

# 超弱反射光栅准分布式光纤传感系统研究

张彩霞 张震伟 郑万福 刘晓航 李 裔 董新永

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 采用波长可调谐光源与光时域反射技术(OTDR)结合的方案,通过对光脉冲调制技术和光电转换电路的优化,实现了一种对超弱全同反射光纤光栅的准分布式解调系统。实验中,20个中心波长相近的超弱反射光栅间隔2 m放置于约5.8 km长的光纤尾端,该解调系统成功实现了对这些反射率仅为0.01%的超弱反射光栅高信噪比的解调与定位,并且测得的光纤布拉格光栅(FBG)中心波长随温度变化的线性度达到99.7%以上。

**关键词** 光纤光学; 传感系统; 弱反射光纤光栅; 准分布式传感; 温度测量

**中图分类号** TN253; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0405004

## Study of a Quasi-Distributed Optical Fiber Sensing System Based on Ultra-Weak Fiber Bragg Gratings

Zhang Caixia Zhang Zhenwei Zheng Wanfu Liu Xiaohang Li Yi Dong Xinyong

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** A quasi-distributed fiber Bragg grating (FBG) demodulating system is developed by combining the wavelength tunable laser and the optical time domain reflectometry (OTDR) technique. By optimizing the optical pulse modulation and the light detection circuit, the ultra-weak reflective FBGs can be demodulated and located. In the experiment, 20 ultra-weak reflective FBGs of only 0.01% reflection with the interval space of 2 m are connected to the end of a 5.8 km long fiber. All the central wavelength and position of the FBGs can be measured simultaneously. The measured FBG center wavelength has a good linearity of 99.7%.

**Key words** fiber optics; sensing system; weak reflection grating; quasi-distributed sensing; temperature measurement

**OCIS codes** 060.2310; 060.3735; 060.4230; 120.4825; 280.4788

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器由于具有对温度、应力等物理量灵敏度高,且防电磁干扰、耐腐蚀、体积小、线宽窄、复用性高等<sup>[1-2]</sup>优点,一直是光纤传感领域的研究热点。由于近年来众多领域对于分布式、长距离测量的需求<sup>[3-5]</sup>越来越多,基于FBG传感器的高复用技术已成为解决上述测量要求的关键之一。光栅复用技术主要分波分复用(WDM)、时分复用(TDM)、频分复用(FDM)及上述几种复

用的结合等技术<sup>[4]</sup>。WDM技术由于受到光源带宽和FBG波长漂移量的限制,单路复用个数比较少,一般不超过几十个<sup>[4]</sup>。FDM技术复用率较高,但受到光程差的限制,不仅使其复用个数受到一定限制,而且使其无法进行长距离的测量<sup>[6-7]</sup>。相对来说,TDM技术的复用个数虽然受到光在光纤中传输的损耗和FBG反射损耗的限制,但如果采用全同弱反射光栅,可以大大提高其复用率,而且弱反射光栅的反射率越低,其优势越明显。光纤光栅反射率越低,

**收稿日期**: 2013-10-08; **收到修改稿日期**: 2013-11-13

**基金项目**: 国家自然科学基金(61007051)、钱江人才项目(QJD1302016)、浙江省安全生产科技计划项目(2013A1004)、浙江省高等学校中青年学科带头人学术攀登项目、浙江省大学生科研创新团队资助项目(2013R409050)

**作者简介**: 张彩霞(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感系统信息处理方面的研究。E-mail: zcxmsa@163.com

**导师简介**: 李 裔(1977—),男,博士,教授,主要从事分布式光纤传感器及微纳光纤等方面的研究。

E-mail: yli@cjl.u.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

输入光和反射光经 FBG 反射的损耗会越低,同时会降低甚至可以忽略光栅间多次反射引起的干涉。并且,文献[7]的研究表明在同等入射光功率条件下,反射率低的光栅可以提高末端光纤光栅的波长漂移解调精度。目前,国外已有报道成功实现 1000 个全同超弱反射 FBG 的复用,其单个光栅的反射率在 0.0199%~0.001% 的范围内<sup>[7]</sup>。国内也开展了相关的研究,文献[8]实现了 4 个反射率为 6% 的 FBG 的复用,测得的温度测量精度为 0.12 °C,光栅间隔 20 m。文献[9]实现了 9 个反射率为 3% 的 FBG 的复用,测得的温度误差为 0.5 °C,光栅间隔 10 m,目前还未见反射率低于 0.1% 的超弱反射 FBG 解调的报道。国内的研究对弱反射光栅的探测能力不足,不能实现大容量的复用,使得跟国外的研究相比,在复用率和空间分辨率等指标上还有很大的差距。为解决上述技术瓶颈,本文采用波长可调谐激光器和光时域反射技术(OTDR)结合的方案,通过提高光脉冲调制的消光比和优化光电转换电路,大大提高了解调系统的探测能力。成功解调出反射率只有 0.01% 的超弱反射光栅,解调得到的 FBG 光谱的中心波长与温度的变化有良好的线性关系。

## 2 主要研究内容及结果

### 2.1 传感原理

本传感系统主要利用 OTDR 技术实现对光栅位置的定位;通过扫描特定波长范围的光得到 FBG 的光谱,实现对温度、应力等敏感物理量变化的监测<sup>[7-8,10]</sup>。具体是将光脉冲信号输入到刻有光栅的光纤中,若输入光的波长与光栅的中心波长相近或相同,光脉冲的一部分会被 FBG 反射回来,通过此返回脉冲在光纤中传输的时间可以推知光栅的位置。FBG 对于不同波长的光脉冲,返回来的光脉冲的功率不同,中心波长处的光脉冲被反射回来的光功率最大。激光器的线宽远小于 FBG 谱宽,利用线性扫描激光器的输出波长,就可以得到 FBG 谱的包络,再对该光谱进行高斯拟合就可得到其中心波长。当 FBG 处的温度或者受到的应力发生变化时,FBG 的中心波长发生漂移,从而可以监测这些物理量的变化。其工作原理如图 1 所示。

将采集到的不同波长下的 OTDR 曲线按照波长的大小排列组合到一起,就获得了 FBG 波长、位置的三维解调图谱。可调谐光源的调谐波长的步长越小,得到的 FBG 的波长解调的精度就越高,谱线就越密集,三维图谱就越光滑,拟合的精度就越高。

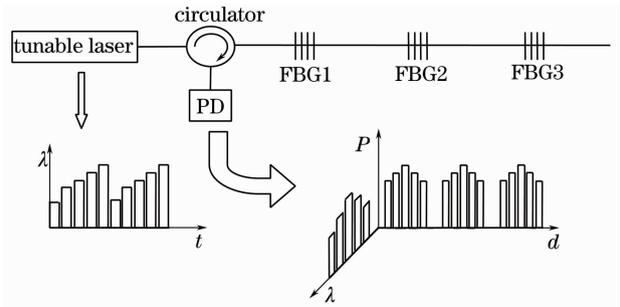


图 1 传感系统原理图

Fig. 1 Schematic principle of the sensing system

但是步长越小,扫描次数就会增多,从而增加了扫描的时间。

### 2.2 系统结构

图 2 为系统的结构框图。具体工作流程是可调谐激光器扫描输出不同波长的连续光,经过两个电光调制器(EOM),调制成脉冲光,然后进入掺铒光纤放大器(EDFA)将此脉冲光进行放大,输出的脉冲光经过环形器再经过约 5.8 km 长的光纤,进入刻有 FBG 的光纤中。光电探测器(PD)对经 FBG 反射回来的光进行接收,把光信号转变成电信号提取出来。然后通过数据采集卡高速采集,将模拟电信号转变成数字电信号,最后利用电脑对这些数据进行读取处理。整个系统的控制、信号采集与分析都由 LabView 程序控制。为提高系统的信噪比,在光路中没有使用接头,所有光纤都是熔接,另外尾端光纤被打成一个半径几个毫米的结,使剩余的光脉冲能量泄露出光纤。所以在 OTDR 曲线上,没有观察到末端的强功率反射。

系统的可调谐激光器型号为 Agilent 81940A,其最小调谐步长为 1 pm,波长重复性为  $\pm 1$  pm,线宽为 100 kHz。消光比是电光调制器的一个重要参数,对系统的信噪比影响很大。高消光比意味着调制出的光脉冲的底部噪声低。底部噪声相当于连续光,一直存在于整个光纤中,由于 EDFA 的放大可导致其超过非线性效应的阈值发生对系统不利的非线性效应,因此高消光比有助于提高 EDFA 的放大倍数,提高入纤功率并降低对光电探测器的要求。在 Wang 等<sup>[7-9]</sup>的研究中,其弱光栅解调系统采用单支电光调制器来调制脉冲光,消光比相对较低。本系统采用两支电光调制器进行级联,使消光比得到叠加,并采用自主研发的电光调制器的偏压控制电路<sup>[11]</sup>,使用自动反馈控制方式对电光调制器的工作点进行实时监测和控制,使电光调制器的消光比可达 50 dB 以上。虽然文献[6]实现了 1000 个

FBG 的复用,但从其实验结构框图可以看出,他们是使用了三个 EDFA 分别对可调谐激光器的输出光、输出的调制脉冲光和反射回来的信号光进行放

大实现的。源于高消光比带来的信噪比的提高,本系统使用了一个 EDFA 来对调制脉冲光进行放大。

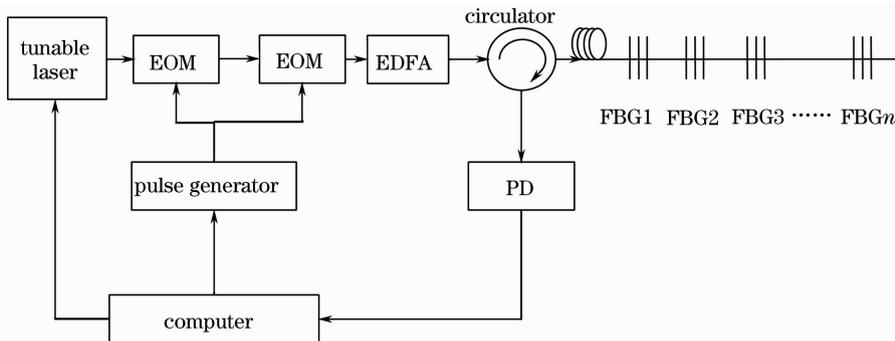


图 2 传感系统结构框图

Fig. 2 Schematic configuration of the sensing system

根据输入光信号的特征,对光电子器件进行选择,并采用前端跨阻放大和后级放大结构的电路对光电探测器进行搭建。因为探测的信号很微弱,需要前端跨阻放大的放大倍数足够大才可以被后级电阻检测到,因此需要在前端跨阻放大电路中引入阻值很大的电阻。但是阻值越大,电阻自身的热噪声越大,这样给电路引入很大的噪声,由于探测信号非常微弱,很有可能使探测信号被淹没在噪声里。所以采用前端跨阻放大与后级放大结合的电路结构,使跨阻放大的放大倍数不需要很大,而是通过后级放大电路对信号进一步放大。虽然经过多级放大也很容易引入较大的噪声,但是经过合理设计,采用超低噪声的光电子元器件,电路制造方面采用光电二极管和反馈电阻悬浮等降噪处理;供电方面采用数字滤波滤除工频噪声等处理,使此光电探测器的最小可探测的光功率可达 5 nW, 3 dB 带宽为 200 MHz,跨阻增益为 40 V/mA,使超弱反射光栅的探测成为可能。

## 2.2 实验内容及结果分析

### 2.2.1 弱反射光栅反射率的测量

设置光谱仪,使其分辨率最小。将宽带光源的光作为参考光。接着将此宽带光源的光经过环形器输入到一个 FBG 上,并在 FBG 另一端的光纤尾端打一个很小的结,使光在此处被损耗掉,从而不会在尾端的截面产生断面反射。最后将环形器的反馈端接到光谱仪上,将参考光与此时的输入光相减,得到的结果如图 3 所示。

图 3 中,最上面黄色的线是宽带光源的输入光谱,中间红色的线是被 FBG 反射回来的光谱,最下边绿色的线是输入光谱与反射回来的光谱相减的结

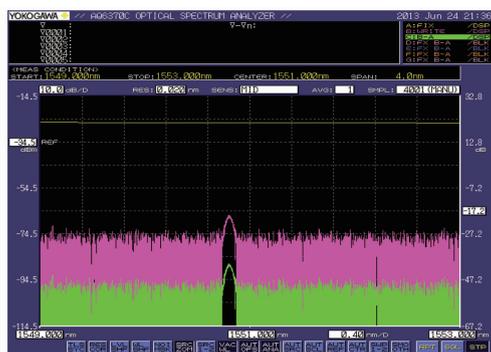


图 3 单个超弱反射 FBG 反射谱图

果。从图右边的坐标可以看出,绿色线峰顶处的值,即反射率约为  $-40$  dB,也就是  $0.01\%$ 。

### 2.2.2 多个弱反射光栅的复用

实验系统如图 2 所示进行搭建。实验采用了 20 个基本全同并在一根光纤上的超弱反射 FBG,其反射率约为  $0.01\%$ ,室温下的中心波长约为  $1549.6$  nm,间隔  $2$  m。由于实验条件有限,超弱反射 FBG 的中心波长不完全相同。设置可调谐激光器的扫描范围为  $1549.1 \sim 1550.1$  nm,脉冲发生器输出的脉冲宽度为  $10$  ns。经 EDFA 输出的光脉冲信号的峰值功率为  $200$  mW。

采集到的 FBG 反射谱的三维图如图 4 所示,光强由大到小分别以红橙黄绿青蓝紫黑的颜色表示。从图中可以看出,经过约  $5.8$  km 长的光纤,反射回来的信号的信噪比仍然很好,各个 FBG 互不干扰可以清晰分辨。而且,最后一个 FBG 反射回来的信号依然有非常高的信噪比。本系统的消光比较高,使得信号的信噪比大大提高,同时 EDFA 的放大倍数也得到提高,所以仅使用一个 EDFA 进行放大,且

在放大倍数并不很大的情况下,仍然得到了信噪比较高的信号。

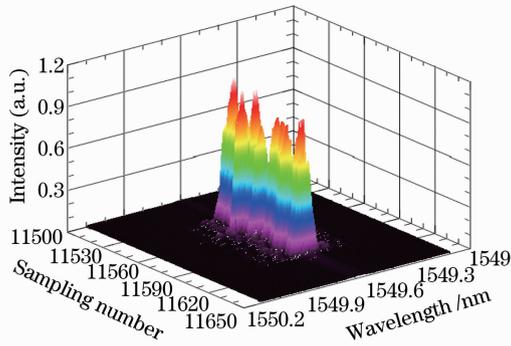


图 4 FBG 反射谱三维图

Fig. 4 Three-dimensional reflection spectrum of FBG

另外需要注意的是瑞利散射在普通单模光纤中

的瑞利散射系数为  $10^{-7}$  m,而 FBG 的反射率为 0.01%,即  $10^{-4}$ ,两者相差约三个数量级。实验所用的 PIN 光电探测器基本上探测不到瑞利散射信号,因此瑞利散射不会对 FBG 反射信号的检测产生显著影响。

### 2.2.3 温度的测量

将最末端一个 FBG 固定在能进行恒温控制的半导体制冷器(TEC)上,使温度变化范围为  $17\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每变化  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  进行一次测量,采到的数据如图 5 所示。该图为俯视图,图中光强由大到小分别由红橙黄绿青蓝紫黑的颜色表示。图中纵坐标为波长(单位为 nm),横坐标表示的是采样点数,两采样点的间隔表示 0.5 m 的光纤距离。从图可以看出,最后一个 FBG 的位置约在 5.803 km 处,随着温度的增高,最后一个 FBG 的中心波长向长波长方向漂移。

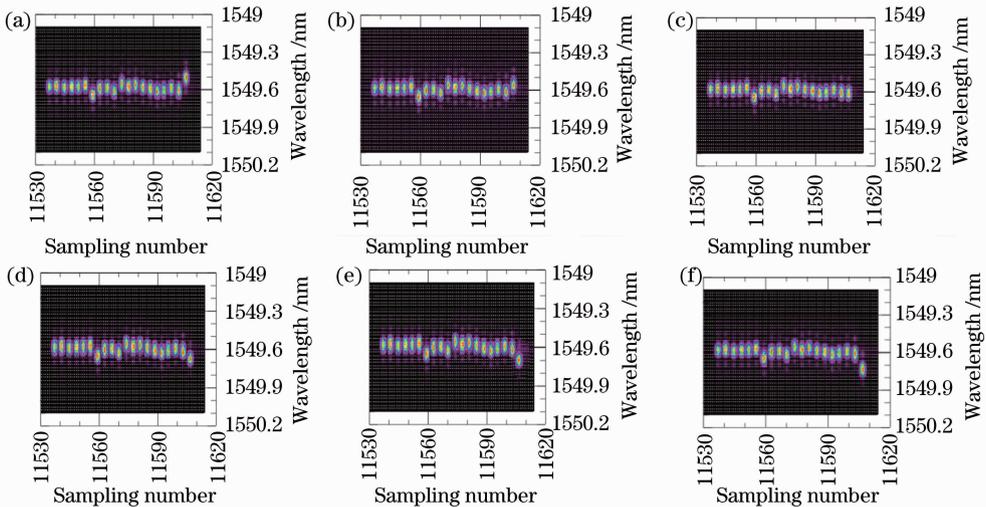


图 5 FBG 中心波长在不同温度下的光谱图。(a)  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (b)  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (d)  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (e)  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (f)  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 Spectra of FBG central wavelength under different temperatures. (a)  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (b)  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (d)  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (e)  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (f)  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$

将得到的数据采用最小二乘法进行线性拟合,拟合的曲线如图 6 所示。从图中可以看出 FBG 的

中心波长随温度变化呈良好的线性关系,得到的线性度达 99.7% 以上。所测温度的最大误差约为  $0.577\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均误差为  $0.256\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,FBG 的温度敏感度为  $10.4\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ,此系统的温度分辨率可以达到  $0.0962\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

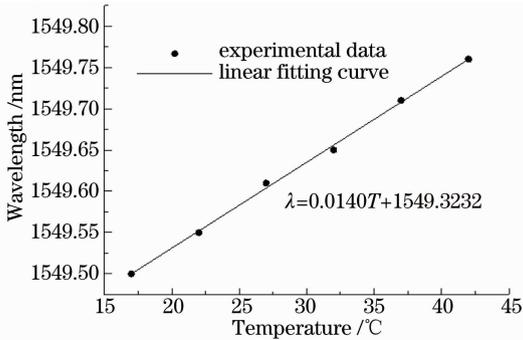


图 6 FBG 中心波长与温度变化关系的拟合曲线

Fig. 6 Linear fitting of relationship between the FBG central wavelength and temperature

## 3 结 论

提出并实现了大范围、长距离、高精度监测的准分布式传感系统。系统采用 OTDR 技术与波长扫描激光器相结合的方式,通过级联两支电光调制器大大提高了调制脉冲的信噪比(达 50 dB),并结合高带宽低噪声的光电探测电路,成功解调了反射率只有 0.01% 的超弱反射光纤光栅。采用超弱反射

光栅不仅可以减小光来回经过 FBG 的损耗, 减弱多反射引起的干涉, 提高复用率, 而且可以提高后级 FBG 波长漂移的解调精度。为了验证系统的实际性能, 在约 5.8 km 长的光纤尾端串联 20 个反射率为 0.01% 左右的超弱反射光栅, 系统在脉冲峰值功率为 200 mW 时可以得到信噪比较高的光谱信号。测得的 FBG 中心波长与温度变化的线性度达到 99.7% 以上, 空间分辨率为 2 m。

### 参 考 文 献

- 1 Cai Jiangjiang, Xu Guoliang, Hu Junhui, *et al.*. Remote fiber Bragg grating sensors system based on self-heterodyne detection [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1214002.  
蔡江江, 许国良, 胡君辉, 等. 基于自外差探测的多光纤光栅远程传感系统[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1214002.
- 2 Gao Huiyong, Tang Jianguan, Li Xiaofu, *et al.*. On-line writing identical and weak fiber Bragg grating arrays[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(3): 030602.
- 3 Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study on fiber grating sensor monitor the crack of concrete[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0114001.  
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0114001.
- 4 Jiang Desheng, Fan Dian, Mei Jiachun. Multiplexing/demultiplexing technology based on fiber Bragg grating sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(4): 14-19.  
姜德生, 范典, 梅加纯. 基于 FBG 传感器的分复用技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(4): 14-19.
- 5 Gu Xingyao, Chen Hongwei, Chen Minghua, *et al.*. 160 km all-optical OFDM transmission system with inline chromatic

- dispersion compensation [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(2): 020601.
- 6 Li Zhaoyun, Li Su, Liu Zhiqiang, *et al.*. Research in optical frequency domain reflectometry fiber Bragg grating distributed strain sensor[J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 36(12): 33-35.  
李沼云, 李苏, 刘志强, 等. 光频域反射光纤光栅分布式应变传感研究[J]. *光通信技术*, 2012, 36(12): 33-35.
  - 7 Y Wang, J Gong, B Dong, *et al.*. A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(17): 2751-2756.
  - 8 Zhang Manliang, Sun Qizhen, Wang Zi, *et al.*. Investigation on distributed optical fiber sensor based on identical-low-reflect fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 080604.  
张满亮, 孙琪真, 王梓, 等. 基于全同弱反射光栅光纤的分布式传感研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 080604.
  - 9 Zhang Yanjun, Xie Xiaopeng, Bi Weihong. High-speed high-multiplexing distributed temperature sensor network based on weak-reflection fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0405006.  
张燕君, 谢晓鹏, 毕卫红. 基于弱光栅的高速高复用分布式温度传感网络[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0405006.
  - 10 I Ma, M G Shlyagin, S V Miridonov, *et al.*. Remote sensing with ultra-low-reflective Bragg gratings written in standard telecommunication fiber[J]. *Opt Eng*, 2003, 42(5): 1182-1183.
  - 11 Zhang Caixia, Zhang Zhenwei, Xu Ben, *et al.*. A novel circuit design for bias controlling of Mach-Zehnder electro-optic modulator [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(8): 1461-1466.  
张彩霞, 张震伟, 徐贲, 等. 马赫-曾德尔电光调制器多工作点偏压控制技术[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(8): 1461-1466.

栏目编辑: 王晓球