

# 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

谭 靖<sup>1,3</sup> 陈伟民<sup>1</sup> 朱 永<sup>1</sup> 王 丁<sup>2</sup>

(1 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2 重庆大学数理学院, 重庆 400044)

(3 中国人民解放军 95478 部队, 400329)

**摘 要** 利用 Sagnac 干涉原理的分布式光纤传感器是一种可用于长途油气管线侵入、泄漏探测和定位的新技术。为了克服屏蔽和隔离 Sagnac 光纤环中未用作传感的那一半光纤所带来的屏蔽困难、成本增加等问题, 提出一种单轴分布式光纤传感器的方法。其原理是利用一条光纤代替光纤环, 并在光纤尾端设置法拉第旋转镜, 构成偏振无关 Sagnac 干涉仪探测和定位管线泄漏。文中详细分析和讨论了该方法的系统光路和探测定位原理。

**关键词** 油气管线; 泄漏定位; 光纤传感器

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A

## 0 引言

长途油气管线是一种方便、经济的油气运输方式, 但管线通常埋藏在地下几米的地方, 其安全易受到自然或人为的破坏, 如地震、挖掘机等工程车辆在管线上施工, 以及不法分子在管线上钻孔偷油等。目前对长途油气管线的监测, 一般采取人工巡视、模型法和传感器法来实现。人工巡视是一种最原始的方法, 主要依靠人在管线上来回巡视; 而模型法和传感器法的定位准确度、准确性则依赖于模型的优劣, 以及传感器的准确度和安装密度<sup>[1]</sup>; 此外模型法和传感器法都只能在泄漏发生后实现对事件的定位, 而不能在泄漏发生前实现对威胁事件的探测和定位。

近年来, 在 Sagnac 干涉仪的基础上, 发展了一种基于分布式光纤传感技术的自动监测方法。这种方法利用沿管线铺设的光纤作为传感元件, 因而传感光纤上的任一点都具有传感能力, 且监测距离远、定位准确度高; 同时利用 Sagnac 干涉原理来获取信号, 其探测灵敏度也较传统方法高。参考文献[2,3]中介绍了利用这种技术的系统结构。在这种结构中, 为了能获得有效的干涉信号, Sagnac 光纤环中只有一半能用作传感器, 而另一半光纤需要屏蔽、隔离, 这一点在实际应用中会大量增加系统成本, 因此限制了该技术在实际监测系统中的应用。本文为解决这一问题, 对该结构进行了改进, 并对探测定位原理作了详细分析。

## 1 Sagnac 分布式光纤传感原理

Sagnac 分布式光纤传感器是在 Sagnac 光纤陀螺

的基础上发展起来的用于管线泄漏探测和定位的一种新技术。它将 Sagnac 光纤环布置在管线内或它的上方<sup>[2,3]</sup>, 沿管线屏蔽和隔离光纤环中的一半, 而将对称的另一半当作传感元件, 如图 1。当一个随时间变化的事件作用在光纤环上 N 点时, 会使光纤在该点处的传输特性发生变化, 从而引起光纤环中相向传输的两束光 CW 和 CCW 的相位在该点处发生变化, 利用信号的宽频特性从两束光的相位变化频谱中分析出泄漏发生的位置。

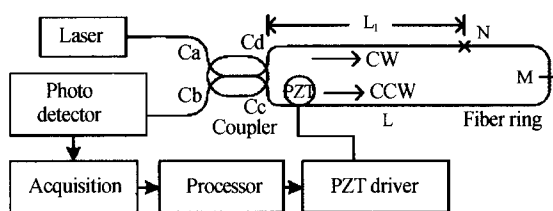


图 1 Sagnac 分布式光纤传感原理图  
Fig. 1 The structure of the system based on Sagnac distributed optical fiber sensor

参考文献[2,3]对其定位原理作了具体分析, 最后得出了求解泄漏位置的计算公式  $f_0 = \frac{Nc}{(L-2L_1)n}$ 。式中  $L$  为光纤环总长度,  $L_1$  为泄漏点距耦合器的距离,  $N$  为正整数。

该系统如果应用到实际系统中, 还存在以下两个问题: 1) 需要屏蔽光纤环中未用作传感的那一半光纤, 这一点在实际应用过程中很难做到。即使在其外面加上特殊材料制成的覆盖层, 效果也不理想, 系统成本也成倍增加。2) 为增加传感距离, 一般选用单模光纤制作光纤环, 因此不得不考虑光纤双折射对系统的影响<sup>[4]</sup>, 需要在光路上增加偏振控制器<sup>[2]</sup>等元件。

## 2 单轴分布式光纤传感器

### 2.1 单轴分布式光纤传感原理

本文提出一种单轴分布式光纤传感器解决方案,采用一条光纤代替光纤环,从而避免因屏蔽带来的困难,系统结构如图 2. 该系统中,在传感光纤末端设置一个法拉第旋转镜<sup>[5]</sup>,不但可以消除传感光纤固有的圆双折射和线性双折射的影响,还可以消除其它原因如温度引起的互易双折射的影响<sup>[6~8]</sup>;在激光器与耦合器之间设置一个光环行器,对反射光进行隔离,以消除它对光源的影响;在延迟光纤上设置利用压电陶瓷组成的相位调制器<sup>[9]</sup>,以一个固定的频率对光纤中传输光的相位进行周期调制.

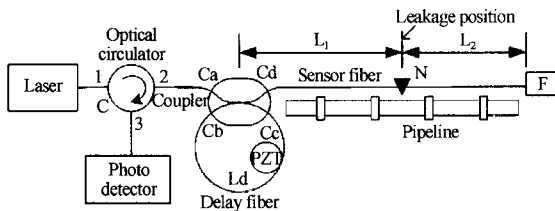


图 2 单轴分布式光纤传感系统结构图

Fig. 2 The structure of the system based on single distributed optical fiber sensor

系统光路如图 3,激光器发出低相干的宽带光,在耦合器中被分成两束  $I_1$  和  $I_2$ .  $I_1$  直接注入传感光纤中,经过干扰源和法拉第旋转镜后,被反射回传感光纤,再次经过干扰源和耦合器,在耦合器中被分成  $I_{11}$  和  $I_{12}$ ,其中  $I_{11}$  经延长光纤后,从耦合器输出到光电探测器; $I_2$  则不同,先经过延长光纤,然后才进入传感光纤,经法拉第旋转镜反射回耦合器,在耦合器中被分为  $I_{21}$  和  $I_{22}$ ,其中  $I_{21}$  直接反射回探测器, $I_{22}$  经延长光纤后,经耦合器输出到光电探测器. 由于  $I_{11}$  和  $I_{21}$  具有相同的光程,在光电探测器上发生干涉,但两束光受到调制和管线扰动影响的时间不同,这将引起干涉条纹的变化. 用检测相位的方法探测这种变化可获得两干涉光中相位的变化量,再用频率分析法即可得到泄漏或侵入事件发生的具体位置.

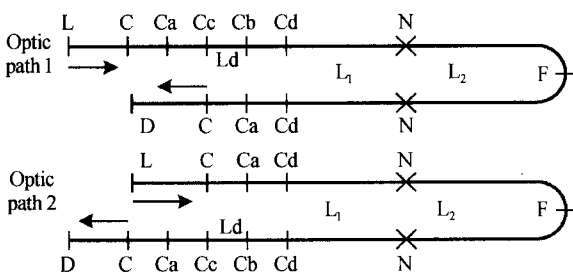


图 3 系统光路图

Fig. 3 The optic path of the system

### 2.2 管线泄漏探测定位的理论分析

在单轴分布式光纤传感器中,由于用一条光纤

代替了光纤环,在光纤中传输的光往返经过事件点时,其相位都将受到影响,而在使用光纤环的系统只被影响一次,因此参考文献<sup>[2,3]</sup>的定位公式不能直接用于该系统,需要重新推导.

首先,假设从耦合器 Ca 端输出的两束光分别为

$$\tilde{E}_1 = E_1 \exp \left\{ j \left[ W_c t + \phi(t - \tau_1) + \phi(t - \tau_2) + \Delta\phi_m [\sin W_m (t - \tau_{m1})] + \varphi_1 \right] \right\} \quad (1)$$

$$\tilde{E}_2 = E_2 \exp \left\{ j \left[ W_c t + \phi(t - \tau_3) + \phi(t - \tau_4) + \Delta\phi_m [\sin W_m (t - \tau_{m2})] + \varphi_2 \right] \right\} \quad (2)$$

这两束光的相位变化包含了外部事件(如泄漏等)对它的影响. 其中,  $\Delta\phi_m$  为相位调制器的调制强度,  $W_m$  为相位调制器的调制频率,  $\varphi_1, \varphi_2$  为两束光的初始相位;  $\phi(t - \tau_1)$  和  $\phi(t - \tau_2)$  表示  $I_1$  在  $(t - \tau_1)$  和  $(t - \tau_2)$  时刻受到泄漏等事件干扰所发生的相位变化,而  $\tau_1$  表示从泄漏点到达耦合器 Ca 输出端所需时间,  $\tau_2$  表示  $I_1$  从泄漏点经法拉第旋转镜,再次通过泄漏点后到达 Ca 输出端所需时间,同理,  $\phi(t - \tau_3)$  和  $\phi(t - \tau_4)$  表示  $I_2$  在  $(t - \tau_3)$  和  $(t - \tau_4)$  时刻受到泄漏等事件干扰所发生的相位变化;  $\tau_{m1}$  和  $\tau_{m2}$  表示相位调制器产生的周期相位信号施加到  $I_1$  和  $I_2$  后,到达耦合器 Ca 输出端的时间;  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_{m1}$  和  $\tau_2$  分别表示为

$$\tau_1 = \frac{nL_1}{c}, \tau_2 = \frac{n(L_1 + 2L_2)}{c}, \tau_{m1} = \frac{n(L_d)}{c},$$

$$\tau_3 = \frac{n(L_d + L_1)}{c}, \tau_4 = \frac{n(L_d + L_1 + 2L_2)}{c},$$

$$\tau_{m2} = \frac{n(L_d + 2L_1 + 2L_2)}{c}$$

式中  $L_d$  表示延迟光纤的长度,  $L_1$  表示从耦合器到事件发生点的距离,  $L_2$  表示从事件发生点到法拉第旋转镜的距离.

式(1)和(2)所表示的相干光在耦合器 Ca 输出端产生干涉,其光强  $I$  可表示为

$$I = 2E_1^2 \left\{ 1 + \cos \left[ \begin{aligned} & \phi(t - \tau_1) + \phi(t - \tau_2) - \phi(t - \tau_3) \\ & - \phi(t - \tau_4) + (\varphi_1 - \varphi_2) + \Delta\phi_m \cdot \\ & \left[ \cos W_m (t - \frac{\tau_T}{2}) \sin W_m (\frac{\tau_s}{2}) \right] \end{aligned} \right] \right\} \quad (3)$$

$$\text{式中 } \tau_T = \tau_{m1} + \tau_{m2} = \frac{n(2L_d + 2L_1 + 2L_2)}{c}, \tau_s =$$

$$\tau_{m2} - \tau_{m1} = \frac{n(2L_1 + 2L_2)}{c}.$$

式(3)中  $\tau_s$  的大小与传感光纤总长度  $L$  有关,其中  $L = (L_1 + L_2)$ ; 系统确定后,  $\tau_s$  为固定值,调整 PZT 的调制频率,让  $\sin W_m (\frac{\tau_s}{2}) = 1$ , 即  $W_m \frac{\tau_s}{2} = \frac{\pi}{2}$ , 则

式(3)可简化为

$$I = 2E_1^2 \left\{ 1 + \cos \left[ \begin{array}{l} \phi(t-\tau_1) + \phi(t-\tau_2) - \\ \phi(t-\tau_3) - \phi(t-\tau_4) + \\ (\varphi_1 - \varphi_2) \\ + \Delta\phi_m [\cos W_m(t - \frac{\tau_T}{2})] \end{array} \right] \right\} \quad (4)$$

用模拟或数字的方法滤除式(4)中的直流部分,余下的干涉项可表示为

$$I_r = 2E^2 \left\{ \begin{array}{l} \cos [\Delta\phi + (\varphi_1 - \varphi_2)] \cdot \\ \cos [\Delta\phi_m \cos W_m(t - \frac{\tau_T}{2})] - \\ \sin [\Delta\phi + (\varphi_1 - \varphi_2)] \cdot \\ \sin [\Delta\phi_m \cos W_m(t - \frac{\tau_T}{2})] \end{array} \right\} \quad (5)$$

式中  $\Delta\phi$  为外部干扰源引起的总的相位变化,可表示为

$$\Delta\phi = \phi(t-\tau_1) + \phi(t-\tau_2) - \phi(t-\tau_3) - \phi(t-\tau_4)$$

利用 Bessel 展开式,将式(5)展开,可得

$$I_r = J_0(\Delta\phi_m) 2E^2 \cos [\Delta\phi + (\varphi_1 - \varphi_2)] - 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{J_{2k-1}(\Delta\phi_m) 2E^2 \sin [\Delta\phi + (\varphi_1 - \varphi_2)] \cdot}{\cos W_m(2k-1)t'} \right] - 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{J_{2k}(\Delta\phi_m) 2E^2 \cos [\Delta\phi + (\varphi_1 - \varphi_2)] \cdot}{\cos W_m 2kt'} \right] \quad (6)$$

式中  $t' = t - \frac{\tau_T}{2}$ .

式(6)中,取出  $W_m$  的一倍频项和二倍频项系数<sup>[7]</sup>,令

$$S_1 = 4E^2 J_1(\Delta\phi_m) \sin [\Delta\phi + (\varphi_1 - \varphi_2)]$$

$$S_2 = 4E^2 J_2(\Delta\phi_m) \cos [\Delta\phi + (\varphi_1 - \varphi_2)]$$

则有

$$S_2 S_1' - S_1 S_2' = 8E^2 J_1(\Delta\phi_m) J_2(\Delta\phi_m) \Delta\phi' \quad (7)$$

对式(7)积分,可得

$$[(S_2 S_1' - S_1 S_2')] = 8E^2 J_1(\Delta\phi_m) J_2(\Delta\phi_m) \Delta\phi \quad (8)$$

从式(8)中即可获得外部干扰所引起的总的相位变化  $\Delta\phi$ . 由于管线的泄漏或挖掘机在管线上工作所产生的信号通常为宽频信号,考虑到  $\delta$  函数的宽频特性,为研究问题的方便,假设  $\phi(t) = \delta(t)u(t)$ . 此处引入  $u(t)$  函数是因为时间  $t$  从  $0 \rightarrow +\infty$  变化,

$u(t)$  函数定义为  $u(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$

可以证明  $\delta(t)u(t)$  也具有宽频特性,则  $\Delta\phi$  可表示为

$$\Delta\phi = u(t) [\delta(t-\tau_1) + \delta(t-\tau_2) - \delta(t-\tau_3) - \delta(t-\tau_4)] \quad (9)$$

对式(9)中的  $\Delta\phi$  作傅里叶变换,可以得到  $\Delta\phi$  在频域中的表达式

$$\Delta\phi(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} [\delta(t-\tau_1) + \delta(t-\tau_2) - \delta(t-\tau_3) - \delta(t-\tau_4)] u(t) e^{-i\omega t} dt \quad (10)$$

根据一维  $\delta$  函数的积分性质<sup>[8]</sup>,式(10)可化简为

$$\Delta\phi(\omega) = e^{-i\omega\tau_1} + e^{-i\omega\tau_2} - e^{-i\omega\tau_3} - e^{-i\omega\tau_4} \quad (11)$$

则有

$$|\Delta\phi(\omega)|^2 = 16 \sin^2(\omega\tau_D) \cos^2(\omega\tau_x) \quad (12)$$

式中

$$\tau_D = \frac{\tau_2 - \tau_3 + \tau_1 - \tau_4}{4} = \frac{nL_d}{2c},$$

$$\tau_x = \frac{\tau_2 - \tau_3 - \tau_1 + \tau_4}{4} = \frac{n(L-L_1)}{c}$$

由式(12)可得

$$|\Delta\phi(\omega)| = |4 \sin \omega\tau_D \cos \omega\tau_x| \quad (13)$$

从式(13)中可以看出,当系统确定时,  $\tau_D$  为固定值,仅有  $\tau_x$  项与距离信息  $L_1$  有关,因此可以通过  $\tau_x$  获得事件的具体位置.

### 3 讨论

现在讨论如何从式(13)求解出事件发生的具体位置. 由式(8)获得  $\Delta\phi$  之后,在频谱中可得到多个满足  $|\Delta\phi(\omega)| = 0$  的零点频率,由式(13)中可知,下列两种情况可产生零点频率:

1)  $\sin(\omega\tau_D) = 0$ , 即  $\omega\tau_D = m\pi, m = 0, 1, 2, \dots$ , 则

零点频率  $f_{01} = \frac{mc}{nL_d}$ ;

2)  $\cos(\omega\tau_x) = 0$ , 即  $\omega\tau_x = (2m+1)\pi/2, m = 0, 1, 2, \dots$ ,

则零点频率

$$f_{02} = \frac{(2m+1)c}{4n(L-L_1)} \quad (14)$$

分析可以发现,将系统改进为单轴结构后,会产生零点频率  $f_{01}$  和  $f_{02}$ , 和参考文献[2,3]相比,多了零点频率  $f_{01}$ . 当系统确定时,零点频率  $f_{01}$  与系统延长光纤长度  $L_d$  有关,对每个系统而言,可视为固定值;而  $f_{02}$  则与外部事件发生位置  $L_1$  有关. 因此,在频域中得到零点频率后,剔除与位置无关的  $f_{01}$ , 以及  $f_{02}$  的高次零点频率,即可获得与外部事件位置有关的  $f_{02}$ , 再通过式(14)可算出  $L_1$ .

此外,从式(14)可知,零点频率与距离  $(L-L_1)$  呈倒数关系,即  $L_1$  越大,零点频率  $f_{02}$  越大,也就是说,监测总长度与监测系统可分辨的最小零点频率有关,以 1 KHz 为例,在理论上可达 50 km,因此该方法具有监测长距离管线的的能力;但是,该方法的监测距离也会受到限制,这是因为零点频率的距离分辨率与距离  $L_1$  的平方呈倒数关系,当  $L_1$  越大,零点频率的增幅也越大,此时对应的零点频率较高,但零点频

率最大不能超过外部事件产生的频谱上限,这就限制了系统的最大监测距离不可能无限加长。

## 4 结论

本文提出的使用单条光纤代替 Sagnac 光纤环作为分布式光纤传感器的管线在线监测系统,经分析发现,该方法产生的零点频率有两种  $f_{01}$  和  $f_{02}$ ,与参考文献[2,3]相比,多出了零点频率  $f_{01}$ ,但  $f_{01}$  只与延长光纤长度  $L_d$  有关,为确定值,所以利用  $f_{02}$  就可以实现管线泄漏的探测和定位。此外,该系统还具有偏振无关特性,可以监测长距离管线,但距离分辨率与参考文献[2,3]一样,与  $L_1$  的平方呈倒数关系,定位准确度也将随着距离  $L_1$  的增大而增大。

### 参考文献

- 1 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. 上海海运学院学报,2001,22(3):13~17  
Zhang B Y, Wang G Z, Liu J D, et al. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2001, 22(3):13~17
- 2 Tan J, Chen W M, Fu Y M, et al. Analysis of Monitoring System for Pipeline Security Based on Sagnac Interferometer, ATFO 2004, Chongqing: Chongqing University Press, 2004. 351~355
- 3 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. 传感器技术,2003,22(10):48~49  
Hu Z X, Zhang G L, He J, et al. *Journal of Transducer Technology*, 2003, 22(10):48~49
- 4 杨爱英,吴德明,徐安士. 单模光纤中偏振模色散的仿真模型. 光子学报,2003,32(12):1461~1463  
Yang A Y, Wu D M, Xu A S. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(12):1461~1463
- 5 王政平,李庆波,冯瑞颖,等. 起偏器参量对光学电流传感器性能的影响. 光子学报,2003,32(4):444~447  
Wang Z P, Li Q B, Feng R Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4):444~447
- 6 柳建春,高立民,李康,等. 光纤陀螺消偏结构与偏振度关系的研究. 光子学报,2005,34(6):948~951  
Liu J C, Gao L M, Li K, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(6):948~951
- 7 张靖华. 双折射光纤琼斯矩阵的一般表达式及反射传输特性. 光子学报,1997,26(6):527~531  
Zhang J H. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(6):527~531
- 8 牟旭东,周柯江. 消偏光纤陀螺的理论和实验研究. 光子学报,2000,29(9):810~813  
Mou X D, Zhou K J. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(9):810~813
- 9 王廷云. 用压电陶瓷实现的光纤相位调制理论与实验分析. 光子学报,1999,28(2):134~137  
Wang T Y. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(2):134~137
- 10 赵玉成,王琥,简永生. Math-Zehnder 光纤干涉仪零差检测方案. 光通信技术,1994,18(3):188~191  
Zhou Y C, Wang H, Jian S S. *Optical Communication Technology*, 1994, 18(3):188~191
- 11 刘培森. 应用傅里叶变换. 北京:北京理工大学出版社,1990. 39~40  
Liu P S. Application of Fourier Transform. Beijing: Beijing institute of technology publishing company, 1990. 39~40

## The Monitoring System and the Analysis of Locating Theory for Pipeline Leakage Detection Based on Single Distributed Optical Fiber Sensor

Tan Jing<sup>1,3</sup>, Chen Weimin<sup>1</sup>, Zhu Yong<sup>1</sup>, Wang Ding<sup>2</sup>

1 The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems, Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044

2 Chongqing University, Chongqing 400044

3 The 95478 Unit of PLA, 400329

Received date:2004-12-07

**Abstract** The pipeline leakage detecting and locating system based on Sagnac interferometer and distributed optical fiber technology has many advantages, such as the long monitoring range and the high precision in fault locating. In the prototype, the non-sensing fiber portion of the Sagnac ring must be shielded to avoid disturbance, which will restrict the application in actual monitoring system. To address this problem, a new optical configuration was put forward in this paper. It adopted one optical fiber line as sensing part instead of the optical fiber ring, and some necessary modifications were made to remove the effect of the fiber birefringence. A theoretical analysis of optical path and locating method were also given in this paper, which demonstrated the feasibility of pipeline intrusion (or leakage) detecting and locating by this system.

**Keywords** Pipeline; Leakage location; Optical fiber sensor

**Tan Jing** was born in Chongqing, China, in 1975. He is a Ph. D. candidate at Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University now. He received the B. S. degree and the M. S. degree in air-fire control engineering from Air Force Engineering University. And he is engaged in the research and development of distributed optical fiber sensor and signal processing.

