

文章编号: 0253-2239(2005)06-731-6

白光干涉双环传感网络理论与实验研究*

杨 军 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 哈尔滨 150001)

摘要: 构造了一种基于双环形拓扑结构的白光干涉光纤传感网络,可用于智能结构中准分布应变或温度的测量。光纤传感网络基于空分多路复用技术(SDM),目的是增强带载能力,降低单点传感器的测量成本,并借助于双端口问询技术,增强传感网络的抗破坏能力。分析了环形网络结构的低相干多路复用原理,根据空分复用的光程匹配条件,推导了传感器干涉信号的强度特性。实验中对连接 9 个传感器的双环传感网络特征及其抗破坏特性进行了验证,并对实验结果进行了分析和讨论。

关键词: 导波与光纤光学; 多路复用; 双环拓扑形结构; 传感网络

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Theoretical and Experimental Study on White-Light Interferometric Sensing Network with Double-Ring Topology

Yang Jun Yuan Libo

(Photonics Research Center, School of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: A white-light interferometric fiber optical sensing network based on the double-ring topology is demonstrated, which can be applied to the measurements of quasi-distributed strain and temperature in a smart structure. In order to increase the multiplexing capacity, decrease the measurement cost of each single point sensor, and improve the ability to resist destruction of the sensor network by resorting to the double-port inquiring technology, the double-ring fiber optical sensing network based on the space division multiplexing (SDM) is further developed. The low-coherent multiplexing principle in the double-ring network structure is analyzed. And based on the optical path matching condition of space division multiplexing, the intensity characteristic of the interference signal in the sensor is deduced. The characteristics of double-ring sensing network connecting 9 sensors and its property of resisting destruction are verified by experiments, and the results of experiments are analyzed and discussed.

Key words: guided wave and fiber optics; multiplexing; double-ring topology structure; sensing network

1 引 言

基于低相干光纤干涉仪原理^[1]的光纤传感系统,可十分方便地实现多路复用^[2]。低相干光纤测量技术经过近 20 年的研究,已经发展了多种基于空分复用技术^[3]的多路复用方法。从结构上分,大体有串行多路复用技术^[3,4]、并行多路复用技术^[5]以及环形拓扑^[6,7]复用技术。理论和实验表明,通过对白光干涉传感系统结构的改进和优化^[3,8],同样可以达到提高信噪比,增强多路复用能力的目的。本

文在单环网络的基础上,构造出双环白光干涉多路复用的拓扑结构,采用双端口问询技术,在降低单点传感器测量成本的同时,增加传感器阵列的抗破坏能力,以满足实际工程中对分布式光纤应变或温度传感网络的需求。

2 白光干涉测量原理

典型的白光光纤干涉仪的结构,如图 1 所示。图

* 国家自然科学基金(50179007)和教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助课题。

作者简介: 杨 军(1976~),男,山东省即墨县人,哈尔滨工程大学理学院讲师,硕士,主要从事光纤传感技术、光纤智能结构方面的研究。E-mail: yangjun141@263.net

收稿日期: 2003-12-08; 收到修改稿日期: 2005-02-01

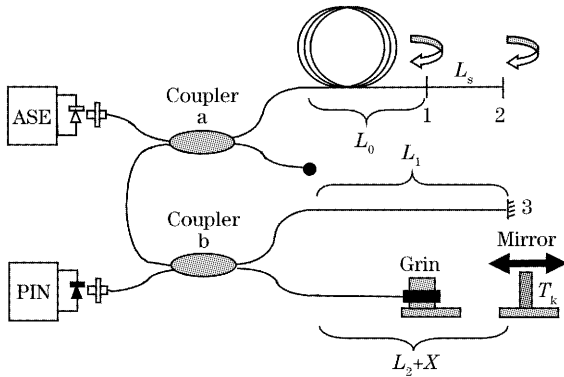


图 1 典型光纤白光干涉仪的结构

Fig. 1 Configuration of white-light interferometer

中 a、b 为 2 个 2×2 的 3dB 单模光纤耦合器(其插入损耗分别为 α_a 、 α_b)，其中耦合器 a 通过长度为 L_0 的尾纤连接于光纤传感器。传感器由一段单模光纤组成， L_s 定义为光纤自然解理面 1、2 之间的距离。光纤耦合器 b 形成一个非对称麦克耳孙干涉仪(参考干涉仪)，其中一臂 L_1 的末端经过镀膜处理作为固定反射端，其反射率为 R_f ，另一臂 L_2 作为光程扫描臂，由自聚焦透镜(GRIN)和移动镜面组成的光学反射系统构成，其反射率为 R_g ，插入损耗记为 $\eta(x)$ 。

当干涉仪工作时，由放大自发辐射光源(ASE)发出的宽谱光，经过光耦合器 a 进入尾纤 L_0 ，被光纤传感器的 1、2 端面所反射，形成具有一定光程差信号光，此信号光再经过耦合器 a 后，射入麦克耳孙干涉仪，并同样被固定端和扫描端反射。反射信号再经过耦合器 b 到达光电探测器 PIN，经探测接收转换为电信号。由于光源的光谱具有一定宽度，只有当麦克耳孙干涉仪两臂之间与传感器两反射面之间产生的光程差小于相干长度 L_c 时，光信号才能发生干涉；当二者绝对相等时，光干涉条纹出现主极大值，称此时干涉仪达到光程匹配，即满足^[9]

$$n_0 \Delta L + X = n_0 L_s, \quad (1)$$

式中 $\Delta L = L_2 - L_1$ ，表示麦克耳孙干涉仪两臂光纤长度差； X 为自聚焦透镜与光学反射器之间的距离； n_0 为光纤芯折射率。

由(1)式可得

$$L_s = \Delta L + X/n_0, \quad (2)$$

式中对于参考干涉仪而言 n_0 与 ΔL 均为常量。(2)式清晰地表达出传感器的长度与移动扫描镜的空间位置一一对应，传感器受到外界物理量(诸如：温度、形变、应变、压力等)作用所引起的长度变化，可以通过检测干涉峰值位置 X 的变化量而得到，此式是干涉条纹解调和传感测量的基础。

同其他光学干涉原理一样，白光干涉的强度输出的表达式为^[9]

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 \cdot I_2} |\gamma(x)| \cos(k \cdot x + \phi), \quad (3)$$

式中 I_1 、 I_2 为两干涉信号强度， k 为波数， x 为两干涉信号光程差， ϕ 为初始相位， $\gamma(x)$ 为光源自相关函数。

白光干涉信号的识别通常采用中心条纹的识别方法^[5~8]，(3)式中交流项振幅极大值 I_{am-max} 一般作为识别的特征信号，根据(1)式的光程匹配关系， I_{am-max} 可表示为

$$I_{am-max} = 2I_0 \left(\frac{\alpha_a}{2}\right)^2 \left(\frac{\alpha_b}{2}\right)^2 R \cdot T \cdot \beta \sqrt{R_g R_f \eta(x)}, \quad (4)$$

式中 I_0 为光源光强； R 、 T 及 β 表示传感器 1、2 端面的反射率、透射率和插入损耗。 R_f 、 R_g 分别为参考干涉仪的扫描镜以及固定反射端的反射率， $\eta(x)$ 为扫描镜位置所对应的插入损耗。

3 双环传感网络结构

白光干涉原理的优点是很容易进行多路复用。从(2)式中可知，如果对于图 1 所示白光干涉仪连接多个传感器的情况，只要满足 $l_i \neq l_j$ 且 $l_i - l_j \geq L_c$ (L_c 为光源相干长度)，则不同传感器在其各自的空间内，只存在单一的白光干涉信号。在光程扫描空间内，这种基于干涉信号分立而复用的技术，称为空分复用技术(SDM)。

基于空分复用技术，可以用载有分布式传感器的双环形结构来替换图 1 中的单一光纤传感器，从而形成光纤传感网络，如图 2 所示。图中，传感网络由两个 2×2 的 3 dB 耦合器 a 和 c 互连而成，构成两环形腔 d 和 e，环形腔内的各个臂上排列着若干个光纤传感器。

假设 d 环的上、下臂传感阵列以串行方式分别连接着 m 和 n 个光纤传感器，而环形腔 e 中共挂接 p 个传感器，传感器的长度分别为 $l_1, l_2, \dots, l_m, l_1, l_2, \dots, l_n$ 和 l_1, l_2, \dots, l_p ，双环传感网络中传感器排列及信号传播特性如图 3 所示。由传感器长度的定义可知，在 d 环和 e 环中分别存在 $1 \sim m+1$ 、 $1 \sim n+1$ 和 $1 \sim p+1$ 个光学反射面(如图 2 中一系列竖线所示)，对于第 k 反射端面，假设其反射率为 R_k ，透射率为 T_k ，插入损耗为 β_k 。

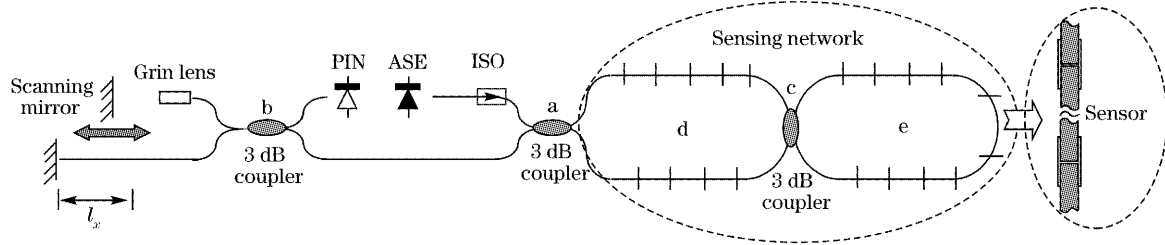


图 2 基于双环形网络拓扑结构的低相干光纤干涉仪

Fig. 2 Low-coherent fiber optical interferometer based on double-ring network topological structure

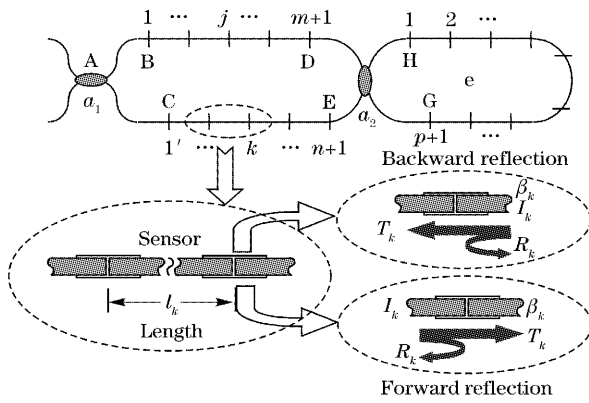


图 3 双环形网络中传感器的排布以及信号分析示意图

Fig. 3 Arrangement of sensors in the double-ring network and the demonstration of signal analysis

4 信号输出特性

如图 3 所示,激励信号光在双环网络中传输时,会受到网络中各个传感器端面的反射,与简单的串、并联式多路复用结构的情况不同,存在前、后两个方向的传播路径,较为复杂。但就传感器的位置和光信号的传播路径而言,存在着一定的对称性,即 d 环上、下臂阵列中的传感器具有完全的对称性,e 环中传感器的前、后向反射信号存在对称性;而 d 环上、

下臂的前、后向反射光信号的传播路径是不同的。所以对于双环网络的传感器信号输出特性的分析,只需要区分 d 环上、下臂阵列中的前、后向反射以及 e 环中光信号三种情况即可。

对于网络中光纤传感器的解调,一般采用对白光干涉信号主极大值的识别和跟踪来完成。与单一传感器的情况类似,同样需要考查光纤传感器信号输出的特征量——交流振幅极大值 I_{am-max} 。所以,对双环网络中各传感器信号特性的分析,就是根据(2)式得到的光程匹配条件,结合与文献[7]相类似的光程追踪分析方法,推导 I_{am-max} 表达式的过程。

为了分析方便,参量定义及部分假设条件如下:

1) 网络中任意传感器 k 的长度为 l_k ,传感器的平均长度为 l_0 ;假设传感器之间的长度差异较小,即满足 $l_k \approx l_0$,并且对于任意两个传感器 k, j 长度均不相等,即有 $l_k \neq l_j$ 。

2) 光纤耦合器 a、b、c 的分束比均为 3 dB,其附加损耗分别为 α_1 、 α_2 和 α_3 。

3) 对于第 k 反射端面,忽略前、后向光信号之间反射率 R_k ,透射率 T_k 和插入损耗 β_k 的差异。

对于分布于双环形结构 d 环上臂阵列中的传感器 k ,其白光干涉峰值强度 I_{am-max} 表示为

$$I_{j,j+1} = I_0 \alpha_{s,j} \left(\frac{\alpha_1}{2} \right)^2 \left\{ \left[\prod_{i=2}^j (T_i \beta_i)^2 \right] \sqrt{R_j R_{j+1} (T_j \beta_j)^2} + \frac{(\alpha_3 \alpha_{ACF} / 2)^2}{(1 - \alpha_3 \alpha_e / 2)^2} \left[\prod_{i=j+2}^{m+1} (T_i \beta_i)^2 \right] \sqrt{R_j R_{j+1} (T_{j+1} \beta_{j+1})^2} \right\},$$

$$j = 1, 2, \dots, m+1$$

$$\prod_{i=1}^j (T_i \beta_i)^2 = 1, \quad i > j, \quad (5)$$

同样,对于分布于双环形结构 d 环下臂阵列中的传感器 j ,其白光干涉峰值强度为

$$I_{k,k+1} = I_0 \alpha_{s,k} \left(\frac{\alpha_1}{2} \right)^2 \left\{ \left[\prod_{i=2}^k (T_i \beta_i)^2 \right] \sqrt{R_k R_{k+1} (T_k \beta_k)^2} + \frac{(\alpha_3 \alpha_{ABF} / 2)^2}{(1 - \alpha_3 \alpha_e / 2)^2} \left[\prod_{i=k+2}^{n+1} (T_i \beta_i)^2 \right] \sqrt{R_k R_{k+1} (T_{k+1} \beta_{k+1})^2} \right\},$$

$$k = 1, 2, \dots, n+1$$

$$\prod_{i=1}^k (T_i \beta_i)^2 = 1, \quad i > j, \quad (6)$$

式中 I_0 为光源光强; α_{ABF} 、 α_{ACF} 和 α_e 分别为信号光通过 d 环上臂、下臂以及 e 环的衰减因子,定义为 $\alpha_{ABF} =$

$$\prod_{i=1}^{m+1} (T_i \beta_i), \alpha_{ACF} = \prod_{i=1}^{p+1} (T_i \beta_i) \text{ 和 } \alpha_e = \prod_{i=1}^{p+1} (T_i \beta_i); \alpha_{s,j} \text{ 表示参考干涉仪解调传感器 } k \text{ 所引入的衰减因子, 定义为 } \alpha_{s,j} = (\alpha_2/2)^2 \sqrt{R_f R_g \eta(x_j, x_{j+1})}, \eta(x_j, x_{j+1}) \text{ 为对应第 } k \text{ 传感器的扫描镜位置所对应的插入损耗, 常数与形式相同.}$$

而 e 环阵列中光纤传感器 j 的干涉信号峰值强度可以表示为

$$I_{j,j+1} = I_0 \frac{\alpha_{s,j} (\alpha_1 \alpha_3 / 4)^2}{(1 - \alpha_a \alpha_e / 2)^2} \left\{ \alpha_{ACF}^2 \sqrt{R_j R_{j+1}} (T_j \beta_j)^2 \left[\prod_{i=j+2}^{m+1} (T_i \beta_i)^2 \right] + \alpha_{ABF}^2 \sqrt{R_j R_{j+1}} (T_{j+1} \beta_{j+1})^2 \left[\prod_{i=j+2}^{m+1} (T_i \beta_i)^2 \right] \right\},$$

$$j = 1, 2, \dots, p+1$$

$$\prod_{i=1}^j (T_i \beta_i)^2 = 1, \quad i > j, \quad (7)$$

式中的参量意义同上。

根据前述的假设, 传感器端面反射率都相同, 取 $R=0.02$ (取菲涅耳 4% 反射率的一半); 传感器之间的插入损耗系数为 $\beta=0.9$, 相应的透射系数为 $T=0.88$; 光源 (ASE) 出射光强 I_0 取为 1 mW (0 dBm), 可得到如图 3 所示的双环网络中光纤传感器白光干涉峰值强度的仿真特性。

图 4 中双环传感网络共连接传感器 12 个, 其中

d 环、e 环各连接 6 个。图 4(a) 表示 d 环中的上、下臂阵列中各分布 3 个传感器干涉峰值强度特性; 而图 4(b) 表示 d 环中的上臂阵列或者下臂阵列中一次性分布 6 个传感器的强度特性。无论图 4(a), 还是图 4(b), d 环传感器的信号输出大于 e 环; 而比较图 4(a) 和图 4(b) 可知: e 环传感器信号输出受 d 环传感器上下臂个数分布的影响, 究其原因是由于 d 环上、下臂衰减因子和所致。

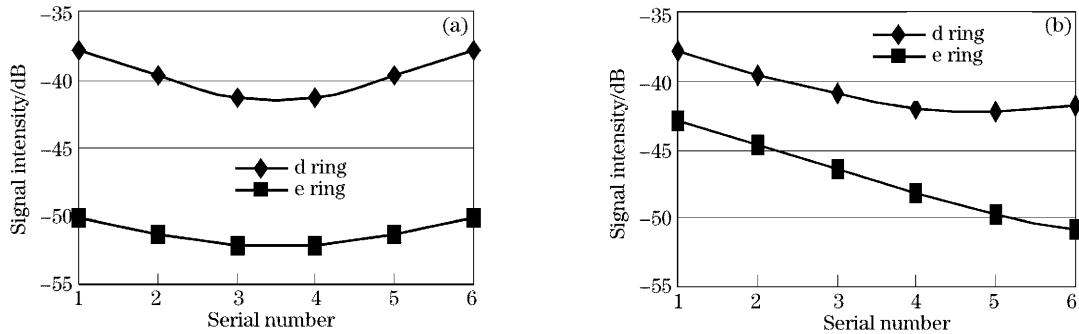


图 4 双环传感网络信号输出特性仿真结果

Fig. 4 Simulation results of the output signal characteristic in a double-ring sensing network

5 实验结果与分析

对双环传感网络连接 9 个传感器的情况进行实验研究。实验装置如图 2 所示, 宽谱光源 (ASE) 出纤功率为 1 mW, 波长为 1550 nm; 扫描臂的光程扫描范围为 0~400 mm (空气中), 平均插入损耗

5 dB, 波动小于 0.2 dB。双环传感网络的传感器连接如图 5 所示。光纤传感器的长度取为 510 mm 左右, 见表 1。其编号为 $S_1 \sim S_9$, 分布在 d 环上臂、d 环下臂以及 e 环内各 3 个; $L_1 \sim L_5$, 分别为 S_3 与耦合器 c、 S_6 与耦合器 c、 S_4 与 S_5 、 S_2 与 S_3 、以及 S_8 与 S_9 之间的光纤连接线。图 6 为传感网络信号输出特性, 图 7~图 12 为模拟局部损坏的实验结果。

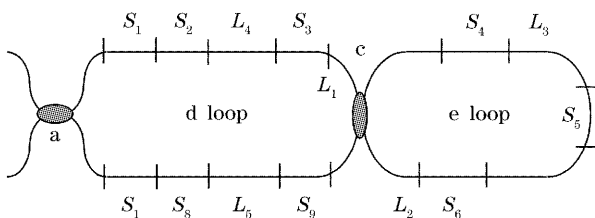


图 5 光纤传感器连接位置示意图

Fig. 5 Demonstration of fiber optical sensor connecting location

表 1 光纤传感器长度

Table 1 Fiber optical sensors length

| Number | Length /mm | Number | Length /mm |
|--------|------------|--------|------------|
| S_1 | 510.89 | S_8 | 500.05 |
| S_2 | 510.10 | S_7 | 498.47 |
| S_3 | 507.53 | S_8 | 497.42 |
| S_4 | 503.56 | S_9 | 496.74 |
| S_5 | 501.66 | | |

双环传感网络及模拟损坏实验结果：

1) 图 6 结果显示:传感器输出信号幅度的趋势与理论计算结果基本符合,强度上的差异来自于传感器端面反射率的不一致;

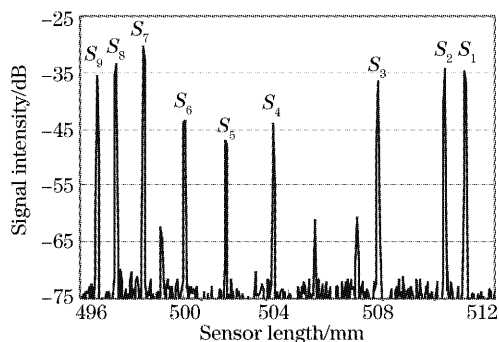


图 6 双环传感网络信号输出特性
Fig. 6 Output characteristic of double-ring sensing network

2) 图 7~图 9 实验结果显示:只断开 d 环或者 e 环的一臂,网络中的传感器并不失效但同图 6 相比,传感器的信号幅度有不同程度的减小,其中 e 环中的传感器较明显;

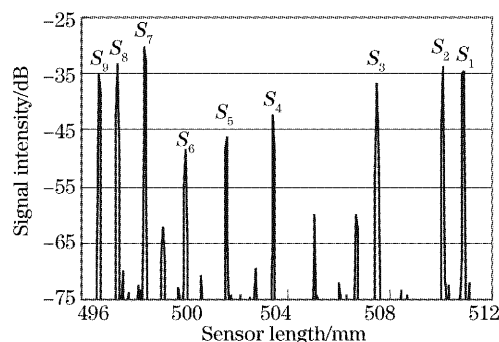


图 7 断开 L1 传感网络输出特性
Fig. 7 Output characteristic of sensing network with opened L1

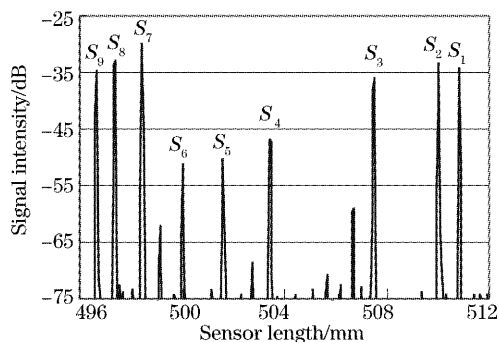


图 8 断开 L2 传感网络输出特性
Fig. 8 Output characteristic of double-ring network with opened L2

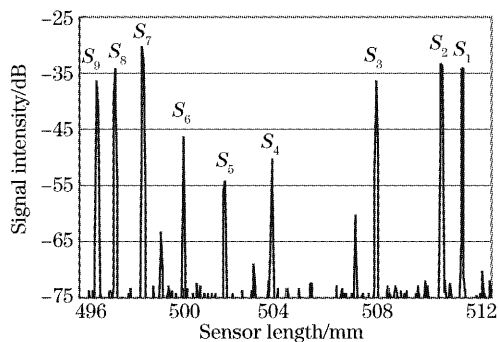


图 9 断开 L3 传感网络输出特性
Fig. 9 Output characteristic of double-ring with opened L3

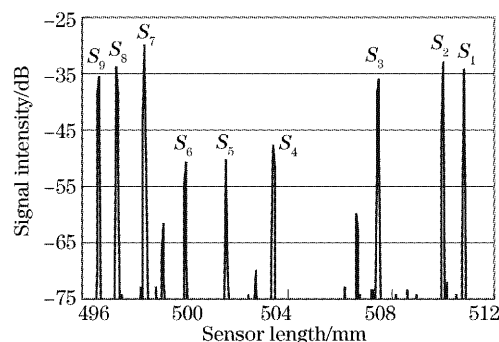


图 10 断开 L1 和 L2 传感网络输出特性
Fig. 10 Output characteristic of sensing network with opened L1 and L2

3) 图 11 与图 12 实验结果显示,如果断开 d 环和 e 环中的各一臂,则失效产生在 e 环,具体为与 d 环失效臂相对的一侧传感器全部失效;而对于 d 环的传感器无影响,但是除个别传感器外,其输出幅度都有不同程度的减少;

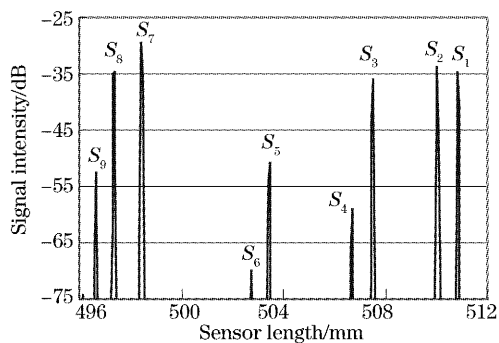


图 11 断开 L3 和 L4 传感网络输出特性
Fig. 11 Output characteristic of sensing network with opened L3 and L4

4) 如图 10 所示,如果恰巧断开的两臂分别是 d 环和 e 环中的相对的两臂,则同样可以避免传感器的失效,幅度减小的程度与 3)同。

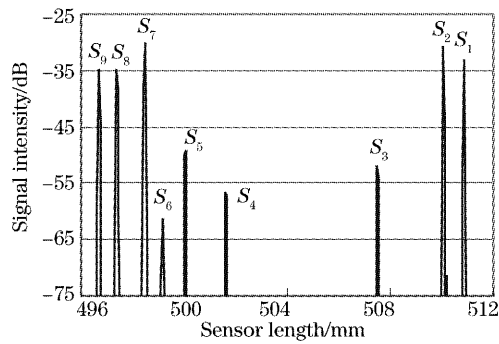


图 12 断开 L_3 和 L_5 传感网络输出特性
Fig. 12 Output characteristic of sensing network
with opened L_3 and L_5

6 结 论

通过上述实验结果,可以得到如下结论:

1) 双环结构与串联式^[3,4]或者并联式^[5]复用结构相比,增大了传感器信号输出,增加了传感器的连接个数,增强了解调系统的多路复用能力;

2) 与单环结构^[6,7]相比,提高了传感器阵列的抗毁坏能力。避免或者改善了传感器或者连接线缆的局部损坏导致阵列整体失效的问题。可见,双环拓扑网络结构增强了系统的可靠性,能够更加有效的抵御光纤传感器网络系统局部损坏对整体的影响。

参 考 文 献

- 1 Born M, Wolf E. *Principles of Optics* [M]. 6th ed., New York: Pergamon, 1980
- 2 Brooks J, Wentworth R, Youngquist R. Tur. Coherence multiplexing of fiber-optic interferometric sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(5): 1062~1072
- 3 Sorin W V, Baney D M. Multiplexed sensing using optical low-coherence reflectometry[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(8): 917~919
- 4 Stefan McMurtry, John D. Wright, David A. Jackson. A multiplexed low coherence interferometric system for humidity sensing[J]. *Sensors and Actuators B*, 2000, **67**(1~2): 52~56
- 5 Libo Yuan, Limin Zhou. $1 \times N$ star coupler as a distributed fiber optic strain sensor in a white light interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(19): 4168~4172
- 6 Libo Yuan, Wei Jin, Limin Zhou *et al.*. Enhanced multiplexing capacity of low-coherence reflectometric sensors with a loop topology [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1157~1159
- 7 Libo Yuan, Limin Zhou, Wei Jin *et al.*. Design of a fiber-optic quasi-distributed strain sensors ring network based on a white-light interferometric multiplexing technique [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(34): 7205~7211
- 8 Jiang Jian, Rao Yuanjiang, Ren Zengling *et al.*. A novel extrinsic fiber-optic Fabry-Pero interferometric sensing 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系统 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 183~186
- 9 Rao Y J, Jackson D A. Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(7): 981~999