同时获得完整的全同光栅反射光谱, 极大地减小了 TDM 系统的解调复杂度和响应时间. WSOTDR 技术主要包括全同弱光栅位置信

息解调、高速波长解调、延迟校准, 系统搭建了连续波长的高速扫频激光器, 利用光在光纤中的传输延时来实现不同位置的全同光栅在时域上的分离, 通过光谱扫频实现光栅波长信息的解调, 在系统初始化阶段采用不同的光谱扫频速度, 获取各光栅固有的延时参量^[17], 在后续解调阶段就可补偿出无传输延时的各光栅反射时间, 完成全同弱光栅在时域中的波长解调, 不同于 WDM 中需要不同波长光栅的组网模式, 全同波长光栅的时域解调突破了激光器光谱宽度的限制, 极大地提高了光栅的复用数目. 本文对上述方法进行了原理阐述, 并通过实验进行了验证, 给出了实验结果.

2 全同弱光栅高速解调方法

解调系统如图 1 所示. 为了输出连续波长的高速扫频光, 激光器采用了 FDML 扫频激光器, 扫频光经光分路器后, 90% 的光进入到弱光栅传感网络, 10% 的光进入到参考通道; 光栅反射光信号和参考通道信号采集部分由光电探测器、信号处理模块构成, 完成检测信号的光电转换和数据采集. 其中传感网络是由多个反射率 $\leq 1\%$, 中心波长相同的光纤光栅等间隔串联组成; 标定通道是谱间距为 2 nm 的梳状滤波器, 梳状滤波器输出一组波长稳定的波峰, 系统依据波峰值进行波长动态标定.

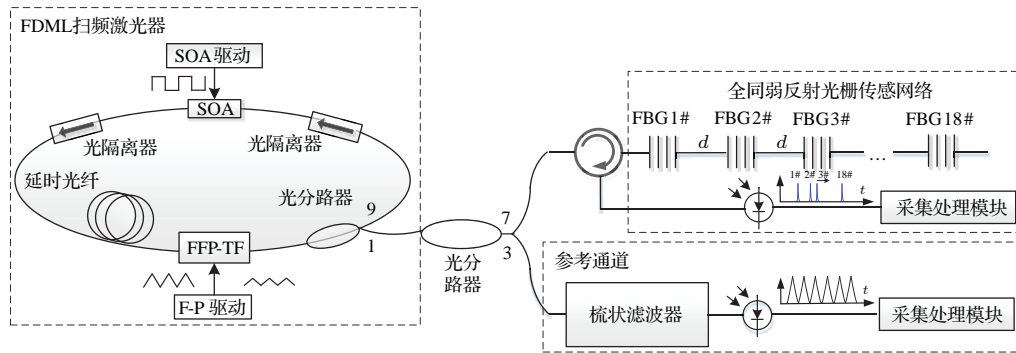


图 1 全同弱反射光栅解调系统图

Fig. 1. Identical weak fiber Bragg gratings demodulation system.

本文提出的 WSOTDR 解调, 利用连续光的一个周期的扫频, 就可以在实现全同光栅时域分离的同时, 获得完整的全同光栅反射光谱的时间信息, 如图 2 所示. 其中, 光栅之间的光纤距离 d 产生的延时时间 t_{delay} 为

$$t_{\text{delay}} = d \frac{2n_{\text{eff}}}{c}, \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为光传输介质的折射率, c 表示光在真空中的传输速度. 全同弱光栅在各延时时间 t_{delay} 和光谱扫频速度 V_{sweep} 连续光的作用下产生系统计数值区分和等效波长的区别, 解调系统通过系统时钟对反射谱的时间信息进行计数, 将扫频时域中的连续波长值 λ 转换为计数值 N_{count} , 其满足一定的

线性函数关系:

$$\lambda = kN_{\text{count}} + b. \quad (2)$$

设计的扫频激光器为正半周期出光, 光谱扫频速度 V_{sweep} 与输出光谱范围 λ_{out} 以及扫描频率 f_0 的关系为

$$V_{\text{sweep}} = 2\lambda_{\text{out}} \cdot f_0. \quad (3)$$

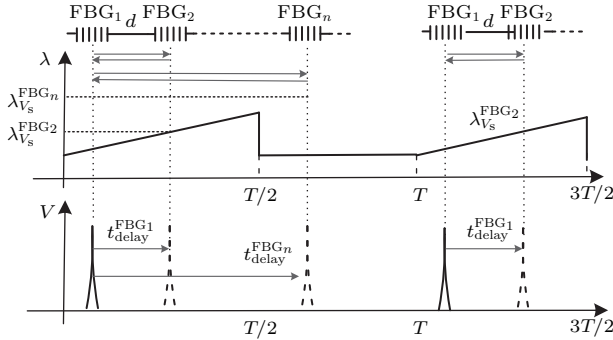


图2 连续扫频光时域反射的光栅区分与解调原理

Fig. 2. Principle of grating discrimination and demodulation of WSOTDR.

因此, 相邻两个弱光栅反射光由延时产生的计数值差值 ΔN_{count} 与光谱扫频速度 V_{sweep} 和延时时间 t_{delay} 的关系式为

$$\begin{aligned} \Delta N_{\text{count}} &= \frac{t_{\text{delay}} \cdot V_{\text{sweep}}}{k} \\ &= d \frac{4n_{\text{eff}} \cdot \lambda_{\text{out}} \cdot f_0}{k \cdot c}. \end{aligned} \quad (4)$$

在理想的初始状况下, 等间隔布置的全同弱光栅在解调系统中的计数值间隔为 ΔN_{count} , 并且各光栅的计数值随着其布置位置的远离而依次增大 ($N^{\text{FBG}_{n-1}} < N^{\text{FBG}_n}$), 这样通过计数值的大小对各光栅的位置顺序进行区分.

与此同时, 解调系统的参考通道输出一组波长 λ^{comb_n} 已知的梳状波峰计数值, 利用梳状滤波器对已区分的全同光栅进行波长解调, 选择光栅两侧的光梳状滤波器波峰值作为标定参考, 得到峰值计数值为 N^{comb_l} , N^{comb_r} , 对应的已知波长为 λ^{comb_l} , λ^{comb_r} . 故在连续扫频光时域反射谱中, 各全同弱光栅解调在光谱扫频速度 V_{sweep} 的等效波长值 $\lambda_{V_s}^{\text{FBG}_n}$ 为

$$\begin{aligned} \lambda_{V_s}^{\text{FBG}_n} &= (N^{\text{FBG}_n} - N^{\text{comb}_l}) \frac{\lambda^{\text{comb}_r} - \lambda^{\text{comb}_l}}{N^{\text{comb}_r} - N^{\text{comb}_l}} \\ &\quad + \lambda^{\text{comb}_l}. \end{aligned} \quad (5)$$

这样, 在激光器的一个扫频周期内, 系统实现了不同位置的全同弱光栅区分, 并同时获取了完整

的全同弱光栅反射光谱波长信息. 该位置区分及波长解调的方法不同于 OTDR, 不需要发出多个不同波长的脉冲光进行波长解调, 提高了全同光栅在 TDM 中的解调速度.

3 延时误差自校准方法

连续扫频光时域反射谱中, 解调得到的等效波长值 $\lambda_{V_s}^{\text{FBG}_n}$ 并不是光栅的真实波长值, 由于光传输的时间延迟, 存在波长值误差 λ_{delay} :

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{delay}} &= \lambda_{\text{real}} + V_{\text{sweep}} \cdot t_{\text{delay}} \\ \Rightarrow f(N_{\text{delay}}) &= f(N_{\text{real}}) + V_{\text{sweep}} \cdot t_{\text{delay}}. \end{aligned} \quad (6)$$

所以, WSOTDR 解调技术在解调系统初始化阶段加入了延时误差自校准方法, 获取各光栅固有的延时参量, 得到光各栅反射回的无传输延迟的时间值, 在扫频光时域中实现各光栅的解调, 完成误差补偿.

在实现过程中, 首先对扫频激光器进行了改进, 设计可输出不同光谱扫频速度的扫频激光器. 已知光谱扫频速度 V_{sweep} 由激光器光谱范围 λ_{out} 和扫频频率 f_0 共同决定, 系统固定了扫频激光器的扫描周期, 即 f_0 始终为 120.99 kHz, 改变 F-P 驱动电压的幅值, 使扫频激光器的扫描范围 λ_{out} 发生变化, 得到了不同光谱扫频速度 V_{s1} , V_{s2} , 其波长扫描的光谱图如图 3 所示.

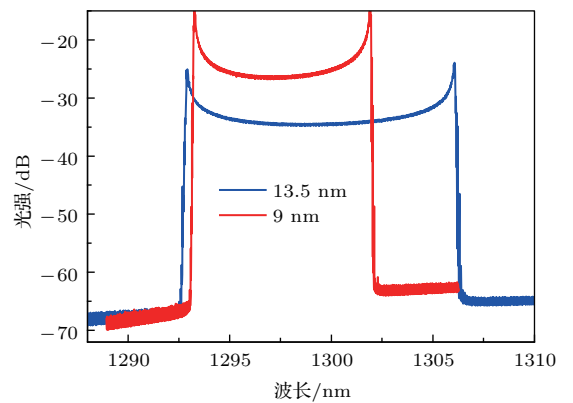


图3 (网刊彩色) V_{s1} , V_{s2} 输出光谱图

Fig. 3. (color online) The output spectrum of V_{s1} , V_{s2} .

在 V_{s1} , V_{s2} 下, 记录待解调光栅 FBG_n 的计数值 $N_{s1}^{\text{comb}_l}$, $N_{s1}^{\text{comb}_r}$, 及光栅两侧梳状滤波器峰值计数值 $N_{s1}^{\text{comb}_l}$, $N_{s1}^{\text{comb}_r}$ 和 $N_{s2}^{\text{comb}_l}$, $N_{s2}^{\text{comb}_r}$, 根据延迟

关系(6)式可得:

$$\begin{cases} \lambda_{\text{real}}^{\text{FBG}_n} = \lambda_{s1}^{\text{FBG}_n} - V_{s1} \cdot t_{\text{delay}}^{\text{FBG}_n}, \\ \lambda_{\text{real}}^{\text{FBG}_n} = \lambda_{s2}^{\text{FBG}_n} - V_{s2} \cdot t_{\text{delay}}^{\text{FBG}_n}. \end{cases} \quad (7)$$

将(7)式中的上下两式联立,可以得到各全同弱光栅的延时时间如(8)式所示:

$$t_{\text{delay}}^{\text{FBG}_n} = \frac{\lambda_{s1}^{\text{FBG}_n} - \lambda_{s2}^{\text{FBG}_n}}{V_{s1} - V_{s2}}. \quad (8)$$

根据延时时间与计数值延时参量的关系,可得在 V_{s1} , V_{s2} 光谱扫频速度下各全同弱光栅的固有的计数值延时参量,如(9)式所示:

$$\begin{cases} N_{\text{calib-s1}}^{\text{FBG}_n} = \frac{N_{s1}^{\text{total}} \cdot f_{s1} (\lambda_{s1}^{\text{FBG}_n} - \lambda_{s2}^{\text{FBG}_n})}{(V_{s1} - V_{s2})}, \\ N_{\text{calib-s2}}^{\text{FBG}_n} = \frac{N_{s2}^{\text{total}} \cdot f_{s2} (\lambda_{s1}^{\text{FBG}_n} - \lambda_{s2}^{\text{FBG}_n})}{(V_{s1} - V_{s2})}, \end{cases} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} \lambda_{s1}^{\text{FBG}_n} = (N_{s1}^{\text{FBG}_n} - N_{s1}^{\text{comb}_l}) \times \frac{\lambda_{s1}^{\text{comb}_r} - \lambda_{s1}^{\text{comb}_l}}{N_{s1}^{\text{comb}_r} - N_{s1}^{\text{comb}_l}} + \lambda_{s1}^{\text{comb}_l}, \\ \lambda_{s2}^{\text{FBG}_n} = (N_{s2}^{\text{FBG}_n} - N_{s2}^{\text{comb}_l}) \times \frac{\lambda_{s2}^{\text{comb}_r} - \lambda_{s2}^{\text{comb}_l}}{N_{s2}^{\text{comb}_r} - N_{s2}^{\text{comb}_l}} + \lambda_{s2}^{\text{comb}_l}, \\ V_{s1} = \frac{\lambda_{s1}^{\text{comb}_r} - \lambda_{s1}^{\text{comb}_l}}{N_{s1}^{\text{comb}_r} - N_{s1}^{\text{comb}_l}} N_{s1}^{\text{total}} f_{s1}, \\ V_{s2} = \frac{\lambda_{s2}^{\text{comb}_r} - \lambda_{s2}^{\text{comb}_l}}{N_{s2}^{\text{comb}_r} - N_{s2}^{\text{comb}_l}} N_{s2}^{\text{total}} f_{s2}. \end{cases} \quad (10)$$

(11)式中 f_{s1} , f_{s2} 为系统解调频率, N_{s1}^{total} , N_{s2}^{total} 为系统每个周期的总计数值. 在得到各光栅固定计数值延时参量 $N_{\text{calib-s1}}^{\text{FBG}_n}$ 后,系统可在对应 V_{s1} 光谱扫频速度下,完成校准解调,消除光延迟带来的波长误差,得到真实波长

$$\lambda_{\text{real}}^{\text{FBG}_n} = (N_{s1}^{\text{FBG}_n} - N_{\text{calib-s1}}^{\text{FBG}_n} - N_{s1}^{\text{comb}_l}) \times \frac{\lambda_{s1}^{\text{comb}_r} - \lambda_{s1}^{\text{comb}_l}}{N_{s1}^{\text{comb}_r} - N_{s1}^{\text{comb}_l}} + \lambda_{s1}^{\text{comb}_l}. \quad (12)$$

在初始化阶段通过一次光谱扫频速率的切换,就完成了各全同光栅固有的计数值延时参量 $N_{\text{calib-s1}}^{\text{FBG}_n}$ 的计算,实现解调误差的补偿.该校准解调方法可在每次扫频周期内得到各全同光栅无传输延迟的时间值,该时间只对应激光器扫频光时域中相应的波长值.该校准解调方法不同于WDM的光栅解调,在WDM模式下不同波长域的光栅才能实现扫频光时域中的解调,通过全同光栅的校准

解调突破了扫频光谱宽度的限制,提高了光栅的复用容量.

而在实际工程应用中,布置好全同弱光栅传感网络后,光纤长度变化并不频繁,当外界环境出现大幅度变化时可再进行校准,这样并不影响解调系统的工作状态下的解调速度,此延时误差自校准方法具有很高的实际应用价值.

4 实验结果与分析

4.1 初始校准

实验采用的是由18个全同弱反射光栅,中心波长为1294和700 nm,反射率为1%,相邻间隔20 m串联组成的全同弱光栅传感网络.首先,进行了光栅初始条件的校准实验,一方面为了标定各全同弱光栅的固有的计数值延时参量,另一方面为了验证系统解调准确度.

实验中使用了FDML激光器作为扫频光输出,扫描周期恒定,频率为120.99 kHz不变,扫描范围在13.5与9 nm间切换,输出两种不同的光谱扫频速度 $V_{s1} \approx 3.27 \times 10^6$ nm/s, $V_{s2} \approx 2.72 \times 10^6$ nm/s.在初始条件下,同时记录在光谱扫频速度 V_{s1} 和 V_{s2} 下梳状波峰、光栅反射光谱中各波峰计数值,其中一个周期的扫频光栅反射光谱如图4(a)和图4(b)所示,虚线表示梳状波峰,实线表示全同弱光栅.

所有18个全同弱反射光栅波长在反射扫频光谱中实现了时域区分,结合延时误差自校准方法,并与光谱分析仪标定的初始状态下各全同弱反射光栅数据进行对比,如表1所列.

由解调结果可知,随着光谱扫频速度的提高和光栅距离的增加,解调的等效波长与真实波长间的绝对误差也增大,最大误差达到10 nm,而通过延时误差自校准方法,计算出各全同弱光栅的固有的计数值延时参数如表1所列,系统对全同弱反射光栅的解调准确度提高到15 pm以内,分辨率为1 pm.

4.2 温度实验

实验中,将此传感网络全部放置于恒温箱内,设置温度从30 °C到100 °C以5 °C为步进变化,在 V_{s1} 下采到的一个周期的扫频光栅反射光谱数据如图5所示,图5(a)和图5(b)分别表示恒温箱温度30和100 °C时采集到的时域波形.

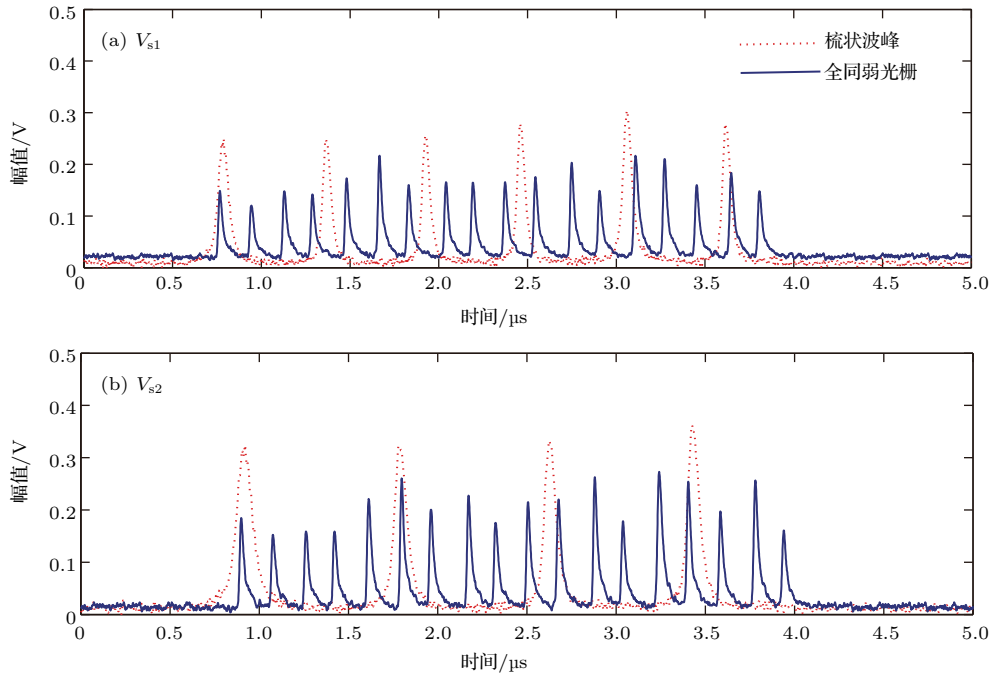


图4 (网刊彩色) 校准实验 (a) 在 V_{s1} 光谱扫频速度下; (b) 在 V_{s2} 光谱扫频速度下

Fig. 4. (color online) Calibration experiment: (a) at V_{s1} of wavelength-sweep; (b) at V_{s2} of wavelength-sweep.

表1 校准解调结果

Table 1. Demodulation results with calibration.

FBG	V_{s1} 等效波长/nm	V_{s2} 等效波长/nm	V_{s1} 延迟参数	V_{s1} 校准波长/nm	真实中心波长/nm	波长误差/nm
FBG1	1294.708	1294.706	2	1294.703	1294.699	0.004
FBG2	1295.315	1295.095	221	1294.682	1294.693	0.011
FBG3	1295.951	1295.518	440	1294.691	1294.68	0.011
FBG4	1296.498	1295.853	626	1294.704	1294.708	0.004
FBG5	1297.158	1296.287	862	1294.689	1294.699	0.010
FBG6	1297.792	1296.714	1083	1294.688	1294.68	0.008
FBG7	1298.356	1297.06	1271	1294.714	1294.726	0.012
FBG8	1299.079	1297.568	1532	1294.689	1294.684	0.005
FBG9	1299.599	1297.876	1713	1294.691	1294.682	0.009
FBG10	1300.222	1298.272	1929	1294.695	1294.705	0.010
FBG11	1300.807	1298.645	2128	1294.709	1294.715	0.006
FBG12	1301.506	1299.122	2378	1294.692	1294.704	0.012
FBG13	1302.046	1299.457	2569	1294.684	1294.686	0.002
FBG14	1302.746	1299.906	2801	1294.72	1294.705	0.015
FBG15	1303.307	1300.284	3006	1294.693	1294.682	0.011
FBG16	1303.927	1300.685	3221	1294.697	1294.695	0.002
FBG17	1304.595	1301.136	3458	1294.686	1294.694	0.008
FBG18	1305.14	1301.461	3647	1294.688	1294.691	0.003

当恒温箱中温度变大时, 梳状波峰稳定不变, 全同弱光栅级联整体向扫频光长波方向发生了漂移. 在得到各全同光栅的时间信息后, 通过消除

各自的固有延时参量得到真实时间值, 完成波长解调, 图6列举了部分光栅温度和解调波长的拟合曲线.

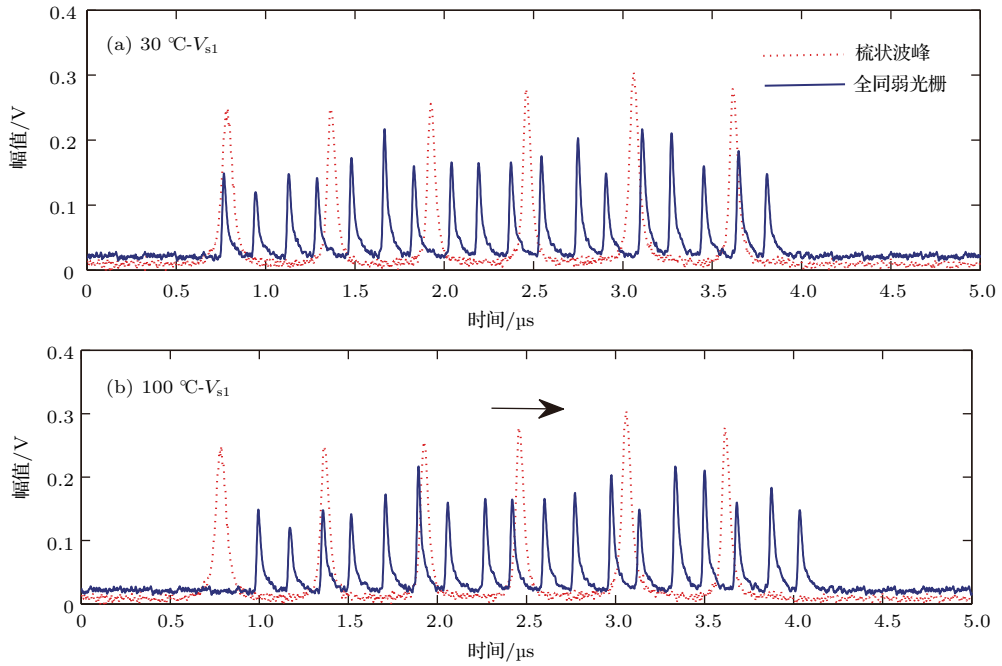


图5 温度实验 (a) 30 °C 初始温度; (b) 100 °C 设置温度

Fig. 5. Temperature experiment: (a) Initial temperature 30 °C; (b) setting temperature 100 °C.

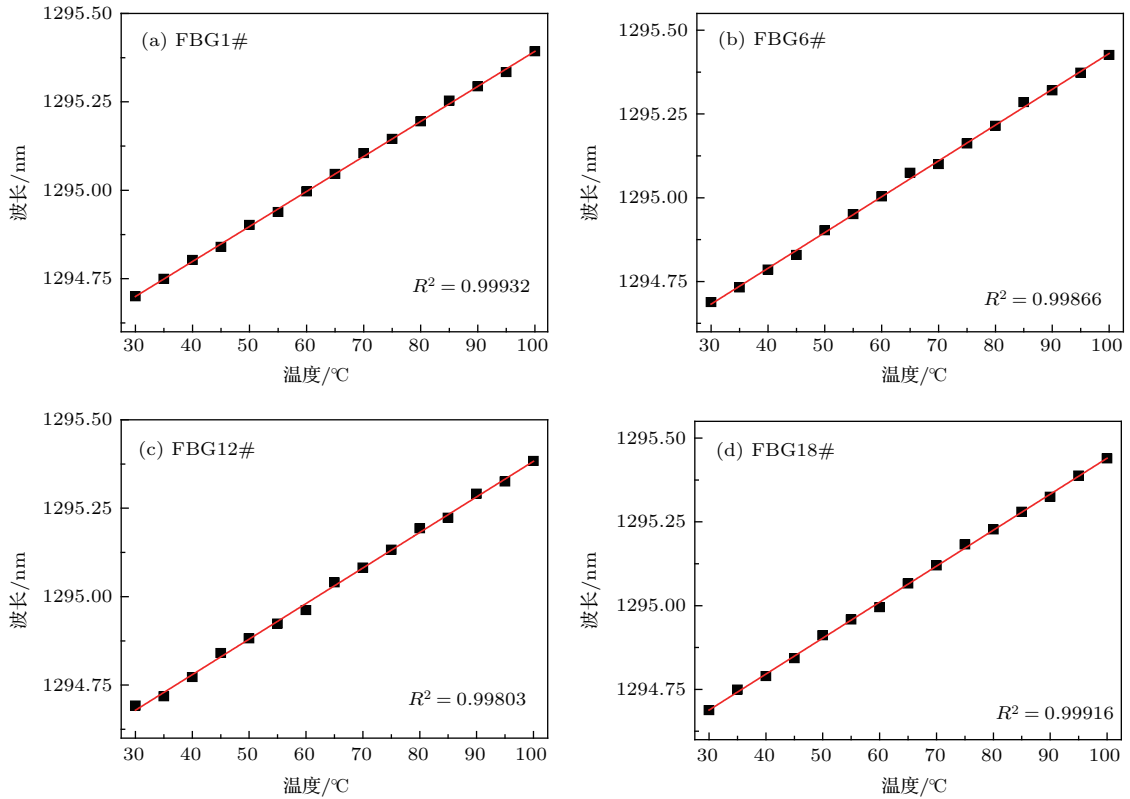


图6 光栅温度实验拟合曲线 (a) FBG1#; (b) FBG6#; (c) FBG12#; (d) FBG18#

Fig. 6. Fitting curve of FBG temperature experiment result: (a) FBG1#; (b) FBG6#; (c) FBG12#; (d) FBG18#.

实验结果证明, 本系统可实现全同弱光栅传感网络中每一个弱反射光栅的位置区分和波长解调, 通过各光栅的延时自校准解调, 线性度达到了0.998以上, 解调准确度在15 pm, 分辨率为1 pm.

4.3 振动实验

实验选取传感网络中的弱反射光栅FBG12#制作光纤光栅加速度传感器^[18], 采用丹麦B & K公司振动实验台搭建振动环境, 在3.6 kHz振动信号下, 解调系统对FBG12#进行了波长解调.

图7为3.6 kHz振动信号的波长解调时域图, 其中 x 轴是时间, y 轴是波长. 在3.6 kHz振动的两个周期内, 共有67个采样点, 每个采样点间隔0.0083 ms, 说明解调频率达到120 kHz;

图8所示为3.6 kHz振动波长频谱分析图, 图8(a)为60 kHz内的频谱分布, x 轴为频率, y 轴为幅值; 将频谱图局部放大, 如图8(b)和图8(c)所示, 将横轴放大到6—12 kHz范围时, 可以得到振动在7.2, 10.8 kHz倍频情况, 将横轴放大到高频范围时, 也可以清晰地看到57.6 kHz高倍频的频谱情况.

综上, 在时序图中, 可以看出解调系统对振动信号的波长解调效果理想, 波形完整、响应度高, 通过计算采样点数量, 说明解调系统解调频率达到了120 kHz. 通过对振动波长值做快速傅里叶变换, 分析振动信号的频谱可知, 解调系统可以分析60 kHz以内的振动信号, 解调系统解调频率达到了120 kHz, 对动态信号解调能力强.

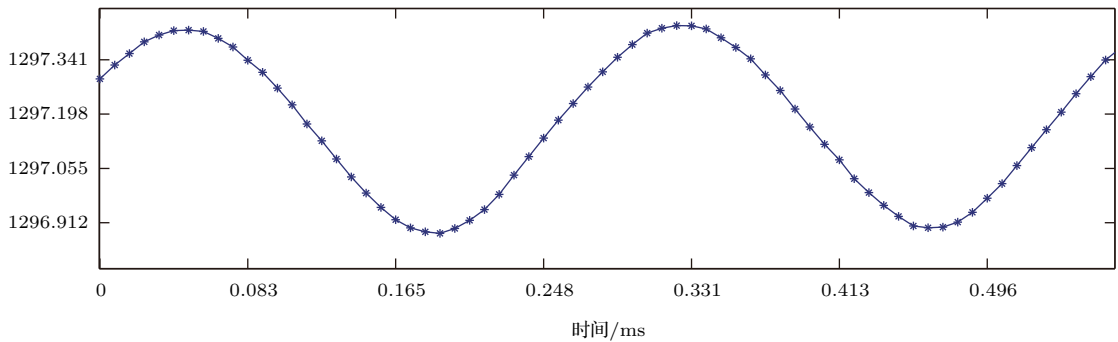


图7 3.6 kHz 振动波长时域图

Fig. 7. Wavelength domain diagram of 3.6 kHz vibration.

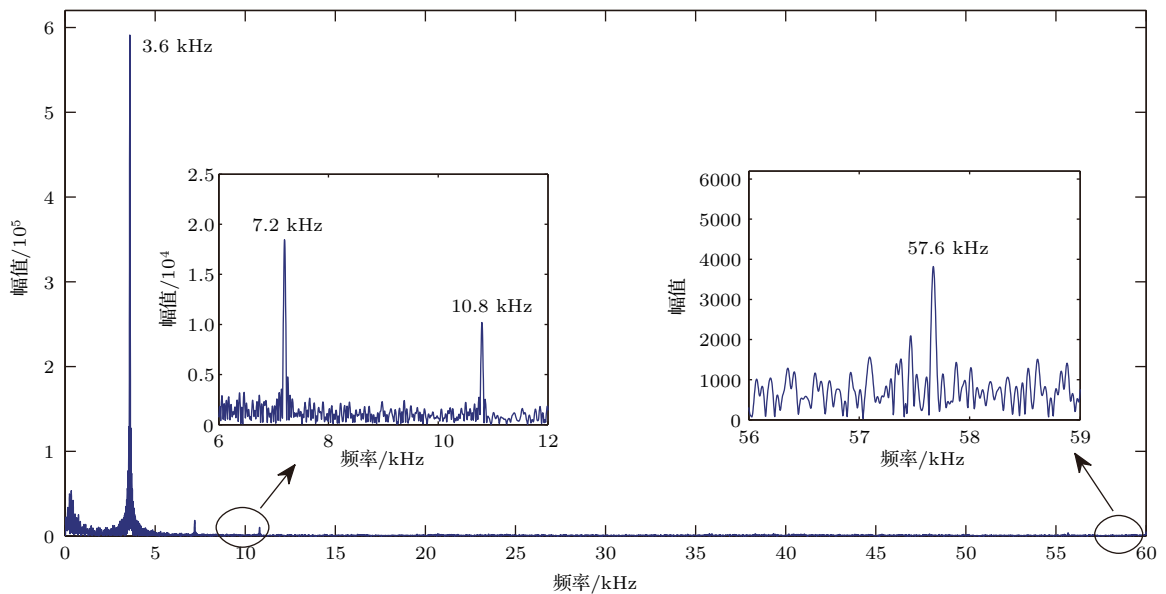


图8 3.6 kHz 振动波长频谱分析图

Fig. 8. Frequency spectrum of 3.6 kHz vibration.

5 结 论

针对全同弱光栅的高速波长解调, 本文提出连续扫频光时域反射 (WSOTDR) 的新解调方法, 并进行了理论推导与验证. 相比较于 OTDR, 系统使用的是连续光而不是脉冲光, 不需要发出多个脉冲的复杂处理, 在系统解调工作阶段, 一次扫频就能同时获取所有光栅的位置信息和完整的反射光谱, 极大地提高了 TDM 系统的解调速度. 通过在系统初始阶段采用延时误差自校准方法, 获取各全同弱光栅的固有的计数值延时参数, 得到各光栅无传输延迟的时间值, 完成全同弱反射光栅在时域中的波长解调. 不同于 WDM 的光栅解调, 全同光栅在扫频时域下的校准解调突破了扫频光谱宽度的限制, 提高了光栅的复用容量. 实验采用 1% 反射率, 20 m 间隔的全同弱反射光栅传感网络, 初始校准、温度和振动实验的结果表明, 系统可实现各全同弱反射光栅的位置区分和波长解调, 波长解调准确度为 15 pm, 分辨率 1 pm, 各全同弱反射光栅的解调线性度在 0.998 以上, 解调速率达到 120 kHz.

参考文献

- [1] Wang L, Li D S, Ou J P 2011 *Adv. Mater. Res.* **148** 1611
- [2] Jiang D S, He W 2002 *J. Opt. Laser* **13** 420 (in Chinese) [姜德生, 何伟 2002 光电子·激光 **13** 420]
- [3] Wang F F, Zhang L, Yang L Z, Liu Y Y 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 88 (in Chinese) [王斐斐, 张丽, 杨玲珍, 刘艳阳 2014 光学学报 **34** 88]
- [4] Zhou Q, Ning T G, Pei L, Li J, Li C, Zhang C 2012 *Opt. Lett.* **8** 414
- [5] Jiang H, Chen J, Liu T, Huang W 2013 *Sensor. Actuat. A: Phys.* **198** 31
- [6] Chen D, Fok M P, Shu C, He S 2008 *Lasers and Electro-Optics, 2008 and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Canada*, May 4–9, 2008 p1
- [7] Lee B C, Jung E J, Kim C S, Jeon M Y 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 094008
- [8] Chen D, Shu C, He S 2008 *Opt. Lett.* **33** 1395
- [9] Yu H H, Zheng Y, Guo H Y, Jiang D S 2014 *J. Funct. Mater.* **12** 12001 (in Chinese) [余海湖, 郑羽, 郭会勇, 姜德生 2014 功能材料 **12** 12001]
- [10] Dai Y, Liu Y, Leng J, Deng G, Asundi A 2009 *Opt. Lasers Eng.* **47** 1028
- [11] Li Z Y, Sun W F, Li Z M, Wang H H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 234207 (in Chinese) [李政颖, 孙文丰, 李子墨, 王洪海 2015 物理学报 **64** 234207]
- [12] Zhang C X, Zhang Z W, Zheng W F, Liu X H, Li Y, Dong X Y 2014 *Chin. J. Lasers* **41** 0405004 (in Chinese) [张彩霞, 张震伟, 郑万福, 刘晓航, 李裔, 董新永 2014 中国激光 **41** 0405004]
- [13] Chan C C, Wei J, Ho H L, Demokan M S 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quant* **6** 741
- [14] Zhang M L, Sun Q Z, Wang Z, Li X L, Liu H R, Liu D M 2011 *Laser & Optoelectronics Progress* **8** 93 (in Chinese) [张满亮, 孙琪真, 王梓, 李晓磊, 刘海荣, 刘德明 2011 激光与光电子学进展 **8** 93]
- [15] Hu C W, Wen H Q, Bai W 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 1406
- [16] Wang Y, Liu W, Fu J, Chen D 2009 *Laser Phys.* **19** 450
- [17] Li Z Y, Liu M Y, Wang Y M, Liu Q, Gong J M 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 2090
- [18] Yin G L, Dai Y T, Karanja J M, Dai J X 2015 *Sensor. Actuat. A: Phys.* **235** 311

High speed demodulation method of identical weak fiber Bragg gratings based on wavelength-sweep optical time-domain reflectometry*

Wang Yi-Ming¹⁾ Hu Chen-Chen²⁾ Liu Quan¹⁾ Guo Hui-Yong²⁾
Yin Guang-Lin²⁾ Li Zheng-Ying^{1)2)†}

1) (Key Laboratory of Fiber Optic 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 25 April 2016; revised manuscript received 21 July 2016)

Abstract

The identical weak reflection Fiber Bragg gratings (FBGs) with large capacity has become one of the central issues of optical fiber sensing field in the engineering application. Currently, wavelength division multiplexing (WDM) and time division multiplexing (TDM) are two major multiplexing techniques. For a WDM system, the maximum number of FBGs is limited by the spectral bandwidth of laser. So the identical weak FBGs are proposed to break through the limitation of the multiplexing capacity. For large-capacity multiplexing of identical weak FBGs, TDM technique is commonly used. In a TDM system, the spectral information of all FBGs can be obtained by some pulsed light with different wavelengths. However, with increasing the number of identical weak FBGs in TDM system, some problems such as complex demodulation process and slow response time are highlighted in the current various demodulation methods. Thus in this paper we propose a new high-speed demodulation method combined with wavelength-sweep optical time-domain reflectometry (WSOTDR) which is different from the pulsed light in optical time domain reflectometry (OTDR), namely a continuous wavelength-sweep light source is used in WSOTDR. In this method, the reflected signals of identical weak FBG at each position will be distinguished from others in time domain through optical delay effect, hence the location information of each FBG could be acquired, and meanwhile the wavelength information of all the identical weak FBGs could be obtained through high-frequency periodical wavelength-swept spectrum in just one wavelength scanning period. In order to calibrate the error of FBG demodulation which is caused by optical delay at high-speed wavelength sweep, we propose a self-calibration method in which two different wavelength-sweep rates are used to obtain the inherent delay parameters of each FBG. In practical application, we use this self-calibration method in the initial stage of demodulation because the inherent delay parameters are usually stable after the layout of an identical weak FBGs network. So the demodulating speed at the working stage of this system is not affected by this self-calibration method. In this paper, by setting up a Fourier domain mode locking laser as an output of continuous wavelength-sweep and high-speed (3.27×10^6 and 2.72×10^6 nm/s) light, an identical weak FBG sensing network which consists of 18 FBGs is tested in three experiments. In the initial calibration experiment, we use the self-calibration method to calibrate the inherent delay parameters of each FBG and to verify the accuracy of the system by comparing with the measurement result of

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575149, 61290311) and the International Science Technology Cooperation Program of China (Grant No. 2015DFA70340).

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

spectrum analyzer. In the temperature experiment, the wavelength of each FBG is demodulated from 30 to 100 °C in order to test the demodulation linearity of the system. Then in the vibration experiment, a dynamic measurement of 3.6 kHz vibration of FBG is demonstrated with a demodulating speed as fast as 120 kHz, and a 0–60 kHz frequency spectrum is analyzed to prove the speed. The experimental results show that the demodulation error is less than 15 pm, the resolution is 1pm, the linearity is above 0.998, and the demodulating speed reaches 120 kHz.

Keywords: continuous wavelength-sweep light, identical weak fiber Bragg gratings, high-speed demodulation, calibration of delay error

PACS: 42.79.Sz, 42.60.Fc, 42.55.-f

DOI: [10.7498/aps.65.204209](https://doi.org/10.7498/aps.65.204209)