

光纤时变扰动分布传感技术的研究进展

方 捻^{1,2} 王陆唐^{1,2} 黄肇明^{1,2}

(¹上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)
(²上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘要 从各种扰动随时间变化的共性出发,对光纤扰动分布传感技术进行了分类,并对其系统结构、检测原理、定位方法、技术特点和应用领域进行了分析。对光时域反射(OTDR)型和干涉型两种常见的光纤时变扰动分布传感(TDDS)技术做了较全面的介绍,对新型的混沌有源光纤时变扰动分布传感技术做了较详细的描述,着重说明各种研究方案的扰动定位方法的原理、优缺点及最新的进展。最后指出,提高系统的检测实时性和抗干扰能力并降低系统的误报率是光纤时变扰动分布传感技术实用化研究的主要方向。

关键词 传感器;定位;光时域反射计;干涉仪;混沌激光器;时变扰动

中图分类号 TP212.14

OCIS 060.2370 120.0280

文献标识码 A

Progress of Fiber-Optic Time-Varying Disturbance Distributed Sensing Technology

Fang Nian^{1,2} Wang Lutang^{1,2} Huang Zhaoming^{1,2}

(¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)
(²School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract From the viewpoint of the time-varying general characteristic of various disturbances, categories of the fiber-optic disturbance distributed sensing technology are presented. The system structures, detection principles, location methods, characteristics and application fields of fiber-optic time-varying disturbance distributed sensing (TDDS) technology are analyzed. Two common kinds of the TDDS technology called optical time domain reflectometry (OTDR) and interferometer are introduced in the round. A novel chaos active fiber-optic TDDS technology is described in detail, and the principles, advantages and disadvantages of the location methods of various TDDS research schemes and the last location methods are emphasized. Finally the directions of promoting wide application of the fiber-optic TDDS technology are proposed, which improve the real-time properties and anti-jamming ability and reduce the false alarm ratio of the TDDS system.

Key words sensors; location; optical time domain reflectometry; interferometer; chaos laser; time-varying disturbance

1 引言

光纤扰动分布传感技术是一个持续了几十年的研究热点。它可对油、气管道泄漏引起的光纤扰动进行检测与定位,保证管道的安全运行,避免造成国家经济损失和环境污染;也可用于监狱、核电站、边境线以及居民小区的周界防卫(又称光纤围栏),对非法入侵引起的光纤扰动进行检测与定位,保障国家重要设施与场所以及人民群众财物的安全;还可用于大型桥梁、高速公路等的断裂、变形等扰动对光纤影响的实时监测,确

收稿日期: 2010-04-02; 收到修改稿日期: 2010-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(60577042)、上海市教育委员会科研创新项目(10YZ19)资助课题、上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108,08DZ2231100)资助课题。

作者简介: 方 捻(1972—),女,博士,副教授,主要从事光纤传感与光纤通信等方面的研究。

E-mail: nfang@staff.shu.edu.cn

保交通安全事故的有效预警。这些光纤扰动的共同特点是都具有时变性。

目前常用的光纤时变扰动分布传感(TDDS)技术主要有两种:时域反射型(OTDR)和干涉型。OTDR型又有相敏OTDR(ϕ -OTDR)^[1~3]、偏振光OTDR(POTDR)^[4]、 ϕ -OTDR与POTDR的结合^[5]等。干涉型则有萨尼亚克(Sagnac)干涉系统^[6~11]、马赫-曾德尔(M-Z)干涉系统^[12~17]、萨尼亚克-萨尼亚克^[18~22]、萨尼亚克/M-Z^[23~24]、萨尼亚克-迈克耳孙^[25]等组合式干涉仪以及法布里-珀罗干涉仪阵列系统^[26]等。最近本课题组提出一种基于新的传感机理的光纤时变扰动分布传感技术——混沌有源传感技术^[27~29]。它利用混沌系统对初值的敏感性,把混沌激光器本身作为光纤时变扰动的分布传感器。分别介绍了这三种技术的系统结构、检测原理、定位方法、技术特点、应用领域和研究近况。当前,光纤时变扰动分布传感技术的核心问题是如何定位扰动,因此,着重说明了各种研究方案的扰动定位方法的原理、优缺点及最新的进展。最后指出了光纤时变扰动分布传感技术实用化研究的发展方向。

2 OTDR型光纤TDDS技术

OTDR技术早在20年前就已提出,现在广泛应用于光纤故障点或其长度的静态检测。用于光纤时变扰动传感时主要是利用背向瑞利散射光的强度变化来检测入侵扰动,根据光脉冲进入光纤与探测器检测到背向返回的光脉冲的时间差来定位入侵^[30]。OTDR技术比较成熟,易于实现,但用于入侵扰动检测时灵敏度较差,容易漏报,需要对传感光纤作增敏处理^[30]。

ϕ -OTDR是在OTDR的基础上发展起来的,如图1所示,它利用光纤上不同部位的背向散射光到达探测器的干涉效应检测光纤受到入侵扰动引起的相位变化^[1~3]。因此, ϕ -OTDR可看作一个迈克耳孙干涉仪。没有入侵时, ϕ -OTDR输出一条特定的背向散射光功率曲线。当有入侵扰动发生时背向散射光功率曲线发生改变。用事先存储的无入侵时的背向散射光功率曲线与有入侵时的背向散射光功率曲线进行比较,即可得出其不同点^[1~3]。由于光纤不同位置的散射光返回时间与此位置到光电探测器的距离成正比,由散射曲线不同点发生的时间可获得入侵发生地点,即定位入侵。目前报道的 ϕ -OTDR传感系统最高定位精度为50 m,定位范围14 km^[3]。

ϕ -OTDR系统只需铺设单根传感光纤,在同一端测量即可,系统结构简单,使用区域灵活。而且灵敏度高,能够检测到传统OTDR检测不到的微小的扰动信号,但需用极窄线宽和极小频率漂移的光源^[2,3]。由于探测信号较弱,系统对光探测器的灵敏度和噪声指标要求较高。要获得高的信噪比,需要对数百条散射曲线进行平均,检测的实时性差。目前,已有文献都是针对单点扰动检测和定位。

其它改进型OTDR光纤时变扰动分布传感系统也逐渐出现,如 ϕ -OTDR和P-OTDR组合型传感系统^[5]可把检测准确度提高到100%,但复杂的信号处理导致实时性下降。利用P-OTDR传感系统的频谱分析法^[4]定位扰动,1 km光纤长度上得到10 m的分辨率,不必再作数据平均,提高了检测实时性,但信号处理也很复杂,对光源的要求依然很高。OTDR型光纤时变扰动分布传感系统下一步要做的工作主要是研究多点扰动的定位方法,降低成本,提高检测实时性。

3 干涉型光纤TDDS技术

3.1 萨尼亚克干涉系统

用一段标准单模光纤把一个3 dB耦合器的两个端口相连即可构成萨尼亚克干涉系统^[6,7]。它将同一光源发出的一束光分解为两束,让它们在同一个环路内沿相反方向环行一周后汇合,发生干涉。萨尼亚克干涉系统用于光纤TDDS时主要用于管道泄漏的检测。对于宽带的泄漏扰动信号,对解调出的扰动信号的相位进行频谱分析,寻找频谱为零的频率即可定位扰动^[6,7]。截至目前,萨尼亚克干涉系统最好的相对定位误差

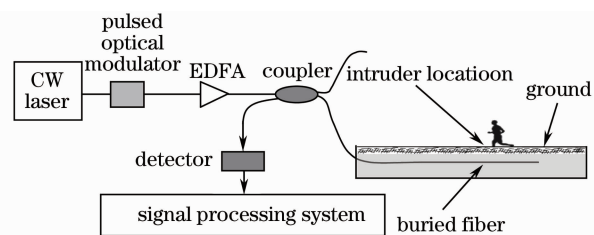


图1 用于入侵扰动传感的 ϕ -OTDR

Fig. 1 ϕ -OTDR used for intrusion sensing

是0.07%^[7]。我们对入侵扰动实测,得到行人入侵信号也是宽频信号,因此,也可用萨尼亚克干涉系统寻求频谱零点频率的方法定位行人入侵^[11]。

萨尼亚克干涉型光纤时变扰动分布传感系统对光源相干性要求不高,使用宽带光源即可。萨尼亚克光纤环中的两束相反方向光是在同一光纤中传播的,其光程是一样的。因此,干涉输出不受环境因素和光源带宽的影响,信噪比高。但是它对解调电路的要求很高,一般需用复杂的相位生成载波(PGC)解调技术^[9,10,31],零点频率有时会淹没在噪声频谱中,需要特别处理^[8],影响了检测的实时性。另外,扰动信号的带宽也限制了系统可检测的距离。环形结构铺设时需将其中一路光纤进行扰动隔离,以避免由于互易效应而造成干涉信号相抵消。

因此,近年来研究较多的是直线式萨尼亚克干涉系统^[8~11]。其结构都与图2所示类似,通过传感光纤末端连接一个法拉第旋转镜(FRM)形成直线式检测结构。只需一根光纤就可对整个光纤沿线上的泄漏或入侵扰动进行检测和定位;同时也消除了萨尼亚克干涉仪对环中心点无法检测的缺陷。除了结构上的改进,获取零点频率的方法也得到了简化^[8,11]。萨尼亚克干涉型光纤时变扰动分布传感系统下一步要做的工作主要是简化和改进扰动信号的解调方法,降低系统的复杂度和成本。

3.2 M-Z干涉系统

M-Z干涉系统用于光纤时变扰动分布传感时可用于入侵^[12]、管道泄漏^[13,14]或其它振动扰动^[15,16]的检测。它一般由两段标准单模光纤和两个3 dB耦合器构成。一条光纤称为传感臂,另一条称为参考臂。M-Z干涉系统双向工作,利用两端探测器探测到的同一扰动产生的干涉信号的时间差定位扰动^[17]。一般通过计算两端干涉信号的互相关函数来实现扰动的定位,检测距离20 km左右时,定位误差在150 m左右^[13,14,16]。

M-Z干涉仪解调技术比较简单,采用一般的光电探测器进行光功率检测即可。所需仪器较少,光路结构较简单。对于多点扰动的情况,两端干涉信号互相关函数将出现多个极值点,而每个极值点将对应一个扰动的时延,所以可对多点扰动进行定位^[13]。

由于采用双臂干涉结构,需用相干光源,参考臂和传感臂的长度要一致;还需对参考臂进行温度、声波等的隔离保护,否则检测结果易受环境因素变化的影响。

基于此,环形M-Z干涉仪光纤时变扰动分布传感系统被提出^[15]。如图3所示,3 dB耦合器C1、环行器C2和C3、对称的3×3光纤耦合器C4和C5与双芯的传感光缆,组成了环形M-Z干涉仪。使得一个M-Z干涉仪中相向传输两路光波,相当于构成双M-Z干涉仪。该系统不但能定位多点扰动,还能恢复扰动信号。1.01 km光纤长度上获得的定位分辨率小于38 m,而且很自然地解决了参考臂和传感臂等长的要求。但同样需考虑环境及温度变化等干扰信号的影响,两个光探测器的性能也需一致,而且只能探测闭合区域。M-Z干涉型光纤时变扰动分布传感系统下一步要做的工作主要是增强系统的抗干扰能力和抗噪声能力^[32],降低误报率。

3.3 组合式干涉系统

组合式干涉仪光纤时变扰动分布传感系统20世纪90年代研究得较多,目前仍在不断发展中。具体组合形式有萨尼亚克-萨尼亚克^[18~22]、萨尼亚克/M-Z^[23~24]、萨尼亚克-迈克耳孙^[25]与法布里-珀罗干涉仪阵列^[26]等。

早期组合式干涉系统的代表是萨尼亚克-迈克耳孙干涉仪^[25]。如图4所示,通过在萨尼亚克环的中心

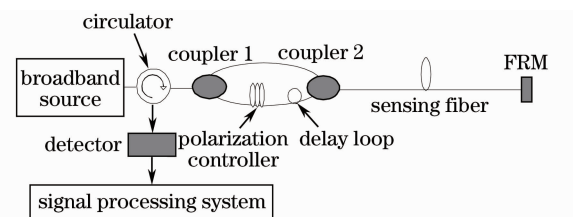


图2 直线式萨尼亚克干涉仪光纤时变扰动分布传感系统

Fig. 2 In-line Sagnac interferometer fiber-optical TDDS system

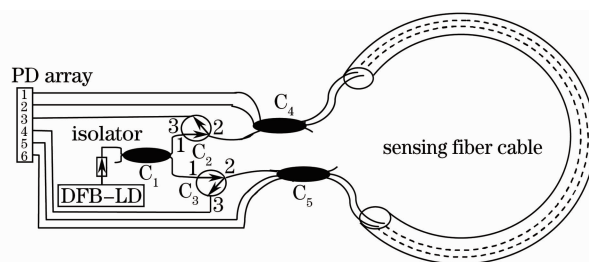


图3 环形M-Z干涉仪光纤时变扰动分布传感系统

Fig. 3 Ring M-Z interferometer fiber-optical TDDS system

位置放置一个频率选择镜(FSM)来实现。从两个光源发出的两个波长(λ_1, λ_2)的光通过波分复用器(WDM1)一起进入宽带耦合器 BBC。FSM 对波长为 λ_1 的光进行反射,对波长为 λ_2 的光进行透射,所以该干涉仪对波长 λ_1 是迈克耳孙干涉仪,对波长 λ_2 是萨尼亚克干涉仪。

对于迈克耳孙干涉仪,其干涉输出信号与扰动引起的相位改变成正比,即

$$y_m(t) \propto \phi(t), \quad (1)$$

式中 $y_m(t)$ 为时变扰动作用到光纤上时迈克耳孙干涉仪的输出, $\phi(t)$ 为扰动引起的相位改变。

对于萨尼亚克干涉仪,干涉输出信号与扰动所引起的相位变化率、扰动点和 FSM 之间的距离成正比,即

$$y_s(t) \propto \frac{2n}{c} z \frac{d\phi}{dt}. \quad (2)$$

式中 $y_s(t)$ 为时变扰动作用到光纤上时萨尼亚克干涉仪的输出, n 为光纤纤芯的折射率, c 为光在真空中的传播速率, z 为扰动点到 FSM 的距离, ϕ 为扰动引起的相位改变。

由(1),(2)式可以得到

$$y(z) = \frac{y_s(t)}{y_m(t)} \propto \frac{2n}{c} z. \quad (3)$$

式中 $y'_m(t) \propto \frac{d\phi}{dt}$ 。由(3)式可以看出,最后得到的信号仅与扰动点到 FSM 的距离 z 有关。因此,求得 z 即可对扰动进行定位。

近期组合式干涉系统的代表是时分复用的双环萨尼亚克干涉仪^[22]。如图 5 所示。通过在萨尼亚克环中插入两个耦合器和一个附加的延迟光纤环形成两个长度不同的萨尼亚克环。利用时分复用技术和脉冲光源区分时分复用的两个萨尼亚克干涉仪的输出信号。由两个干涉仪输出功率的大小经过反余弦以及反正切等运算来定位扰动。虽然利用时分复用技术,只需一个宽带光源和一个探测器,降低了成本,但其定位算法比较复杂,而且由于余弦和正切函数的周期性,其结果具有不确定性,因此定位准确度难以保证。

这些组合式干涉仪避免了单个干涉仪的某些缺点,而保留了每个干涉仪的优点。但是在定位分辨率方面并没有比单个干涉仪有明显提高,系统结构和信号处理却变得复杂,检测的实时性较单个干涉仪降低。组合式干涉仪光纤时变扰动分布传感系统下一步要做的工作主要是简化信号处理,提高检测实时性。

4 混沌有源光纤 TDDS 技术

混沌有源光纤 TDDS 技术的思想来自于混沌保密光通信技术。它利用混沌系统对初值的敏感性作为传感机理。基于混沌激光器输出光波的帧型结构特点把传感光纤的扰动定位转变成帧内混沌波形发生变化的开始时刻的定时。利用相邻帧混沌波形的相似性,动态比较相邻两帧混沌波形的互相关峰值变化定位扰动。其系统结构如图 6 所示,环形激光器中的一段光纤用作传感光纤,可用于多种时变扰动的检测与定位^[27~29]。初步实验测得,在 3 km 左右的监测范围内定位误差约 45 m,相对误差 5%^[29]。

半导体光放大器(SOA)光纤环形激光器的输出为具有帧结构的偏振混沌光,如图 7 所示。两个相邻自脉冲之间的混沌波形称为一帧,帧长 τ 等于光在光纤环中循环一周所用的时间。因此,一帧混沌波形的时间与一环光纤长度相对应,同时,环形激光器中一段光纤的双折射特性的变化与一段混沌波形的变化相对应。

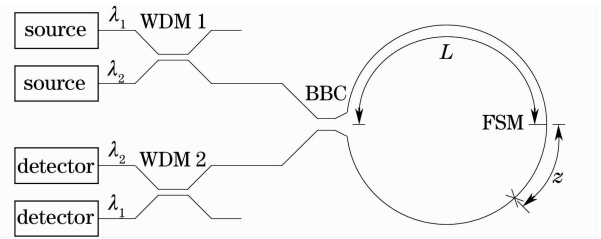


图 4 环形 M-Z 干涉仪光纤时变扰动分布传感系统

Fig. 4 Ring M-Z interferometer fiber-optical TDDS system

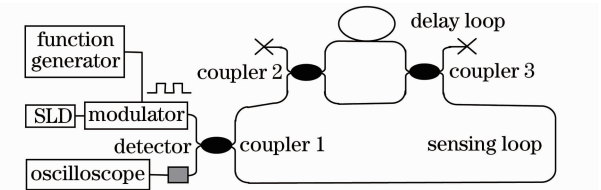


图 5 时分复用的双环萨尼亚克干涉仪光纤时变扰动分布传感系统

Fig. 5 Time-division multiplexing dual-ring Sagnac interferometer fiber-optical TDDS system

无扰动时混沌激光器的初始状态无变化,相邻两帧混沌波形的相似度高,两者的互相关峰值较大。任意位置的扰动都会改变环形激光器中光纤的双折射分布状态,引起环形激光器初始状态的改变。由于混沌对初值的敏感性,激光器输出波形即刻被改变,导致相邻两帧混沌波形的互相关峰值下降。因此,通过相邻帧输出波形的互相关运算可实现扰动的检测。扰动位置的不同会导致相邻帧混沌波形的互相关峰值不同。利用扰动位置与帧间互相关峰值的线性关系可实现扰动的定位^[29]。

由于混沌有源传感系统检测与定位扰动只需动态比较两帧时间的混沌波形,光纤环以 10 km 长计,两帧时间仅为 10^{-4} s,在这样短的时间内,缓慢变化的环境影响可以忽略不计。因此,抗干扰能力强。利用混沌对初值的敏感性,外界的瞬间扰动一旦发生,混沌激光器的状态和输出波形即刻发生变化,比较相邻两帧时间的混沌波形即可检测到有无扰动,信号处理简单,检测的实时性强。由于混沌波形不会重复自身,相邻帧波形又具有相似性,因此,混沌波形具有优良的延迟相关特性,其相关曲线形如 δ 函数的线型^[27,29],检测的分辨率高。由于混沌有源传感技术刚刚兴起,还有不少问题有待进一步解决,如多点扰动的定位方法、混沌信号的去噪、长距离传感时系统的工作稳定性等。

5 结 论

本文从各种扰动随时间变化的共性出发,对光纤扰动分布传感技术进行了分类和多方面的分析,包括系统结构、检测原理、定位方法、技术特点和应用领域。对 OTDR 型和干涉型两种常见的光纤 TDDS 技术做了较全面的介绍,着重说明它们的最新进展。对新型的混沌有源光纤时变扰动分布传感技术做了较详细的描述。针对光纤时变扰动分布传感技术定位扰动的核心问题介绍了各种研究方案的解决办法、各自的特点及下一步要做的工作。

几乎所有文献都给出了自己的定位分辨率,或给出定位精度或误差,但较少提及检测用时和误报率。而且基本都是限于原型系统或实验室模拟实验甚至数值模拟的研究程度,很少有实际的报警电路和实地测试结果,离实用化还很遥远。然而系统用于各种复杂的实际环境中时,如果隔离措施不好,各种干扰信号很可能把要检测的扰动信号淹没掉。已报道的各种方案的定位分辨率或精度基本都满足工程需要了,而实际应用时,检测的实时性和准确性其实更加重要。所以,无论哪种传感形式,要想尽快实用化,必须朝着提高检测实时性和抗干扰能力,降低系统的误报率的方向努力。

参 考 文 献

- 1 H. F. Taylor, C. E. Lee. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing[P]. United States; Patent; 5194847, Mar. 16, 1993
- 2 J. C. Juarez, E. W. Maier, K. N. Choi *et al.*. Distributed fiber optic intrusion sensor system[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6): 2081~2087
- 3 Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light ϕ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 569~572
谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 ϕ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 569~572

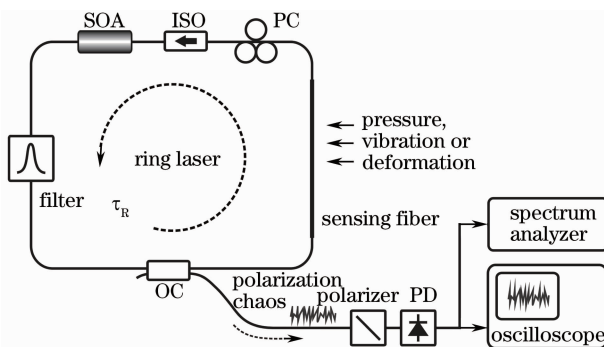


图 6 混沌有源光纤时变扰动分布传感系统

Fig. 6 Chaos active fiber-optical TDDS system

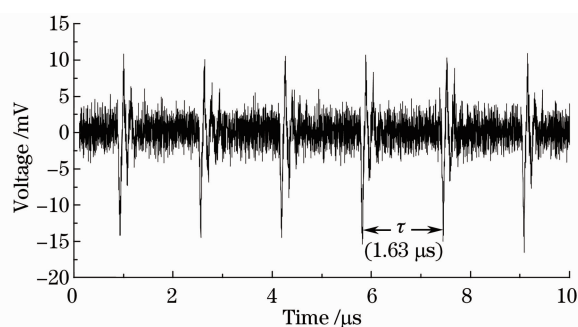


图 7 具有帧结构特点的偏振混沌环形激光器输出波形

Fig. 7 Framing output waveforms of polarization chaos ring laser

- 4 Z. Zhang, X. Bao. Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of polarization-OTDR system[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10240~10247
- 5 Y. J. Rao, J. Z. Li, Z. L. Ran *et al.*. Distributed intrusion detection based on combination of φ -OTDR and POTDR[C]. *SPIE*, 2008, **7004**: 700461-1~4
- 6 Hu Zhixin, Zhang Guilian, He Ju *et al.*. Leak detection on gas pipeline with the distributed fiber-optic sensing technology [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2003, **22**(10): 48~49
胡志新, 张桂莲, 何 巨 等. 利用分布式光纤传感技术检测天然气管道泄露[J]. *传感器技术*, 2003, **22**(10): 48~49
- 7 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
- 8 G. Hong, B. Jia, H. Tang. Location of a wideband perturbation using a fiber Fox-Smith interferometer[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(10): 3057~3061
- 9 S. Huang, W. Lin, M. Tsai *et al.*. Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks [J]. *Sens. and Actuators A*, 2007, **135**: 570~579
- 10 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 123~127
杭利军, 何存富, 吴 斌 等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 123~127
- 11 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*, 2009, **29**(s2): 292~297
- 12 Liu Bo, Yang Yifei, Zhang Jian *et al.*. A fiber fence system based on M-Z interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1013~1017
刘 波, 杨亦飞, 张 键 等. 基于 M-Z 干涉的光纤围栏系统实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1013~1017
- 13 Chen Weimin, Wu Jun, Tan Jing *et al.*. Locating technology for twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2128~2132
陈伟民, 吴 俊, 谭 靖 等. 双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2128~2132
- 14 Zhou Yan, Jin Shijiu, Zeng Zhoumo *et al.*. Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline safety detection and location[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(7): 922~924
周 琰, 靳世久, 曾周末 等. 分布式光纤管道安全检测定位技术研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(7): 922~924
- 15 Q. Sun, D. Liu, J. Wang *et al.*. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**: 1538~1544
- 16 S. Liang, C. Zhang, W. Lin *et al.*. Fiber-optic intrinsic distributed acoustic emission sensor for large structure health monitoring[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(12): 1858~1860
- 17 B. Kizlik. Fibre Optic distributed sensor in Mach-Zehnder interferometer configuration[C]. TCSET, 2002, 128~130
- 18 X. Fang. A variable-loop Sagnac interferometer for distributed impact sensing[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(10): 2250~2254
- 19 X. Fang. Fiber-optic distributed sensing by a two-loop Sagnac interferometer[J]. *Opt. Express*, 1996, **21**(6): 444~446
- 20 S. J. Russell, K. R. 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
- 21 S. J. Spammer, P. L. Swart, A. A. Chtcherbakov. Distributed dual-wavelength Sagnac impact sensor[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1998, **17**(3): 170~173
- 22 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 Optical Technology Letters*, 2009, **51**(11): 2564~2567
- 23 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
- 24 S. J. Spammer, P. L. Swart, A. A. Chtcherbakov. Modified Sagnac/Mach-Zehnder interferometer for distributed disturbance sensing[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1999, **20**(1): 34~36
- 25 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
- 26 R. M. Manuel, M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov. Location of a time-varying disturbance using an array of identical fiber-optic interferometers interrogated by CW DFB laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 20666~20675
- 27 N. Fang, C. Shan, L. Wang *et al.*. Polarization chaos distributed sensing with a semiconductor fiber ring laser[C]. Pacific

- Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO-Technical Digest, 2009, 1~2
- 28 Fang Nian, Shan Chao, Wang Lutang *et al.*. Study on the fiber distributed sensing system based on a polarization chaos ring laser[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(3): 335~339
方 捻, 单 超, 王陆唐 等. 基于偏振混沌环形激光器的分布光纤传感系统[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(3): 335~339
- 29 Shan Chao, Fang Nian, Wang Lutang *et al.*. Chaotic fiber fence system and intrusion location method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 335~339
单 超, 方 捻, 王陆唐 等. 混沌光纤围栏系统及其入侵定位方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 335~339
- 30 J. Gao, Z. Jiang, Y. Zhao *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 633~635
- 31 Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 87~91
肖 浩, 李 芳, 王永杰 等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 87~91
- 32 Ge Qiang, Xu Changchun, Wu Xuqiang *et al.*. Two noise reduction methods in interferential optical fiber sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 726~728
葛 强, 徐长春, 吴许强 等. 干涉型光纤传感器中的双重降噪方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 726~728