

文章编号: 1001-3806(2014)04-0480-04

基于 3×3 耦合器 Fox-Smith 型光纤周界系统的定位技术

任 广^{1,2}, 江 山^{2*}, 闫奇众², 印新达², 熊 岩²

(1. 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074; 2. 武汉理工光科股份有限公司, 武汉 430200)

摘要: 为了对长距离周界入侵进行定位, 提出一种使用 3×3 耦合器作为基本元件的 Fox-Smith 干涉仪光纤入侵探测系统。对此结构及其定位方法进行了理论分析和实验验证。当有冲击作用在传感光纤上时, 光纤中的光波受到相位调制, 利用两束光波受到调制的时间不同从而产生相位差; 通过对解调出的相位信号进行傅里叶变换, 获取了一系列的陷波点。结果表明, 在长度为 34.793km 传感光纤上, 获得平均定位误差为 $\pm 83\text{m}$, 可见该种结构在长距离周界系统定位是可行的。这一结果在长距离周界入侵定位上具有一定的帮助。

关键词: 传感器技术; 光纤; Fox-Smith 干涉仪; 入侵探测; 定位

中图分类号: TP212 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.010

Location technology of fiber intrusion detection system based on Fox-Smith interferometer with 3×3 coupler

REN Guang^{1,2}, JIANG Shan², YAN Qizhong², YIN Xinda², XIONG Yan²

(1. Wuhan Research Institute of Post and Telecommunication, Wuhan 430074, China; 2. WUTOS Technology Co. Ltd., Wuhan 430200, China)

Abstract: In order to locate the long distance perimeter intrusion, an optical fiber intrusion detection system was promoted based on Fox-Smith interferometer with 3×3 coupler as the main component. Theoretical analysis and experimental verification were carried out on the system and its location method. When the impact force acts on the sensor fiber, the optical wave is modulated by the phase. There is phase difference because of the modulation time difference between both the beams. A series of trap points are gained after the fast Fourier transform of the demodulated phase signal. The results showed the average location error was $\pm 83\text{m}$ when the length of sensing fiber was 34.793km. The system is feasible for long intrusion location and helpful to intrusion detection.

Key words: sensor technique; optical fiber; Fox-Smith interferometer; intrusion detection; location

引 言

近年来,干涉型分布式光纤传感系统由于其具有较高的灵敏度在油气管道泄漏检测和安防检测等领域受到了广泛的关注^[1]。干涉型分布式光纤传感系统基于相位调制原理,干涉信号的相位中携带有信号信息及信号的作用位置信息,为了从中分离出信号的位置信息,人们提出了多种采用干涉结构实现定位。目前的主要干涉结构有 Sagnac 干涉定位系统、单马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 干涉定位结构、MZI-MZI 干涉定位系

统^[2-3]、MZI-Sagnac 干涉定位系统^[4]、Sagnac-Michelson 干涉定位系统^[5]。2004 年,HOFFMAN 和 KUZYK^[6]报道了仅使用 Sagnac 干涉仪的振动定位传感系统。2007 年,HONG 等人^[7]报道了基于 2×2 的 Fox-Smith^[8-9]干涉结构,该结构没有对相位进行解调,而是使用近似的方法获取振动信息,这样影响了对振动信号的准确获取,从而影响定位精度。作者介绍一种基于 3×3 耦合器的 Fox-Smith 型干涉周界入侵探测系统,该系统使用 3×3 耦合器作为相位解调元件,通过解调相位获得振动信息,从而实现定位。使用法拉第旋光反射镜作为端面和谐振腔反射元件,既减少了偏振带来的影响^[10-13]也提高了光纤端面的反射率。系统传感光纤成直线型,这样在油气管道泄漏探测和安防检测时,传感光纤的利用率较高。

作者简介:任 广(1988-),男,硕士研究生,主要从事分布式光纤传感系统技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail:jshan@wri.com.cn

收稿日期:2013-09-16;收到修改稿日期:2013-10-11

1 基于 3 × 3 耦合器的 Fox-Smith 干涉分布式光纤传感方案

在本文中作者将基于 Fox-Smith 谐振腔以及 3 × 3 耦合器提出一种振动入侵探测传感系统,使用单根光纤作为探测的 Fox-Smith 干涉仪。

基于 3 × 3 耦合器的 Fox-Smith 干涉分布式光纤传感方案见图 1。该方案主要包括超辐射发光二极管 (superluminescent light emitting, SLED) 宽谱光源、光隔离器、三端口光环行器、3 × 3 耦合器、长度为 L_d 的时延光纤 (time delay fiber, TDF)、法拉第旋光镜 (Faraday rotation mirror, FRM)、传感光纤、光电转探测器 (photo detector, PD) 等组成。图 1 中, I, II, III 和 1, 2, 3 分别表示耦合器的 3 个输入端口和 3 个输出端口。采用 SLED 宽谱光源主要是防止光波在振荡的时候在 3 × 3 耦合器中干涉,从而无法获得正确的信号。使用 FRM 主要是起到减弱光偏振对干涉光的影响,有效避免在扰动点处光纤偏振态随机变化从而对干涉系统造成影响^[8]。设扰动点为 D , 扰动点距离端面的距离为 L_x 。光波在系统中会形成多路光,可以干涉的两路光波为:

光波 1: 光源 → I → 2 → TDF → FRM₂ → II → FRM₁ →

1 → FRM₃ → coupler 1 → $\left\{ \begin{array}{l} \text{III} \rightarrow \text{PD}_2 \\ \text{I} \rightarrow \text{circle 2} \rightarrow \text{circle 3} \rightarrow \text{PD}_1; \end{array} \right.$

光波 2: 光源 → I → 1 → FRM₃ → II → FRM₁ → 2 → TDF →

FRM₂ → coupler 1 → $\left\{ \begin{array}{l} \text{III} \rightarrow \text{PD}_2 \\ \text{I} \rightarrow \text{circle 2} \rightarrow \text{circle 3} \rightarrow \text{PD}_1。 \end{array} \right.$

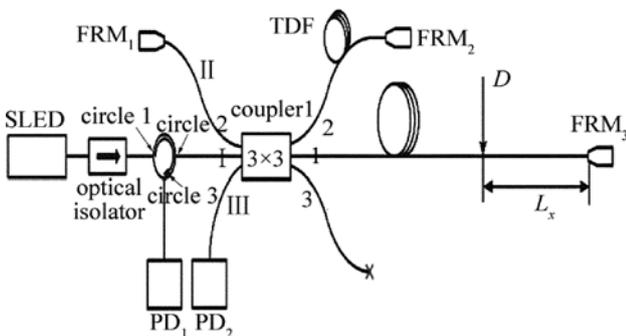


Fig. 1 Structure of Fox-Smith distributed sensing system based on 3 × 3 coupler

两束光波在 3 × 3 耦合器中可以形成稳定的干涉,这是因为两束光走过的光路是相同的,只是到达扰动位置的时间有延迟 $\tau = 2n_{\text{eff}}L_d/c$,其中, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, c 为光速, L_d 为延迟距离。这种不

对称使得两束光产生了相位差,从而形成干涉。理想的 3 × 3 耦合器的琼斯矩阵表达式为:

$$K_{mn} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix}, (m = n, \text{直接耦合}) \quad (1)$$

$$K_{mn} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{3}e^{i\frac{2\pi}{3}} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3}e^{i\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix}, (m \neq n, \text{跨接耦合}) \quad (2)$$

法拉第旋光反射镜琼斯矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

若假设扰动信号为 $\phi(t)$, 入射光为 $E_0 = [E_x \ E_y]^T$, 则 PD₁ 中相干的两路光分别为:

$$\begin{cases} E_1 = K_{21}MK_{22}MK_{12}e^{i\phi(t-t_1)}Me^{i\phi(t)}K_{11}E_0 \\ E_2 = K_{11}e^{i\phi(t-\tau-t_1)}Me^{i\phi(t-\tau)}K_{21}MK_{22}MK_{12}E_0 \end{cases} \quad (4)$$

则 PD₁ 中接收的光强为:

$$\begin{aligned} I_1 = E \cdot E^* &= (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)^* = \\ &= [K_{21}MK_{22}MK_{12}e^{i\phi(t-t_1)}Me^{i\phi(t)}K_{11}E_0 + \\ &+ K_{11}e^{i\phi(t-\tau-t_1)}Me^{i\phi(t-\tau)}K_{21}MK_{22}MK_{12}E_0] \cdot \\ &[K_{21}MK_{22}MK_{12}e^{-i\phi(t-t_1)}Me^{-i\phi(t)}K_{11}E_0 + \\ &+ K_{11}e^{-i\phi(t-\tau-t_1)}Me^{-i\phi(t-\tau)}K_{21}MK_{22}MK_{12}E_0]^* = \\ &= A + B\cos[\phi(t - \tau - t_1) + \phi(t - \tau) - \\ &\phi(t - t_1) - \phi(t)] \end{aligned} \quad (5)$$

PD₂ 中相干的两路光分别为:

$$\begin{cases} E_1' = K_{23}MK_{22}MK_{12}e^{i\phi(t-t_1)}Me^{i\phi(t)}K_{11}E_0 \\ E_2' = K_{13}e^{i\phi(t-\tau-t_1)}Me^{i\phi(t-\tau)}K_{21}MK_{22}MK_{12}E_0 \end{cases} \quad (6)$$

可得 PD₂ 中接收到的光强为:

$$\begin{aligned} I_2 = (E_1' + E_2') \cdot (E_1' + E_2')^* &= \\ &= [K_{23}MK_{22}MK_{12}e^{i\phi(t-t_1)}Me^{i\phi(t)}K_{11}E_0 + \\ &+ K_{13}e^{i\phi(t-\tau-t_1)}Me^{i\phi(t-\tau)}K_{21}MK_{22}MK_{12}E_0] \cdot \\ &[K_{23}MK_{22}MK_{12}e^{-i\phi(t-t_1)}Me^{-i\phi(t)}K_{11}E_0 + \\ &+ K_{13}e^{-i\phi(t-\tau-t_1)}Me^{-i\phi(t-\tau)}K_{21}MK_{22}MK_{12}E_0]^* = \\ &= A_1 + B_1\cos\left[\phi(t - \tau t_1) + \phi(t - \tau) - \right. \\ &\left. \phi(t - t_1) - \phi(t) + \frac{2\pi}{3}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中, A, B, A_1 和 B_1 均为常数, * 表示共轭转置, $t_1 = 2n_{\text{eff}}L_x/c, \tau = 2n_{\text{eff}}L_d/c$ 。设 $\phi(t) = \phi_0 \sin(2\pi ft)$, 其中 f 为频率。将 $\phi(t)$ 代入 I_1, I_2 表达式的相位

中,可得:

$$\begin{aligned} \Delta\psi_1(t) &= \phi(t - \tau - t_1) + \phi(t - \tau) - \\ &\phi(t - t_1) - \phi(t) = \\ &\phi_0 \sin\left[2\pi f\left(t - \frac{2n_{\text{eff}}L_d}{c} - \frac{2n_{\text{eff}}L_x}{x}\right)\right] + \\ &\phi_0 \sin\left[2\pi f\left(t - \frac{2n_{\text{eff}}L_d}{c}\right)\right] - \\ &\phi_0 \sin\left[2\pi f\left(t - \frac{2n_{\text{eff}}L_x}{x}\right)\right] - \phi_0 \sin(2\pi ft) = \\ &4\phi_0 \sin\left(\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_d}{c}\right) \cos\left(\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_x}{c}\right) \times \\ &\cos\left[2\pi f\left(t - \frac{n_{\text{eff}}L_x}{c} - \frac{n_{\text{eff}}L_d}{c}\right)\right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta\psi_2(t) &= \phi(t - \tau - t_1) + \phi(t - \tau) - \\ &\phi(t - t_1) - \phi(t) + \frac{2\pi}{3} = \\ &\phi_0 \sin\left[2\pi f\left(t - \frac{2n_{\text{eff}}L_d}{c} - \frac{2n_{\text{eff}}L_x}{x}\right)\right] + \\ &\phi_0 \sin\left[2\pi f\left(t - \frac{2n_{\text{eff}}L_d}{c}\right)\right] - \\ &\phi_0 \sin\left[2\pi f\left(t - \frac{2n_{\text{eff}}L_x}{x}\right)\right] - \phi_0 \sin(2\pi ft) + \frac{2\pi}{3} = \\ &4\phi_0 \sin\left(\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_d}{c}\right) \cos\left(\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_x}{c}\right) \times \\ &\cos\left[2\pi f\left(t - \frac{n_{\text{eff}}L_x}{c} - \frac{n_{\text{eff}}L_d}{c}\right)\right] + \frac{2\pi}{3} \end{aligned} \quad (9)$$

I_1 和 I_2 相位的幅值为:

$$\Delta\psi_{\text{amp}} = 4\phi_0 \sin\left(\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_d}{c}\right) \cos\left(\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_x}{c}\right) \quad (10)$$

(10)式中,当 $\sin\left(\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_d}{c}\right) = 0$ 或 $\cos\left(\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_x}{c}\right) = 0$ 时, $\Delta\psi_{\text{amp}} = 0$, 在频率上表现为向下的凹陷,称之为陷波点。对(10)式分析如下:

(1) 当 $\cos\left(\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_x}{c}\right) = 0$ 时, $\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_x}{c} = (2k +$

$1)\frac{\pi}{2}$, 则陷波点频率 f_{null} 为:

$$f_{\text{null}} = (2k + 1) \frac{c}{4n_{\text{eff}}L_x} \quad (11)$$

式中, k 为自然数,这时出现的陷波点频率与扰动距离相关。由上式可以看出,当扰动点距离尾端面较近的时候,出现的第1级陷波点频率较大,在相同采样率的条件下,对同样数目的点做快速傅里叶变换所获得的频率范围较小,从而陷波点的个数就会相应减少,从而导致定位误差增大。

(2) 当 $\sin\left(\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_d}{c}\right) = 0$ 时, $\frac{2\pi f n_{\text{eff}}L_d}{c} = k\pi$, 即:

$$f_{\text{null}}' = k \frac{c}{2n_{\text{eff}}L_d} \quad (12)$$

从(12)式可以看出,长度为 L_d 的延迟光纤也会产生陷波点,通过控制延迟光纤的长度,使延迟纤形成的陷波点远离零点,这样可以获得由于扰动产生的陷波点,从而实现定位。当把扰动视为理想的白噪声时,相应的傅里叶变换为绝对的正弦函数,由(11)式定义的频率与扰动点之间的关系见图2,因此定位原理为通过获取相位的频谱,获得陷波点,从而实现定位。

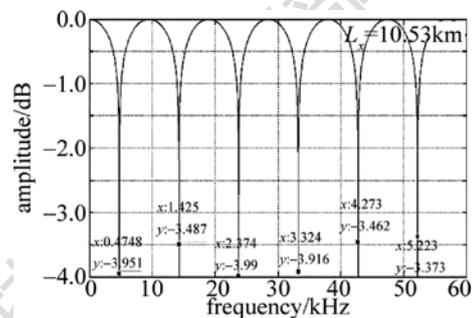


Fig. 2 Frequency response of Fox-Smith interferometer when white noise perturbation applied at a distance of L_x

2 实验

实验平台按照图1搭建,光源采用中心波长为1550nm的SLED光源,光源出光功率为1.3mW。数据采集卡为凌华PCI-9846H,16位分辨率,最高采样率为40Msamples/s。光电二极管为昱升YSPD718,其响应度为0.86。延迟光纤的长度为1.187km。3×3耦合器的分光比测量为1:1.045:1.015。法拉第旋光反射镜的反射率测量值为87.5%。传感光纤长度为34.793km,分别是10.015km,10.53km,3.973km,10.275km(每盘光纤均为光学时域反射针测量)。在实验室条件下对上述结构进行实验,设

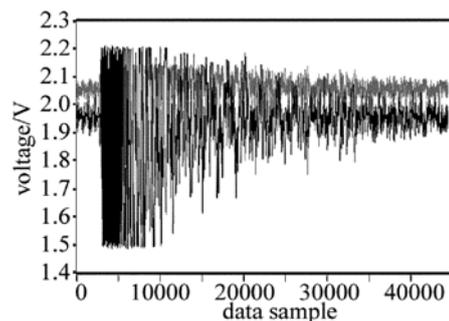


Fig. 3 Time-domain signal of perturbation

置采集卡采样率为 1Msample/s,通过某一段光纤获得一系列的波形,其时域波形如图 3 所示。

按照 3 × 3 耦合器的解调方法^[9-10]进行相位解调后,获得的相位图形如图 4 所示。

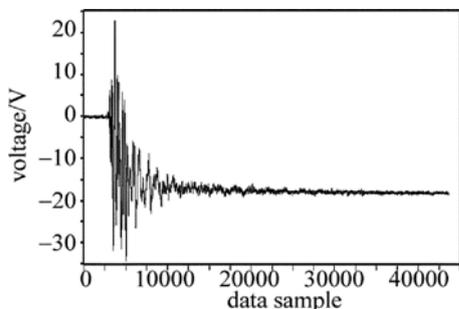


Fig. 4 Phase signal after demodulation

对图 4 所示的相位信号做短时傅里叶变换,这样就可以获得相位的强度谱,其强度谱幅值以 dB 为单位,获得的频域波形如图 5 所示。

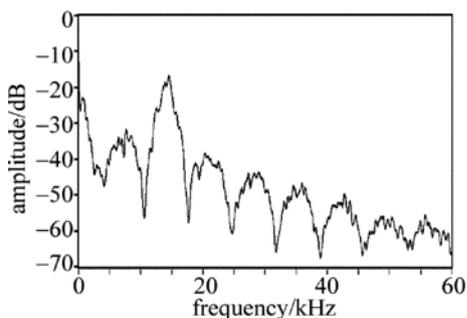


Fig. 5 Power spectrum result of an impact at 13.988km

获得的陷波点频率为:4147.465Hz,10599.078Hz,17603.686Hz,24700.460Hz,31705.069Hz,38894.009Hz。根据(3)式,取光纤折射率为 1.48,计算出扰动点位置为 13.957km,其定位误差为 12m。实验中选取了几盘光纤的连接点做实验,结果如表 1 所示。

Table 1 Perturbation deviation at different position

location of impact/km	location distance/km	deviation/m
10.015	9.834	181
13.988	13.957	31
24.518	24.580	62
34.793	34.852	59

从上面的数据可以算出,定位误差为 ±83m。

3 结 论

通过理论分析与实验验证,证明利用 3 × 3 耦合器作为基本元件的 Fox-Smith 干涉结构在长距离周

界的入侵检测定位是可行的。通过对相位的解调,获得了在长 34.793km 传感光纤上,平均定位精度为 ±83m。但是该种结构在靠近光纤尾端时灵敏度较低,获得的定位误差较大。用于长距离周界入侵时需要预留出一段光纤以保证在探测时具有较高的灵敏度。

参 考 文 献

- [1] ZHANG R, JIANG Sh, YAN Q Zh, *et al.* All-fiber perimeter alarm system based on Mach-Zehnder interference[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3): 334-337 (in Chinese).
- [2] XIE Sh R, ZOU Q L, TU Y J. A Study on real-time location method for long distance dual M-Z interferometric vibration sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(8): 1020-1024 (in Chinese).
- [3] CHEN W M, WU J, TAN J, *et al.* Locating technology for twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system [J]. *Acta Proceedings of Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2128-2132 (in Chinese).
- [4] CHITCHERBAKOV A A, SWART P L, SPAMMER S J, *et al.* Modified Sagnac/Mach-Zehnder interferometer for distributed disturbance sensing [J]. *Proceedings of the SPIE*, 1998, 3489: 60-64.
- [5] SPAMMER S J, SWART P L. Merged Sagnac-Michelson interferometer for distributed disturbance detection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(6): 972-976.
- [6] HOFFMAN P R, KUZYK M G. Position determination of an acoustic burst along a sagnac interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(2): 494-498.
- [7] HONG G W, JIA B, TANG H. Location of a wideband perturbation using a fiber Fox-Smith interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(10): 3057-3061.
- [8] BARNESLEY P. Fiber Fox-Smith resonators; application to single-longitudinal-mode operation of fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1988, 5(8): 1339-1446.
- [9] SMITH P W. Stabilized single frequency output from a long laser cavity [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1965, 1(8): 343-348.
- [10] XU H Y. Study on perturbation determination based on distributed fiber sensing system [D]. Shanghai: Fudan University, 2011: 45-60 (in Chinese).
- [11] SUN Q Zh. Study on distributed fiber-optic sensing and information processing technology and its applications [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 29-31 (in Chinese).
- [12] SUN Y, JIA B, ZHANG T Zh. Position determination sensing system based on all-fiber interferometer with feedback loop [J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2006, 25(1): 44-46 (in Chinese).
- [13] HANG L J, HE C F, WU B, *et al.* Detection technology of underwater pipeline leakage and its location method [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(3): 376-379 (in Chinese).