

文章编号: 0253-2239(2005)11-1472-5

光纤菲佐应变传感器的波分频分复用方法*

周昌学¹ 饶云江^{1,2**} 朱涛^{1,2}

(¹ 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044
² 电子科技大学通信与信息工程学院, 成都 610035)

摘要: 将波分复用技术与空间频率复用技术相结合,提出了新的光纤菲佐应变传感器波分频分复用方法:在粗波分复用(CWDM)的不同波段实现具有不同腔长的光纤菲佐应变传感器的空间频率复用。描述了基于该方法的光纤菲佐应变传感器复用系统的结构、原理及实验结果,讨论了复用技术中可能产生的串扰的影响及其解决方法。实验结果表明,该方法大大提高了光纤菲佐应变传感器的复用能力,可复用40个以上的菲佐应变传感器,且其应变测量精度达 $\pm 5 \mu\epsilon$,可满足实际应用的要求。

关键词: 导波与光纤光学; 光纤传感器; 菲佐干涉仪; 复用; 粗波分复用; 应变计
中图分类号: TN253 文献标识码: A

SFDM/CWDM of Fiber-Optic Fizeau Strain Sensors

Zhou Changxue¹ Rao Yunjiang^{1,2} Zhu Tao^{1,2}

(¹ School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044
² School of Communication and Information Engineering, Electronic Science and Technology University of China, Chengdu 610054)

Abstract: A novel method for a large number of multiplexing fiber-optic Fizeau sensors using coarse wavelength division multiplexing (CWDM) and spatial-frequency division multiplexing (SFDM) is proposed and demonstrated. A CWDM device is used to multiplex signals from different sensor channels occupying different wavelength regions divided by the CWDM. The structure and principle of multiplexing fiber-optic Fizeau sensor are described, and the effect and reduction of cross-talk resulted from the multiplexing are analyzed. More than 10 Fizeau sensors arranged in a single channel can be multiplexed by using SFDM due to the long cavity length of the Fizeau sensor. The experimental results show that a strain accuracy of $5 \mu\epsilon$ is achieved. There is little cross-talk between adjacent CWDM channels and also between two adjacent Fizeau strain sensors with certain cavity length difference. This system improves the multiplexing capability of Fizeau strain sensors significantly. It is anticipated that such a sensor system could find important applications in smart materials and health monitoring for large structures.

Key words: guided wave and fiber optics; optical fiber sensors; Fizeau interferometer; multiplexing; coarse wavelength division multiplexing; strain gauge

1 引 言

随着现代测量技术的发展,光纤法布里-珀罗(Fabry-Pérot)应变传感器越来越受到人们的重视^[1]。现已广泛应用到复合材料、大型工程结构(如

桥梁等)、宇航飞行器、飞机等的结构健康监测,以实现所谓的智能结构^[2,3]。与传统的应变传感器相比,光纤法布里-珀罗应变传感器具有不受电磁干扰、适用范围广、稳定性好、可靠性好、分辨率高、精度高、体积小、重量轻等显著优点^[1~8]。但光纤法布

* 国家杰出青年科学基金(60025515)、教育部重点基金(104210)和重庆市自然科学基金(8415)资助课题。

作者简介: 周昌学(1982~),男,湖北潜江人,重庆大学光电工程学院硕士研究生,主要从事光纤传感、光通信器件方面的研究。E-mail: changxue_Zhou@126.com

** 通信联系人。E-mail: yjrao@cqu.edu.cn

收稿日期: 2004-12-01; 收到修改稿日期: 2005-04-11

里-珀罗传感器仍然存在一个比较严重的缺点就是较难进行复用,从而导致系统成本较高,限制了其实际应用范围。为了进一步提高光纤法布里-珀罗应变传感器的复用能力,本文在之前提出的光纤菲佐(Fizeau)应变传感器频分复用^[9]和光纤法布里-珀罗应变传感器波分复用^[10]的基础上,将两者结合起来建立光纤菲佐应变传感器的波分频分复用系统。

2 光纤菲佐应变传感器复用系统结构及原理

光纤菲佐应变传感器波分频分复用系统的原理见图 1。从宽带光源发出的光经 2×2 耦合器后,进入 1×4 粗波分复用(CWDM),通过粗波分复用的宽带光被分解成 4 个带宽约为 20 nm 的通道,在每个通道上通过分束器接入多个具有不同腔长的菲佐传感器,即实现了波分和频分的同时复用。反射回来的信号通过耦合器进入光谱仪(MICRON OPTICS si720),然后通过计算机采集进行数据处理。系统中的折射率匹配液用来防止光纤端面反射带来的干扰。传感头由石英玻璃管和光导入/反射单模光纤构成,其中导入光纤为将端面切割成平面的普通单模光纤,反射光纤端面镀了一层金属银,形成反射率约 95% 的反射面。由于该传感头两光纤端面反射率不等,为与两端面反射率相等的普通法布里-珀罗腔相区别,将之称为菲佐腔^[11]。石英管长约为 40 mm、内外直径分别为 128 μm、300 μm,两光纤端面相距几百微米到几毫米甚至十几毫米。在石英管两端,光纤和石英管用 AB 胶粘合在一起,这样就构成了光纤菲佐应变传感器,其典型的干涉谱如图 2 所示(腔长约为 1 mm)。

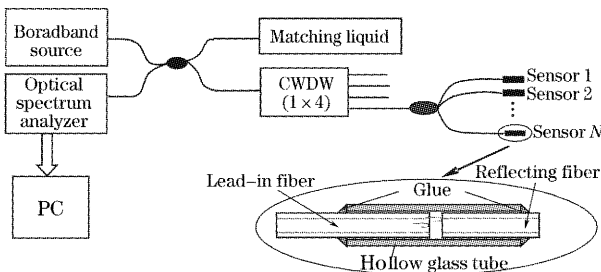


图 1 菲佐传感器波分频分复用系统

Fig. 1 Multiplexing system of Fizeau strain sensors

菲佐干涉仪反射信号的对比如可以表示为^[12]

$$V = \frac{\sqrt{r_1 [1 + (Ad/2\pi)^2]}}{1 + r_1 [1 + (Ad/2\pi)^2]}, \quad (1)$$

这里,反射光纤由于镀银反射率很高,假设其反射率

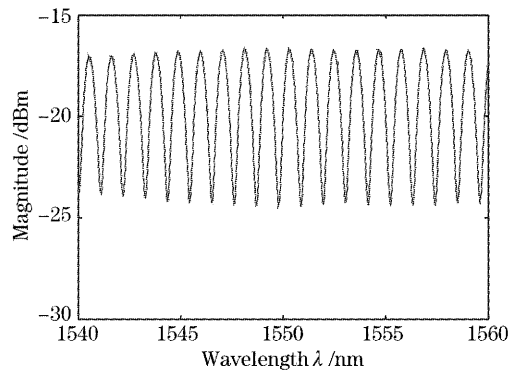


图 2 Fizeau 传感器典型的干涉波形

Fig. 2 Typical interferometric signal of a Fizeau sensor 为 100%, r_1 为入射光纤反射率,约为 4%, d 是菲佐腔腔长, $A = \lambda \ln \nu / a^2$ 对指定的光纤是常数(其中 ν 是单模光纤归一化频率, a 是光纤半径)。因此,一旦光纤确定后,对比度可以通过(1)式求出,对此系统, $r_1 = 0.035$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\nu = 2.094$, $a = 5 \mu\text{m}$, 可得 $A = 0.0458$, 对比度 V 与腔长 d 的关系如图 3 所示。从图 3 可以看出在腔长达到 12 mm 时,仍然有 0.07 的对比度,因此菲佐腔的腔长可以很长。

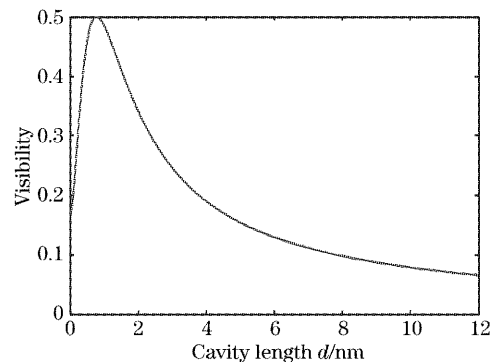


图 3 对比度与腔长的关系

Fig. 3 Relationship between visibility and cavity length

图 4 是在系统中粗波分复用两个波长通道上各接入两个菲佐应变传感器的输出波形,从图 4 中可

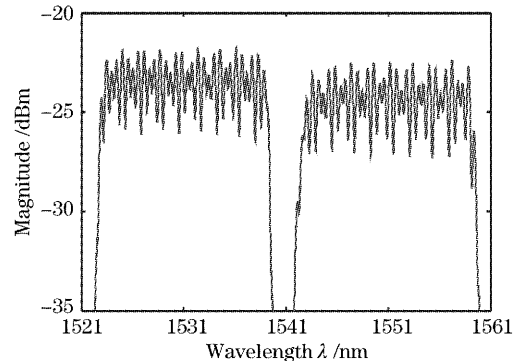


图 4 粗波分复用两通道的反射谱

Fig. 4 Reflective signal from two CWDM channels

以看出,各路传感信号分别位于不同的波段,对各路信号分别进行同样的信号解调即实现了4路传感信号的波分复用。粗波分复用是此系统的关键器件,系统中使用的 1×4 粗波分复用相邻通道隔离度大于35 dB,可以认为相邻通道之间无串扰,其回波损耗更是大于45 dB,可以不作考虑,即与普通的光纤菲佐应变传感器系统(无粗波分复用)相比,此系统加入的元器件粗波分复用对系统的信噪比影响很小,仍能得到较精确的应变值。

由于所构成的菲佐腔一端为未镀膜的普通光纤,其端面反射率较低(约为4%),因此光束的干涉可以近似等效为双光束干涉,其干涉谱近似为余弦分布(图2),可以通过快速傅里叶变换(FFT)方法求得其波形频率来进行腔长解调。对一传感信号,通过快速傅里叶变换其解调腔长可以表示为

$$d = \frac{k}{2N\delta\nu}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

其中 k 为快速傅里叶变换极大值下标, N 为快速傅里叶变换点数,而 $\delta\nu = \delta\lambda/\lambda^2$ 。也就是说,对离散光强信号用快速傅里叶变换算法计算其离散傅里叶变换幅度,继而寻找其极大值对应的下标,代入(2)式就可以求出菲佐应变传感器的腔长值。这样对混在一起的多个菲佐传感器信号可以通过快速傅里叶变换将其分辨出来,前提是各个菲佐传感器信号的频率不同即菲佐腔的腔长不同。由于菲佐腔的腔长可以很长,达到10 mm以上仍可获得可用的干涉信号,所以可以很方便的进行频分复用。

四个具有不同腔长(即0.5 mm, 1.5 mm, 2.5 mm, 3.5 mm)的菲佐传感器的混合信号去直流后的结果如图5所示,此时完全无法分辨出该混合信号含有那些频率成分,无法运用传统的波峰值算法求出菲佐传感器的腔长,因此需要对其进行处

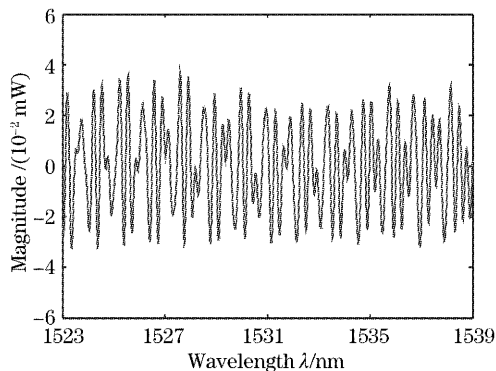


图5 四个具有不同腔长的菲佐的传感器的混合信号
Fig. 5 Mixed signal from a CWDM channel with four Fizeau sensors with different cavity lengths

理。将信号进行滤波和快速傅里叶变换后,得到如图6所示的波形,其中横坐标即为快速傅里叶变换的点数。从图6可以看出,信号在变换域中完全可以被分开,由此在一个粗波分复用通道内实现了四个传感器的复用,图6中四个传感器腔长差为1 mm,由于菲佐腔长可以高达10 mm以上,事实上可以复用的传感器的数量在10个以上,再加上四路通道的波分复用就是40个以上,这样,波分复用与频分复用结合起来大大的提高了光纤菲佐应变传感器的复用能力。

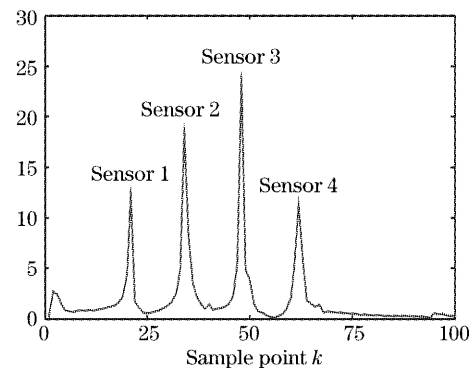


图6 具有不同腔长的四传感器信号快速傅里叶变换谱
Fig. 6 Fast Fourier transform spectrum for four different cavity lengths

3 实验结果与讨论

为了验证所提出原理和方法的可行性,用该系统进行了应变测量实验,测量装置如图7所示。将图6中所示的四个菲佐应变传感器中的Sensor 1和Sensor 2通过耦合器接在粗波分复用波长1521~1541 nm通道, Sensor 3和Sensor 4接在波长1541~1561 nm通道,其波形如图4所示。其中Sensor 1和Sensor 3粘贴在金属悬臂上,金属悬臂末端安装步进电机使悬臂末端发生位移而产生应变,而Sensor 2和Sensor 4则不受应变,用来测量粗波分

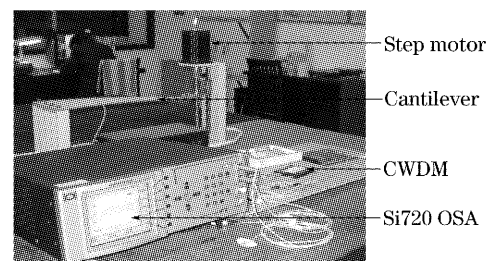


图7 应变测量装置图
Fig. 7 Photograph of strain test system

复用通道之间的串扰及通道内两菲佐传感器之间的串扰。将金属悬臂末端以每 1 mm 的步长下降 10 mm, 四个传感器测量的应变结果如图 8 所示。从图中可以看出该传感器精度较高, 粗波分复用通

道之间的串扰和通道内两菲佐传感器之间的串扰均很小 ($< \pm 3 \mu\epsilon$), 实验证明其测量精度约为 $\pm 5 \mu\epsilon$, 在工程应用中对于大型工程结构(如桥梁)的健康监测, 该精度都已经足够。

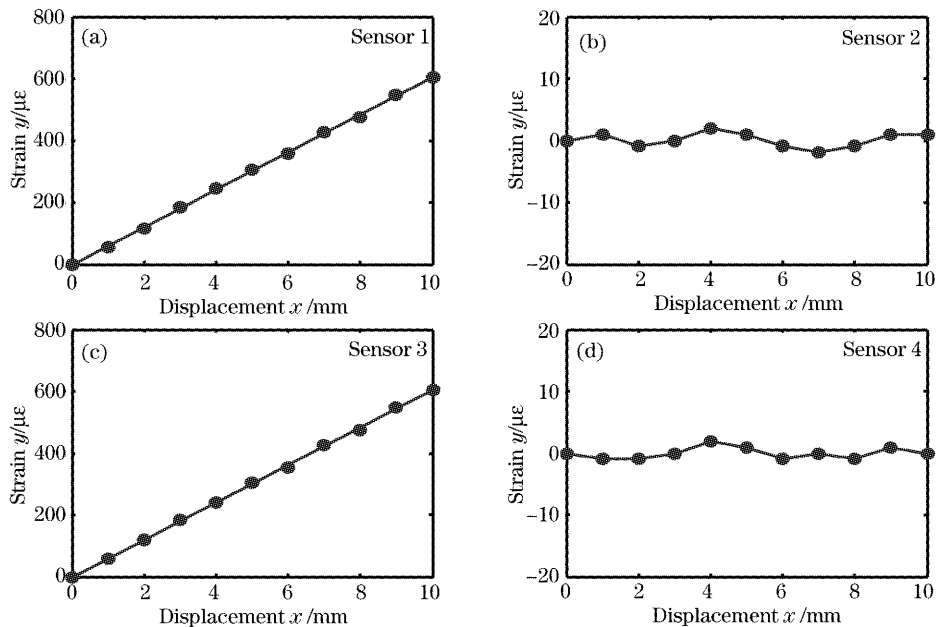


图 8 应变实验结果图

Fig. 8 Experimental results of four Fizeau strain sensors

另外实验发现在相邻两个菲佐腔的腔长差较小(如 0.5 mm)的时候, 它们之间的串扰不可忽略, 其对应变测量的精度影响较大, 这是由于快速傅里叶变换的边带效应引起的, 一个菲佐传感器信号的快速傅里叶变换边带会对另一传感器的快速傅里叶变换谱产生影响, 从而产生串扰及相应的应变测量误差, 降低应变测量精度。串扰的大小与单个菲佐传感器信号的对比如度有关, 对腔长差固定的两菲佐传感器, 在传感器信号对比如度较大时串扰较小, 而对比如度较小时串扰较大。可以通过提高菲佐传感器的制作质量, 如减少石英管内灰尘和光纤端面损坏等的影响来提高传感信号的对比如度。另外, 有望通过数字信号处理的方法来减小串扰的影响。实际应用中为了减小串扰, 可以将菲佐腔的腔长差设置得稍大些(如 1 mm), 此时仍能频分复用 10 个以上传感器, 大大降低传感系统的成本。

4 结 论

通过实验证明光纤菲佐应变传感器波分频分复用方法有效地提高了光纤菲佐应变传感器的复用能力, 可以复用 40 个以上的传感器, 这大大降低传感

系统的平均成本, 具有较大的实用价值。该传感方法除了复用能力强外, 信号处理方法简单, 结果准确, 而且测量精度较高, 应变实验表明其应变测量精度达 $\pm 5 \mu\epsilon$, 因此该传感器系统可望在大型结构健康监测中发挥重要作用。

参 考 文 献

- Francis T. S. Yu, Shizhuo Yin. *Fiber Optic Sensors* [M]. New York: Marcel Dekker, 2002. 41~74
- Eric Udd. *Fiber Optic Smart Structures* [M]. New York: Wiley, 1995. 249~270
- Jin Wei, Liao Yanbiao, Zhang Zhipeng *et al.* *Guided wave Optical Sensor: Principle and Technology* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 287~319 (in Chinese)
- 靳伟, 廖延彪, 张志鹏等. 导波光传感器: 原理与技术 [M]. 北京: 北京科学出版社, 1998. 287~319
- Y. J. Rao, S. F. Yuan, X. K. Zeng *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement of advanced 3-D braided composite materials using an improved EFPI/FBG system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, **38**(6): 557~566
- Rao Yunjiang, Zeng Xiangkai, Zhu Yong *et al.*. EFPI/FBG strain-temperature sensor and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 85~88 (in Chinese)
- 饶云江, 曾祥楷, 朱永等. 非本征型法布里-珀罗干涉仪光纤布拉格光栅应变温度传感器及其应用 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 85~88
- Sun Jiyong, Chen Weiming, Zhu Yong *et al.*. Influence of optical source spectrum on optical fiber F-P strain sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 596~600 (in Chinese)

- 孙吉勇,陈伟民,朱永等.光源光谱对光纤法布里珀罗应变传感系统的影响[J].*光学学报*,2002,**22**(5):596~600
- 7 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Extrinsic optical fiber Fabry-Perot strain sensor system based on optical amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 183~186 (in Chinese)
- 江建,饶云江,冉曾令等.光放大外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感器系统[J].*光学学报*,2004,**24**(2):183~186
- 8 Wei Rengxuan, Jiang Desheng. Refractive index measurement with Fabry-Perot interferential wavelength[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(6): 551~554 (in Chinese)
- 魏仁选,姜德生.基于F-P干涉波长的折射率测量[J].*中国激光*,2003,**30**(6):551~554
- 9 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Zhou Changxue *et al.*. Spatial-frequency-multiplexed fiber-optic fizeau strain sensor system with optical amplification[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7): 2221~2225 (in Chinese)
- 江建,饶云江,周昌学等.基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器频分复用系统[J].*物理学报*,2004,**53**(7):2221~2225
- 10 C. X. Zhou, Y. J. Rao, J. Jiang. A coarse wavelength-division-multiplexed extrinsic fiber Fabry-Perot sensor system[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5634**: 219~224
- 11 Y. J. Rao, D. A. Jackson, R. Jones *et al.*. Development of prototype fibre-based Fizeau pressure sensors with temperature compensation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(9): 1685~1695
- 12 Y. J. Rao, D. A. Jackson. Universal fiber-optic point sensor system for quasi - static absolute measurements of multiparameters exploiting low coherence interrogation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(4): 592~600