

两级解调 FBG 传感复用技术*

高宏伟 袁树忠 刘 波 李红民 曹 晔 罗建花 赵 健 开桂云 董孝义

(南开大学现代光学研究所,教育部光电信息技术科学重点实验室,天津 300071)

摘 要 采用两级解调的方法,优化了 WDM/SDM 光纤光栅传感复用系统的解调规则,探索了采用双解调系统,同时对光纤光栅传感阵列进行解调以提高传感系统解调速度的方法.在系统设计中采用 Petri Net 理论来解决多解调系统协调运行的问题.通过构建双解调四通道的布喇格光纤光栅应变传感复用系统验证了多解调复用技术的可行性,采用排队论理论,模拟仿真了双解调系统的性能.理论分析和实验表明双解调系统的平均等待时间比传统的解调方法的平均等待时间低一个数量级.

关键词 布喇格光纤光栅(FBG)传感;Petri Net;排队论;解调

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

0 引言

光纤光栅传感器的复用解调技术是光纤光栅传感器实用化的关键技术之一,目前出现了各种各样的检测方法^[1,2].1995年,Y. J. Rao 报道了由四个布喇格光纤光栅(简称 FBG)串组成的空分复用传感系统,传感元的复用数目达到 32 个^[3].1996年,Y. J. Rao 等人将波分、空分复用技术相结合,组成光纤光栅传感网络应变分辨率为 $7 \mu\epsilon$ ^[4,5].这些系统都是通过机械切换光开关,达到复用解调系统的目的,其中一些传感信息没变化的通道也要扫描解调,扫描解调规则不合理.

同时,为了提高解调系统的响应速度,满足大型传感系统多点测量的需要,人们也提出了很多方法.如袁微等人利用微机控制步进电机对多路匹配光栅施加压力和拉力从而与测量光栅匹配,达到多路传感信号集中、同时解调,但步进电机的不稳定性和响应速度使得解调系统的实际测量误差在 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[6];Peng-Chun Peng 等人利用不同比例的光耦合器

和 F-P 滤波器组成的解调系统,通过光强复用和波分复用的方法实现多路传感信号同时解调,然而传感通路中光强的变化将影响系统的解调准确度^[7].

本文探讨了一种易于实际使用的既优化传感系统采集解调规则,又提高传感系统整体解调响应速度的方法,即在一个传感复用系统中采用两级解调的方法优化传感系统的采集规则,并使用两个解调设备同时对传感通路进行扫描解调进一步提高系统的解调响应速度.通过对波分/空分复用系统的结构进行改进,并将 Petri Net 理论应用于解调系统中,解决了多个解调系统的竞争冲突问题,实现了光纤光栅复用系统的协调运行.构建了一个双 F-P 解调四通道的光纤光栅温度传感复用系统,验证了系统的可行性.经过理论分析和实验验证,该双解调系统的平均等待时间比传统的单解调系统平均低了一个数量级.

1 双解调 FBG 传感复用技术

图1为双解调光纤光栅传感复用系统.系统中

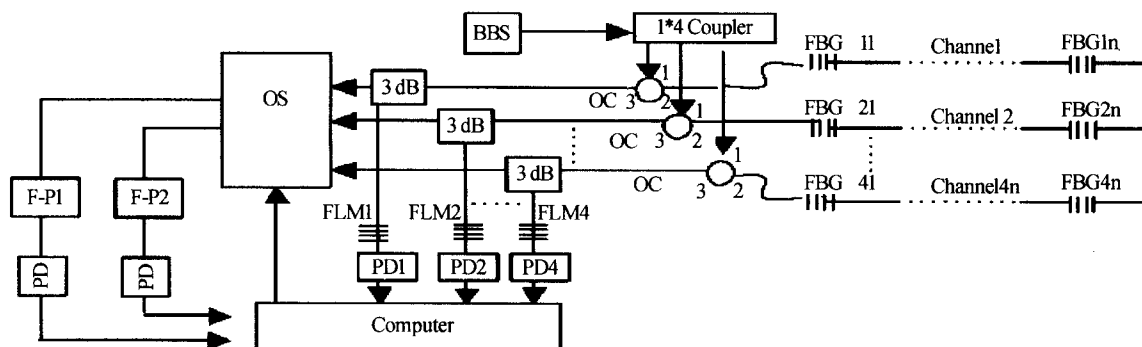


图 1 两级解调原理

Fig. 1 The schematic of two level demodulations

在每条光纤光栅传感通道上都接入高双折射光纤环镜(High Birefringence Fiber Loop Mirror,简称 FLM),InGaAs PIN 光电二极管和放大滤波电路组成的光电监测器件(简称 PD)构成初级解调系统,利

* 国家科技部 863 计划(2002AA313110)和天津市重大科技攻关项目(043182011)资助
Tel:022-23494617 Email:ghw00@mail.nankai.edu.cn
收稿日期:2004-12-24

用两个 F-P 滤波器构成次级解调装置. 当 FBG 传感器的中心波长发生漂移时, 由于 FBG 反射的波长和光纤环境的卷积作用, PD 检测到的光强将随波长的漂移发生变化. PD 将检测到的光强变化经 AD 采集卡传递给计算机, 计算机据此判断哪条光路上的 FBG 传感器检测到环境变化, 从而控制光开关 (简称 OS) 切换到该路, 并协调控制两个 F-P 解调装置对该条光通道上的 FBG 传感器进行扫描和解调. 因此解调系统只对传感信息发生变化的通道进行扫描解调, 优化了采集规则.

1.1 系统平均等待时间

传统的单解调复用方式是通过机械切换关开关实现的, 根据排队论的理论^[8], 它的平均等待时间的数学模型为

$$W_{con} = k * \mu / 2 \tag{1}$$

双解调系统的平均等待时间分以下两种情况

1) 当 $\rho \neq 1$ 时

$$W_{sm} = \frac{(m\rho)^m * \rho * p_0}{m! * (1-\rho)^2 * \lambda * (1-p_k)} [1 - (k - m - 1) * \rho^{k-m} + (k - m) * \rho^{k-m+1}] * 0.5$$

$$p_0 = \left[\sum_{n=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^n}{n!} + \frac{(m\rho)^m}{m!} \frac{1 - \rho^{k-m+1}}{1-\rho} \right]^{-1}$$

2) 当 $\rho = 1$ 时

$$W_{sm} = \frac{m^m * p_0}{2 * m! * \lambda * (1-p_k)} (k - m - 1) * (k - m) * 0.5$$

$$p_0 = \left[\sum_{n=0}^{m-1} \frac{(m)^n}{n!} + \frac{(m)^m}{m!} (k - m + 1) \right]^{-1} \tag{2}$$

式中, W_{con} 为单解调系统平均等待时间, W_{sm} 为双解调系统的平均等待时间, k 为系统的通道数, μ 为系统的解调速度, $\rho = \lambda / m\mu$ 为服务强度, m 为系统的解调设备数.

1.2 系统的协调控制

当两个或两个以上光通路中的 FBG 传感器检测到环境变化时, 对光纤光栅传感阵列的扫描解调是一个竞争事件, 可能引发信息采集冲突. 为了避免冲突、协调控制两个 F-P 滤波器组成的次级解调系统, 尝试将用于解决并发事件的 Petri Net 理论^[9] 应用于 FBG 传感系统, 使得 FBG 传感系统可协调

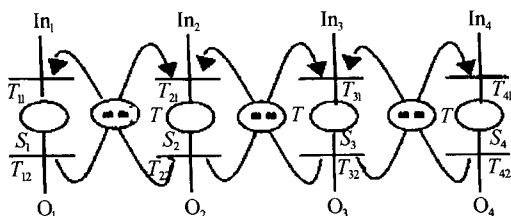


图 2 两级解调的 Petri Net
Fig. 2 The Petri Net of two level demodulations

控制两路解调扫描设备对传感阵列进行扫描解调. 图 2 为四通道的双解调 FBG 传感系统 Petri Net 图.

图 2 中, T 为竞争资源 (F-P 扫描解调); $In_1 \sim In_4$ 为光路的请求信号; $S_1 \sim S_4$: 解调装置的处理; $O_1 \sim O_4$ 为输出; $T_{11} \sim T_{42}$ 为解调系统的触发. 库所 T 中的两个黑点 (托肯) 代表了两个 F-P 解调系统, 当系统有多个解调设备时, 可改变托肯的数目以表示相应的解调设备数目. 通过协调控制托肯在 Petri Net 网中的流动来达到协调控制解调系统的目的. 根据上面的 Petri Net 图, 可以得到相应的控制逻辑方程^[10]

$$\begin{aligned} S_1 &= (In_1 * T + S_1) * \overline{T_{12}}; \\ S_2 &= (In_2 * T + S_2) * \overline{T_{22}} \\ T &= (T_{12} + T_{22} + T_{32} + T_{42}) * \\ &\quad \overline{(S_1 + S_2 + S_3 + S_4)} \end{aligned} \tag{3}$$

根据上面的逻辑方程, 可以对可编程控制器、工控机和单片机等编程, 从而满足系统协调控制的需要. 同时, 根据上图的 Petri Net 图, 还可以采用还可以通过分析 Petri Net 模型 (如可达树法), 确认系统的合理性及发现潜在的缺陷.

2 试验

根据需要, 可以很容易的将上述复用技术中的解调设备和传感通道扩大成大规模传感复用系统. 为便于分析, 搭建了一个如图 1 的由四条光通道和两个 F-P 滤波解调器组成的 FBG 传感复用系统. 每条传感通路有一个粘贴于压电陶瓷上的光纤光栅应变传感器, 由工控机 (Evoc 810) 产生四路符合泊松分布的随机信号驱动这四个压电陶瓷以模拟传感信息变化. 通过计算机记录下随机信号的产生时间和得到解调的时间, 从而算出信号的平均等待时间. 四个 FBG 传感器的中心波长分别为 1537.65 nm, 1545.05 nm, 1547.35 nm, 1550.95 nm. A/D 采集卡 (AD-Link DAQ2010) 扫描频率为 1 MHz. 系统中的 F-P 滤波器 (Micro Optics 公司), 其精细度为 750, 采用 10 Hz, 0~12 V 的三角波驱动电压周期扫描, 扫描范围为 1525 nm~1575 nm. 光开关的切换速度为 50ms/channel, 则系统的解调速度为 150ms/channel.

图 3 为系统平均等待时间随输入信号平均强度变化的关系, 横轴为工控机输入随机信号的平均强度 (Hz), 纵轴为信号的平均等待时间 (ms). 图中的理论值由式 (1)~(2) 得到. 为验证理论值, 在相同条件下分别记录了双解调系统和传统方法解调所需的时间, 信号强度从 0.5 Hz~14 Hz, 每步递增 0.5 Hz, 每个信号强度采集 200 s.

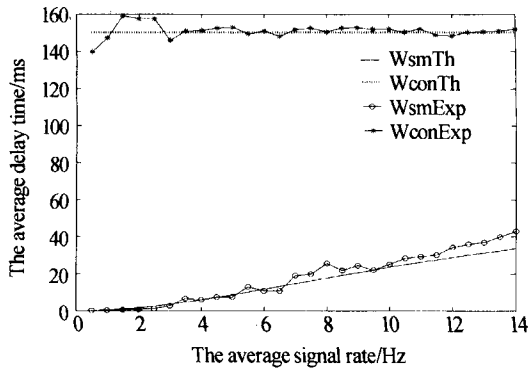


图3 平均等待时间和平均输入信号强度关系

Fig. 3 Experimental plots between the average delay time and the average signal rate

由图3可知,实验值符合理论值的变化规律,其差值是由于理论值为假设系统采样时间无限长,而实际采样时间为每数据点200 ms,延长系统的采样时间两者的符合度将更好.图中,传统解调方法的平均等待时间为150 ms,而双解调系统在信号强度14 Hz时为43 ms,经分析,这是由于传统的WDM/SDM解调系统需要对所有的传感通道进行扫描解调,而改进后的系统只对传感信息发生变化的通道进行解调.从整体上来说,和传统的单解调光纤光栅传感复用系统相比,双解调光纤光栅传感复用系统的信号等待时间要低一个数量级.

3 结论

本文尝试对传统空分/波分光纤光栅传感复用系统进行改进,构成了两级解调复用系统,优化了解调系统的解调规则,并进一步通过协调控制多个可调滤波解调设备同时解调的方法提高解调速度.该方法结构简单,准确度高,稳定可靠不受环境变化的影响,易于工程实际的应用,是满足大规模光纤光栅传感系统需要的一种有效方法.如利用长周期光纤光栅代替光纤环境,则系统的构建成本将可得到降低.

通过尝试引入Petri Net理论解决了多解调设备的协调控制问题,经验证建立的双解调系统的平均等待时间比传统单解调系统低一个数量级.如果利用该方法将解调设备数目增加,则系统的平均等待时间将进一步降低,以适应大规模光纤光栅传感复用系统的需要,实际应用中可根据本文的仿真方法确定适合的解调设备数目.

参考文献

1 Alan D K, Michael A D, Heather J P, *et al.* Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15** (8): 1442~1463

2 刘波,童峥嵘,曾剑,等.一种利用啁啾光栅反射滤波的光纤光栅传感解调方法. *光子学报*, 2004, **33**(1): 57~60
Liu B, Tong Z R, Zeng J, *et al.* *Acta Photonic Sinica*, 2004, **33**(1): 57~60

3 Rao Y J, Kalli K, Brady G, *et al.* Spatially-multiplexed fiber-optic Bragg grating strain and temperature sensor system based on interferometric wavelength-shift detection. *Electron Letter*, 1995, **31**(12): 1009~1010

4 Rao Y J, Ribeiro A B L, Jackson D A, *et al.* Simultaneous spatial, time and wavelength division multiplexed in-fiber grating sensing network. *Opt Commun*, 1996, **125**(1-3): 53~58

5 Rao Y J. In-fiber grating sensing network with a combined SDM, TDM, and WDM topology. *Lasers and Electro-Optics*, 1996, **6**(2-7): 244~244

6 袁微,姜德生. FBG温度传感的多路解调方法. *传感器技术*, 2003, **22**(9): 50~52
Ai W, Jiang D S. *Journal of Transducer Technology*, 2003, **22**(9): 50~52

7 Peng P C, Lin J H, Tseng H Y. Intensity and wavelength-division multiplexing FBG sensor system using a tunable multiport Fiber Ring laser. *Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(1): 230~232

8 徐光辉. 随机服务系统. 北京: 科学出版社, 1988. 25~99
Xu Guanghui. *Stochastic Service System*. Bei Jing: Science Press, 1988. 25~99

9 袁崇义. Petri网原理. 北京: 电子工业出版社, 1998. 25~99
Yuan C Y. *Theory of Petri Net*. Bei Jing: Publishing House of Electronics Industry, 1998. 25~99

10 高宏伟,李淑君,王永华. 基于PetriNet的钢胚磷化PLC控制系统. *仪表技术与传感器*, 2004, **256**(6): 17~18
Gao H W, Li S J, Wang Y H. *Instrument Technique and Sensor*, 2004, **256**(6): 17~18

11 张自嘉,施文康,高侃,等. 长周期光纤光栅(LPFGs)的谱结构研究. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1308~1312
Zhang Z J, Shi W K, Gao K, *et al.* *Acta Photonic Sinica*, 2004, **33**(11): 1308~1312

12 宋宁,郭晓金,殷宗敏. 长周期光纤光栅的分析和优化设计. *光子学报*, 2003, **32**(6): 735~737
Song N, Guo X J, Yin Z M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 735~737

Two Level Demodulated FBG Sensing Multiplexing Technique

Gao Hongwei, Yuan Shuzhong, Liu Bo, Li Hongmin Cao Ye, Luo Jianhua, Zhao Jian,
Kai Guiyun, Dong Xiaoyi

*Institute of Modern Optics, The Key Laboratory of Optoelectronic Information Technological Science, EMC,
Nankai University, Tianjin 300071*

Received date: 2004-12-24

Abstract With two level demodulation, the demodulate rule of WDM/SDM FBG sensing system was optimized. To improve the demodulated speed of sensing system more, a FBG sensing multiplexing technique with multi-demodulate device was proposed. Petri net theory was used to solve the harmonize problem of the technology. In order to demonstrate the feasibility of the multi-demodulate technique, a FBG sensing system with four sensing channels and two F-P filters were studied. The performance of the technique was analyzed by using Queuing Theory. The average delay time of the double demodulate system is lower one magnitude order than the conventional ones.

Keywords Fiber Bragg grating sensing; Petri Net; Queuing theory; Demodulate



Gao Hongwei was born in 1978, in Xuchang, Henan Province. He received the M. S. degree from Zhengzhou University of Light Industry in 2003. Now he is pursuing the Doctor's Degree at the Institute of Modern Optics, NanKai University. His major research fields are fiber grating sensors, fiber Bragg grating system and fiber communication.