

文章编号: 0253-2239(2010)s100212

基于码分复用和波分复用的光纤布拉格光栅 传感网络仿真研究

李东升^{1,2} 隋青美^{1,2} 贾磊^{1,2}

(¹ 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; ² 山东大学光纤传感技术工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要 采用码分复用(CDM)和时分复用(TDM)混合复用技术的光纤布拉格光栅(FBG)传感网络能大幅提升系统的复用能力,但结构复杂,动态测试性能较差,工程上不易实现。提出一种新的采用 CDM 和波分复用(WDM)混合复用技术的 FBG 传感网络结构,通过对测点直接进行二维码分多址(CDMA)编码,在不影响系统动态测试性能的同时增加了复用能力,且结构简单,便于工程实现。仿真实验表明,该结构可以在 10 nm 范围内布置 49 个测点,每个测点的量程可达 10 nm。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅传感网络;码分复用;波分复用;测点编码方法

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100212

Simulation of Fiber Bragg Grating Sensing Networks Using Code Division Multiplexing and Wavelength Division Multiplexing

Li Dongsheng^{1,2} Sui Qingmei^{1,2} Jia Lei^{1,2}

¹ School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China
² Optical Fiber Sensor Technology and Engineering Research Center, Shandong University,
Jinan, Shandong 250061, China

Abstract A fiber Bragg grating (FBG) sensing network using code division multiplexing (CDM) and time division multiplexing (TDM) increases the multiplying density, but decreases the network's dynamic performance and is difficult to be implemented in engineering for its complex structure. A new kind of FBG sensing network using CDM and wavelength division multiplexing (WDM) by coding measuring points directly with 2D-CDMA codes is proposed, which increases the multiplying density while does not influence its dynamic performance and is easy to be implemented in engineering for its simple structure. Simulation experiment indicates that in a spectral range of 10 nm, 49 FBG sensors can be arranged in this type of sensing network, and the measuring range of every sensor reaches 10 nm.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating sensing network; code division multiplexing; wavelength division multiplexing; measuring point coding method

OCIS codes 250.0250; 060.0060; 280.0280

1 引 言

为提高光纤布拉格光栅(FBG)传感器的复用能力,降低系统成本,研究人员提出了多种复用方案^[1~4]。其中码分复用技术因复用能力强、抗干扰性好、随机接入、安全性高和管理方便等特点,最适

合工程现场应用,是一种极具发展潜力的复用技术。

码分复用技术应用于光纤传感的思想出现于 1999 年。当时,美国海军实验室的 K. P. Koo 等^[5]在时分复用的基础上利用码分复用(CDM)技术对光源编码,证明采用 127 的码序长度可以复用 100

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(61074163)和山东大学自主创新基金(2009TS045)资助课题。

作者简介: 李东升(1972—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感技术与微弱信号处理等方面的研究。

E-mail: lidongshengjn@gmail.com(中国光学学会会员号:S040M627)

个以上的 FBG 传感器。此后,研究人员又对 FBG 传感网络中的 CDM 技术作了进一步研究^[6~10]。由于这些研究都建立在时分复用的基础上,CDM 技术仅是光源编码的辅助手段,致使系统结构比时分复用系统更加复杂,而且解调困难,动态测试性能较差,工程上不易实现。

为解决这一问题,本文提出一种新的采用 CDM 和波分复用(WDM)混合复用技术的 FBG 传感网络结构。它以波分复用系统为基础,在每一个信道内利用编码光栅对测点直接进行码分多址(CDMA)编码以实现定位,并利用自相关数字解调^[11]获取被测测量信息。该方案的实质是利用编码光栅对测点直接进行二维 CDMA 编码,从而保证任意两测点之间具有正交性,因此结构简单,复用能力强,便于工程实现,而且不会影响系统的动态测试性能。

2 系统结构原理

2.1 测点编码方案

测点直接编码方案如图 1 所示。FBG 传感器 FOS 包括 m 个编码光栅组 Group 1, Group 2, ..., Group m , 每个编码光栅组又包括 n 个编码光栅 $FBG_{i1}, FBG_{i2}, \dots, FBG_{in} (i=1, 2, \dots, m)$ 。选择编码光栅的半高带宽 B 及中心波长反射率 R 均相同,并定义 FBG_{i1} 的初始中心波长为 λ_{i1}^0 , FBG_{i2} 的中心波长为 $\lambda_{i2}^0 = \lambda_{i1}^0 + B, \dots, FBG_{in}$ 的中心波长为 $\lambda_{in}^0 = \lambda_{i(n-1)}^0 + B = \lambda_{i1}^0 + (n-1)B$, 则第 i 个编码光栅组的编码可以用向量 $\mathbf{c}_i = [c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in}]$ 表示,测点地址则可以用向量 $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_m]^T$ 表示,其中元素 $c_{ij} = 1$ 表示第 i 个编码光栅组使用初始中心波长为 λ_{ij} 的编码光栅进行测量, $c_{ij} = 0$ 表示第 i 个编码光栅组不使用初始中心波长为 λ_{ij} 的编码光栅进行测量 ($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$)。

为保证测量的准确性,要求 1) 任意两个编码光

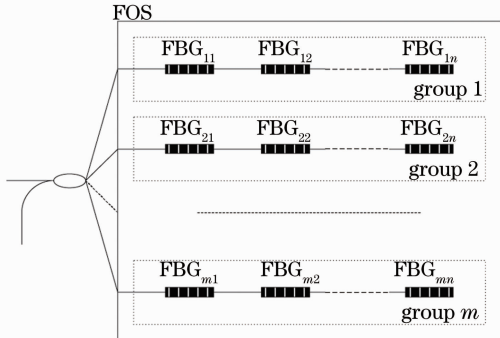


图 1 测点编码原理

Fig. 1 Principle of measuring point coding method

栅组在波长域的间距不能小于测点量程,即必须满足波分复用条件;

2) 同一编码光栅组的编码必须满足码分复用条件,且任意两相邻位不能同时为 1,即

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} c_{ij \oplus \tau} = \begin{cases} w, & \tau = 0 \\ 0, & \tau = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ \leq \lambda_a, & 2 \leq \tau \leq n \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{i,j=1}^n c_{ij} c'_{ij \oplus \tau} \leq \lambda_c \quad (c_{ij} \neq c'_{ij})$$

式中 w 为码字重量,即编码光栅组同一编码的自相关峰值; λ_a 为码字自相关限制,即编码光栅组同一编码的自相关旁瓣; λ_c 为码字互相关限制,即编码光栅组不同编码间的互相关峰值。一般情况下,有 $\lambda_a = \lambda_c = 1$ 。

2.2 解调原理

基于 CDM 和 WDM 混合复用的 FBG 传感网络结构如图 2 所示。假设各测点相互独立,且光纤传输损耗可以忽略,则光谱分析仪(OSA)接收的测点反射光谱表示为

$$S(\lambda) = \sum_{h=1}^r \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R c_{ij}^h \exp \left[-\frac{4 \ln 2}{B^2} (\lambda - \lambda_{ij}^h)^2 \right]. \quad (2)$$

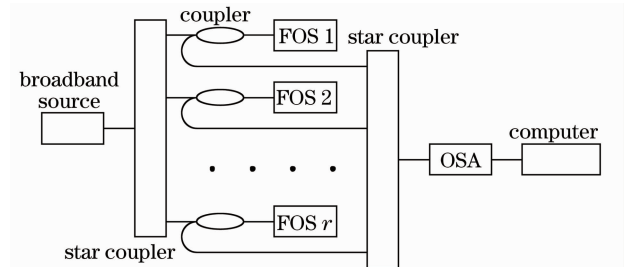


图 2 基于 CDM+WDM 的 FBG 传感网络

Fig. 2 FBG sensing network using CDM+WDM

考虑到各编码光栅的中心波长构成等差数列且随被测物理量变化,所以上式可以写为

$$S(\lambda, t) = \sum_{h=1}^r \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R c_{ij}^h \times \exp \left\{ -\frac{4 \ln 2}{B^2} [\lambda - \lambda_{i1}^h(t) - (j-1)B]^2 \right\}, \quad (3)$$

式中 $S(\lambda, t)$ 表示随时间变化的测点反射光谱; R, B 表示编码光栅的中心波长反射率和半高带宽; c_{ij}^h 为满足(1)式的测点编码系数; $\lambda_{i1}^h(t)$ 是 t 时刻时第 h 个测点第 i 个编码光栅组第 1 个编码光栅的中心波长。

根据(2)式计算相邻时刻测点反射光谱的自相关,则有

$$S(\lambda, t)S(\lambda - \Delta\lambda, t + \Delta t) = \sum_{h=1}^r \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Rc_{ij}^h \exp\left\{-\frac{4\ln 2}{B^2}[\lambda - \lambda_{i1}^h(t) - (j-1)B]^2\right\} \times \\ \sum_{h=1}^r \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Rc_{ij}^h \exp\left\{-\frac{4\ln 2}{B^2}[\lambda - \Delta\lambda - \lambda_{i1}^h(t + \Delta t) - (j-1)B]^2\right\}, \quad (4)$$

式中 $0 \leq \Delta\lambda \leq \Lambda$, Λ 为测点量程。将(1)式代入(4)式并化简,得

$$S(\lambda, t)S(\lambda - \Delta\lambda, t + \Delta t) \approx K \sum_{h=1}^r \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (c_{ij}^h)^2 \exp\left\{-\frac{4\ln 2}{(B/\sqrt{2})^2}\left\{\lambda - \left[\lambda_{i1}^h(t) + (j-1)B + \frac{\Delta\lambda_h - \Delta\lambda}{2}\right]\right\}^2\right\}, \quad (5)$$

式中 K 是系统常数, $\Delta\lambda_h(t) = \lambda_{ij}^h(t + \Delta t) - \lambda_{ij}^h(t)$ 是相邻时刻第 h 个测点随被测量变化而产生的编码光栅中心波长漂移。

由(5)式可知,反射光谱自相关函数可以看作一系列宽度为 $B/\sqrt{2}$, 中心依次位于 $\lambda_{i,1}^h(t) + (j-1)B + \frac{\Delta\lambda_h - \Delta\lambda}{2}$ 的高斯函数的和,若用脉冲函数近似高斯函数,则得到第 h 个测点的编码地址。考虑到 $\lambda_{i,1}^h(t)$ 已知,因此,可以利用(5)式求出相邻时刻被测物理量的增量,并可利用递归算法得到被测物理量随时间的变化情况。

3 仿真实验结果

利用 Matlab 对图 2 所示系统进行仿真。选择 $m=2$,且每个编码光栅组内的编码光栅采用(43, 3, 1)-OOC 码。令编码光栅的半峰全宽 B 为 0.1 nm,中心波长反射率 R 为 0.9,Group 1 的波长取值范围为 1530.0 ~ 1534.5 nm, Group 2 的波长取值范围为 1544.5 ~ 1549.0 nm,则各测点编码地址如表 1, 2 所示。

表 1 编码光栅组可用编码
Table 1 Code of coding FBG group

Vector address	Code	Coding FBG's wavelength /nm	
		Group 1	Group 2
$c_{i,1}$	{0, 8, 14}	$\lambda_{1,1} = 1530.0$ ($c_{1,1} = 1$)	$\lambda_{2,1} = 1544.5$ ($c_{2,1} = 1$)
		$\lambda_{1,9} = 1530.8$ ($c_{1,9} = 1$)	$\lambda_{2,9} = 1545.3$ ($c_{2,9} = 1$)
		$\lambda_{1,15} = 1531.4$ ($c_{1,15} = 1$)	$\lambda_{2,15} = 1545.9$ ($c_{2,15} = 1$)
$c_{i,2}$	{0, 9, 13}	$\lambda_{1,1} = 1530.0$ ($c_{1,1} = 1$)	$\lambda_{2,1} = 1544.5$ ($c_{2,1} = 1$)
		$\lambda_{1,9} = 1530.9$ ($c_{1,10} = 1$)	$\lambda_{2,9} = 1545.4$ ($c_{2,10} = 1$)
		$\lambda_{1,15} = 1531.3$ ($c_{1,14} = 1$)	$\lambda_{2,15} = 1545.8$ ($c_{2,14} = 1$)
$c_{i,3}$	{0, 10, 12}	$\lambda_{1,1} = 1530.0$ ($c_{1,1} = 1$)	$\lambda_{2,1} = 1544.5$ ($c_{2,1} = 1$)
		$\lambda_{1,9} = 1531.0$ ($c_{1,11} = 1$)	$\lambda_{2,9} = 1545.5$ ($c_{2,11} = 1$)
		$\lambda_{1,15} = 1531.2$ ($c_{1,13} = 1$)	$\lambda_{2,15} = 1545.7$ ($c_{2,13} = 1$)
$c_{i,4}$	{0, 11, 18}	$\lambda_{1,1} = 1530.0$ ($c_{1,1} = 1$)	$\lambda_{2,1} = 1544.5$ ($c_{2,1} = 1$)
		$\lambda_{1,9} = 1531.1$ ($c_{1,12} = 1$)	$\lambda_{2,9} = 1545.6$ ($c_{2,12} = 1$)
		$\lambda_{1,15} = 1531.8$ ($c_{1,19} = 1$)	$\lambda_{2,15} = 1546.3$ ($c_{2,19} = 1$)
$c_{i,5}$	{0, 15, 20}	$\lambda_{1,1} = 1530.0$ ($c_{1,1} = 1$)	$\lambda_{2,1} = 1544.5$ ($c_{2,1} = 1$)
		$\lambda_{1,9} = 1531.5$ ($c_{1,16} = 1$)	$\lambda_{2,9} = 1546.0$ ($c_{2,16} = 1$)
		$\lambda_{1,15} = 1532.0$ ($c_{1,21} = 1$)	$\lambda_{2,15} = 1546.5$ ($c_{2,21} = 1$)
$c_{i,6}$	{0, 16, 19}	$\lambda_{1,1} = 1530.0$ ($c_{1,1} = 1$)	$\lambda_{2,1} = 1544.5$ ($c_{2,1} = 1$)
		$\lambda_{1,9} = 1531.6$ ($c_{1,17} = 1$)	$\lambda_{2,9} = 1546.1$ ($c_{2,17} = 1$)
		$\lambda_{1,15} = 1531.9$ ($c_{1,20} = 1$)	$\lambda_{2,15} = 1546.4$ ($c_{2,20} = 1$)
$c_{i,7}$	{0, 9, 22}	$\lambda_{1,1} = 1530.0$ ($c_{1,1} = 1$)	$\lambda_{2,1} = 1544.5$ ($c_{2,1} = 1$)
		$\lambda_{1,9} = 1530.9$ ($c_{1,10} = 1$)	$\lambda_{2,9} = 1545.4$ ($c_{2,10} = 1$)
		$\lambda_{1,15} = 1532.2$ ($c_{1,23} = 1$)	$\lambda_{2,15} = 1546.7$ ($c_{2,23} = 1$)

表 2 测点地址

Table 2 Address of measuring points

Measuring point	Address	Measuring point	Address	Measuring point	Address	Measuring point	Address
1	$[c_{1,1}, c_{2,1}]^T$	14	$[c_{1,2}, c_{2,7}]^T$	27	$[c_{1,4}, c_{2,6}]^T$	40	$[c_{1,6}, c_{2,5}]^T$
2	$[c_{1,1}, c_{2,2}]^T$	15	$[c_{1,3}, c_{2,1}]^T$	28	$[c_{1,4}, c_{2,7}]^T$	41	$[c_{1,6}, c_{2,6}]^T$
3	$[c_{1,1}, c_{2,3}]^T$	16	$[c_{1,3}, c_{2,2}]^T$	29	$[c_{1,5}, c_{2,1}]^T$	42	$[c_{1,6}, c_{2,7}]^T$
4	$[c_{1,1}, c_{2,4}]^T$	17	$[c_{1,3}, c_{2,3}]^T$	30	$[c_{1,5}, c_{2,2}]^T$	43	$[c_{1,7}, c_{2,1}]^T$
5	$[c_{1,1}, c_{2,5}]^T$	18	$[c_{1,3}, c_{2,4}]^T$	31	$[c_{1,5}, c_{2,3}]^T$	44	$[c_{1,2}, c_{2,2}]^T$
6	$[c_{1,1}, c_{2,6}]^T$	19	$[c_{1,3}, c_{2,5}]^T$	32	$[c_{1,5}, c_{2,4}]^T$	45	$[c_{1,7}, c_{2,3}]^T$
7	$[c_{1,1}, c_{2,7}]^T$	20	$[c_{1,3}, c_{2,6}]^T$	33	$[c_{1,5}, c_{2,5}]^T$	46	$[c_{1,7}, c_{2,4}]^T$
8	$[c_{1,2}, c_{2,1}]^T$	21	$[c_{1,3}, c_{2,7}]^T$	34	$[c_{1,5}, c_{2,6}]^T$	47	$[c_{1,7}, c_{2,5}]^T$
9	$[c_{1,2}, c_{2,2}]^T$	22	$[c_{1,4}, c_{2,1}]^T$	35	$[c_{1,5}, c_{2,7}]^T$	48	$[c_{1,7}, c_{2,6}]^T$
10	$[c_{1,2}, c_{2,3}]^T$	23	$[c_{1,4}, c_{2,2}]^T$	36	$[c_{1,6}, c_{2,1}]^T$	49	$[c_{1,7}, c_{2,7}]^T$
11	$[c_{1,2}, c_{2,4}]^T$	24	$[c_{1,4}, c_{2,3}]^T$	37	$[c_{1,6}, c_{2,2}]^T$		
12	$[c_{1,2}, c_{2,5}]^T$	25	$[c_{1,4}, c_{2,4}]^T$	38	$[c_{1,6}, c_{2,3}]^T$		
13	$[c_{1,2}, c_{2,6}]^T$	26	$[c_{1,4}, c_{2,5}]^T$	39	$[c_{1,6}, c_{2,4}]^T$		

设 OSA 扫描范围为 1530.000~1559.000 nm, 各测点量程为 10 nm, 且均为线性输入。开始测量前, 分别记录每个测点的反射谱线, 以此计算并存储 K 值和 ω 值; 同时记录各测点被测量的初始值, 完成测量初始化工作。测量开始后, 依次计算相邻时刻测点反射谱线的自相关函数, 并利用(5)式进行解调。测点 1[输入为 $x_1(t) = 10t$]和测点 44[输入为 $x_{44}(t) = 5t$]的解调结果如图 3 所示, 验证了本文提出的利用 CDM 和 WDM 混合复用构建 FBG 传感网络的有效性。

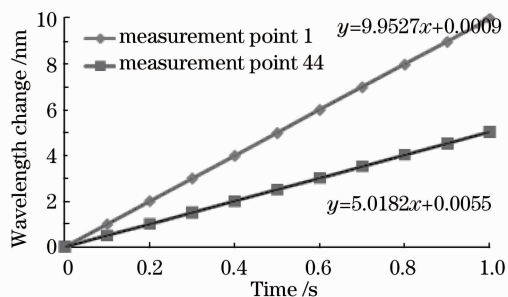


图 3 测点 1 和测点 44 的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of measurement point 1 and measurement point 44

4 结 论

采用 CDM 和时分复用(TDM)混合复用技术的 FBG 传感网络能大幅提升系统的复用能力, 但结构复杂, 工程上不易实现; 而且不能充分发挥光纤传

感网络并行信息处理的优势。提出基于 CDM 和 WDM 混合复用的 FBG 传感网络不仅提升了系统的复用能力, 而且保留了并行信息处理的优势, 简化了系统结构, 便于一般工程技术人员在施工现场使用; 但其提出的对传感器进行二维 CDMA 编码的要求增加了 FBG 传感器结构设计的难度, 在现有技术条件下不易实现。因此, 该方法虽然适合工程需要, 具有极大发展潜力, 但其前景在很大程度上仍依赖于集成光学的发展。

参 考 文 献

- 1 B. Culshaw, J. Dakin. Optical Fiber Sensors[M]. Li Shaoya, Ning Zhinong Transl.. Wuhan: Huazhong University Press, 1997. 514~573
- 2 B. Clushaw, J. Dakin. 光纤传感器[M]. 李少雅, 宁稚农译. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997. 514~573
- 3 Nunes Luiz C, Olivieri Bruno S, Kato Carla C *et al.*. FBG sensor multiplexing system based on the TDM and fixed filters approach [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2007, **138**(2): 341~349
- 4 D. S. Montero, C. Vazquez, J. M. Baptista *et al.*. Coarse WDM networking of self-referenced fiber-optic intensity sensors with reconfigurable R characteristics[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 4396~4410
- 5 Y. J. Rao, C. X. Zhou, T. Zhu. SFDM/CWDM of fiber-optic fizeau strain sensors[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(6): 1259~1261
- 6 K. P. Koo, A. B. Tveten, S. T. Vohra. Dense wavelength division multiplexing of fibre Bragg grating sensors using CDMA [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(2): 165~167
- 7 H. Ryu, H. Lee, K. S. Kim. Economical and multiple fiber grating sensor system with rapid response using CDMA [C].

- SPIE*, 2000, **4185**: 712~715
- 7 H. Lee, J. Park. Dynamic strain characteristics of multiple FBG sensor system using CDMA [C]. *IEEE LEOS*, 2001, **2**: 871~872
- 8 S. Abbenseth, S. Lochmann. A novel approach utilizing optical SIK-DS-CDMA overcomes restrictions of traditional FBG sensor networks[C]. *SPIE*, 2005, **5634**: 196~203
- 9 S. Abbenseth, S. I. Lochmann. Overcoming restrictions of traditional FBG sensor networks using SIK-DS-CDMA [C]. *SPIE*, 2005, **5952**: 1~9
- 10 Huijuan Dong, Jian Wu, Guangyu Zhang. Novel successive demultiplexing scheme based on optical-CDMA balanced demodulation for FBG sensor systems[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 23~25
- 11 Li Dongsheng, Huo Zhipu. Digital demodulation method for fiber Bragg grating sensors based on signal autocorrelation principle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 914~917
李东升, 霍志璞. 基于信号自相关原理的光纤光栅数字解调方法 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 914~917