

基于 Lissajous 图形的光纤分布式扰动传感器定位方法

梁生^{1,2}, 盛新志^{1,2}, 娄淑琴³, 陈京惠³, 董宏辉²

- (1. 北京交通大学理学院物理系光信息科学与技术研究所教育部发光与光信息技术重点实验室, 北京 100044; 2. 轨道交通控制与安全国家重点实验室(北京交通大学), 北京 100044;
3. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 研究了一种基于 Lissajous 图形的光纤分布式扰动传感器定位方法。光纤分布式扰动传感器基于 Mach-Zehnder 干涉仪, 通过两路输出信号的时延得到扰动定位。在两路输出信号的 Lissajous 图形中构造拟合椭圆, 基于实验数据的仿真研究表明: 通过椭圆半短轴长可以得到时延, 实现定位。对该方法进行了仿真和实验研究, 在无需噪声抑制的条件下定位精度较高: 在信噪比为 -6~7 dB 范围, 最大定位误差为 207 m; 多次测量中, 最大误差为 94 m。研究结论可以为光纤分布式扰动传感器定位方法提供新的技术参考。

关键词: 光纤分布式扰动传感器; Mach-Zehnder 干涉仪; Lissajous 图形; 定位算法; 拟合椭圆
中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1896-06

Novel extended lissajous figure based location method for fiber-optic distributed disturbance sensor

Liang Sheng^{1,2}, Sheng Xinzhi^{1,2}, Lou Shuqin³, Chen Jinghui³, Dong Honghui²

- (1. Key Laboratory of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Department of Physics, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;)

Abstract: A location method based on the extended Lissajous figure was proposed for fiber-optic distributed disturbance sensor based on Mach-Zehnder interferometer. The disturbance was located by the fiber-optic distributed disturbance sensor due to the time delay between the two signals from clockwise and counter-clockwise Mach-Zehnder interferometer. In the Lissajous figure of the two signals, a fitting ellipse with constant semimajor and azimuths was induced to evaluate the time delay. The relationship between the time delay and semiminor of the ellipse was obtained by linear fitting. Then, the time delay could be calculated by the semiminor of the fitting ellipse. By the simulation with experimental data and experimental test, it is found that the proposed lower location errors can be obtained by the location method than current cross correlation function based method without phase generation carrier technique.

Key words: fiber-optic distributed disturbance sensor; Mach-Zehnder interferometer; lissajous figure; location method; fitting ellipse

收稿日期: 2012-11-16; 修订日期: 2012-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(61205074); 教育部博士点基金(20120009120041); 轨道交通控制与安全国家重点实验室项目(RCS2012K007)

作者简介: 梁生(1981-), 男, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: shliang@bjtu.edu.cn

0 引言

光纤分布式扰动传感器能够对传感光纤上任意一点扰动进行探测和定位,凭借其监测距离长、可连续定位以及无需外场供电等重要技术优势,广泛应用于周界安防、油气管线预警、通信线路监测以及大型结构监测^[1-24]。

在光纤分布式扰动传感器的多种实现方案中,基于 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪方案以结构简单、定位精度高、灵敏度高和敏感振动频谱宽以及无需相位解调等优势成为目前分布式光纤扰动传感器的主流技术方案^[1-6]。M-Z 干涉仪光纤分布式扰动传感器通过检测两个方向干涉仪输出的时延实现对扰动的定位,基于时延差检测的定位方法一直是研究热点^[1-6]。

现有定位方法主要有基于互相关函数及多种时延估计算法。基于互相关函数的定位方法需要对传感器输出信号进行降噪处理,为了抑制和消除相位缓变和偏振衰落的影响,通常还需要采用 PGC 技术,增加了系统的复杂性和硬件成本;时延估计算法由于复杂性和较长的响应时间限制了其在实际应用中的推广。因此,针对 M-Z 干涉仪光纤分布式扰动传感器研究探索在无需附加 PGC 技术情况下的算法简单、适用于低信噪比情况下的定位算法对推动光纤分布式扰动传感器的实用化具有重要意义。文中分析了 M-Z 干涉仪光纤分布式扰动传感器的输出信号 Lissajous 图形与信号时延之间的理论关系,通过对 Lissajous 图形特征量的提取和计算得到时延,实现定位。文中提出的定位方法可以为进一步提高光纤分布式扰动传感器的定位精度提供有益的技术参考。

1 Mach-Zehnder 干涉仪光纤分布式扰动传感器系统装置及其原理

M-Z 光纤分布式扰动传感器的原理如图 1 所示^[1-6]:激光光源输出的光波进入光纤耦合器 1,分为两路光波分别通过光纤耦合器 2 和 3 从顺时针和逆时针方向通过 M-Z 干涉仪分别进入光电探测器 1 和 2。当在传感光纤 a 和 b 发生扰动时,M-Z 干涉仪中传输光波的相位会被调制 $\Delta\varphi$,顺时针和逆时针方向 M-Z 干涉仪的输出光强由光电探测器 1 和 2 分

别接收,可以表示为:

$$I_1(t) = I_1 \{1 + K_1 \cos[\Delta\varphi(t-t_1) + \varphi_0]\} \quad (1)$$

$$I_2(t) = I_2 \{1 + K_2 \cos[\Delta\varphi(t-t_2-t_3) + \varphi_0]\} \quad (2)$$

式中: t_1 、 t_2 和 t_3 分别为光波通过光纤 L_1 、 L_2 和 L_3 的传输时间。 I_1 和 I_2 分别由干涉仪输入光强决定, K_1 和 K_2 分别为两个方向 M-Z 干涉仪的可见度,在忽略偏振衰落时,可以认为 $K_1=K_2=1$ 。 φ_0 为 M-Z 干涉仪初始相位,由 M-Z 干涉仪臂长差决定。被光电探测器接收的光强信号 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 之间存在时延 $\tau=t_2+t_3-t_1$,忽略激光光源至光纤耦合器 1 以及光电探测器 1 至光纤耦合器 2 之间的光纤长度,扰动发生的位置可以通过检测时延 τ 得到:

$$L_1 = \frac{1}{2}(L_1+L_2+L_3-c \cdot \tau/n) \quad (3)$$

式中: c 和 n 分别为真空中的光速以及光纤线芯的有效折射率。上式表明:通过计算 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 的时延 τ 可以实现扰动定位。现有基于互相关函数的定位方法为:计算 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 的互相关函数 $R(I_1, I_2)$,根据 $R(I_1, I_2)$ 的极值对应的采样点可以确定 τ ,计算得出扰动距离光纤耦合器 2 的位置 L_1 ^[1-6]。

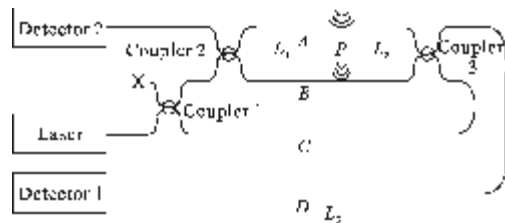


图 1 Mach-Zehnder 干涉仪光纤分布式扰动传感器原理示意图
Fig.1 Schematic illustration of the Mach-Zehnder interferometer based on FDDS

2 Lissajous 图形定位方法

Lissajous 图形通常用来描述两个相互垂直简谐振动的合振动轨迹^[25-26]。当两分振动的频率比和振幅比恒定时,合振动的 Lissajous 图形仅与分振动的相位差即时延有关。两个振动方向相互垂直、频率相同的简谐振动的 Lissajous 图形为椭圆。将简谐振动推广到扰动信号,光纤扰动传感器输出信号 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 可以分别视为多个简谐振动的叠加,因此, $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 的 Lissajous 图形可以视为若干椭圆的叠加。

为了研究 M-Z 干涉仪光纤分布式扰动传感器输出信号 Lissajous 图形与时延之间的理论关系,分

别给出对光强信号的采样频率 $f_s=2\text{ MHz}$ 条件下,不同时延(即不同扰动位置)信号的 Lissajous 图形。其中,时延分别为 $\tau=10T_s$ (T_s 为采样周期)和 $\tau=15T_s$ 的 M-Z 干涉仪光纤分布式扰动传感器输出信号如图 2 所示。

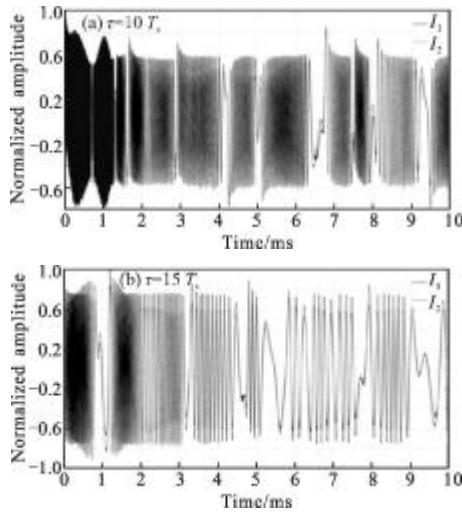


图 2 归一化 M-Z 干涉仪光纤分布式扰动传感器输出信号
Fig.2 Normalized signals of Mach-Zehnder interferometer based FDDS with different time delay

相应地,不同时延信号的 Lissajous 图形如图 3 所示。可以发现:在 Lissajous 图形 I_1-I_2 中,坐标点在一定范围密集分布,通过一个中心坐标在 $(0,0)$ 、方

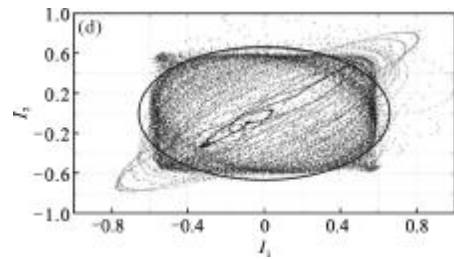
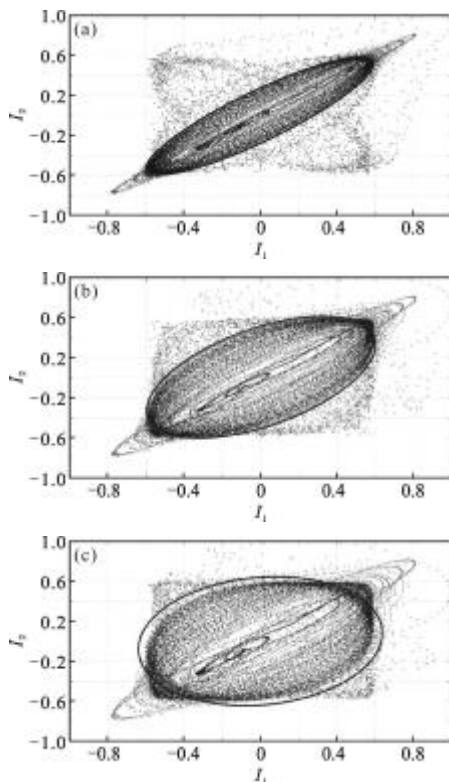


图 3 不同时延信号的 Lissajous 图形

Fig.3 Lissajous figures for different time delay

位角约为 45° 的拟合椭圆描述该分布区域,分布在拟合椭圆区域内的点的概率(比值) p 保持特定值情况下,拟合椭圆的半长轴 a 和半短轴 b 的长度与随时延的变化。图 3 中的拟合椭圆参数由表 1 给出。

表 1 Lissajous 图形拟合椭圆参数

Tab.1 Parameters for fitting ellipse in Lissajous figure

Fig.3	τ	O	γ	a	b	p
(a)	$5T_s$	(0,0)	45°	0.82	0.2	79.35%
(b)	$10T_s$	(0,0)	45°	0.75	0.4	78.11%
(c)	$15T_s$	(0,0)	15°	0.68	0.6	80.99%
(d)	$20T_s$	(0,0)	5°	0.66	0.66	82.92%

从表 1 的数据中可以发现:拟合椭圆的半短轴 b 对时延呈单调敏感变化,在方位角、半长轴以及概率比值确定的情况下,可以尝试将拟合椭圆的半短轴作为计算时延的变量。

特别地,固定拟合椭圆的方位角、半长轴和概率比值分别为 45° 、0.83 及 80%,对于任意时延信号的 Lissajous 图形,从 0 开始增加拟合椭圆的半短轴长度,根据多次计算结果比较,将 80%比值作为判断阈值,在拟合椭圆内的坐标点数比值达到 80%时,记录此时的半短轴长度 b ,得到半短轴长度 b 与时延 τ 之间的关系,如图 4 所示。半短轴长度 b 与时延 τ 之间呈现近似线性关系,通过线性拟合,得到:

$$b=0.028(f_s \cdot \tau)+0.032 \quad (4)$$

由公式(4),在得到拟合椭圆半短轴长度 b 时,可以计算得到时延 τ :

$$\tau=T_s(b-0.032)/0.028 \quad (5)$$

Lissajous 图形定位方法的流程如图 5 所示。由输入的 I_1, I_2 得到 Lissajous 图形,拟合椭圆的中心在 $(0,0)$,方位角为 45° ,半长轴长度为 0.83,半短轴长度初始值为 0,以步长 Δb 递增,判断在拟合椭圆内

的坐标点比值达到 80%时确定此时半短轴长度 b , 通过公式(5)计算得到 τ ,由公式(3)计算得到扰动位置。

基于 Lissajous 图形的定位方法的定位分辨率由传感器对光电探测器输出信号的采样频率决定。

$$L_r = \frac{c}{2nf_s} \quad (6)$$

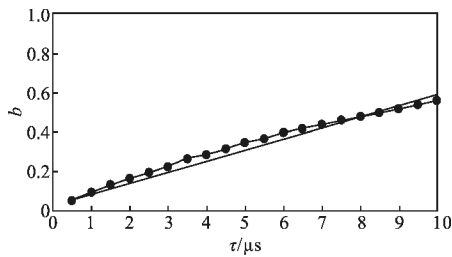


图 4 半短轴长度 b 与时延 τ 之间的关系 ($a=0.83, p=80\%$)

Fig.4 Relationship between semi-minor b and time delay τ ($a=0.83, p=80\%$)

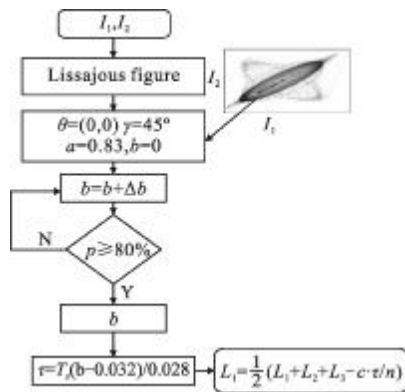


图 5 Lissajous 图形定位方法流程图

Fig.5 Procedure of the proposed location method based on Lissajous figure

3 噪声影响下的 Lissajous 图形定位方法

为了验证所提出方法在噪声影响下的性能,基于图 2(a)的信号波形,认为此时信号为理想无噪声信号 $I_{01}(t)$ 和 $I_{02}(t)$,构造带有噪声的信号:

$$I_1(t) = I_{01}(t) + n_1(t) \quad I_2(t) = I_{02}(t) + n_2(t) \quad (7)$$

式中: $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 分别为均值为 0 的 Gaussian 噪声。设定噪声 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 的相对幅值使信噪比(SNR)的取值为 $-6 \sim 7$ dB,得到基于互相关函数和 Lissajous 图形定位方法的定位误差 ΔL ,如图 6 所示。在 SNR 从 7 dB 降低至 -6 dB 的过程中,基于互相关函数定位方法的定位误差有较大变化:SNR 优于 2 dB 时,定位误差为 0 m;SNR 小于 2 dB 时,出现较大定位误差,

最大定位误差为 2.05 km,无法满足实际应用。Lissajous 图形定位方法的定位误差随 SNR 变化较小,最大定位误差为 207 m,可以满足实际应用的要求。

为了进一步说明 Gaussian 噪声对两种不同定位方法的影响机理,在图 7、图 8 和图 9 中,分别给出了 SNR 为 7 和 -6 时的归一化信号时域波形、归一化互相关函数以及 Lissajous 图形。

SNR= -6 时,信号的时延波形被噪声淹没,如图 7(a)所示。相应地,此时的互相关函数出现多个最大值,导致定位误差为 2.01 km;而在 Lissajous 图形中,对于 Gaussian 噪声的影响可以近似认为其坐标点均匀分布,不影响在拟合椭圆内的分布概率(比值) p ,从而采用 Lissajous 图形定位方法。在 Gaussian 噪声影响下,定位误差较为稳定,此时定位误差仅为 28.5 m,如图 9(b)所示。SNR 为 -6 dB 时,噪声淹没信号,互相关函数产生随机峰值,导致定位误差。

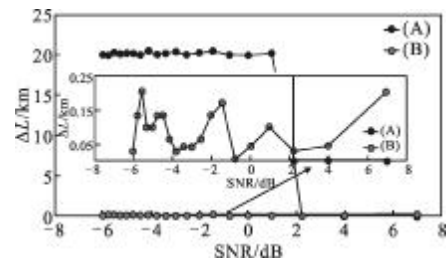


图 6 不同 SNR 条件下时基于互相关函数(B)与 Lissajous 图形(A)定位方法的定位误差

Fig.6 Location errors (ΔL) of cross correlation function method (A) and Lissajous figure method (B) for different SNR

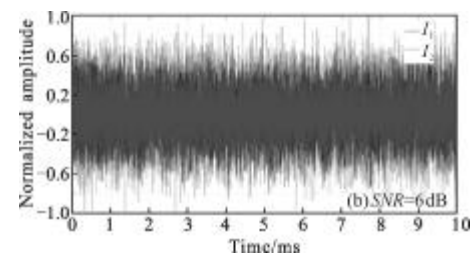
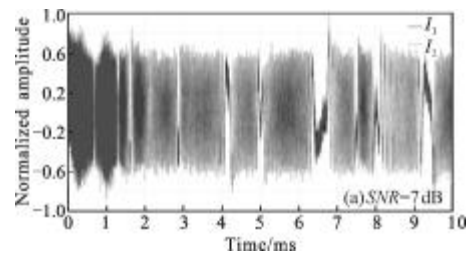


图 7 SNR=7 dB、 -6 dB 条件下的归一化信号

Fig.7 Normalized signals for SNR=7 and -6 dB

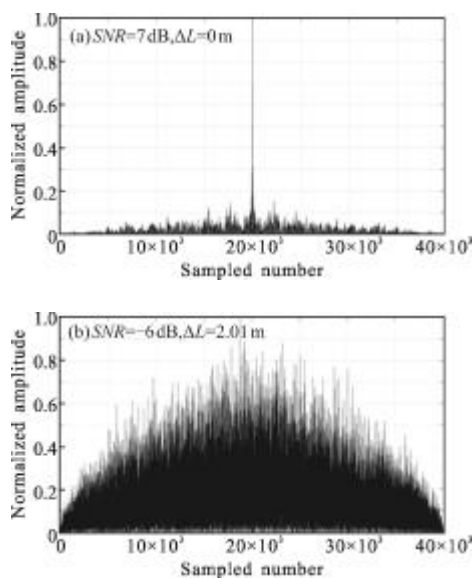


图 8 SNR=7 dB、-6 dB 条件下的信号归一化互相关函数

Fig.8 Normalized cross correlation function for SNR=7 and -6 dB

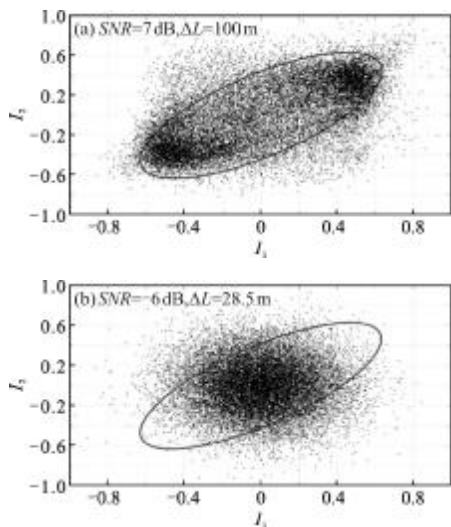


图 9 SNR=7 dB、-6 dB 条件下的信号的 Lissajous 图形

Fig.9 Lissajous figures for SNR=7 and -6 dB

4 实验

为了进一步验证 Lissajous 图形定位方法的有效性,基于图 1 所示的 M-Z 光纤分布式扰动传感器样机采集多次扰动数据,对不同定位方法的定位误差进行多次重复测试。每个位置为一组,每组测试 20 次,记录最大定位误差,定位误差分布情况如图 10 所示。由于样机没有采用附加 PGC 技术消除相位缓变和偏振衰落的影响^[2-4],可以对比研究以上两种定位方法的性能。通过 20 组实验结果的定位误差分布可

以发现:互相关函数定位方法的最大定位误差达到 1.1 km,而 Lissajous 图形定位方法的最大定位误差仅为 94 m。以上结果与基于实验数据仿真结果一致:Lissajous 图形定位方法可以有效实现对扰动的定位,在无需噪声抑制技术的条件下定位精度较高。

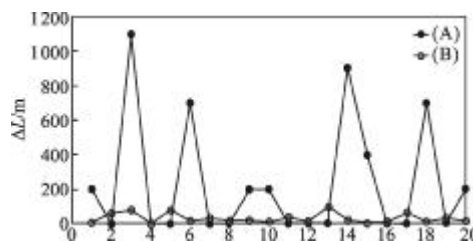


图 10 互相关函数和 Lissajous 图形定位方法实验定位误差
Fig.10 Experimental location errors of cross correlation function and Lissajous figure methods

5 结论

针对目前 M-Z 光纤分布式扰动传感器定位问题,提出了一种基于 Lissajous 图形的定位方法:在输出信号的 Lissajous 图形中引入拟合椭圆,通过计算椭圆半短轴长度得到信号之间的时延,实现定位。仿真和实验研究表明:该定位方法与现有互相关函数方法相比,在无需附加 PGC 技术消除相位缓变的条件下具有更小的定位误差。在文中验证所提出定位方法可行性的基础上,还需要进一步研究传感器输出信号数据长度、拟合椭圆半短轴长度对时延的灵敏度以及时延检测动态范围之间的理论关系,以提高和优化该定位方法的技术。

参考文献:

- [1] Li Xiaolei, Sun Qizhen, Sun Zhifeng, et al. Fiber vibration sensor system of digital network [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1160-1163. (in Chinese)
- [2] Li Fang, He Jun, Xu Tuanwei, et al. Fiber laser sensing technology and its applications [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 1025-1032. (in Chinese)
- [3] Liang Sheng, Zhang Chunxi, Lin Wentai, et al. Fiber-optic intrinsic distributed acoustic emission Sensor for large structure health monitoring [J]. Optics Letters, 2009, 34(12): 1858-1860.
- [4] Liang Sheng, Zhang Chunxi, Lin Wentai, et al. Influences of semiconductor laser on Mach-Zehnder interferometer based

- fiber-optic distributed disturbance sensor [J]. *Chin Phys B*, 2010, 19(12): 124217.
- [5] Zhang Chunxi, Liang Sheng, Feng Xiujuan, et al. Spectrums and influences of Rayleigh and stimulated Brillouin scattering on fiber-optic distributed disturbance sensor[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(7): 1862-1867. (in Chinese)
- [6] Lin Wentai, Zhang Chunxi, Li Lijing, et al. Novel fiber-optic distributed disturbance sensor using a modified phase generation carrier technique[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 282-283: 697-701.
- [7] Xu Wenyuan, Zhang Chunxi, Liang Sheng, et al. Fiber-optic distributed sensor based on a sagnac interferometer with a time delay loop for detecting time-varying disturbance[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, 51: 2564-2567.
- [8] Li Xiaolei, Sun Qizhen, Wo Jianghai, et al. Hybrid TDM/WDM-based fiber-optic sensor network for perimeter intrusion detection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30: 1113-11120.
- [9] Russell S J, Brady K R, Dakin J P. Real-time location of multiple time-varying strain disturbances, acting over a 40-km fiber section, using a novel dual-Sagnac interferometer [J]. *Journal of Lightwave*, 2001, 19: 205-213.
- [10] Sun Yao, Jia Bo, Zhang Tian. Position determination sensing system based on all-fiber interferometer with feedback loop [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, 25: 44-46. (in Chinese)
- [11] Marek Zyczkowski, Mieczyslaw Szustakowski, Norbert Palka, et al. Fibre optic perimeter protection sensor with intruder localization [C]//*Proceedings of SPIE, Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks*, 2004, 5611: 71-78.
- [12] Chtcherbakov A A, Swart P L, Spammer S J. Mach-Zehnder and modified Sagnac-distributed fiber-optic impact sensor [J]. *Applied Optics*, 1998, 37: 3432-3437.
- [13] Spammer Stephanus J, Swart Pieter L, Andre Booyesen. Interferometric distributed optical-fiber sensor [J]. *Applied Optics*, 1996, 35: 4522-4525.
- [14] Kondrat M, Szustakowski M, Ciurapinski W, et al. Two interferometer fiber optic sensor with disturbance localization [C]//*Proceedings of SPIE, Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks III Stockholm*, 2006, 6394: 63940T.
- [15] Ciurapinski Wieslaw M, Andrzej Maciejak. Localisation of the disturbance place in distributed fiber optic sensor [C]//*Proceedings of SPIE, Optoelectronic and Electronic Sensors II*, 1996, 3054: 47-49.
- [16] McAulay Alastair D, Jian Wang. A Sagnac interferometer sensor system for intrusion detection and localization [C]//*Proceedings of SPIE, Enabling Photonic Technologies for Aerospace Applications VI*, 2004, 5435: 114-119.
- [17] Lin Wuwen. Novel distributed fiber optic leak detection system[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2): 278-279.
- [18] Culshaw B. The optical fibre Sagnac interferometer: An overview of its principles and applications [J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17(01): 1-16.
- [19] Mahmoud Seedahmed, Katsifolis Jim. Performance investigation of real-time fiber optic perimeter intrusion detection systems using event classification [C]//*Proceedings of International Carnahan Conference on Security Technology*, 2010: 387-393.
- [20] Xu Haiyan, Wu Hongyan, Qiao Zhongde, et al. A research on polarization effects in an distributed optical fiber sensor disturbance location system [C]//*Proc of SPIE, Fiber Optic Sensors and Applications VIII*, 2011, 8028: 8028R.
- [21] Xu Haiyan, Zhang Yi, Wu Hongyan, et al. Multiple disturbance location in distributed fiber-optic sensor based on phase generated carrier [C]//*Proceedings of SPIE, 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies*, 2010, 7656: 76567A.
- [22] Wu Hongyan, Xu Haiyan, Wang Chao, et al. Position determination and monitoring of disturbance along distributed fiber optic sensors [C]//*Proceedings of SPIE, Fiber Optic Sensors and Applications VIII*, 2011, 8028: 80280L.
- [23] Hong Xiaobin, Guo Hongxiang, Jian Wu. An intrusion detection sensor based on coherent optical time domain reflector [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, 52: 2746-2748.
- [24] Juarez J C, Taylor H F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters [J]. *Applied Optics*, 2007, 46: 1968-1971.
- [25] Li Zhijun, Zhen Shenglai, Chen Bo, et al. Lissajous figures in the application of micro-vibration measurement[J]. *Optics Communications*, 2008, 281: 4744-4746.
- [26] Zhi Lisong, Zhang Junping. Remote sensing image registration based on retrofitted SURF algorithm and trajectories generated from lissajous figures [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7: 491-495.