

## Frequency Encoding Fiber Ring Sensor Array Based on Intensity Modulation \*

MENG Shuang, LIN Jian-wen, LEI Bin, ZHUANG Qi-ren \*

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou Fujian 362021, China)

**Abstract:** A novel frequency encoding fiber ring sensor is proposed and demonstrated based on frequency sweep sinusoidal intensity modulation technique. The configuration of the fiber optic sensor array and the principle of quasi-frequency division multiplexing are presented. The characteristics of the array backward signals to photo-detector is analyzed and the resonant frequency of fiber ring sensor with different length is mainly discussed. The results show that the resolution ability of the sensor array can be increased through changing coupling efficiency of couplers and choosing appropriate fiber ring length. Demodulation was achieved by using frequency tracking demodulator, it improves signal to noise rate (SNR) and detection sensitivity of the system. This sensor array can be used to measure the quasi-distributed strain and temperature.

**Key words:** fiber ring sensor; intensity modulated; quasi-frequency division multiplexing; frequency tracking demodulator

EEACC:7230E

## 一种强度调制型频率编码光纤环传感器阵列 \*

孟爽, 林建文, 雷斌, 庄其仁 \*

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建泉州 362021)

**摘要:** 提出一种基于强度调制技术的频率编码光纤环传感器。给出光纤传感阵列结构并阐述了多传感器准频分复用原理, 分析了阵列中传感器的反射信号特征, 并重点讨论了不同长度光纤环的谐振频率特性。结果表明, 通过改变光纤耦合系数及选用合适的光纤环长度, 可以提高传感系统的复用能力和分辨能力。系统采用频率跟踪解调技术以提高信噪比和探测灵敏度。此系统可用于准分布应变和温度的测量。

**关键词:** 光纤环传感器; 强度调制; 准频分复用; 频率跟踪解调

中图分类号: TN 253

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)06-0972-05

采用波长编码、具备多传感器复用能力的光纤光栅 (FBG) 传感网络是研究最多的实现分布式检测功能的光纤传感器网络<sup>[1-3]</sup>, 但由于 FBG 传感系统价格较高, FBG 传感器制作的一致性难以保证, 限制了 FBG 传感系统成为成本低廉的光纤传感器, 但它仍然是光纤传感器应用研究的一个发展方向<sup>[4-6]</sup>。在光纤系统中, 强度调制光信号的调制、传输与检测是技术最成熟、成本最低的调制方式。本文介绍一种采用普通光纤制作的强度调制型频率编码光纤环

传感器, 通过对光源调制频率的连续扫描实现传感器阵列的寻址。与传统的光纤环谐振器<sup>[7-8]</sup>不同, 在光纤环传感器中的谐振频率是光强度调制频率, 而不是光频。

### 1 原理

图 1 所示为强度调制型光纤环传感器基本结构及工作原理图, 其中包含一个光纤环和两个光纤耦合器。光纤环可以是单环, 也可以是多环折叠而成。光

基金项目: 福建省自然科学基金资助 (A0710012)

收稿日期: 2008-01-22 修改日期: 2008-02-20

纤环首先接收来自激励光源的光信号,激励光源为扫频信号源调制的正弦形强度调制光,光源只需采用调制带宽大于 300 MHz 的半导体激光二极管(LD)。

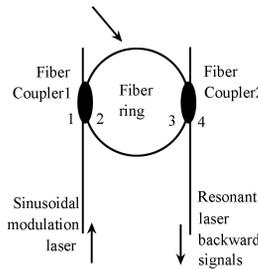


图 1 光纤环传感器基本结构

当激励光源的调制频率为  $f$  时,由于光信号从 1 端耦合到 2 端之后进入光纤环内,一部分从 3 端耦合到 4 端输出,另一部分返回到 2 端,同时又有一部分耦合输出,一部分返回,如此循环,所以从光纤环返回到接收端的瞬时光强度可用式(1)表示:

$$I_B(t) = \sum_{s=0} K_{12} K_{34} e^{-\frac{s}{2}} \left[ (1 - K_{21}) (1 - K_{43}) e^{-s} \right]^s \cdot I_0 \left[ 1 + m \cos \left( 2\pi f t + \frac{2\pi f \cdot n l s}{c} + \phi_0 \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $K_{ij}$  为光波导从  $i$  到  $j$  的功率耦合系数,  $R$  为光纤单位长度的功率损耗,  $I_0$  为光源入射到光纤中的平均光强度,  $m$  为调制系数,  $s$  为光在环形光纤中的循环次数,  $\phi_0$  为信号光源初相位,  $c$  是真空中光速,  $n$  是光纤纤芯折射率,  $l$  是光纤环长度。设  $K_{12} = K_{21}$ ,  $K_{34} = K_{43}$ ,  $R = (1 - K_{12})(1 - K_{34})e^{-l}$ ,  $T = \frac{2\pi f n l}{c}$ ,  $T_r = K_{12} K_{34} e^{-\frac{T}{2}}$ 。则由式(1)表示的光强度传递函数  $T_r$  与  $\theta$  的关系表达式可写为:

$$T_r = \frac{I_B}{I_0} = \sum_{s=0} K_{12} K_{34} R^s (1 + m \cos(s\theta)) =$$

$$\sum_{s=0} K_{12} K_{34} R^s + \sum_{s=0} m K_{12} K_{34} R^s \cos(s\theta) = T_0 + T_a \quad (2)$$

其中:

$$T_0 = \sum_{s=0} K_{12} K_{34} R^s = \frac{K_{12} K_{34}}{1 - R} \quad (3)$$

$$T_a = \sum_{s=0} m K_{12} K_{34} R^s \cos(s\theta) = \frac{m K_{12} K_{34}}{2} \left[ \sum_{s=0} (Re^i)^s + \sum_{s=0} (Re^{-i})^s \right] = \frac{m K_{12} K_{34}}{2} \left[ \frac{1}{1 - Re^i} + \frac{1}{1 - Re^{-i}} \right] = \frac{m K_{12} K_{34}}{2} \frac{2 - R(e^i + e^{-i})}{1 + R^2 - R(e^i + e^{-i})} = m K_{12} K_{34} \frac{1 - R + 2R \sin^2(\frac{\theta}{2})}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2(\frac{\theta}{2})} \quad (4)$$

由式(2)、式(3)和式(4),并令调制系数  $m = 1$  可得

$$T_r = K_{12} K_{34} \left[ \frac{2 - 2R + (2R - 4 + \frac{4}{1 - R}) \sin^2(\frac{\theta}{2})}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2(\frac{\theta}{2})} \right] \quad (5)$$

根据式(5)即可做出强度调制光信号经过光纤环的传递函数曲线,如图2所示。可见光纤环输出极值光强位置在  $\theta = 2N\pi$  处,相应的信号频率为:

$$f = \frac{N \cdot c}{n \cdot l} \quad (6)$$

其中: $N$  为自然数,表示强度调制光信号在一个光纤环长度内的传输周期数。由于光纤环长度可以被外界压力、温度所改变。因此,由被测物理量锁定的光纤环输出信号最大值是由光纤环内反复循环的光功率信号的零差拍叠加所得,这样由外界物理量引起的光纤环长度变化的相位调制信号就转换为频率偏移的信号。这种频率偏移信号在理论上可以通过相干解调来消除相位噪声和白噪声,从而检测出只与光纤环长度和纤芯折射率相关的谐振频率  $f_c$ ,为了获得高性能的传感特性,频率连续变化的强度调制光源信号幅度应该是平坦的,并且相位稳定。同时频率扫描范围应与光纤环形谐振腔的谐振频率范围一致,一般取  $N = 1$  的谐振频率范围,以减小传感器体积,并可避免频率混叠现象。

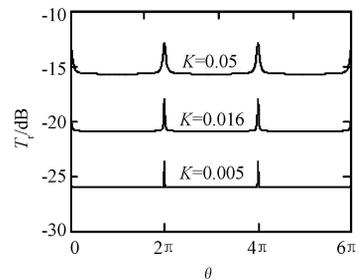


图 2 光纤环功率传递函数曲线 ( $K_{12} = K_{34} = K$ )

当外界参量(应变/温度)发生改变时,将对光纤环的折射率  $n$  和长度  $l$  发生影响。这时式(6)的形式为

$$f = - Nc \left[ \frac{1}{l \cdot n^2} n + \frac{1}{n \cdot l^2} l \right] \quad (7)$$

因此,通过检测光纤环谐振频率的移动,就能反过来得知光纤环的折射率  $n$  或长度  $l$  的变化,由式(7)还可以推导出光纤环作为传感器时的灵敏系数。

应力测量时,应力影响光纤环谐振频率是由于光纤的伸缩和弹光效应引起的。为了简化推导,设光纤仅受轴向应力作用,忽略温度和其它均匀压力场的影响,则环形光纤长度改变量为:

$$l = l \cdot \epsilon \quad (8)$$

有效折射率的变化可以由弹光系数矩阵  $P_{ij}$  和应变

张量矩阵  $n_{ij}$  表示为:

$$(1/n)^2 = \sum_{j=1}^6 P_{ij} n_{ij} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

其中  $i = 1, 2, 3$  分别代表  $x, y, z$  轴方向。由于剪切力为零,所以  $n_4 = n_5 = n_6 = 0$ 。经推导可得沿  $z$  方向传播的光波所感受到的折射率变化为:

$$n = -\frac{1}{2} n^3 \left( \frac{1}{n} \right)_{x,y} = -\frac{1}{2} n^3 (P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})) z \quad (10)$$

其中,  $P_{11}, P_{12}$  为弹光系数,  $\nu$  是纤芯材料的泊松比,将式(8)、式(10)代入式(7)可得应力引起的光纤环谐振频率位移为

$$f = -\frac{Nc}{l} \left[ \frac{n}{2} (\nu(P_{11} + P_{12}) - P_{12}) + \frac{1}{n} \right] z \quad (11)$$

温度测量时,温度变化对光纤环谐振频率的影响是由热光效应和弹光效应引起的。假设均匀应力场和轴向应力场都保持恒定,则由热膨胀效应引起的光纤长度变化为:

$$l = \alpha \cdot l \cdot T \quad (12)$$

其中  $\alpha$  为光纤的热膨胀系数。

由热光效应引起的折射率变化为:

$$n = \beta \cdot n \cdot T \quad (13)$$

其中  $\beta$  为光纤的热光系数,表示折射率随温度的变化率。将式(12)、式(13)代入式(7)即可得温度引起的光纤环谐振频率位移为

$$f = -\frac{Nc}{nl} \cdot (\alpha + \beta) \cdot T \quad (14)$$

## 2 传感器阵列的设计

将光纤环传感器做成一系列周长  $l$  各不相同的环形,从式(6)可知,对于任意两个光纤环,如果满足  $l_i \neq l_j$ ,且  $|l_i - l_j| > l_{max}$ ,则不同传感器在其各自的长度变化范围  $l_{max}$  内,谐振频率是唯一确定的。根据需要将光纤环传感器串联或者并联连接起来,就可以组成传感器的准频分复用阵列,如图3所示。

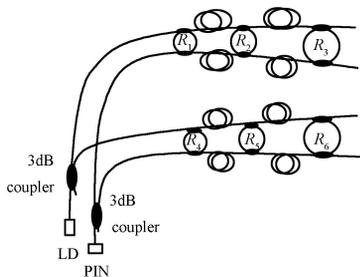


图3 准频分复用阵列

图中  $R_1 \sim R_6$  为光纤环传感器,  $R_1 \sim R_3$  和  $R_4 \sim R_6$  分别串联连接后再并联,组成拓扑传感网络。由

LD光源发出的强度调制激光经过光隔离器和耦合器进入光纤环传感器网络,并被各个光纤环传感器所反射,形成一系列反射光信号。由于每个光纤环只反射一个频率的调制光信号,当信号光源采用频率扫描调制时,光电探测器(PIN)一次最多只能接收到一个传感器的反射调制光信号,而其它传感器的反射光是强度不变的直流信号。通过检测反射调制光信号的极大值频率,就能获得被测物理量的变化量。所以当激光光源进行调制频率全程扫描时,在频率域将得到一系列彼此分立的信号强度峰值,它们与光纤环传感器的长度及折射率一一对应,所以光纤环传感器的输出信号可看作是频率编码信号,多传感器的复用方式为准频分复用方式。通过对传感器各自峰值频率的识别与位移跟踪,就可对准分布的物理量(诸如温度、应变等)进行测量与传感。在这个准频分复用结构中,扫描信号中的  $M$  个频率从独立的  $M$  个光纤环传感器中返回。构建的阵列使相邻频率不发生交叠,而且在探测端用一个与扫描信号频率同步变化的本振信号进行差频放大(图4)。一个窄带滤波器(NBF)用在解调系统中可减少背景噪声,同时也消除了传感器随机振动的影响和频率扫描过后的不完全消波所引起的相邻光纤环串扰。图中MIX为混频器,MFA为中频放大器,ED为包络检波器,DP为数据处理单元,AGC为自动增益调制,LO为本地振荡器,FSSO为扫描信号源。

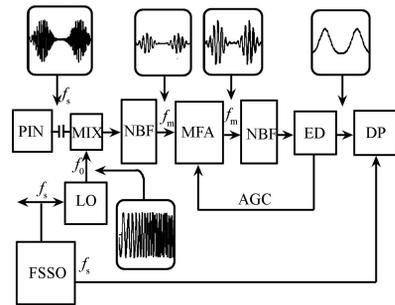
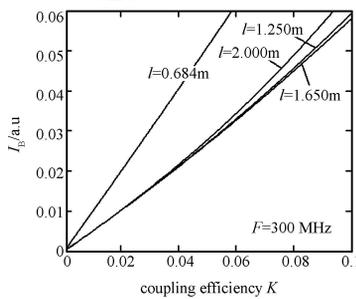


图4 基于超外差式电路的频率跟踪解调器的方框图

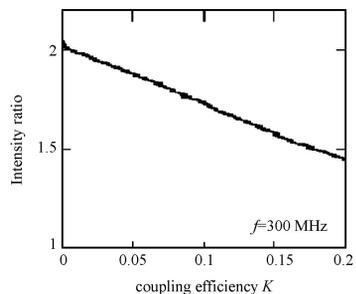
在光纤环传感器阵列中,给定光纤环长度的频率位移响应度是由在光纤环内传输的信号延迟所致,而与传感器到探测器的距离(传输时间)无关,所以光纤环传感器阵列可任意组合,即传感器可任意安放在串联或并联的传感器网络上,没有顺序要求。光纤环长度  $l$  与返回频率  $f$  的对应关系是  $f = \frac{N \cdot c}{n \cdot l}$ ,理论上,频率位移响应度正比于传输周期数  $N$ (由式(7)可知),但  $N$  增大需要同时增加光纤环长度  $l$ ,使光纤环传感器体积增大,这并不可取,所以这里取  $N = 1$ 。因此,在光纤环传感器阵列中,扫描

频率范围为:最高频率  $f_{\max} = \frac{c}{n \cdot l_{\min}} + f_m$ ,最低频率  $f_{\min} = \frac{c}{n \cdot l_{\max}} - f_m$ ,其中  $l_{\max}$ 、 $l_{\min}$  为阵列中光纤环长度的最大值和最小值,  $f_m$  为光纤环传感器的最大频率位移绝对值。在特定的光纤环传感器阵列设计中,选择合适的光纤环长度使扫描频率范围  $f_{\max} - f_{\min}$  尽可能小,以获得高的频率分辨率,提高光纤环传感器灵敏度。

为了分析光纤环传感器阵列中反射光强度变化特性,我们计算了纤芯折射率为  $n = 1.462$  (普通石英光纤,波长 1 550 nm) 在  $f = 300$  MHz 激励下,不同光纤环长度  $l$  的返回光强度  $I_B$  与耦合系数  $K$  (设  $K_{12} = K_{34} = K$ ) 的关系曲线如图 5(a)。由式(6)计算得到的反射光强极大值对应的谐振光纤环长度分别为  $l = 0.684$  m ( $N = 1$ )、 $l = 1.380$  m ( $N = 2$ ) 和  $l = 2.000$  m ( $N = 3$ )。图 5(a) 显示了耦合系数  $K$  对反射光强度的影响很大,并且耦合系数  $K$  越大,反射光强度越强,但谐振长度光信号与非谐振长度光信号的比值却随之降低,如图 5(b) 所示。图中曲线说明在  $f = 300$  MHz 激励下,谐振长度  $l = 0.684$  m 的反射光强度与非谐振长度  $l = 1.250$  m 时的反射光强度比值随耦合系数  $K$  的增大而减小的特性。另外,从图 2 中还可以看到,光纤耦合器的功率耦合系数对谐振频率带宽有较大影响,随着  $K$  值的减小,光纤环的谐振频率带宽逐渐变窄。因此光纤耦合器的功率耦合系数不能太大,比较后认为选择  $K = 0.4\% \sim 0.8\%$  较合适。



(a) 绝对光强度变化曲线



(b) 光强度比值变化曲线 ( $I_B |_{l=0.684} / I_B |_{l=1.250}$ )

当入射到光纤中的光功率为 1 mW 时,光纤环传感器阵列的反射光强度随扫描频率的变化曲线见图 6,实验结果与理论计算结果都得到相同的曲线特征,其中光纤环长度分别为 0.684 m、1.030 m、1.250 m、1.380 m、1.450 m、1.550 m 和 2.000 m,从图中可以看到在 100 ~ 200 MHz 频率范围内反射光强度峰值与光纤环长度一一对应,但在 300 MHz 附近产生频率混叠,这是因为光纤环长度  $l = 0.684$  m 在  $N = 1$  时的谐振频率约为 300 MHz,  $l = 1.380$  m 在  $N = 2$  时的谐振频率约为 297.4 MHz,  $l = 2.000$  m 在  $N = 3$  时的谐振频率约为 307.8 MHz,于是在 300 MHz 附近出现 3 个反射峰。因此在组成光纤环传感器阵列时应选择合适的光纤环长度和扫描频率,避免出现这种频率混叠现象。

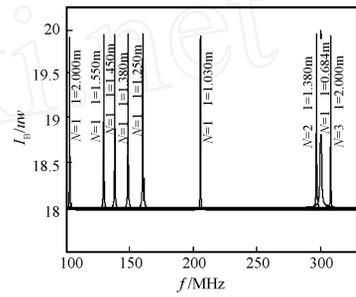


图 6 不同长度光纤环的谐振频率

由式(11)和式(14)可知,要提高传感系统的分辨率,理论上可通过提高扫描频率分辨率而得到。当扫描频率分辨率为 1 kHz、石英光纤环长度为 1.50 m 时,理论计算和实验验证了光纤环传感器可检测到 10 的应变和 0.1 的温度变化。另外,采用折叠环结构的光纤环传感器也可提高应变测量灵敏度,测量温度时可利用增敏材料来获得高的灵敏度<sup>[3]</sup>。

### 3 结束语

提出一种新颖有效的基于强度调制技术的频率编码光纤环传感器。通过对传感器各自返回信号峰值频率的识别与位移跟踪,实现了对传感器阵列的准频分复用寻址,从而检测准分布的物理量。结果表明,强度调制传感网络中光纤环传感器的耦合效率对反射信号特性有较大影响,光纤耦合器的功率耦合系数不能太大,一般选择  $K = 0.4\% \sim 0.8\%$  较合适,而光纤环的长度取  $N = 1$  的谐振长度可以减小传感器体积,并避免频率混叠现象。由于采用准频分复用网络,检测的传感器反射信号只与频率有关,与距离(传输时间)无关,所以光纤环传感器阵列可任意组合,没有顺序要求,组网灵活。另外,在接

收端采用超外差解调方式,提高了光纤环传感器的检测灵敏度。

#### 参考文献:

- [1] 沈震强,赵建林,张晓娟. 光纤光栅法布里-珀罗传感器频分复用技术[J]. 光学学报,2007,27(27):1173-1177.
- [2] 周广东,李宏男,任亮等. 光纤光栅传感器应变传递影响参数研究[J]. 工程力学,2007,24(6):169-173,97.
- [3] Byoung-ho Lee. Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors [J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9 :57-79.
- [4] 孙安 陈嘉琳 李国扬等. 基于高频微波技术的分布式光纤传感器布里渊散射信号检测[J]. 中国激光,2007,34(4):503-506.
- [5] Brian Culshaw. Fiber Optics in Sensing and Measurement [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,2000,6(6):1014-1021.
- [6] 杨军,苑立波. 具有嵌入式环形拓扑结构的光纤传感器网络. 中国激光,2005,32(10):1391-1396.
- [7] John E. Heebner, Vincent Wong, Aaron Schweinsberg, Robert W. Boyd, and Deborah J. Jackson. Optical Transmission Characteristics of Fiber Ring Resonators [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6):726-730.
- [8] Kazuo Honda, Elsa M. Garmire, Keith E. Wilson. Characteristics of an Integrated Optics Ring Resonator Fabricated in Glass [J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, L T-2(5):714-719.
- [9] 李秋实,罗洪,孟洲,胡永明. 同轴干涉型光纤水听器声压灵敏度特性分析[J]. 测试技术学报,2005,19(4):403-407.



孟爽(1983-),女,辽宁省昌图县人,硕士研究生,主要从事光纤传感技术的研究,mengs@hqu.edu.cn



庄其仁(1960-),男,福建省泉州市人,研究员,主要从事光纤传感和信号检测技术,qzhuang@hqu.edu.cn