

# 基于波分复用的光纤多防区周界传感系统

董小鹏 郑俊达

(厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要** 提出了一种新的光纤多防区周界传感系统,采用波分复用技术实现了监控防区和通道的扩展。该系统对传统采用单根传感光纤和反射镜的结构作了改进,并扩展了传感光纤的数量,将多根传感光纤分别置于监控领域内的不同防区,每个防区分别用不同中心波长的光纤布拉格光栅作为反射装置,使每根传感光纤工作在不同的波长。利用波分复用器件与技术,多根传感光纤共用一套干涉系统,实现了多个干涉子系统同时、独立的监测。实验结果表明,该系统可以实现多个分散防区同时、独立的入侵检测和定位,信号响应时间小于 1 ms,不同防区间信号的串扰小于 -20 dB。

**关键词** 光纤光学;光纤干涉传感器;周界传感;波分复用;多防区定位

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0905007

## Multi-Area Perimeter Sensing System Based on Optical Fiber Wavelength Division Multiplexing Technology

Dong Xiaopeng Zheng Junda

(*Institute of Light-Wave Technology, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China*)

**Abstract** A new multi-area perimeter sensing system based on optical fiber wavelength division multiplexing (WDM) technology is proposed and demonstrated. The traditional single channel system with broadband mirror is improved by introducing fiber Bragg grating (FBG) as the mirror, and the number of the monitoring areas is expanded by using the FBG with different reflecting wavelengths matching the demodulation channels of a WDM apparatus. The WDM and FBG technology employed in the system makes the measurement in each channel independent, simultaneous, no mutual-interfering between channels sharing the same interference device. The experimental results show that the proposed perimeter sensing system is able to detect and recognize the perturbation localization simultaneously in each area or channel. The response time of the system is less than 1 ms, and crosstalk between channels is less than -20 dB.

**Key words** fiber optics; optical fiber interference sensor; perimeter sensing; wavelength division multiplexing technology; localization of perturbation in multi-area

**OCIS codes** 060.2370; 120.0280; 120.3180; 120.5060

## 1 引言

分布式光纤传感器在周界传感入侵检测、长距离管道和光缆监控等方面有广阔的应用前景。其主要技术方案有光时域反射(OTDR)<sup>[1,2]</sup>、分布式光纤布拉格光栅(FBG)<sup>[3,4]</sup>、光纤干涉式测量技术<sup>[5-10]</sup>等。光纤干涉式测量技术由于结构简单、检测灵敏、实时性高等优点被广泛采用。

较早采用 Sagnac 光纤干涉仪的周界传感系

统<sup>[7]</sup>,利用干涉仪输出信号频谱缺损位置的差异与扰动点的对应关系进行定位。这种系统结构简单,但是光纤环中只有一半能用作传感器,而另一半光纤需要屏蔽、隔离。文献[8,9]对 Sagnac 干涉仪的结构进行了改进,提出了基于反馈环的单轴结构,避免了屏蔽光纤的困难。这两种方案对扰动信号的定位原理相似,只能对单个扰动点进行定位,当系统存在多点同时扰动时,这两种系统无法实现多个扰动

收稿日期: 2011-11-09; 收到修改稿日期: 2012-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(61077031)和厦门大学 985 与 211 工程资助课题。

作者简介: 董小鹏(1963—),男,教授,主要从事光纤技术及其应用等方面的研究。E-mail: xpd@xmu.edu.cn

位置的定位。

实现多区域同时扰动定位的一种方式是在周界的不同区域各铺设一根传感光纤,每根传感光纤对应一个干涉系统。如文献[10]在每根传感光纤上串接压电陶瓷(PZT)相位调制器,采用相位载波复用的方式实现干涉系统的复用。该方案在使用时必须限制扰动频率小于压电陶瓷调制频率间隔,否则可能出现不同传感光纤之间信号的串扰。这种方案需要系统带有多个相位调制器,解调技术较复杂,成本较高,在扰动信号频带较宽时会带来定位问题。

本文针对光纤周界传感系统的多防区扰动检测问题,提出了一种采用波分复用(WDM)技术的新方案。在周界内铺设多根传感光纤,用不同中心波长的FBG作为每个传感光纤的反射镜,再使用波分复用器将不同传感光纤的反射信号在接收端分开,实现多个区域同时、独立的入侵监测和定位。实验结果表明这种方案扩展性强,可以实现多个防区的同时、独立检测。

## 2 波分复用传感系统的结构与原理

提出的基于波分复用技术的周界传感系统原理框图如图1所示。该系统由光源、光纤耦合器、光纤延迟线、传感光纤、反射装置、密集波分复用器(DWDM)和光电探测器(PD)等组成。

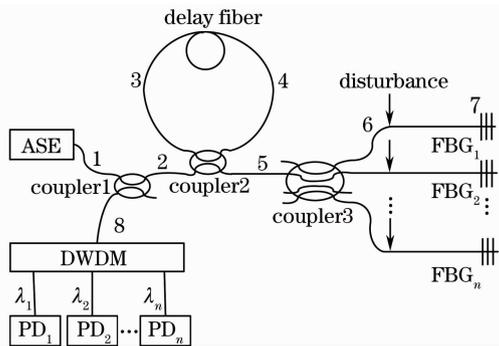


图1 波分复用周界传感系统原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the perimeter sensing system with WDM technology

为消除光程差较大的信号之间干涉造成的扰动,采用实验室自制的放大自发辐射(ASE)宽带光源。coupler 1和coupler 2为50:50光纤耦合器。coupler 1实现环形器的功能,coupler 2和光纤延迟线组成干涉组件。为实现多防区监控,系统使用一个 $1 \times N$ ( $N$ 为系统拟分的防区数)的分路器coupler 3,其各输出端连接不同防区对应的传感光纤,且各传感光纤的终端连接中心波长不同的FBG作反射镜。

各传感光纤FBG反射回coupler 1的各波长信号,在其输出端通过一个与各FBG中心波长匹配的波分复用器解复用后被 $PD_1 \sim PD_n$ 各光电探测器接收,对各探测器获得的电信号进行分析即可得到各个防区的扰动信息。

图1所示的周界传感系统实际是多个干涉子系统(对应不同防区)的组合。以第一个干涉子系统(连接 $FBG_1$ 的光纤光路)为例,系统中存在着两束光,光束1的传播路径为“1-2-4-3-5-6-7-6-5-2-8”,光束2的传播路径为“1-2-5-6-7-6-5-3-4-2-8”。这两束光的光程近似相等,在接收端可以发生干涉,而经过其他光路的光由于光程差较大,在接收端不会产生干涉。当有一个扰动施加于传感光纤(如图1中6所示位置)时,光束1和光束2在不同的时刻受到相位改变,相位变化到达端口2-8存在短暂时间差,使得此处的干涉光强发生快速变化,通过检测这个快速变化的光强,推断出光纤受到的扰动。其他FBG对应的光路与 $FBG_1$ 对应光路的工作原理相似。

在多波长同时工作的情况下,通过图1接收端的高性能的DWDM,可将各波长信号严格分开,从而进行独立检测,达到同时监测多个防区扰动信号的目的。与其他复用方式相比,由于采用无源的复用方式,且各FBG反射信号共用同一个干涉组件,减少了器件的数量,对各防区扰动信号的带宽没有限制,系统的可靠性、性能将得到更大的提高。

## 3 实验结果与讨论

按图1搭建测量系统。实验所用宽带光源的波长范围为1525~1570 nm,输出功率为2.9 mW。传输和传感光纤均采用G652普通单模光纤。光纤延迟线由长度为3.4 km的普通单模光纤组成。为验证系统的多防区检测特性,采用一个 $4 \times 4$ 的光纤耦合器,在其4个输出端分别连接长度为2 m的传

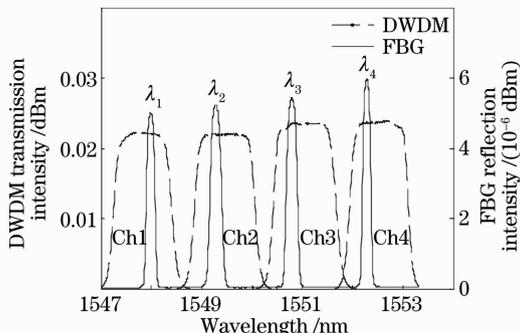


图2 FBG和DWDM的光谱特性

Fig. 2 Spectral characteristic of the FBG and DWDM

感光纤和用作反射的 FBG。DWDM 的各波长通道间隔均匀,为避免接收端各通道输出信号间的串扰,FBG 的中心波长应与 DWDM 各通道的中心波长相匹配,如图 2 所示。实验所用的 FBG 中心波长分别位于 1548.0,1549.2,1550.8,1552.3 nm, DWDM 的波长间隔为 1.6 nm(频率间隔为 200 GHz)。

### 3.1 传感系统对相位突变信号的响应

为模拟快速扰动对输出信号的影响,实验上将传感光纤绕在一个压电陶瓷圆柱上,对压电陶瓷作电压驱动可以调制传感光纤中光的相位,使输出的干涉信号强度发生变化。

实验时在压电陶瓷上施加一个上升沿时间  $t_r = 100$  ns 的方波电压信号,模拟传感光纤受到的瞬间扰动。用数据采集卡同时采集压电陶瓷的输入突变信号和传感系统输出的响应信号,采集卡的采样频率为 250 KHz,测量结果如图 3 所示。

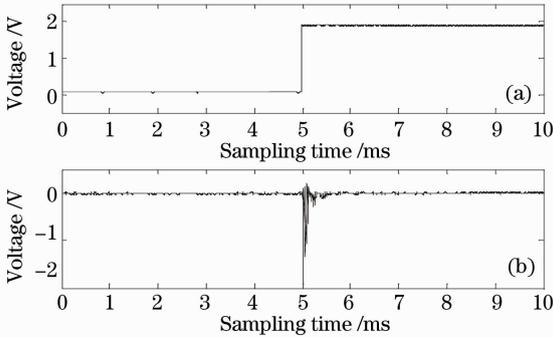


图 3 传感系统输出响应信号与输入突变信号的关系。

(a)输入突变信号;(b)输出响应信号

Fig. 3 Relation between the output and input signal of the system. (a) Input abrupt signal; (b) output response signal

从图 3 中可以看出,方波信号加载引起传感光纤相位突变,使系统输出光强发生突变。系统的响应速度很快,输出光强变化从 0 V 到达最大值  $-2$  V 的时间为  $20 \mu\text{s}$ 。

### 3.2 多防区入侵扰动的独立检测

实验上将监控区域周界分成 4 个防区,每个防区分别对应一根传感光纤和一个光栅。为减小不同防区扰动信号之间的串扰,应使用隔离度高的 DWDM 器件。实验所用的 DWDM 器件通道隔离度大于 30 dB,基本不会造成防区间信号的串扰。光栅作为具有波长选择特性的反射器件,应使用边模抑制比(SMSR)较大的器件。当 SMSR 大于 20 dB 时,防区间串扰小于  $-20$  dB。实验选用的各光栅 SMSR 值均大于 20 dB。

实验上用数据采集卡 4 个通道同时采集 4 路干

涉子系统的输出信号电压,每通道采样频率为 5 KHz。人在布防区域内走动或触碰各传感光纤时,传感系统的输出将产生相应的变化。

图 4 为扰动信号只作用于传感光纤 1 时,各干涉子系统的输出信号电压。图中的横坐标表示采集数据点的索引值,即每通道每次采集 2500 个点。由图 4 可以看出,只有第 1 路子系统的干涉信号产生变化,其他 3 路信号均不发生变化。

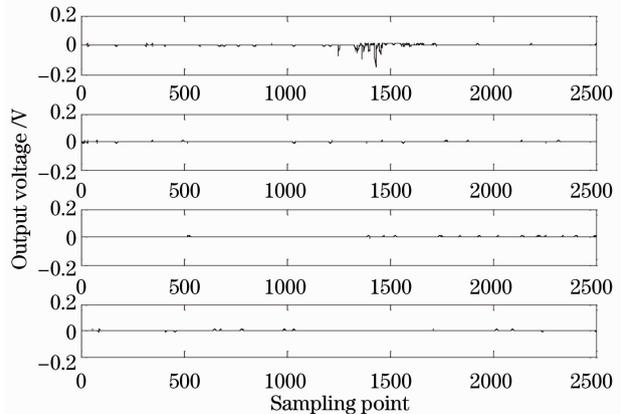


图 4 第 1 路传感光纤受到扰动时,各干涉子系统的输出信号

Fig. 4 Output signals (in voltage) obtained from each channel when there is perturbation in channel 1

图 5 为第 2 路和第 3 路传感光纤分别受到扰动时,各干涉子系统输出信号电压。从图 5 可以看出,只有扰动对应的两路输出信号发生变化,而第 1 路和第 4 路输出没有发生变化。

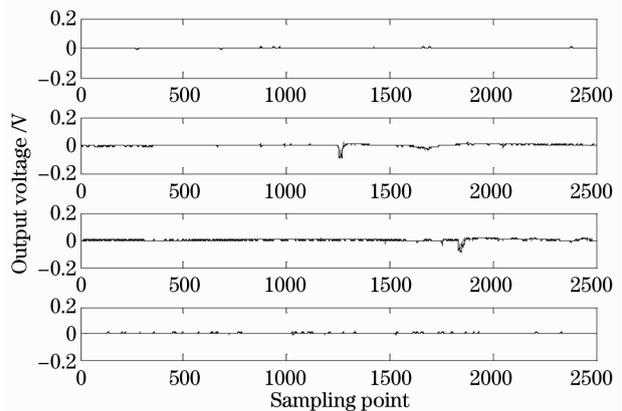


图 5 第 2、3 路传感光纤受到扰动时,各干涉子系统的输出信号

Fig. 5 Output signals (in voltage) obtained from each channel when there are perturbations in channel 2 and 3

当多路传感光纤分别受到不同的扰动时,传感系统的输出情况分别如图 6(a)和(b)所示。由于对

各干涉子系统光纤在不同时刻施加不同的扰动,观察到的响应波形也各不相同,证明各防区子系统的响应是独立的。

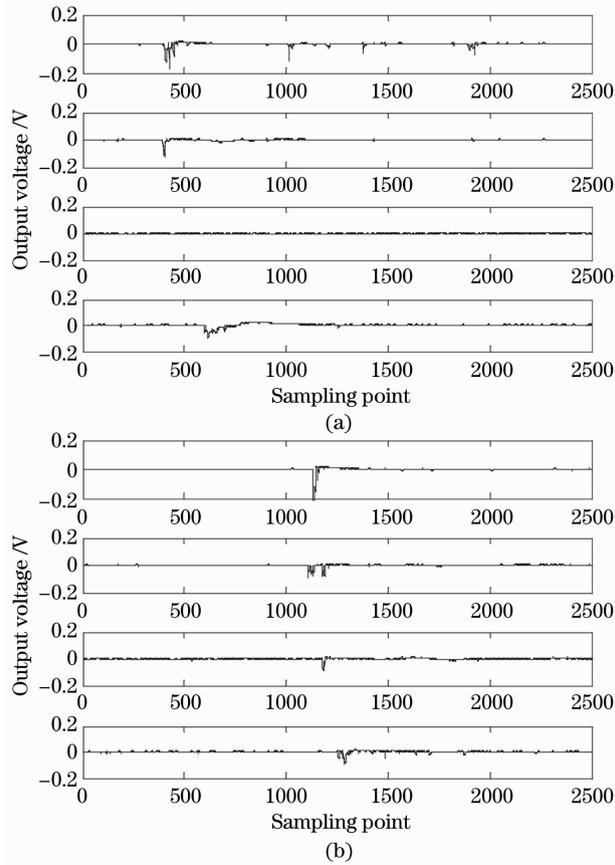


图6 各干涉子系统输出电压。(a) 3路传感光纤受到扰动的情况;(b) 4路传感光纤全部受到扰动的情况

Fig. 6 Output signals (in voltage) obtained from each channel. (a) Different perturbations exist in channel 1, 2, 4; (b) different perturbations exist in all channels

对于以上4组波形,分别计算其4个通道输出电压信号的方差 $\sigma$ ,并与对应防区是否受到扰动进行比较,计算结果如表1所示。

表1 4组波形中4个通道输出信号的方差

Table 1 Variance of four channels' output voltage in four waveforms above

Figure number	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4
Fig. 4	$5.5 \times 10^{-5}$	$7.8 \times 10^{-6}$	$9.1 \times 10^{-6}$	$9.8 \times 10^{-6}$
Fig. 5	$8.7 \times 10^{-6}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$5.1 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-6}$
Fig. 6(a)	$1.44 \times 10^{-4}$	$5.6 \times 10^{-5}$	$8.9 \times 10^{-6}$	$1.24 \times 10^{-4}$
Fig. 6(b)	$2.13 \times 10^{-4}$	$5.8 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-5}$	$4.7 \times 10^{-5}$

从表1中可以算出,当防区没有受到扰动时,输出信号电压的方差 $\sigma$ 均小于 $10^{-5}$ 。当系统的某些

防区有入侵信号时,对应防区输出信号电压方差明显增大,但由于入侵扰动行为的随机性,数值差异较大。此时,没有发生入侵的防区其输出信号的方差仍小于 $10^{-5}$ ,可见该波分复用系统各防区之间的串扰很小。

## 4 结 论

提出的采用波分复用的光纤周界传感系统可以方便地扩展防区和子干涉系统的数目,实现多防区、多扰动检测和定位的目的。实验结果表明,系统对入侵信号的检测灵敏度高,响应速度快,各防区之间的串扰很小。这种新的光纤周界传感系统在安防等领域有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light  $\phi$ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 569~572  
谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 $\phi$ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 569~572
- Song Muping, Qiu Chao. Long distance Brillouin optical time domain reflectometer with two-parameter sensing for standard single-mode optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 954~958  
宋牟平, 裘超. 普通单模光纤的长距离双参量传感布里渊光时域反射计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 954~958
- Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength division multiplexing/time division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201  
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2196~2201
- Zhang Manliang, Sun Qizhen, Wang Zi *et al.*. Investigation on distributed optical fiber sensor based on identical-low-reflective 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
- Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin. A new pipeline leakage detection system based on linear optical fiber Sagnac interferometer and its location technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 820~824  
杭利军, 何存富, 吴斌. 一种新的直线型Sagnac光纤干涉仪管道泄漏检测系统及其定位技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 820~824
- Chen Weimin, Wu Jun, Tan Jing *et al.*. Locating technology for twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2128~2132  
陈伟民, 吴俊, 谭靖等. 双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2128~2132
- P. R. Hoffman, M. G. Kuzyk. Position determination of an acoustic burst along a Sagnac interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(2): 494~498
- W. W. Lin. Novel distributed fiber optic leak detection system [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(2): 278~279
- Sun Yao, Jia Bo, Zhang Tianzhao. Position determination sensing system based on all fiber interferometer with feedback

loop [J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2006, **25**(1): 44~46

孙 尧, 贾 波, 张天照. 基于反馈环全光纤干涉的定位系统 [J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(1): 44~46

10 Wu Yuan, Bian Pang, Xiao Qian. Fiber-optic security system

based on phase carrier multiplexing and its realization methods [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 967~971

吴 媛, 卞 庞, 肖 倩. 基于相位载波复用的光纤周界安防系统及其实现方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 967~971

栏目编辑: 王晓球