

文章编号: 1003-501X(2009)07-0140-04

一种抑制传感死区的 Sagnac 分布式传感器

范彦平, 陈明星, 巫建东, 朱 灵, 刘 勇, 王 安

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 激光中心, 合肥 230031)

摘要: 提出了一种能抑制传感死区的 Sagnac 分布式光纤传感结构, 利用 2×2 耦合器实现光路的循环。运用琼斯矩阵对光路进行了分析, 指出只要延迟光纤的长度选择合适, 就能消除传感光纤中的传感死区, 排除信号中伪零频点对信号解调的干扰。在八个不同的点分别进行扰动定位监测, 对得到的信号经滤波平滑后在局部最小值附近运用最小二乘法拟合, 以确定零频点的位置。实验结果表明该系统能实现扰动定位, 平均误差最大值为 68 m, 最小为 3 m, 证明了结构的正确性, 表明该结构可用于远距离管道泄漏检测。

关键词: 分布式传感器; 2×2 耦合器; 琼斯矩阵; 零频点

中图分类号: TN29

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2009.07.027

A Novel Distributed Fiber-optic Sagnac Sensor for Eliminating Dead Zone

FAN Yan-ping, CHEN Ming-xing, WU Jian-dong, ZHU Ling, LIU Yong, WANG An

(Laser Centre, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: A novel structure of fiber-optic Sagnac sensor, which could eliminate dead zone, was proposed. The optical path circulation was realized by a 2×2 coupler. The optical path was analyzed based on Jones matrix. If the length of delay loop was selected properly, the dead zone of the sensing optic-fiber could be eliminated and the disturbance of false zero frequency could be filtered. After filtering and smoothing, the signal, acquired at eight different points, was fitted by least-square method and the zero frequency was obtained. According to the experimental results, the source of disturbance was located with maximum error 68m and minimum error 3m. The validity of the structure was testified, which indicates that the structure could be used to monitor the leakage at long distance pipeline.

Key words: distributed sensor; 2×2 coupler; Jones matrix; zero frequency point

0 引 言

随着我国的经济的发展, 对石油、天然气需求越来越大, 铺设的管道也越来越多。但这些管道大多是在没人监管的情况下工作, 由于各种自然的和人为的因素相互作用, 容易引起管道腐蚀、破坏, 进而产生管道泄漏。这就需要发展一种能长距离工作, 具有安全可靠的无损检测技术来检测管道的工作情况。近年来管道泄漏检测技术得到了长足的发展, 有负压波法、质量平衡法^[1]、实时模型法、声波法、压力梯度法等^[2], 其中基于 Sagnac 干涉原理的分布式光纤定位传感技术以其抗干扰性强、定位精度高、成本低等优点得到了广泛的研究, 提出了多种多样结构的传感器。

在各种 Sagnac 结构中, 单轴结构^[3]的干涉仪能避免环状 Sagnac 干涉结构中因扰动互易性而需要屏蔽一半光纤的麻烦, 它通过在一光纤端面镀膜或加法拉第旋转镜实现光路环。但镀膜的光纤头存在镀膜不均匀、极易受到磨损、长久挥发等问题, 且会影响光的传输质量, 需要高质量镀膜以及加保护头等措施, 这无形之中增加了成本和复杂度。大多数的 Sagnac 光纤传感结构中未考虑由于噪声和信号衰弱引起的传感死

收稿日期: 2008-11-05; 收到修改稿日期: 2009-04-07

基金项目: 中国科学院合肥研究院基金及创新科研专题资助项目(20080603); 中科院安光所青年人才资助项目

作者简介: 范彦平(1983-), 男(汉族), 浙江金华人。硕士研究生, 主要从事光纤传感和信号处理方面研究。E-mail: fypofcas@163.com。

区现象。本文在研究了各种结构的 Sagnac 干涉仪的基础上，提出了一种结构简单、安全可靠，具有消除死区的新型传感结构，并对该结构进行了实验研究。

1 分布式传感结构及原理

分布式传感结构系统如图 1 所示，通过一个 2×2 耦合器来代替光纤反射头，并把该耦合器的另一侧两个出射端直接熔接。其中传感区在 AD 之间。

激光器发出的低相干的光从 In 端入射，经 3×3 耦合器分为两束，一束光从 A 到 D，又经 2×2 耦合器分为两束，最后光在 Out 端出射。其中主要光路有：

- 1) In-A-D-E-G-F-D-A-C-B-A-Out;
- 2) In-A-D-F-G-E-D-A-C-B-A-Out;
- 3) In-A-B-C-A-D-E-G-F-D-A-Out;
- 4) In-A-B-C-A-D-F-G-E-D-A-Out;
- 5) In-A-D-E-G-F-D-A-Out;
- 6) In-A-D-F-G-E-D-A-Out。

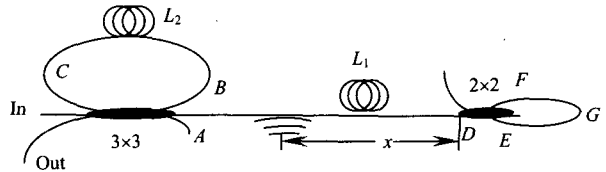


图 1 分布式光纤传感结构图

Fig.1 Structure of distributed fiber-optic sensor

其余的光因为要在光路 ABC 多走一圈，期间通过耦合器的次数增加使光强减弱，因此可以忽略。扰动位置只发生在 L₁ 范围内，E-G-F 相当于一延迟光纤，那么光路 5 与光路 6 虽然要发生干涉，但由于光程差为零，输出结果只是一直流分量。在该结构中只要光纤长度 L₂ 的距离大于光源的相干长度，则光路 5 与 6 就不会和其余的光路发生干涉，同理可知光路 1 与 2、光路 3 与 4 干涉后产生的也是一直流量。而载有有用信息的是光路 1 与 3、4 干涉以及光路 2 与 3、4 干涉。在不考虑各种损耗的情况下，2×2 耦合器的分光比为 1:1，3×3 的为 1:1:1，那么它们的琼斯矩阵^[4]分别为

$$\begin{aligned}
 K_{2S} &= \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & 0 \\ 0 & \sqrt{2}/2 \end{bmatrix}, & K_{2A} &= \begin{bmatrix} i\sqrt{2}/2 & 0 \\ 0 & i\sqrt{2}/2 \end{bmatrix}, \\
 K_{3S} &= \begin{bmatrix} \sqrt{3}/3 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/3 \end{bmatrix}, & K_{3A} &= \begin{bmatrix} \sqrt{3}/3e^{i2\pi/3} & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/3e^{i2\pi/3} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中：K_{2S}、K_{3S} 和 K_{2A}、K_{3A} 分别为直接耦合和跨接耦合时的矩阵。设外界的扰动相位为 φ(t, x)，输入的线偏振光为 E₀ = $\begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix}$ ，则光路 1、2、3、4 分别可表示为

$$\begin{aligned}
 E_1 &= e^{i(\varphi(t_2,x)+\varphi(t_1,x))} K_{3A} K_{3A} K_{2A} K_{2S} K_{3S} E_0; & E_2 &= e^{i(\varphi(t_2,x)+\varphi(t_1,x))} K_{3A} K_{3A} K_{2S} K_{2A} K_{3S} E_0; \\
 E_3 &= e^{i(\varphi(t_4,x)+\varphi(t_3,x))} K_{3A} K_{2A} K_{2S} K_{3A} K_{3A} E_0; & E_4 &= e^{i(\varphi(t_4,x)+\varphi(t_3,x))} K_{3A} K_{2S} K_{2A} K_{3A} K_{3A} E_0
 \end{aligned} \tag{2}$$

由式(1)可知 K_{2S}K_{2A} = K_{2A}K_{2S} = $\begin{bmatrix} i/2 & 0 \\ 0 & i/2 \end{bmatrix}$ ，所以 E₁=E₂、E₃=E₄，输出端可表示为

$$E = 2[e^{i(\varphi(t_2,x)+\varphi(t_1,x))} K_{3A} K_{3A} K_{2A} K_{2S} K_{3S} + e^{i(\varphi(t_2,x)+\varphi(t_1,x))} K_{3A} K_{2S} K_{2A} K_{3A} K_{3A}] E_0 \tag{3}$$

光强为

$$I = A + B \cos(\varphi(t_4,x) + \varphi(t_3,x) - \varphi(t_2,x) - \varphi(t_1,x) + \Delta\phi) \tag{4}$$

式中：A、B 为不同的常数，Δφ 为光路固有的相位差，t₁、t₂、t₃、t₄ 是光路上同一点不同的扰动时刻。从图 1 中可以得到：t₂ = t₁ + $\frac{2x + L_{EFG}}{v}$ ；t₃ = t₁ + $\frac{L_2}{v}$ ；t₄ = t₁ + $\frac{L_2 + 2x + L_{EFG}}{v}$ 。其中：x 为扰动点到 2×2 耦合器的距离，v 为在光纤中的光速。

虽然 Sagnac 光纤干涉对抑制温度等环境慢变噪声有很好的效果，但光纤的损耗，探测器的背景噪声，散弹噪声，放大器的放大噪声以及光源光功率的波动和光纤长度等因素，使得在没有外界扰动时，输出的信号也有一定幅度的波动，若在某点扰动产生的信号很小，则此时有用信号可能完全湮没在噪声当中，这就是传感死区现象^[5]，而信号的大小由相位差决定，即：

$$\Delta\phi = \varphi(t_4,x) + \varphi(t_3,x) - \varphi(t_2,x) - \varphi(t_1,x) \tag{5}$$

当 $\varphi(t_4, x)$ 与 $\varphi(t_1, x)$ 差值达到最小且 $\varphi(t_3, x)$ 与 $\varphi(t_2, x)$ 相等时,即 $L_2=2x+L_{EFG}$ 时,此时相位差最小,因此要消除死区现象,就必须使扰动时刻分开足够大,而使最小扰动相位差值增大。通常外界扰动对光纤产生的相位可表示为^[6]: $\varphi(t)=\varphi_0\sin(\omega t+\gamma)$, φ_0 为扰动相位的幅值, γ 为常数, ω 是扰动信号频率,系统中的噪声估计为6.7%左右,由于相位差值很小使得干涉信号与相位差成正比,则:

$$I \propto \Delta\varphi \approx 2\varphi_0 \sin\frac{\omega(t_4-t_1)}{2} \cos(\omega(t-\frac{t_4+t_1}{2})+\gamma) \tag{6}$$

考虑到扰动信号在50 kHz以上能量很弱,那么可估算出只要使 $L_2 \geq 44.44$ m就可以消除死区。

2 定位分析及实验

在本系统中 EFG 的长度 L_{EFG} 相对 L_1 、 L_2 来说很小,可忽略不计,则相位差可表示为

$$\Delta\varphi = 2 \sin\frac{\omega L_2}{2v} \cos(\omega(t-\frac{t_1+t_2+t_3+t_4}{4})+\Delta\gamma) \cos\omega\frac{x}{v} \tag{7}$$

$\Delta\gamma$ 为相位常数,管道泄漏时产生的扰动信号是一宽频信号^[7],当 $\omega(x/v)=(\pi/2)+N\pi$ 时或 $\omega L_2/2v=M\pi$ 时(N, M 为整数), $\Delta\varphi$ 为零,由于扰动信号在50 kHz以上能量很弱,所以只要使 $\omega L_2/2v=M\pi$ 决定的伪零频点大于50 kHz既 $L_2 \leq 4000$ m或滤除此式决定的伪零频点,从信号频谱图图上寻找零频点 f_k 就可以确定扰动点的位置:

$$x = \frac{c}{4nf_k} + \frac{kc}{2nf_k} \quad (k \text{ 为整数}) \tag{8}$$

综合考虑光源相干长度及抑制传感死区,在实验中 L_2 取值为2 000 m,选用的光源中心波长为1 310 nm,功率为1 mW,采集卡的采样频率设置为80 000 Hz,采样点数为16 384个, L_1 为10 232 m,在 $x=1000$ m附近没有扰动和有扰动时的信号如图2所示,实验结果显示在传感光纤上不存在传感死区。

用一个只有一面开口的铁盒子作为扰动源来模拟管道泄漏产生的振动,把一小段光纤粘贴在铁盒一面,在盒的对面用手敲击产生扰动信号。扰动信号经光电探测器、放大器、高通滤波器后成一交流信号,送到采集卡得到图3(a)信号,此信号经Matlab进行FFT变换得到如图3(b)所示的信号,此时的信号包含噪声等太多,无法直接从该信号中找到最低点,通过小波去噪,曲线平滑等综合措施处理后得到的平滑曲线如图4所示,从图中很容易能找到零频点。当找到波洛的局部最小值后,该最小值可能偏离零频点如图4中第二个局部最小值点,因此通过在最小值两边取一小部分数据进行最小二乘法拟合,以确定零频点。

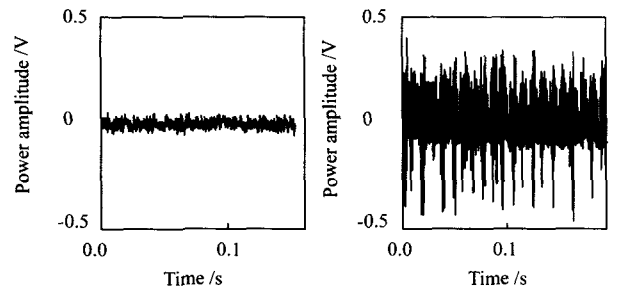


图2 $x=1000$ m处无扰动和有扰动时的信号
Fig.2 Signal of non-disturbance and disturbance at $x=1000$ m

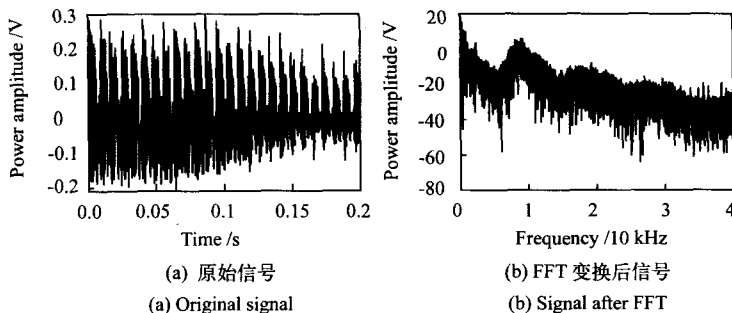


图3 扰动时得到的时域和频域信号

Fig.3 Time-domain and frequency-domain signal when disturbing

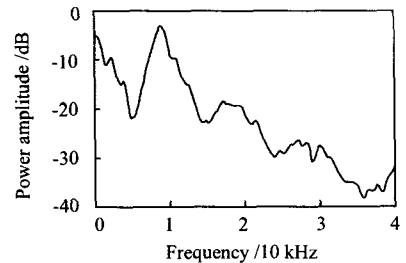


图4 经滤波平滑后的信号波形

Fig.4 Signal after filtering and smoothing

利用以上方法, 我们分别在不同的点进行了定位试验, 得到的数据如表 1 所示: 从表中可以看到, 该结构的分布式定位传感器得到的定位误差比较小, 基本在预期范围内, 符合理论分析。

表 1 在不同点测定的值

Table 1 Detecting value at different points							m
Actual distance	Measure 1	Measure 2	Measure 3	Measure 4	Measure 5	Average	Error
9 732	9 743	9 752	9 762	9 651	9 787	9 739	7
9 232	9 301	9 143	9 176	9 217	9 309	9 229	3
8 732	8 587	8 650	8 614	8 894	8 596	8 668	64
8 232	8 127	8 291	8 216	8 136	8 050	8 164	68
7 732	7 757	7 641	7 699	7 681	7 801	7 716	16
7 232	7 201	7 267	7 150	7 211	7 267	7 219	13
6 732	6 692	6 701	6 728	6 720	6 736	6 715	17
6 232	6 221	6 243	6 209	6 224	6 239	6 227	5

3 结 论

本文提出的一种基于 Sagnac 干涉结构的分布式光纤传感器具有定位精度高等优点, 整个结构成单轴状, 能消除 Sagnac 环状结构中扰动的互易性缺陷, 同时采用一个 2×2 耦合器实现光路循环, 克服了光纤镀膜极易磨损, 对传输光影响等不稳定性, 及封装隔离的麻烦。通过理论分析, 合理的选择延迟光纤的长度, 能消除由于光路和电路中各种噪声、光源功率漂移等引起的传感死区现象。通过实验证明了该结构的正确性, 对不同的点进行定位监测, 得到最大平均误差为 68 m, 最小 3 m, 与文献[6]平均定位误差为 80 m 相比误差较小, 可用于较长距离石油、天然气管道泄漏检测, 误差主要原因是未能消除光纤双折射等对定位的影响。但该结构还存在一定的缺陷, 只能实现对单个扰动进行定位, 而当有多个扰动时, 将无法进行定位监测, 而在实际中管道有可能同时产生好几个地方泄漏, 为此我们还需要进行改进和研究, 以提出更好的结构和算法, 实现多点定位。

参考文献:

- [1] Liou Jim C P. Leak detection by mass balance effective for Norman wells line [J]. *Oil & Gas Journal*(S0030-1388), 1996, 94(17): 69-74.
- [2] ZHANG Xue-jun. Statistical leak detection in gas and liquid pipelines [J]. *Pipes & Pipelines International*(S0032-020X), 1993, 38(4): 26-29.
- [3] 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.
TAN Jing, CHEN Wei-min, ZHU Yong, *et al.* The monitoring system and the analysis of locating theory for pipeling leakage detection based on single distributed optical fiber sensor [J]. *ACTA PHOTONICA SINICA*, 2006, 35(2): 228-231.
- [4] Chtcherbakov A A, Swart P L. Polarization Effects in the Sagnac-Michelson Distributed Disturbance Location Sensor [J]. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*(S0733-8724), 1998, 16(8): 1404-1412.
- [5] Mieczyslaw Szustakowski, Marek Yczkowski, Wieslaw Ciurapinski, *et al.* Sensitivity of perimeter sensor based on Sagnac interferometer [J]. *Proceedings of the SPIE*(S0277-786X), 2004, 5576: 319-323.
- [6] 张天照, 贾波. 管道安全检测定位系统 [J]. 光电工程, 2006, 33(4): 72-74.
ZHANG Tian-zhao, JIA Bo. Position determination and monitoring system for pipe security [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(4): 72-74.
- [7] Wassef W A, Bassim M N, Houssny-Emam M. Acoustic emission spectra due to leaks from circular holes and rectangular slits [J]. *Acoustical Society of America*(S1557-0215), 1985, 77(3): 117-128.