

Sagnac/Mach-Zehnder 分布式光纤传感系统 探测及定位理论分析

吴俊¹, 陈伟民², 谭靖², 章鹏²

(1 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)
(2 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要: 利用 3×3 耦合器解调算法实现对光纤沿线破坏行为的探测及预警. 在确定破坏行为发生的基础上, 通过将光源切换为窄带光源, 使 Mach-Zehnder 干涉系统工作. 利用互相关方法实现对破坏行为的精确定位. 详细介绍并分析了该方法的系统光路和探测定位原理.

关键词: 光纤光学与光通信; 分布式传感; 预警; 探测; 定位

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)02-347-5

0 引言

世界范围内, 随着大堤、长途油气管道等大型工民建设施安全性要求的不断提高, 对一体化安全监测系统的需求逐步攀升^[1-3]. 大型工民建设施局部受到破坏作用威胁初期, 设施由于外界作用而产生的变形较小, 然而如果破坏初期的微小变形不被及早发现并予以充分重视, 必然会在一定阶段累积并造成灾难性后果. 所以开发具备事前预警、长距离探测和定位功能的分布式光纤传感系统具有较高的实际应用价值.

针对工程的迫切需求, 本文开发了不仅能在事故初期对破坏行为进行探测、预警, 而且能对破坏行为进行精确定位的基于 Sagnac/Mach-Zehnder 干涉原理的分布式光纤传感系统.

1 Sagnac/Mach-Zehnder 分布式传感系统

基于 Sagnac/Mach-Zehnder 原理的分布式传感系统结构如图 1.

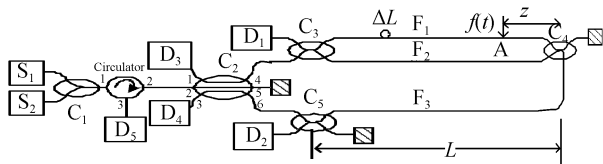


图 1 Sagnac/Mach-zehnder 干涉仪分布式传感系统结构
Fig. 1 Structure of the distributed sensing system based on Sagnac/Mach-zehnder interferometer

图 1 的结构中, 主要包括宽带光源 S_1 , 窄带光源 S_2 , 光环行器 C, 一个 1×2 耦合器 C_1 , 一个 3×3

耦合器 C_2 , 三个 2×2 耦合器 C_3, C_4, C_5 , 5 个探测器 D_1-D_5 . 为简便起见, 设光纤 F_1 的长度为 $L + \Delta L$, F_2, F_3 的长度均为 L .

图 1 中, 宽带光源 S_1 发出的光波经 1×2 耦合器 C_1 、光环行器 Circulator 后进入 3×3 耦合器 C_2 的 2 端, 于耦合器 C_2 的 4 端、6 端分为顺时针、逆时针传输的两束光. 4 端输出的顺时针传输的光在耦合器 C_3 中又分成两束, 这两束光波在传感光纤 F_1 和参考光纤 F_2 中传播时分别形成传感光和参考光. 传感光在 A 点感受地震动波作用后和参考光经耦合器 C_4 的一个输出端口汇合进入引导光纤 F_3 , 然后经引导光纤 F_3 从耦合器 C_5 的一个端口到达 3×3 耦合器 C_2 . 同理, 耦合器 C_2 的 6 端输出的逆时针光波经过耦合器 C_5 、引导光纤 F_3 、耦合器 C_4 、传感光纤 F_1 和参考光纤 F_2 、以及耦合器 C_3 , 到达 3×3 耦合器 C_2 . 包含传感光纤 F_1 的整条光纤路径, 顺、逆时针光波彼此间光程差为零, 构成一个 Sagnac 干涉仪. 同理, 包含参考光纤 F_2 的整条光纤路径构成另一个 Sagnac 干涉仪.

在通过 Sagnac 干涉系统探测到外界的破坏行为, 并发出警告信息后, 宽带光源 S_1 自动切换为窄带光源 S_2 . 光波顺时针传输时, 在传感光纤 F_1 中传输的传感光在 A 点感受地震动波作用后, 与在参考光纤 F_2 中形成的参考光于耦合器 C_4 的一个输出端口合成一束, 然后经引导光纤 F_3 从耦合器 C_5 输出到探测器 D_2 , 这就构成一个顺时针方向的 Mach-Zehnder 干涉仪. 同理, 逆时针传输的光波经历耦合器 C_5 、引导光纤 F_3 、耦合器 C_4 、传感光纤 F_1 和参考光纤 F_2 、以及耦合器 C_3 , 输出到探测器 D_1 , 该光路结构构成一个逆时针方向的 Mach-Zehnder 干涉仪.

对于大堤、长途油气管道等工民建设施而言, 当大堤具有滑坡隐患或管道上方有挖掘机等重型机械

施工,威胁到工民建设施安全时,埋于大堤内部或管道附近的光纤会感知到相应的外界作用 $f(t)$,如图2. 由于 $f(t)$ 的作用,光纤的局部长度 l 及直径 d 会

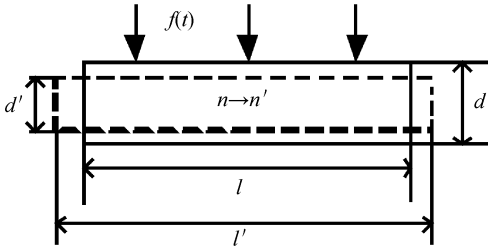


图2 光纤中光相位调制示意

Fig. 2 Sketch of light phase modulation in optic-fiber

发生改变,光波的相位会发生改变^[4]

$$\varphi(t) = B \cdot f(t) \quad (1)$$

式中

$$B = \frac{2\pi l}{\lambda} \left\{ 1 + \frac{n^2(1-\sigma)}{4\sigma} (p_{11} + p_{12}) + p_{12} \right\} \quad (2)$$

式中, $\varphi(t)$ 为由于外界应力作用光相位的改变, l 为受应力影响的光纤长度, λ 为光源中心波长, p_{11} 、 p_{12} 为光纤的光弹性系数, n 为光纤的折射率, σ 为光纤材料的泊松比. 对于某一次干扰事件, l 、 λ 、 p_{11} 、 p_{12} 、 n 、 σ 均为定值, B 为常量. 所以,光相位的变化与外界的作用 $f(t)$ 可以看成是线性变化的关系.

基于对外界破坏行为引起的光相位变化的感知, Sagnac 干涉系统能够高灵敏的探测外部作用,实现对破坏行为的预警, Mach-Zehnder 干涉系统能够实现对外部作用的精确定位.

2 破坏行为探测机理分析

破坏行为的探测依靠对 Sagnac 干涉系统输出信号的处理分析实现, Sagnac 干涉系统中光波的传输路径可以用图3的等效光路来表示.

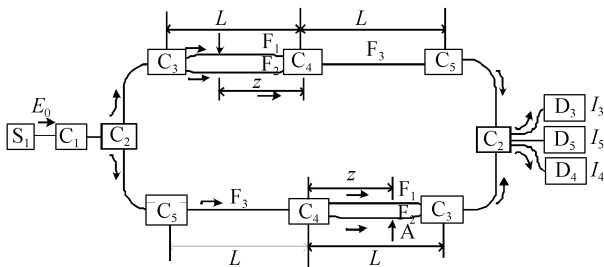


图3 探测系统的等效光路

Fig. 3 Equivalent optic path of detection system

由等效光路可知,由于构成 Mach-Zehnder 干涉仪的并行传感光纤 F_1 和 F_2 的存在,在顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向分别分成两束光,因此探测器 D_3 、 D_4 和 D_5 上各自接收到四束光: S_1 - C_1 - C_2 - C_3 - F_1 - C_4 - F_3 - C_5 - C_2 , S_1 - C_1 - C_2 - C_3 - F_2 - C_4 - F_3 - C_5 - C_2 , S_1 - C_1 - C_2 - C_5 - F_3 - C_4 - F_1 - C_3 - C_2 , S_1 - C_1 - C_2 - C_5 - F_3 - C_4 - F_2 - C_3 - C_2 . 在这四束光波中,经过传感光纤 F_1 和

参考光纤 F_2 的正反向两束光分别产生干涉. 由于选择宽带光源,相干长度有限,即光源的相干长度小于两条传感光纤 F_1 和 F_2 之间的长度差,则经过两条光路的光波之间不会产生干涉. 这样可以保证在探测器 D_3 、 D_4 和 D_5 上接收到的是两个 Sagnac 干涉仪输出光强的叠加.

根据探测系统的等效光路和耦合器的传输系数,在不考虑各光纤元件的插入损耗和光纤传输损耗情况下,可以写出探测器 D_3 接收到的四束光波的表达式^[5]

探测器 D_3 接收到的四束光波中经过传感光纤 F_1 的两束光为

$$E_{31} = \frac{\sqrt{2}}{12} E_0 \exp \left\{ j \cdot \left[\omega_c t + 2\pi \frac{n \cdot 2L}{\lambda_0} + \Delta\varphi_L + \varphi \left(t - \frac{n(L-z)}{c} - \frac{n\Delta L}{c} \right) + \frac{2\pi}{3} + \pi \right] \right\} \quad (3)$$

$$E_{32} = \frac{\sqrt{2}}{12} E_0 \exp \left\{ j \cdot \left[\omega_c t + 2\pi \frac{n \cdot 2L}{\lambda_0} + \Delta\varphi_L + \varphi \left(t - \frac{n(L+z)}{c} \right) - \frac{2\pi}{3} + \pi \right] \right\} \quad (4)$$

探测器 D_3 接收到的四束光波中经过参考光纤 F_2 的两束光为

$$E_{33} = \frac{\sqrt{2}}{12} E_0 \exp \left\{ j \cdot \left[\omega_c t + 2\pi \frac{n \cdot 2L}{\lambda_0} + \frac{2\pi}{3} \right] \right\} \quad (5)$$

$$E_{34} = \frac{\sqrt{2}}{12} E_0 \exp \left\{ j \cdot \left[\omega_c t + 2\pi \frac{n \cdot 2L}{\lambda_0} - \frac{2\pi}{3} \right] \right\} \quad (6)$$

式中, E_0 为光源振幅, ω_c 为光波中心频率, $\frac{(2\pi \cdot n \cdot 2L)}{\lambda}$ 表示光波经历的光程所带来的相位,

$\Delta\varphi_L = \left(\frac{2\pi \cdot n \cdot \Delta L}{\lambda_0} \right)$ 表示由两条传感光纤间存在长度差而引入的光程差, z 为作用点距终点的距离, L 为传感光纤长度, n 为单模光纤的折射率, $\varphi(t)$ 为外界作用所施加的相位影响. 其中 E_{31} 、 E_{32} 两次经过 2×2 耦合器的耦合,所以有附加相移 π ^[6].

为讨论问题方便,设

$$\varphi_1 = \omega_c t + 2\pi \frac{n \cdot 2L}{\lambda_0} + \Delta\varphi_L + \varphi \left(t - \frac{n(L-z)}{c} - \frac{n\Delta L}{c} \right) + \frac{2\pi}{3} + \pi \quad (7)$$

$$\varphi_2 = \omega_c t + 2\pi \frac{n \cdot 2L}{\lambda_0} + \Delta\varphi_L + \varphi \left(t - \frac{n(L+z)}{c} \right) - \frac{2\pi}{3} + \pi \quad (8)$$

$$\varphi_3 = \omega_c t + 2\pi \frac{n \cdot 2L}{\lambda_0} + \frac{2\pi}{3} \quad (9)$$

$$\varphi_4 = \omega_c t + 2\pi \frac{n \cdot 2L}{\lambda_0} - \frac{2\pi}{3} \quad (10)$$

由于光源 S_1 的相干长度小于传感光纤 F_1 和

F_2 之间的长度差 ΔL , 则探测器 D_3 接收到的四束光中, 只有 E_{31} 与 E_{32} 和 E_{33} 与 E_{34} 之间会发生干涉, 所以总光强为

$$I_3 = [(E_{31} + E_{32})(E_{31} + E_{32})^*] + [(E_{33} + E_{34})(E_{33} + E_{34})^*] = E_{31}E_{31}^* + E_{32}E_{32}^* + E_{33}E_{33}^* + E_{34}E_{34}^* + E_{31}E_{32}^* + E_{32}E_{31}^* + E_{33}E_{34}^* + E_{34}E_{33}^* = I_0/18 + I_0(\cos \Delta\varphi_{12} + \cos \Delta\varphi_{34})/36 \quad (11)$$

式中 $I_0 = E_0^2$.

根据式(7~10), 有

$$\Delta\varphi_{12} = \varphi\left(t - \frac{n(L-z)}{c} - \frac{n\Delta L}{c}\right) - \varphi\left(t - \frac{n(L+z)}{c}\right) + \frac{4\pi}{3} - \frac{n(2z - \Delta L)}{c} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{4\pi}{3} \quad (12)$$

$$\Delta\varphi_{34} = \frac{4\pi}{3} \quad (13)$$

由于传感光纤 F_1 和 F_2 为同缆光纤, 它们之间的 ΔL 较短, 所以式(12)中的 $\frac{n\Delta L}{c} \frac{d\varphi}{dt}$ 非常小, 为简化分析, 忽略它的影响, 则有

$$\Delta\varphi_{12} = \frac{2nz}{c} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{4\pi}{3} \quad (14)$$

将式(13)、(14)代入式(11), 可得 D_3 接收到的总光强

$$I_3 = \frac{1}{36}I_0 + \frac{1}{36}I_0 \cos\left(\frac{2nz}{c} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (15)$$

式(15)中, $\frac{1}{36}I_0$ 为直流分量, $\frac{1}{36}I_0 \cos\left(\frac{2nz}{c} \frac{d\varphi}{dt} - \frac{2\pi}{3}\right)$ 是与干涉有关的交流分量, 该项只与作用信号的位置和相位影响大小有关。

同理, 探测器 D_4 、 D_5 上接收到的光强可表示为

$$I_4 = \frac{1}{36}I_0 + \frac{1}{36}I_0 \cos\left(\frac{2nz}{c} \frac{d\varphi}{dt} - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (16)$$

$$I_5 = \frac{1}{36}I_0 + \frac{1}{36}I_0 \cos\left(\frac{2nz}{c} \frac{d\varphi}{dt}\right) \quad (17)$$

如式(15)~(17)的信号在坐标轴上是对称分布的, 可以利用对称解调算法进行处理, 对称解调算法的原理图如图 4。

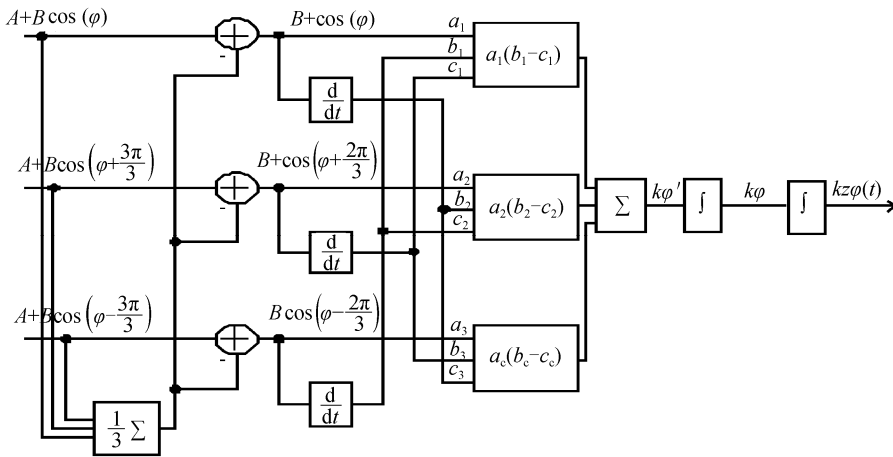


图 4 相位的对称解调方法

Fig. 4 The symmetry demodulation method for disturbance phase

由对称解调原理图可以看出, 经加法、微分、积分等运算后, 可以得到与光相位变化信号 $\varphi(t)$ 成线性关系的信号

$$y = k \cdot z \cdot \varphi(t) \quad (18)$$

式中 k 是一与系统结构相关的常量, z 为破坏行为发生的位置信息, 在某一次事件中, z 也为常量. 将式(1)代入式(18)可得

$$y(t) = k \cdot z \cdot B \cdot f(t) \quad (19)$$

由式(19)可以看出, 通过 Sagnac 传感系统对破坏行为的感测及对称解调算法的后续处理, 得到了与外界破坏作用 $f(t)$ 成正比的 $y(t)$, 从而实现了对外界破坏作用 $f(t)$ 的复现, 成功地实现了对破坏行

为的探测. 系统可以根据探测的结果, 判断外界行为是否具有破坏性, 并及时发出报警信息。

3 破坏行为定位理论分析

破坏行为的定位依靠对 Mach-Zehnder 干涉系统输出信号的处理分析实现, Mach-Zehnder 干涉系统中光波的传输路径可用如图 5 的等效光路来表示。

Sagnac 传感系统探测到有威胁性事件发生后, 宽带光源 S_1 自动切换为窄带光源 S_2 , 由于满足光源相干长度大于光纤长度差 ΔL 的要求, Mach-Zehnder 传感系统开始工作。

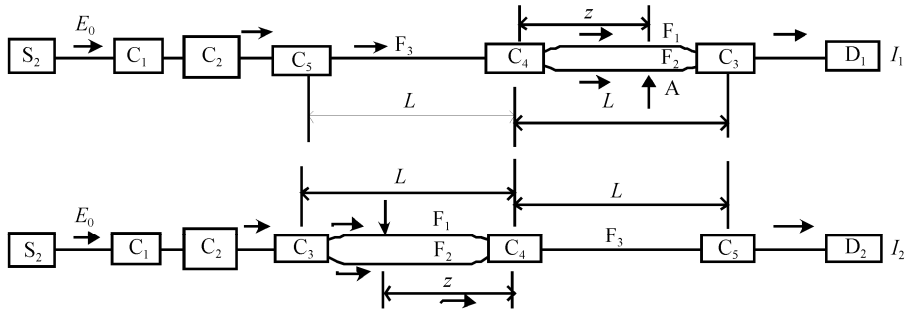


图5 定位系统的等效光路
Fig.5 Equivalent optic path of location system

探测器 D₁ 接收到的两束干涉光分别为

$$E_{11} = \frac{\sqrt{6}}{12} E_0 \exp \left\{ j \cdot \left[\omega_c t + 2\pi \frac{n \cdot 2L}{\lambda} + \Delta\varphi_L + \varphi \left(t - \frac{n(L-z)}{c} - \frac{n\Delta L}{c} \right) - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (20)$$

$$E_{12} = \frac{\sqrt{6}}{12} E_0 \exp \left\{ j \cdot \left[\omega_c t + \frac{2\pi \cdot n \cdot (2L)}{\lambda} - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (21)$$

探测器 D₂ 接收到的的两束干涉光分别为

$$E_{21} = \frac{\sqrt{6}}{12} E_0 \exp \left\{ j \cdot \left[\omega_c t + 2\pi \frac{n \cdot 2L}{\lambda} + \Delta\varphi_L + \varphi \left(t - \frac{n(L+z)}{c} \right) + \frac{2\pi}{3} + \frac{3\pi}{2} \right] \right\} \quad (22)$$

$$E_{22} = \frac{\sqrt{6}}{12} E_0 \exp \left\{ j \cdot \left[\omega_c t + \frac{2\pi \cdot n \cdot (2L)}{\lambda} + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (23)$$

则 D₁ 和 D₂ 接收到的干涉光强分别为

$$I_1 = \frac{1}{12} I_0 + \frac{1}{12} I_0 \cos \left(\Delta\varphi_L + \varphi \left(t - \frac{n(L-z)}{c} - \frac{n\Delta L}{c} \right) \right) \quad (24)$$

$$I_2 = \frac{1}{12} I_0 + \frac{1}{12} I_0 \cos \left(\Delta\varphi_L + \varphi \left(t - \frac{n(L+z)}{c} \right) + \pi \right) \quad (25)$$

设

$$\tau_1 = \frac{n(L-z)}{c} + \frac{n\Delta L}{c}, \tau_2 = \frac{n(L+z)}{c} \quad (26)$$

则式(24)、(25)可表示为

$$I_1 = \frac{1}{12} I_0 + \frac{1}{12} I_0 \cos \left(\Delta\varphi_L + \varphi(t - \tau_1) \right) \quad (27)$$

$$I_2 = \frac{1}{12} I_0 - \frac{1}{12} I_0 \cos \left(\Delta\varphi_L + \varphi(t - \tau_2) \right) \quad (28)$$

滤除式(27)和(28)中的直流成分后,可以得到两个反向的余弦干涉信号

$$I_{1r} = \frac{1}{12} I_0 \cos \left(\Delta\varphi_L + \varphi(t - \tau_1) \right) \quad (29)$$

$$I_{2r} = -\frac{1}{12} I_0 \cos \left(\Delta\varphi_L + \varphi(t - \tau_2) \right) \quad (30)$$

从式(29)、(30)可以得到 I_{1r} 和 I_{2r} 两个信号的时间

延迟 Δτ

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = \frac{n(2z - \Delta L)}{c} \quad (31)$$

从式(31)可知, I_{1r} 和 I_{2r} 两个信号的时间延迟 Δτ 与传感光纤 F₁、F₂ 之间的长度差 ΔL 和外部作用的位置 z 有关. 由于 ΔL 为定值, 则 Δτ 的变化只与作用位置 z 有关, 所以只需要测得这两个信号之间的时延 Δτ, 就可以由(31)式求得外部作用的位置 z.

在实际的信号处理中, 将 I_{2r} 反相, 与 I_{1r} 作互相关, 就可以得到两个干涉信号的时移 Δτ, 将 Δτ 代入式(31), 就可以求得破坏行为发生地的位置信息 z.

4 结论

通过分析发现, 基于 Sagnac/ Mach-Zehnder 干涉原理的分布式光纤传感系统通过对光源的时分复用, 实现了 Sagnac 和 Mach-Zehnder 干涉传感系统的优化组合, 不仅能够复现外界破坏行为, 对管道破坏行为进行预警, 而且可以较简单的通过互相关算法实现对破坏行为的精确定位.

参考文献

[1] ZHANG Bu-yue, WANG Gui-zeng, LIU Ji-dong, et al. A survey on methods of leak detection and location for oil pipelines[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2001, 22(3): 13-17.
张布悦, 王桂增, 刘吉东, 等. 输油管线泄漏检测和定位技术综述[J]. *上海海运学院学报*, 2001, 22(3): 13-17.

[2] TAN Jing, CHEN Wei-min, FU Yu-mei, et al. Analysis of monitoring system for pipeline security based on sagnac interferometer[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2004: 351-355.

[3] HU Zhi-xin, ZHANG Gui-lian, 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漏[J]. *传感器技术*, 2003, 22(10): 48-49.

[4] SUN Sheng-he, WANG Ting-yun, XU Ying. Optic fiber measurement and optic fiber sensing technology[M]. Harbin: Harbin Industry University Press, 2002: 141-142.
孙圣和, 王廷云, 徐影. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 141-142.

- [5] TAN Jing, CHEN Wei-min, ZHU Yong, *et al.* The monitoring system and the analysis of locating theory for pipeline leakage detection based on single distributed optical fiber sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 228-231.
谭靖, 陈伟民, 朱永, 等. 单轴分布式光纤传感器管线泄漏探测方法及定位理论分析[J]. 光子学报, 2006, **35**(2): 228-231.
- [6] TAN Jing, CHEN Wei-min, FU Yu-mei. A research on polarization effects in the single distributed optical fiber sensor based on sagnac interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 492-497.
谭靖, 陈伟民, 符欲梅. 基于 Sagnac 原理的单轴分布式光纤传感系统的偏振态分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(3): 492-497.

Detecting and Locating Method of Distributed Optic-fiber Sensing System Based on Sagnac/Mach-Zehnder Interferometers

WU Jun¹, CHEN Wei-min², TAN Jing², ZHANG Peng²

(1 *Southwest Water Transport Research Department, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China*)

(2 *The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems, Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400030, China*)

Received date: 2007-09-20

Abstract: A 3×3 coupler demodulation algorithm was used to detect destruction along the fiber. Based on confirming the occurring of the destruction, by switching the broadband to narrowband source, Mach-Zehnder interference system works. The cross-correlation method was used to realize precise positioning, thus achieving the goal that defenders are led to stop acts of sabotage to prevent the occurrence of malice. The optical path was presented, and the detecting and locating principle was analyzed in detail.

Key words: Optical fiber optics and optical communication; Distributed optic fiber sensor; Early-alarm; Detecting; Locating



WU Jun was born in 1981. He obtained his B. S. degree and M. S. degree in 2004 and 2007 respectively. He is now an engineer at Southwest Water Transport Research Department, Chongqing Jiaotong University, and his research interests focus on optical fiber sensors, optoelectronic precise instruments.