

干涉型分布式光纤振动传感技术的研究进展

王贺^{1,2} 孙琪真^{1,2} 李晓磊^{1,2} 刘德明^{1,2}

(¹ 华中科技大学 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074)

² 华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 分布式光纤振动传感技术广泛应用于区域安防、输油管道维护和工程结构健康监测等领域,是光纤传感领域的研究热点。综述了干涉型分布式光纤振动传感技术的特点及研究现状,重点对近年来的研究新进展进行了详细介绍。分析了新型干涉结构和传感机理的基本原理、定位方法及技术指标。阐述了新型数据处理方法的实现目标及具体实施过程。最后展望并讨论了干涉型分布式光纤振动传感技术的发展趋势和应用前景。

关键词 光纤光学;光纤干涉仪;振动传感;空间定位;解调算法

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.020004

Progress in Optical Fiber Interferometer Based Distributed Vibration Sensing Technology

Wang He^{1,2} Sun Qizhen^{1,2} Li Xiaolei^{1,2} Liu Deming^{1,2}

¹ National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

² School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Distributed optical fiber vibration sensing (DOFVS) technology is the research focus of the optical fiber sensing field in recent years, and it has been widely used in many application areas such as perimeter security, pipeline maintenance and engineering structural health monitoring. This paper summarizes the features and research status of optical-fiber interferometer-based distributed vibration sensing technology, emphasizing on the new progress in the past few years. The fundamental working principles, location methods and main technical specifications of the novel system configurations and sensing theories are analyzed in detail. Moreover, the purpose and implementation process of the novel data-processing algorithms are also introduced. The developing trend and application prospect are presented and discussed.

Key words fiber optics; fiber interferometer; vibration sensing; spatial positioning; demodulation algorithms

OCIS codes 060.2370; 280.4788; 350.4600

1 引言

分布式光纤振动传感(DOFVS)是以光纤为传感元件和传输介质,实现对传感链路周边压力或振动信号进行探测的技术。DOFVS不但具有普通光纤传感技术灵敏度高、耐高温、抗腐蚀和抗电磁干扰等优越特性,而且更能体现光纤分布延伸的优势,传感链路中任一点都能受到振动信号的调制,从而可以实现振动信号的无漏点监测。因此,在超远距离和高空间分辨率要求的监测中,DOFVS具有电子传感器件不可比拟的优势,在边境安全、军事基地防范、油气管道泄漏、社区安全以及建筑结构监测等领域具有广泛应用前景^[1~8]。

收稿日期: 2012-09-26; **收到修改稿日期**: 2012-10-28; **网络出版日期**: 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60937002)和中央高校基本科研基金(HUST:2011TS059)资助课题。

作者简介: 王贺(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: wanghe@hust.edu.cn

导师简介: 孙琪真(1982—),女,副教授,主要从事光纤传感和传感器网络技术等方面的研究。

E-mail: qzsun@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

干涉型 DOFVS 是基于光波干涉调制原理的 DOFVS 技术,具有灵敏度极高、动态范围大和响应频带宽等突出优点,在 DOFVS 中占有重要地位。经过 30 多年的发展,干涉型 DOFVS 已经取得了丰硕的研究成果,提出了 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)、Michelson 干涉仪(MI)和 Sagnac 干涉仪(SI)等基本干涉结构以及 SI-MZI^[9,10],SI-MI^[11],MZI-MZI^[12,13],SI-SI^[14~16]等多种复合干涉结构。

近年来,干涉型 DOFVS 又取得了新的发展。在新型传感结构和传感机理方面,对 SI,MZI 等传统干涉结构进行了改进^[17~23],同时出现了 MI-MI 等大量新型复合干涉结构^[24~32],光时域反射(OTDR)技术、光子晶体光纤(PCF)等技术也被应用于 DOFVS^[33,34];在新型数据处理方面,提出了多点振动同时监测的定位算法^[35]以及应用小波去噪等技术提高系统定位精度等多种数据处理方法^[36~40]。本文主要从以上两方面对干涉型 DOFVS 的最新研究进展进行综述,并对干涉型 DOFVS 的发展趋势及应用前景进行展望。

2 干涉型 DOFVS 的新型结构及传感机理

2.1 直线形布局的 SI 分布式光纤振动传感结构

Wu 等^[17]将传统的 SI 干涉仪的环形光纤约束成直线形,振动信号同时作用在传感光纤的两点,形成直线形布局的 SI 分布式光纤振动传感结构,如图 1 所示。超辐射发光二极管(SLED)发出激光经 3×3 耦合器进入 SI,且仅有经路径 $A-B-C-D-E-D'-C'-B'$ 和 $B'-C'-D'-E-D-C-B-A$ 的两路信号光经历的传播路径完全相同,满足干涉条件。设单频振动源信号施加在 $C(C')$ 点,引入的相位调制可以表示为

$$\varphi(t) = \varphi_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

式中 φ_0 为相位变化的峰值, ω 为振动信号的频率。由于 A 点光纤环的延时作用,两路信号光传播到 C 和 C' 点时受到的相位调制也不同,两者之差为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(t) = & \varphi_0 \{ \sin[\omega(t + \tau_1 + \tau_3)] + \sin[\omega(t + \tau_1 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_2 + \tau_4)] \} - \\ & \varphi_0 \{ \sin[\omega(t + \tau_3) + \sin[\omega(t + \tau_3 + \tau_4 + \tau_2 + \tau_4)] \} = \\ & 4\varphi_0 \cos\left[\frac{\omega n_{\text{eff}}}{2c}(2L_4 + L_2)\right] \sin\left(\frac{\omega n_{\text{eff}} L_1}{2c}\right) \cos\left[\omega\left(t + \frac{n_{\text{eff}} L}{2c}\right)\right], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $L_1 \sim L_4$ 为图 1 中对应长度的距离, $\tau_1 \sim \tau_4$ 分别对应信号光在 $L_1 \sim L_4$ 中传播的时间, L 为传感链路的总长, c 为真空中的光速, n_{eff} 为光纤的折射率。由(2)式可知,当 f_k^* 满足

$$f_k^* = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{(2k-1)c}{n_{\text{eff}}(4L_4 + 2L_2)}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

时, $\Delta\varphi(t)$ 恒为 0,称 f_k^* 为零点频率。因此当包含丰富频率成分的振动信号作用在传感光纤上时,从时域干涉信号中解调出振动相位信号 $\Delta\varphi(t)$,并对其进行傅里叶变换,通过寻找频谱图中的零点频率即可得振动源位置 L_4 。

和传统环形 SI 相比,该结构将环形光纤布局成直线形,避免了环状结构因扰动的互易性而需要屏蔽一半光纤的麻烦,提高了 SI 的实用性。实验在距离尾端 25 km 的位置施加振动,实现了 59 m 的定位精度。但该技术定位时需要得到完整的频谱响应,若振动信号包含的频率成分较少(或不包含零点频率),则会导致定位误差较大甚至定位失败。

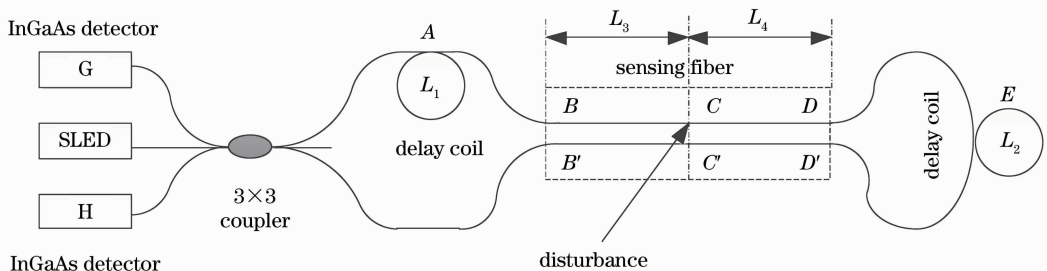


图 1 直线形布局的 SI 分布式光纤振动传感结构

Fig. 1 Configuration of in-line SI-DOFVS

2.2 环形 MZI-MZI 结构

Sun 等^[18]提出环形 MZI-MZI 结构,如图 2 所示。采用单色性极好的分布反馈(DFB)激光二极管(DFB-LD)作为光源,双芯单模光缆作为传感链路(光缆中包含的两根等长光纤分别为传感臂和参考臂)。激光经过耦合器 C1 分束形成顺时针(CW)光路和逆时针(CCW)光路,两者同时在这两臂中传播,形成环形 MZI-MZI 结构。设振动源位 P 与光缆端点 M 的距离为 Z_m ,受到相同振动调制的两路干涉光到达光电探测器(PD)的时间差为

$$\Delta T = \frac{(L - 2Z_m)n}{c}, \quad (4)$$

式中 L 为环状光缆的总长度, n 为光纤折射率, c 为真空中的光速。

由(4)式可得

$$Z_m = \frac{L - \Delta T \cdot c/n}{2}. \quad (5)$$

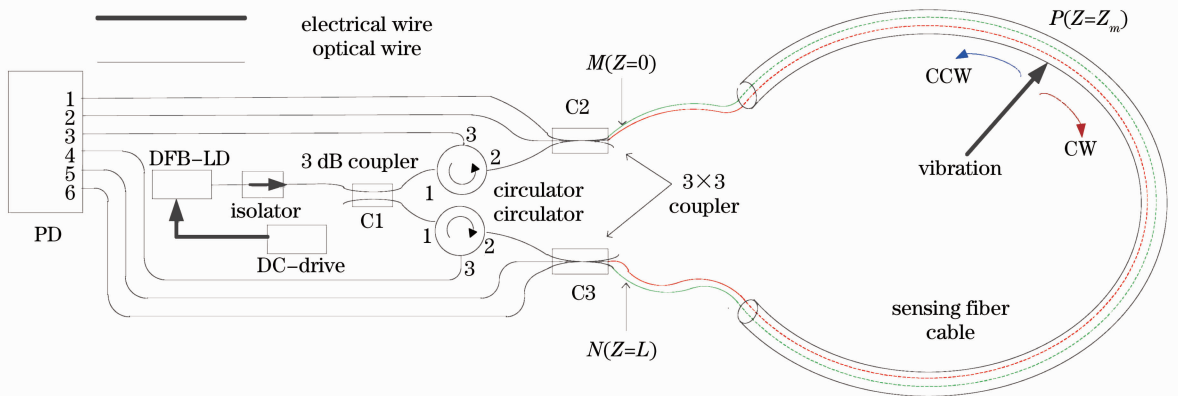


图 2 环形 MZI-MZI 分布式光纤振动传感结构

Fig. 2 Configuration of ring MZI-MZI-DOFVS

该结构省略了传统 MZI-MZI 振动传感结构中的引导光纤,可达到更长的监测距离,且通过筛选解调信号的频率可以实现多振动源的同时监测。实验对长度为 1.01 km 的环形光缆进行实验,实现了 38 m 的定位精度。但由于传感光纤的偏振特性具有随机性,会导致输出光强对输入偏振态敏感,造成信号相关性恶化,即发生“偏振诱导衰落”现象^[41]。

2.3 MI-MI 结构

Hong 等^[24]利用波分复用器(WDM)和法拉第旋光反射镜(FRM)组成了共用传感臂和参考臂的 MI-MI 振动传感结构,如图 3 所示。第 1 路 MI 中,DFB 激光器 1(1330 nm)发射光束,经 3×3 耦合器 C1 分束后被 WDM1~4 引导分别在传感臂和参考臂中传播,经 FRM1 和 FRM2 反射后沿原路返回,最终在耦合器 C1 处

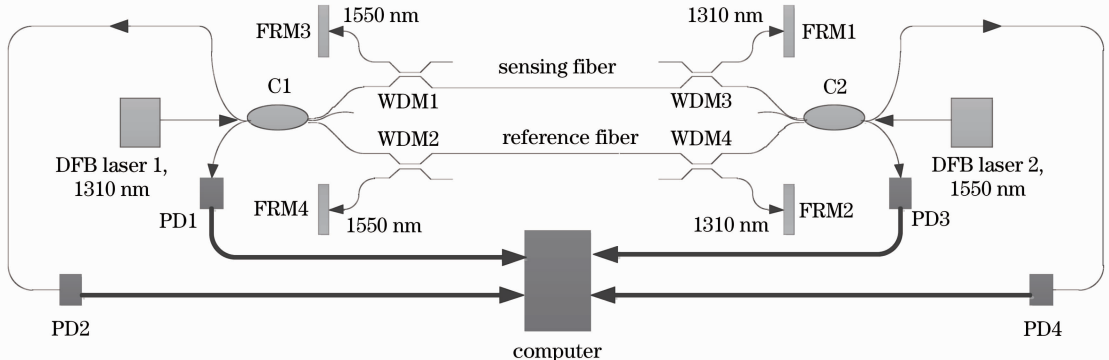


图 3 MI-MI 分布式光纤振动传感结构

Fig. 3 Configuration of MI-MI-DOFVS

发生干涉,干涉光强由探测器 PD1,PD2 接收。与第 1 路 MI 结构相似,第 2 路 MI 由 DFB 激光器 2(1550 nm)发射光束,经 3×3 耦合器 C2 分束后被 WDM1~4 引导分别在传感臂和参考臂中传播,经 FRM3 和 FRM4 反射后沿原路返回,最终在耦合器 C2 处发生干涉,干涉光强由探测器 PD3,PD4 接收。当传感臂受到振动时,通过两路干涉信号的时延关系可实现振动源定位。

与传统 MZI 相比,该结构利用 FRM 实现了良好的抗偏振衰落效果^[42];与传统 SI 相比,该结构避免了定位精度严重依赖振动信号频谱特性的缺陷。实验中传感臂长为 4.012 km,系统定位精度为 51 m。但该结构同样需要对参考臂进行屏蔽处理,以降低系统的误报率。

2.4 SI-SI 结构

2.4.1 直线型 SI-SI 复用结构

许海燕等^[25]提出了共用传感臂的 SI-SI 振动传感结构,如图 4 所示。A、D、F、D₁、F₁、B、H 均为光纤耦合器;C、G 为长度相等的延时线圈;1-2 段和 3-4 段为引导光纤,长度均为 L_3 。SLED 输出激光,经耦合器 A 分束后进入两路直线型 SI。在第 1 路 SI 中,仅有经过光路径 B-C-D-D₁-E-F₁-FRM2-F₁-E-D₁-D-B 和 B-D-D₁-E-F₁-FRM2-F₁-E-D₁-D-C-B 的信号光满足干涉条件,设两路干涉光束的振幅近似等于 E_{10} ,初始相位分别为 φ_1 、 φ_2 ,外界扰动引起的相位差为 $\Delta\varphi_1(t)$,探测器 PIN1 接收到干涉信号的交流项为

$$I_{12} = E_{10}^2 \cos[\Delta\varphi_1(t) + \varphi_1 - \varphi_2]. \quad (6)$$

与第 1 路 SI 相似,设第 2 路 SI 中两路干涉信号的振幅近似为 E_{20} ,初始相位分别为 φ_3 、 φ_4 ,外界扰动引起的相位差为 $\Delta\varphi_2(t)$,则探测器 PIN2 接收到干涉信号的交流项为

$$I_{34} = E_{20}^2 \cos[\Delta\varphi_2(t) + \varphi_3 - \varphi_4]. \quad (7)$$

设光纤折射率为 n ,真空中的光速为 c ,当 t 满足 $t \leq 2nL_3/c$ 时, $\Delta\varphi_1(t)$ 与 $\Delta\varphi_2(t)$ 的时间差为 $\Delta\tau = n(L_1 - L_2)/c$,由(6),(7)式知干涉信号延时也满足此关系,所以振动源与位置 2 的距离 L_1 为

$$L_1 = \frac{L + \Delta\tau \cdot c/n}{2}, \quad (8)$$

式中 $L = L_1 + L_2$ 为传感光纤总长度。

该结构采用最小均方差自适应时延估计的方法直接对振动源进行定位,无需对 SI 结构进行复杂的相位解调运算,处理算法简单易实现,且具有较高的灵敏度和定位精度。实验搭建了 22 km 的传感系统,定位精度达到 20 m。但该系统为了保证足够的估计时延的时间,要求预留较长的引导光纤,增加了系统的复杂性。另外,引导光纤引入的损耗也会导致系统监测范围减小。

2.4.2 基于波分复用的直线型 SI-SI 结构

传统的 SI 振动干涉结构使用寻找零点频率的方法进行定位,若振动信号频谱范围有限或不包含零点频率,则定位误差很大。另外,振动源距离 FRM 太近时对应的零点频率过大,可能超出仪器探测范围而导致定位失败。

许海燕^[26]利用 WDM 技术构建了一种新型 SI-SI 振动传感结构,如图 5 所示。采用 SLED 作为光源,耦合器 3 和波分复用器 6 之间的光纤为两路干涉仪的共用传感光纤。第 1 路 SI 由 SLED1(中心波长为 1310 nm)、隔离器 1、耦合器 1 和 3、WDM4~6、光纤延时线圈 7、压电陶瓷(PZT1)、FRM1、PD1 和 PD2 及各元件间的连接光纤组成;第 2 路 SI 由 SLED2(中心波长为 1550 nm)、隔离器 2、耦合器 2 和 3、WDM4~6、延时线圈 7 和 8、PZT2、FRM2、PD3 和 PD4 及各元件间连接光纤组成。

采用相位生成载波(PGC)解调算法从干涉光强中提取振动相位 $\Delta\varphi_{\lambda 1}(t)$ 、 $\Delta\varphi_{\lambda 2}(t)$,利用傅里叶变换计算两者在同一振动频率 ω 下的响应之比为

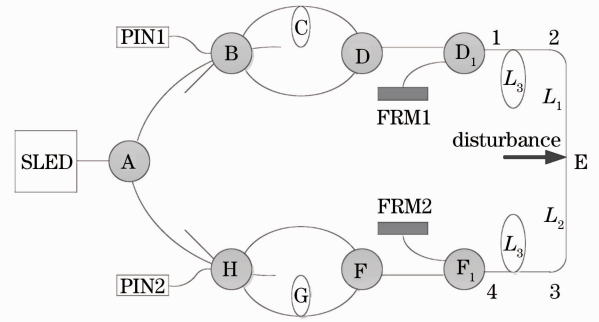


图 4 直线型 SI-SI 分布式光纤振动传感结构
Fig. 4 Configuration of in-line SI-SI-DOFVS

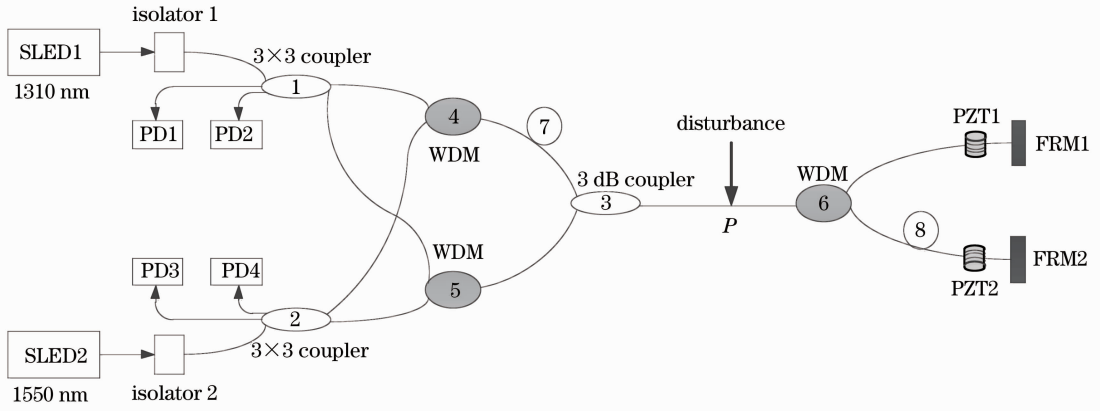


图 5 基于 WDM 的 SI-SI 分布式光纤振动传感结构

Fig. 5 Configuration of SI-SI-DOFVS based on WDM

$$\frac{F_{\lambda_1}(\omega)}{F_{\lambda_2}(\omega)} = \frac{\lambda_2 \cos \frac{\alpha \alpha l_1}{2}}{\lambda_1 \cos \frac{\alpha \alpha (l_1 + l_3)}{2}}, \quad (9)$$

式中 λ_1, λ_2 分别为两光源的波长, α 为与光纤折射率 n 和真空中的光速 c 有关的常数, l_1 为振动点 P 与 FRM1 的距离, l_3 为线圈 8 的长度。由(9)式得

$$l_1 = \frac{1}{\alpha \alpha} \arctan \left[\cot \alpha \alpha l_3 - \frac{F_2(\omega)}{F_1(\omega) \sin \alpha \alpha l_3} \right]. \quad (10)$$

该结构通过频谱比值算法计算振动源位置,不要求振动源具备特定频率,提高了系统实用性。另外,该结构依靠任意的振动频率都能实现定位,因此求取频谱上多个振动频率对应振动位置的平均值,能进一步提高系统定位精度。实验对 30 km 范围的传感光纤进行实验,不同位置的定位误差均小于 80 m。但该结构用到的光电器件数量较多,增加了成本,另外解调算法也较复杂。

2.4.3 基于时分复用的环形 SI-SI 结构

Xu 等^[27]利用光纤延时环形成了时分复用(TDM)的 SI-SI 结构,如图 6 所示。在传统环形 SI 结构中增加光纤延时环,形成 1-2-3-5-6-1 和 1-2-4-5-6-1 两条长度不同的 SI 干涉环路。对 SLED 光源进行脉冲调制,光脉冲分别在两条环路中传播,利用 TDM 技术可使光电探测器在不同时刻交替探测到两路 SI 的干涉光强。设振动源对光纤引起的相位调制是频率为 ω 的正弦信号 $\varphi_0 \sin \omega t$, 则两干涉环路的相位变化幅值分别为

$$\begin{cases} \varphi_{\text{int1}} = 2\varphi_0 \sin \frac{\omega n (L_1 - 2\Delta L)}{2c} \\ \varphi_{\text{int2}} = 2\varphi_0 \sin \frac{\omega n (L_2 - 2\Delta L)}{2c} \end{cases}, \quad (11)$$

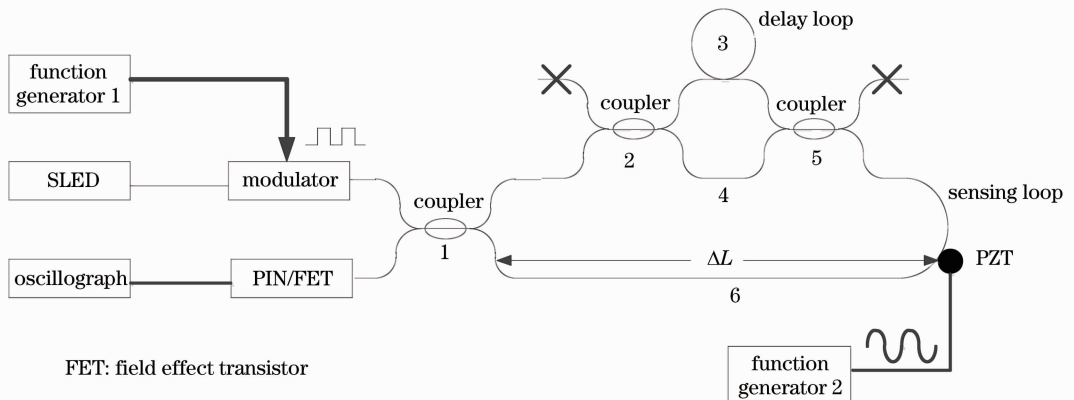


图 6 基于 TDM 的 SI-SI 分布式光纤振动传感结构

Fig. 6 Configuration of ring SI-SI-DOFVS based on TDM

式中 L_1, L_2 分别为两条 SI 传感光纤的总长度, ΔL 为振动源与耦合器 1 之间的距离, n 为光纤的折射率, c 为真空中的光速。对于低频振动信号, (11) 式中两路相位调制信号的时延差可以忽略。设 L_D 为光纤延时线圈 3 的长度, 利用两环路的长度关系 $L_2 = L_1 + L_D$ 和三角函数运算关系, 得

$$\Delta L = \frac{L_1}{2} - \frac{c}{n\omega} \arctan \frac{\alpha \cos \frac{n\omega L_D}{2c}}{1 - \alpha \cos \frac{n\omega L_D}{2c}}, \quad (12)$$

式中 α 是与振动前后两路 SI 干涉光强相关的参量。另外该结构中 SI 的工作点是 π , 所以振动频率 ω 可通过干涉信号的频率除以 2 获得。

与传统 SI-SI 相比, 该结构利用 TDM 技术只需 1 个光源及 1 个探测器就能同时完成两路 SI 信号的检测, 大大节约了系统成本。实验采用 PZT 模拟振动信号, 对 10 km 的传感光纤进行测试, 实现了 400 m 的定位精度。但该方法只适用于测量频率较低的振动信号, 且定位算法要求振动源只能是单一频率, 无法同时测量多点振动, 限制了系统的适用范围。

2.5 SI-MZI 结构

Nian 等^[28]提出了一种新型 SI-MZI 分布式光纤振动传感结构, 如图 7 所示。耦合器 1 和 2、光纤 L_1 和 L_2 构成 SI。光纤 L_1 和 L_4 组成传感臂, 光纤 L_2 和 L_3 组成参考臂, 共同构成 MZI。系统中 L_3, L_4 的长度远小于 L_1, L_2 , 因此它们的长度可忽略不计。带通滤波器的作用是消除环境中的高频或低频噪声, 提高系统定位精度。当振动信号施加在光纤 L_1 上时, 由于振动点距离耦合器 1、2 距离的差异, 两探测器检测到振动干涉信号的时间不同, 所以通过两路振动干涉信号的时延关系即可计算出振动源的位置。

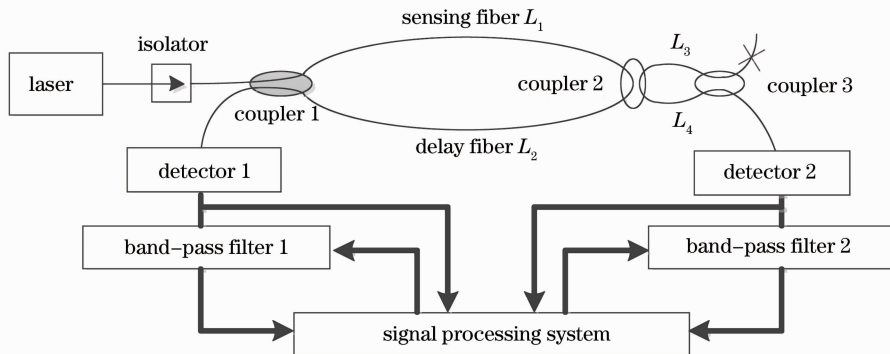


图 7 SI-MZI 复合的分布式光纤振动传感结构

Fig. 7 Configuration of hybrid SI-MZI-DOFVS

SI 干涉结构具有抗环境干扰的优点, 但需要复杂的相位载波解调技术才能实现定位。MZI-MZI 结构能利用简单的时延估计方法进行定位, 但光纤链路易受环境噪声影响。该 SI-MZI 结构综合了两者的优点, 利用 SI 判决是否有振动发生, 再通过时延估计方法求取振动源位置, 结构简单, 且对环境噪声不敏感, 能有效减少误判。系统的仿真实验结果证明了该结构的定位方法是有效的, 且具备抗环境干扰能力。该结构的难点在于 SI 和 MZI 两种干涉结构对光源的线宽要求不同, 如何做好两者之间的平衡是实现成功定位的关键。

2.6 基于瑞利散射的干涉型 DOFVS 结构

Hong 等^[33]提出基于光纤瑞利散射原理的干涉型分布式光纤振动传感结构, 如图 8 所示。单片机 (MCU) 控制光源发出光脉冲, 经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后进入非平衡 MZ 结构, 光束在传感光纤的任一点 P 都会发生瑞利散射。散射光在传感链路中存在以下 4 条光路径: 1) $L_1 + L + L + L_1$, 2) $L_1 + L + L + L_2$, 3) $L_2 + L + L + L_1$, 4) $L_2 + L + L + L_2$ 。其中只有在 2)、3) 路径中传播的信号光满足相干条件, 干涉光强被光电探测器 (APD) 接收。设振动源作用在 P 点, 所有经过该点的信号光都会受到振动源的调制使干涉光强发生变化。所以根据 OTDR 原理, 比较振动前后干涉光强形成的 OTDR 曲线的差异, 由差异起始点即可求出对应的振动源位置。

该方案利用 OTDR 原理形成了总长度不断变化的“动态直线型 SI”结构, 具有很强的抗环境干扰能力。

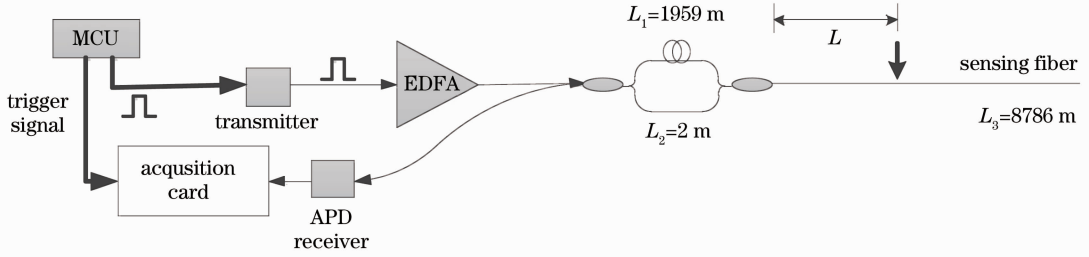


图 8 基于瑞利散射的干涉型分布式光纤振动传感结构

Fig. 8 Configuration of interferometric DOFVS based on Rayleigh scattering

且该系统的定位机理由频域分析转为时域分析,可以获得更高的定位精度。实验对 8.8 km 的光纤进行监测,达到了 25 m 的定位精度。但该结构还有一些缺点有待解决,例如:后向瑞利散射光强度微弱,导致对系统的信号采集和处理要求很高。虽然增加脉冲宽度可以提高散射光强度和信噪比,扩大系统的监测范围,但同时会导致定位精度降低。

2.7 基于全固光子带隙光纤的振动传感结构

PCF 具有高双折射、灵活的色散控制和低温度干扰等突出优点,在光纤传感领域也发挥越来越重要的作用^[43,44]。全固光子带隙光纤是光子带隙型 PCF 的一种,具有易与标准单模光纤(SMF)熔接等优点^[45]。Ding 等^[34]将 SMF 与全固光子带隙光纤熔接,并在 PCF 自由端镀 99% 高反膜,提出了一种基于全固光子带隙光纤的分布式振动传感结构,传感原理如图 9 所示。

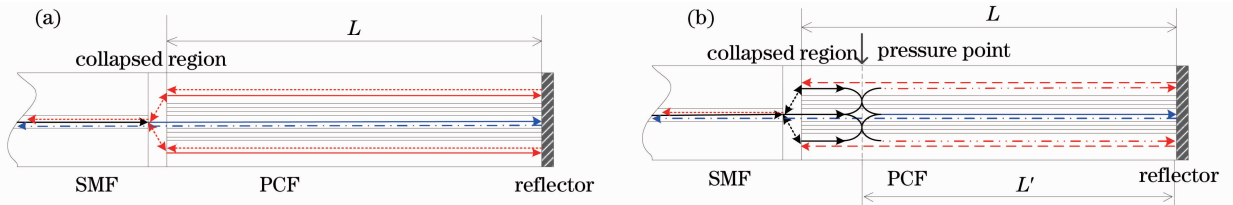


图 9 模式耦合原理图。(a)无外界振动;(b)有外界振动

Fig. 9 Principle of the mode coupling. (a) PCF is not pressed; (b) PCF is pressed

信号光经过 SMF 耦合入 PCF,在光纤熔接位置由于模场的不匹配激发出纤芯模式与包层模式。无外界振动时,两种模式分别在纤芯和包层中向右传输,经反射膜反射后原路返回到熔接点处发生干涉,形成光纤内嵌的 MI,如图 9(a)所示。设 PCF 长度为 L ,包层和纤芯的有效折射率差为 Δn_{eff} 。波长分别为 λ_1, λ_2 的信号光在 MI 中经历的相位变化也不同,两者之差 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}} \cdot 2L(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1\lambda_2}. \quad (13)$$

当外界振动作用在距离 PCF 反射端 L' 处时,向右传输的两种模式会在振动点位置发生能量交换,即包层模变为纤芯模在纤芯中传播,纤芯模变为包层模在包层中传播。两者经反射膜反射后返回到熔接点处发生干涉,形成光纤内嵌的 MZI,如图 9(b)所示。波长为 λ'_1, λ'_2 的信号光分别在 MZI 中经历的相位变化之差 $\Delta\varphi'$ 为

$$\Delta\varphi' = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}} \cdot (L + L')(\lambda'_2 - \lambda'_1)}{\lambda'_1\lambda'_2}. \quad (14)$$

扫描入射光波频率,观察不同光波长对应干涉光强的大小。在无振动条件下,将光谱图中相邻谷值对应的波长 λ_1, λ_2 (对应 $\Delta\varphi = 2\pi$) 代入(13)式,得 Δn_{eff} ;当振动发生时,光谱图发生变化,将新的谷值对应波长 λ'_1, λ'_2 (对应 $\Delta\varphi' = 2\pi$) 以及 Δn_{eff} 代入(14)式可得 L' 。

该方案利用在光纤内形成内嵌的 MI/MZI 干涉仪结构,实现了基于 PCF 的分布式光纤传感。实验对 8 cm 的 PCF 光纤进行测量,得到 0.1 cm 的定位精度。与普通光纤干涉仪相比,这种光纤内嵌干涉仪最大的特点在于将传感光路、耦合器和反射镜集成在同一根光纤内,具有更加灵活和紧凑的传感结构。该方案利用频谱分析技术可获得极高的定位精度,且保留了光子晶体结构设计灵活、色散和非线性效应可控等优异的光

学特性。但该方案受频谱分析仪器分辨率、光纤损耗及成本的限制,不适宜用于长距离的振动监测。

3 干涉型 DOFVS 的新型数据处理方法

3.1 直线型 SI 干涉振动传感的解调算法

传统 SI 传感系统需要相位生成载波技术对振动相位信号 $\Delta\varphi(t)$ 进行解调,使用寻找 $\Delta\varphi(t)$ 频率谱零点频率的方法实现定位。设振动信号频率为 ω_s ,则探测器得到光强的干涉项为

$$I_{\text{int}} = -2E^2 \cos[\Delta\varphi(t)] = -2E^2 \cos\left[r \cos \omega_s \left(t - \frac{\tau_T}{2}\right)\right], \quad (15)$$

式中 E 为信号光经传感链路损耗后的电场幅度, r, τ_T 均是延时线圈长度 L_D 和振动位置与 FRM 的距离 L_x 的函数,可见(15)式的形式为“二次嵌套余弦函数”。

方捻等^[46]对直线型 SI 结构提出了一种新的解调算法,系统结构如图 10 所示。调节 L_D 可以改变 r 值的大小,当满足 $r < 3.2$ 时,(15)式与其内嵌函数 $\Delta\varphi(t)$ 近似满足倍频关系,且 r 值越小,二次嵌套函数的谐波成分越小,其频谱越接近内嵌的余弦函数的倍频谱。因此该算法避免了直接对振动相位进行繁琐的解调,直接利用干涉信号零点频率除以 2 即可得到入侵信号的零点频率。

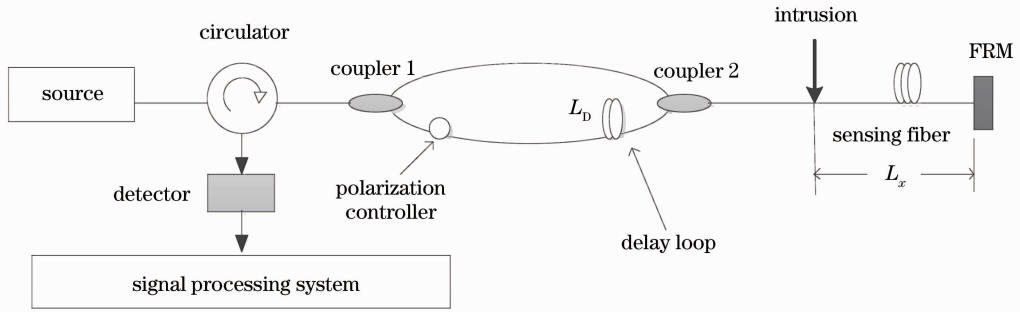


图 10 采用二次嵌套函数的直线式 SI 分布式光纤振动传感结构

Fig. 10 Configuration of in-line SI-DOFVS with quadratic nested function

该解调算法无需复杂的相位解调技术,大大降低了系统的复杂性。实验对 11 km 长度传感光纤进行验证,平均定位误差为 170 m。

3.2 MZI-MZI 结构多振动点同时定位的解调算法

传统的 MZI-MZI 干涉系统只能对单点振动实现定位,而对多点同时发生的振动则无能为力。Zhang 等^[35]提出了一种基于相关理论和频谱分析技术的算法,实现多点振动的同时监测。

设两个多频振动源同时作用在传感链路上,两路探测器接收到的探测光强分别为

$$\begin{cases} I_1(t) = \cos[\Delta\varphi_1(t) + \varphi_0] \\ I_2(t) = \cos[\Delta\varphi_2(t) + \varphi_0] \end{cases}, \quad (16)$$

式中 $\Delta\varphi_1(t), \Delta\varphi_2(t)$ 分别为由振动源引起的两路信号光的相位变化, φ_0 为干涉仪的初始相位差。具体定位步骤如下:1) 利用相位解缠算法获取 $\Delta\varphi_1(t), \Delta\varphi_2(t)$; 2) 对 $\Delta\varphi_1(t), \Delta\varphi_2(t)$ 进行频域分析,获取两者所含频率成分; 3) 对 $\Delta\varphi_1(t), \Delta\varphi_2(t)$ 进行相关运算,滤去相关函数中两者的共有频率,对剩下的独立频率做相位谱分析,即可获得各个振动源的位置信息。

该方法实现了对多点振动源同时监测的初步理论分析,难点在于如何提高信号相位谱精度,这直接关系到各振动源的定位精度。

3.3 基于离散小波预处理的长距离 MZI-MZI 结构数据优化方法

在长距离 MZI-MZI 干涉系统中,存在着众多的噪声和干扰,例如传感链路中的微弱振动、光纤瑞利散射光强的积累、光电器件引入的随机噪声以及温度慢漂等。如何消除这些噪声和干扰,准确找到由振动源引起的干涉信号的起始位置,直接影响到系统的定位精度。

谢尚然等^[37]提出了一种基于离散小波预处理的数据处理方法寻找长距离 MZI-MZI 结构中振动干涉信号的起始位置。利用不同中心频率不同带宽的一组滤波器对原始信号进行滤波,得到各层小波系数。由于

上层小波系数对应滤波器的中心频率最高,和具有很强高频成分的振动信号一致,因此在上层小波系数设定阈值即可找到突变点,即振动的起始点。

该方法引入离散小波技术对振动信号进行处理,能有效消除环境噪声干扰,提高定位精度。实验利用第2层细节系数确定突变点,截取之后 $5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ 的点数为有效数据域,对总长为 30.498 km 的光缆进行测试,得到了 50 m 的定位精度。

3.4 基于阈值-求导方法的 SI 结构数据优化方法

传统的 SI 是基于寻找相位信号频率谱中的零点频率来实现定位的,但是由于受到多种噪声的干扰,振动相位信号的频率响应并不是理想的“连山形”,如何准确找出零点频率直接关系到系统的定位精度。

钱静洁等^[38]提出了一种针对传统 SI 定位系统的实时信号处理方法。首先对 SI 系统的频率响应信号进行 6 次小波分解和重构的预处理,达到消除噪声的目的;利用线性最小均方曲线拟合的方法将重构后信号的向下趋势去掉;利用阈值-求导法找到零点频率。阈值求导法分为 3 个步骤:1) 求出频率信号的平均幅值 a ; 2) 对响应小于该幅值的所有频率进行标记,利用求导的方法确定某一零点频率所在的小区域范围;3) 找到该范围内的最小值即为零点频率。该方法提出了一种针对 SI 振动传感系统的完整、可靠的数据处理方法,实验对 27km 范围内的光纤进行振动实验,得到的测量位置与真实位置之间的相对误差小于 1.5%。

4 发展趋势与应用前景

虽然目前研究者已经提出多种多样的干涉型 DOFVS 传感结构及数据处理方法,但还存在一些问题需要解决。1) 大多数 DOFVS 传感结构只能对单振动点实现定位,而在超远距离监测的需求中,光纤需要布设长达几十公里,多点同时振动的可能性很高,单点监测系统极可能造成定位误判或漏判;2) 干涉型 DOFVS 的灵敏度很高,自然环境对超长距离布设的光纤干扰尤其严重,如何有效排除风、雨等自然噪声的干扰,是 DOFVS 需要重点解决的问题;3) 在许多实际应用中,还需要对振动源类型进行识别,将人、动物以及车辆等不同种类的振动信号进行自动识别有助于应对措施制定。因此,多点振动定位、抗环境干扰与振动源类型自动识别是 DOFVS 进一步发展的趋势。

干涉型 DOFVS 由于其监测范围广、无漏点和探测灵敏度高、具有非常广泛的应用前景。将干涉型 DOFVS 系统布设于国境线、军事基地、监狱和机场等重要场所,能有效打击偷渡、越狱和恐怖主义等犯罪活动;布设在银行、企业和生活小区等生产生活场所,能提升安保质量,保证民众生命财产安全;贴附或埋入输油管道、桥梁隧道和水库大坝等建筑设施内,可实时监测建筑物的破损、形变、老化等信息,保障建筑物的健康安全。

5 结束语

干涉型分布式光纤振动传感器具有灵敏度高、动态范围大及响应频带宽等独特的优点,在区域安防和结构健康监测领域有广阔的应用前景。然而其存在的多点同时振动无法检测、抗环境干扰能力弱等问题一定程度上限制了其实际应用及产业化发展,只有解决了这些问题,干涉型分布式光纤振动传感器才能在国民经济和国防建设中发挥更大的作用。

参 考 文 献

- 1 Sun Qizhen, Liu Deming, Wang Jian. Recent progress in distributed optical fiber stress sensor[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(1): 10~15
- 2 孙琪真, 刘德明, 王 健. 全分布式光纤应力传感器的研究新进展[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(1): 10~15
- 3 D. Jia, N. Fang, L. Wang *et al.*. Distributed fiber optic in-line intrusion sensor system[C]. 2008 China-Japan Joint Microwave Conference, 2008, 608~611
- 4 A. Loayssa. Optical Fiber Sensors for Structural Health Monitoring. In: *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring* [M]. Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 96. Berlin: Springer, 2011. 335~358
- 5 Hang Lijun, He Cunfun, Wu Bin. A new pipeline leakage detection system based on linear optical fiber Sagnac interferometer and its location technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 820~824

- 杭利军, 何存富, 吴 斌. 一种新的直线型 Sagnac 光纤干涉仪管道泄漏检测系统及其定位技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 820~824
- 5 P. R. Hoffman, M. G. Kuzyk. Position determination of an acoustic burst along a Sagnac interferometer[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 494~498
- 6 X. Li, Q. Sun, J. Wo *et al.*. Hybrid TDM/WDM-based fiber-optic sensor network for perimeter intrusion detection[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, **30**(8): 1113~1120
- 7 He Cunfu, Zheng Xingqiang, Luo Jianwei *et al.*. Research on a pipeline leakage detection system and its stability based on depolarized Sagnac fiber interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208002
何存富, 郑兴强, 骆建伟 等. 消偏型 Sagnac 光纤管道泄漏检测系统及其稳定性研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0208002
- 8 Hu Zhengsong, Yang Qihua, Qiao Bo. Design of interference distributed fiber-optic underwater long gas pipeline leakage detection system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(7): 070602
胡正松, 杨其华, 乔 波. 干涉分布式光纤水下长输气管道泄漏检测系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(7): 070602
- 9 A. A. Chtcherbakov, P. L. Swart, S. J. Spammer. Mach-Zehnder and modified Sagnac-distributed fiber-optic impact sensor[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(16): 3432~3437
- 10 S. C. Huang, W. W. Lin, M. T. Tsai *et al.*. Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks[J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **135**(2): 570~579
- 11 S. J. Spammer, P. L. Swart, A. A. Chtcherbakov. Merged Sagnac-Michelson interferometer for distributed disturbance detection[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 972~976
- 12 Zhang Ximo. Polarization Control for Dual Mach-Zehnder Fiber Oil and Gas Pipeline Security System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. 28~31
张溪默. 双 Mach-Zehnder 型光纤油气管道安全系统中的偏振控制[D]. 天津: 天津大学, 2012. 28~31
- 13 Luo Guangming, Zhang Chunxi, Ma Zongfeng *et al.*. Study on the distributed fiber optic sensing and locating technology for security system[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009, **31**(3): 327~329
罗光明, 张春熹, 马宗峰 等. 分布式光纤安防系统传感和定位技术研究[J]. 压电与声光, 2009, **31**(3): 327~329
- 14 S. J. Russell, J. P. Dakin. Location of time-varying strain disturbances over a 40 km fibre section, using a dual-Sagnac interferometer with a single source and detector[C]. *SPIE*, 1999, **3746**: 580~583
- 15 S. J. Russell, K. R. C. Brady, J. P. Dakin. Real-time location of multiple time-varying strain disturbances, acting over a 40-km fiber section, using a novel dual-Sagnac interferometer[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(2): 205~213
- 16 X. Fang. Fiber-optic distributed sensing by a two-loop Sagnac interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6): 444~446
- 17 D. F. Wu, T. Z. Zhang, B. Jia. Modified Sagnac interferometer for distributed disturbance detection[J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2008, **50**(6): 1608~1610
- 18 Q. Sun, D. Liu, J. Wang *et al.*. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(6): 1538~1544
- 19 Sun Yao, Jia Bo, Zhang Tianzhao. Position determination sensing system based on all-fiber interferometer with feedback loop[J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2006, **25**(1): 44~46
孙 尧, 贾 波, 张天照. 基于反馈环全光纤干涉的定位系统[J]. 传感器与微系统, 2006, **25**(1): 44~46
- 20 S. S. Mahmoud, J. Katsifolis. A real-time event classification system for a fibre-optic perimeter intrusion detection system [C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 75031P
- 21 G. Luo, C. Zhang, L. Li *et al.*. Distributed fiber optic perturbation locating sensor based on Dual-Mach-Zehnder interferometer[C]. *SPIE*, 2008, **6622**: 66220Z
- 22 Zhang Ying, Chen Jiamei, Li Gang *et al.*. Location method of distributed fiber-optic perimeter security system based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0605005
张 颖, 陈佳妹, 李 刚 等. 马赫-曾德尔分布式光纤周界防范系统定位算法研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(6): 0605005
- 23 S. Xie, Q. Zou, L. Wang *et al.*. Positioning error prediction theory for dual Mach-Zehnder interferometric vibration sensor [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(3): 362~368
- 24 X. Hong, J. Wu, C. Zuo *et al.*. Dual Michelson interferometers for distributed vibration detection[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(22): 4333~4338
- 25 Xu Haiyan, Xu Qie, Xiao Qian *et al.*. Disturbance detection in distributed fiber-optic sensor based on time-delay estimation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1603~1607

- 许海燕, 徐 锲, 肖 倩等. 基于时延估计的分布式光纤传感定位[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1603~1607
- 26 Xu Haiyan. Research on Distributed Fiber Vibration Sensor and Localization Method [D]. Shanghai: Fudan University, 2011. 21~85
- 许海燕. 分布式光纤振动传感器及其定位技术研究[D]. 上海: 复旦大学, 2011. 21~85
- 27 W. Xu, C. Zhang, S. Liang *et al.*. Fiber-optic distributed sensor based on a Sagnac interferometer with a time delay loop for detecting time-varying disturbance[J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2009, **51**(11): 2564~2567
- 28 N. Fang, J. Li, L. Wang *et al.*. Simulation of distributed optical fiber disturbance detection system based on Sagnac/Mach-Zehnder interferometer and cross-correlation location [J]. *J. Shanghai University (English Edition)*, 2011, **15**(2): 115~118
- 29 Weimin Chen, Yuanyuan Xie, Peng Zhang *et al.*. Localization theory of distributed fiber vibration sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(3): 186~187
- 30 Wu Yuan, Zhao Dong, Xu Haiyan *et al.*. Multiple disturbance location in distributed fiber-optic sensor based on WDM[C]. ICOCN 2010, 2010. 73~76
- 31 G. Zhang, C. Xi, Y. Liang *et al.*. Dual-Sagnac optical fiber sensor used in acoustic emission source location[C]. Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference, 2011. 1598~1602
- 32 Jiang Haili, Yuan Yonggui, Yang Jun *et al.*. The theoretical and experimental study on white light interferometric fiber optic sensors network based on Michelson and Mach-Zehnder interferometers[C]. 2011 Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology, 2011. 73~77
- 33 X. Hong, H. Guo, J. Wu *et al.*. An intrusion detection sensor based on coherent optical time domain reflector[J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2010, **52**(12): 2746~2748
- 34 W. Ding, Y. Jiang. All-solid photonic band gap fiber based distributed fiber optic pressure sensor[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(13): 14054~14063
- 35 C. Zhang, Q. Li, S. Liang *et al.*. Location algorithm for multi-disturbances in fiber-optic distributed disturbance sensor using a Mach-Zehnder interferometer[C]. ICOCN 2010, 2010. 103~107
- 36 L. Jiang, R. Yang. Identification technique for the intrusion of airport enclosure based on double Mach-Zehnder interferometer[J]. *J. Computers*, 2012, **7**(6): 1453~1459
- 37 Xie Shangran, Zou Qilin, Tu Yijun *et al.*. A study on real-time location method for long distance dual MZ interferometer vibration sensor[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(8): 1020~1024
- 谢尚然, 邹琪琳, 屠亦军等. 长距离双 M-Z 干涉型振动传感器实时定位算法研究[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(8): 1020~1024
- 38 Qian Jingjie, Zhang Jianqiu, Jia Bo. Real-time signal processing in Sagnac interferometer location determining system[J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2006, **19**(4): 1033~1037
- 钱静洁, 张建秋, 贾 波. Sagnac 干涉定位系统的实时信号处理方法[J]. 传感技术学报, 2006, **19**(4): 1033~1037
- 39 Q. Zhang, Z. Xiong, G. Liu. Noise elimination of vibration signal of distributed optical fiber-sensing system based on wavelet analysis[J]. *JDCTA*, 2011, **5**(10): 315~321
- 40 Lan Tian, Zhang Chunxi, Li Lijing *et al.*. All fiber perimeter security system[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(2): 259~261
- 蓝 天, 张春熹, 李立京等. 全光纤周界安全防范系统[J]. 光学技术, 2008, **34**(2): 259~261
- 41 Zeng Zhoumo, Zhang Ximo, Feng Hao *et al.*. Control of polarization fading for dual Mach-Zehnder fiber interferometric sensing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(3): 468~476
- 曾周末, 张溪默, 封 皓等. 双 Mach-Zehnder 光纤干涉传感系统中的偏振衰落控制[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(3): 468~476
- 42 Wang Jianfei, Wang Xiao, Luo Hong *et al.*. Investigation of polarization-induced phase noise in interferometric optical fiber sensing system based on FRM[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(15): 150701
- 王建飞, 王 潇, 罗 洪等. 基于法拉第旋镜的干涉型光纤传感系统偏振相位噪声特性研究[J]. 物理学报, 2012, **61**(15): 150701
- 43 Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900139
- 余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展[J]. 光学学报, 2011, **31**(9): 0900139
- 44 Li Deyue, Zhou Guiyao, Xia Changming *et al.*. Theoretical investigation of photonic crystal fiber with highly nonlinear and birefringent[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1105003

- 李德月, 周桂耀, 夏长明 等. 高非线性高双折射光子晶体光纤特性的理论研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(11): 1105003
- 45 Xu Hui zhen, Zhou Changjie. Highly nonlinear all-solid photonic crystal fibers with low dispersion slope[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1106001
- 徐惠真, 周昌杰. 全固高非线性低色散斜率光子晶体光纤设计[J]. 中国激光, 2012, **39**(11): 1106001
- 46 Fang Nian, Jia Dongjian, Shan Chao *et al.*. In-line Sagnac interferometer intrusion detection system and its location method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 292~297
- 方 捻, 贾东建, 单 超 等. 直线式 Sagnac 干涉仪入侵检测系统及其定位方法[J]. 光学学报, 2010, **29**(s2): 292~297