

文章编号: 1001-5078 (2006) 10-0960-03

# 一类密集型分布式 FBG 传感方法

姜德生, 高雪清

(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, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为了在密集型传感场合下, 能提高分布式温度传感系统中传感器的数量, 设计了全同 FBG 传感器, 文中通过实验对全同 FBG 传感方法作了分析和讨论。

**关键词:** 光纤 Bragg 光栅; 分布式温度传感; 信号处理; 火灾报警

**中图分类号:** TP274. 2; TP212. 11 **文献标识码:** A

## The Method of FBG Sensing for a Sort of Dense Distributed Measurement

J IANG De-sheng, GAO Xue-qing

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

**Abstract:** In order to increase the number of FBG sensors for a sort of dense distributed measurement identical FBG sensors are introduced. The method of identical FBG sensors applied in dense distributed measurement is analyzed and discussed by experiment data in the paper.

**Key words:** fiber Bragg grating; distributed temperature sensing; signal processing; fire disaster predicting

### 1 引言

光纤 Bragg 光栅 (FBG) 传感器作为一种新型传感器, 正受到越来越广泛的重视<sup>[1]</sup>。它具有高灵敏度、动态区间宽、抗电磁干扰、耐腐蚀的特点, 因而可用于在许多恶劣的环境中, 用作各种传感器件<sup>[2-3]</sup>。

FBG 传感器是波长调制型传感器<sup>[4]</sup>, 波分复用技术是光纤光栅传感技术的重要特点之一。利用波分复用技术, 可以实现分布式测量, 但由于被测对象往往不是几个点, 而是呈一定空间分布的场, 如温度场、应力场等, 因而往往需要几十个 FBG 传感器同时进行分布式测量。众所周知, 波分复用技术中, 每个 FBG 传感器必须具有一定的工作带宽, 所以, 传感器的数量受到光源和波长解调器的带宽限制, 例如, 激光光源的带宽约为 40nm, 光栅的运行带宽为  $\pm 2.5$ nm, 对于温度实验的测试带宽为 3nm, 所以只能复用 10 个左右的 FBG 传感器<sup>[5]</sup>。同时传感器的数量还受到波长解调器带宽的限制, 在一般情况下, 单路光纤上允许耦合的传感器数量最多不超过 20 个<sup>[6]</sup>。

有一类分布式 FBG 传感系统, 虽然是对一个场进行分布式检测, 但其目的是为了获得这一类被测对象的异常信息, 如隧道和石化储油罐区的火灾探测, 虽然是对温度场进行分布式检测, 但只须对温度的最高值做出测算, 就可以判断火警出现与否。这类 FBG 分布式传感系统有两个共同的特点: (1) 要求对对象进行高密度检测, 传感器的数量大, 一般在 40~150 个左右; (2) 只检测出最高温度值并依此做出相应判断。

针对以上的情况, 本文提出了一种采用全同 FBG 传感器实现的分布式测量的方法, 用于石化储油罐区的火灾探测。通过实践证明, 采用这种方法, 具有很高的经济实用价值。

### 2 一类密集型 FBG 分布式温度传感技术

感温火灾探测与温度检测虽然形式上都是对温度场的检测, 但它们一个最大的不同是, 温度检测是

作者简介: 姜德生 (1949 - ), 男, 武汉理工大学首席教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术的研究和工程应用。

收稿日期: 2006-03-31

各个传感器获取各个检测点的实际温度值,感温火灾探测则是关注一个区域的温度异常情况或是对最高温度值的检测。一般的做法是多点检测,反映最高温度值。采用光纤“全同 Bragg光栅 感应温度的变化,既可满足火灾报警系统的使用要求,又可放宽对光栅解调器解调范围的要求。

对于 FBG温度传感器而言,主要以两种参数来反映传感器的特性,一是传感器的中心波长;二是传感器的温敏系数。所谓“全同光栅 指的是在环境温度一定时,具有相同的中心波长,温度敏感特性一致的一组 FBG光栅。

在分布式 FBG传感系统中,采用“全同光栅 技术,所获取的“全同光栅 的反射波信号,相当于复用技术中获取一种波长的传感器反射波信号,如图 1所示,是一组环境温度为 20 ,中心波长为 1292.45nm 的 38 个全同光栅串接在一起时的信号采集波形。图中锯齿波是施加在波长解调器上的解调信号,锯齿波 0~10V 的变化对应着波长解调器的解调范围 20nm;脉冲波是全同 FBG传感器反射波解调后,经过光-电转换的模拟电压信号,反射波的带宽是 3dB。

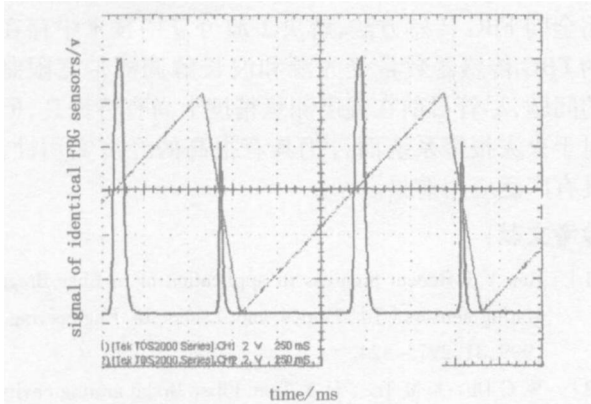


图 1 全同光栅信号拾取

Fig 1 collecting signal of identical FBG sensors

从图 1 不难看出,采用“全同光栅”的传感系统,由于各个 FBG传感器在同样的温度环境中,其中心波长是一样的,故而反射波谱重叠在一起,在信号采集波形上表现为解调信号正反扫描过程中,可以分别获得一个全同 FBG传感信号脉冲。在时域上,全同 FBG传感器的传感信号的脉宽占据解调范围中很小一部分。这说明,采用全同 FBG传感器的方法,使得光源的带宽和解调器带宽不再是限制传感器数量的瓶颈问题,理论上全同光栅在数量上不受光源带宽和波长解调带宽的限制,可以满足多种场合下感温火灾探测对传感器的密度要求。

虽然各个传感器的信号是重叠在一起的,但当被检测区域温度发生异常升高时,检测区域的温度

会呈一定的梯度分布,这时,由于各个传感器所感知的温度不同,各传感器中心波长的漂移量也对应着温度场呈一定的梯度分布,温度最高的传感器波长的漂移量最大,温度最小的传感器波长的漂移量最小,这时,全同 FBG传感器的传感信号是一个逐渐展宽的脉冲信号,如图 2所示。

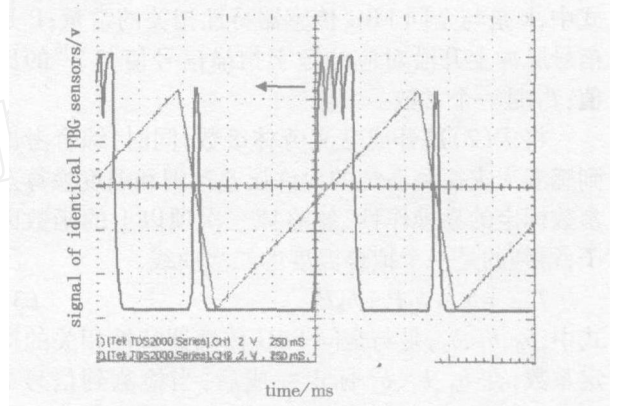


图 2 全同光栅信号分离

Fig 2 separating signal of identical FBG sensors

由于各个全同 FBG传感器的反射波是耦合在一起的,获得的信号脉冲为一个宽脉冲,所以无法从这个宽脉冲信号中遴选出感知最高温度的传感器的中心波长信号。但是,从图 2 中可以发现,向长波长方向(如图中箭头所指)漂移的脉冲信号的上升沿 P 凸现出了温度的最大变化,表征了当前检测区域温度的最高值  $T_{max}$ ,因而有:

$$T_{max} = f(P) \tag{1}$$

式中, P 是与信号脉冲前沿相关的数字信号值。

关于 Bragg光栅的热敏性,有许多文章对其进行了分析和研讨,当以 Bragg光栅中心波长作为温度的调制和解调信号时, Bragg光栅中心波长的漂移与温度的变化呈良好的线性关系。但以光脉冲信号长波长方向上升沿作为温度的调制和解调信号时,实际温度与检测信号之间存在着非线性关系。

我们将 FBG传感器放置在 10~110 的可控恒温箱中进行温度检测,得到的检测信号与温度的关系曲线如图 3所示。

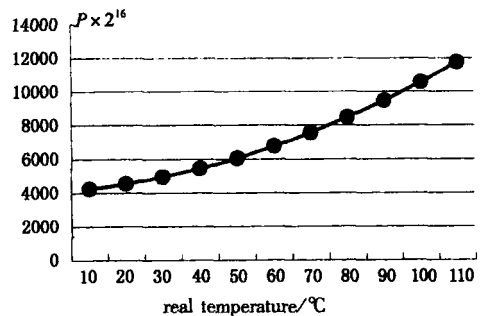


图 3 光纤光栅传感器温度-检测信号曲线

Fig 3 curve of detected signal-temperature

根据获得的检测信号与温度的关系曲线,推测在一定的温度测量范围内(待检测温度小于 120 ,温度过高将会导致传感器的封装遭到破坏),温度与电压信号的函数关系,可以近似用一个如式(2)的函数进行温度拟合,换算出温度值。

$$T_{\max} = T_0 (1 - e^{-kp}) \quad (2)$$

式中,  $k$ 是与全同 FBG传感器特性相关的常量;  $P$ 是信号脉冲上升沿对应的数字扫描信号值与  $2^{16}$ 的比值;  $T_0$ 是一个常数。

将式(2)展开成麦克劳林级数,同时,综合考虑感温火灾探测系统的允许误差范围和温度换算及参数标定的易操作性,忽略掉三次项以上的函数因子,得到的是一个拟合温度的二次曲线。

$$T_{\max} = b_0 + b_1 P + b_2 P^2 \quad (3)$$

式中,  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ ,是与全同 FBG传感器特性相关的待定系数,在  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  标定完成后,当检测到信号  $P$ 后,通过式(3)就可以换算出当前分布式光栅检测到的最高值,并依此判定火警是否出现。

### 3 实验结果与分析

实验中采用的全同 FBG传感器是经过预张拉处理、毛细钢管封装的光纤 Bragg光栅传感器,环境温度为 20 时,中心波长为 1292.45nm,温度灵敏度系数为 24.9pm/ ;实验用信号处理器采用 TGW-100B型,信号处理器波长解调范围为 20nm。实验过程中,以 5个全同 FBG传感器组成分布式温度传感系统,在环境温度为摄氏 0 的条件下,分别将各全同 FBG传感器放置在 10、20、30、40、50、60、70、80、90 的可控温箱内,信号处理器采用(3)式对各传感信号进行测算,得到测试数据见表 1。

表 1 温度检测实验数据

Tab 1 data of temperature checked with 5 identical FBG sensors

标称 温度	光栅 1、2、3、4、5对应检测温度				
	Na 1	Na 2	Na 3	Na 4	Na 5
10.0	9.7	10.2	9.2	9.9	10.3
20.0	20.0	19.3	20.2	19.2	20.8
30.0	28.9	30.5	31.2	29.6	30.4
40.0	39.7	41.1	40.6	38.9	41.0
50.0	49.3	49.6	50.8	49.2	52.0
60.0	59.0	60.8	61.0	59.0	61.5
70.0	68.7	71.0	71.2	70.3	71.0
80.0	79.2	80.5	80.9	79.8	82.1
90.0	89.8	91.5	91.2	90.5	91.7

从实验得出的数据可以看出,采用全同 FBG传感技术的分布式温度检测系统与采用波分复用技术

的分布式温度检测系统相比,从测算精度来看还存在一定的误差,这主要是因为:

- 全同 FBG传感器在制作过程中,很难保证中心波长和温度灵敏度系数完全一致,任何细微的差异都会严重影响到测算精度,全同 FBG传感器的一致性分布式温度传感系统中温度测算是否准确的关键;

- 采用(3)式进行温度测算,忽略了高次函数因子对计算的影响,也会一定程度上影响到温度的测算精度;

- 采用中心波长调制和解调温度,测算精度可以不受光源波动的影响<sup>[6]</sup>,但全同 FBG传感方法所采用的检测信号是与反射波信号上升沿相关的数字信号,温度换算结果受到激光光源波动的影响,这是造成测算的温度误差较大的主要原因。

随着光纤光栅微加工技术和精加工技术的发展,全同 FBG传感器的一致性将会得到突破性的提高;对于因激光光强波动造成的温度测算误差,可以考虑采用差温比较和补偿的办法,使测量误差缩小,这是我们下一步要改进的问题。

在一类高密度分布式 FBG温度传感系统中,采用全同 FBG传感方法,解决了波分复用技术中存在的问题,尽管目前在温度测量精度上尚有待提高,但对于火灾报警系统而言仍具有很高的经济实用性,具有广泛应用前景。

### 参考文献:

- [1] Rao Y.J. Recent progress in application of in fiber Bragg grating sensors [J], Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31, 297 - 324.
- [2] W C Du, X M Tao, H Y Tan. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. IEEE Photonics Technol Lett, 1999, 11: 105.
- [3] Nobuaki Takahashi, Kazuto Yoshimura, Sumio Takahashi, et al Development of an optical fiber hydrophone with Bragg grating [J]. Ultrasonics, 2000, 38: 581 - 585.
- [4] 黄俊斌,尹进,张心天,等,波分复用分布式 FBG传感网络 [J]. 传感器技术, 2003, 22(12): 9 - 11.
- [5] 姜德生,范典,梅加纯. 基于 FBG传感器的波分复用技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4).
- [6] Pietro Ferraro, Giuseppe De Natale On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 37: 115 - 130.
- [7] C Martun Sterke, N G Raphael Broderick, Benjamin J Eggleton, et al Nonlinear Optics in Fiber Gratings [J]. Optical Fiber Technology, 1996, 2: 253 - 268.