

文章编号: 0253-2239(2010)06-1603-05

基于时延估计的分布式光纤传感定位

许海燕 徐 颢 肖 倩 张 毅 贾 波

(复旦大学光纤研究中心, 上海 200433)

摘要 提出了一种新型的基于 Sagnac 干涉仪的双向 Sagnac 分布式光纤传感器, 可对传感光纤线路上的扰动进行检测与定位。阐述了该分布式光纤传感系统的组成和工作原理。利用基于最小均方(LMS)算法的自适应时延估计方法直接在时域上对扰动信号进行定位。理论分析和测试结果表明, 该分布式光纤传感器能快速、有效地实现扰动信号的检测及定位。算法简单易实现, 具有较高的测试灵敏度和定位精度, 最大定位误差小于 20 m。

关键词 光纤光学; 分布式光纤传感器; 自适应时延估计

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103006.1603

Disturbance Detection in Distributed Fiber-Optic Sensor Based on Time-Delay Estimation

Xu Haiyan Xu Qie Xiao Qian Zhang Yi Jia Bo

(Fiber-Optic Research Center, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract A novel double Sagnac distributed fiber-optic sensor based on Sagnac interferometer for determining the position of disturbance along an optical fiber is presented. The configuration and operating principle of the system are illustrated, and the location principle and method for the detection system are analyzed. The system realizes the location of disturbances by using the adaptive time-delay estimation with the least mean square (LMS) algorithm in the time domain. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed technology can realize the detection and location of the disturbed signal rapidly and effectively. This method is simple and can be obtained easily, and it has high measurement sensitivity and location precision. The maximum location error is less than 20 m.

Key words fiber optics; distributed fiber-optic sensor; adaptive time-delay estimation

1 引 言

近年来, 分布式光纤定位传感技术在管道泄漏和损坏的实时定位与监测及干线安全防护等方面都有很广泛的应用。目前使用的方法主要有光时域反射法(OTDR)^[1,2]和干涉法^[3~6]。基于散射光信号检测原理的 OTDR 法灵敏度低, 不适于检测时变信号。最近提出了一种基于谱分析的偏振 OTDR 系统, 结构简单, 但却需要很复杂的信号处理算法^[7]。干涉法中 Sagnac 定位传感器应用较为广泛, 但该分布式传感器在结构以及位置信息解调上还存在一定的局限

性, 如在解调出外部扰动引起的相位变化后, 在通过使用在频谱中得到的零点频率来确定扰动点位置^[8,9]时, 当外界干扰信号频率小于第一个零点频率等情况下会使解调出的位置信息有很大的误差。

针对光纤定位系统存在的问题, 提出了一种新的基于 Sagnac 光纤干涉仪原理的双向 Sagnac 分布式光纤传感器, 采用自适应时延估计方法在时域上直接对检测到的信号进行扰动定位, 而无需解调出外部干扰源引起的相位变化。该算法简单易实现, 具有较高的检测灵敏度和定位精度, 最大定位误差

收稿日期: 2009-07-10; **收到修改稿日期:** 2009-08-24

基金项目: 科技部创新方法工作专项项目(2008IM041200)资助课题。

作者简介: 许海燕(1978—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤传感与信号处理等方面的研究。

E-mail: xhyjstu@hotmail.com

导师简介: 贾 波(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感与光纤通信等方面的研究。

E-mail: jiabo@fudan.edu.cn(通信联系人)

小于 20 m。

2 双向 Sagnac 分布式光纤传感定位原理分析

双向 Sagnac 分布式光纤传感系统的结构框图如图 1 所示。系统采用的是超辐射发光二极管 (SLD) 光源, A, D, F, D₁, F₁, B, H 为均分的光纤耦合器, PIN1 和 PIN2 为光电探测器, FRM1 和 FRM2 为法拉第旋转镜。系统的定位功能通过 2 个基于 Sagnac 光纤干涉仪构成的分布式传感器来完成, 延时线圈 C, G 长度相同, 使系统具有对称结构, 以此保证 2 个定位光路受到相同的作用。两个传感器共用光纤 14 段, 其中 12 段和 34 段为导引光纤, 长度均为 L_3 , 23 段作为传感光纤, E 为扰动源。

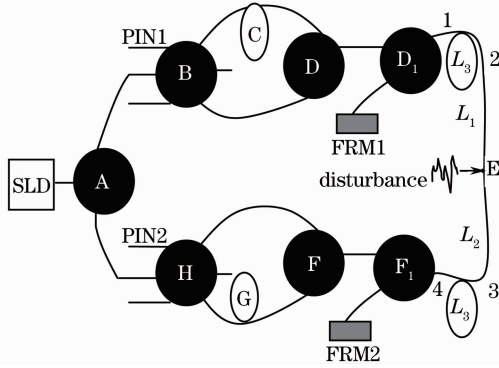


图 1 双向 Sagnac 分布式光纤传感系统结构

Fig. 1 Structure of the system based on double Sagnac distributed optical fiber sensor

图中光源发出的光经 A 均分后到达 B, 由于干涉原理可知, B 处只有 B—C—D—D₁—E—F₁—FRM2—F₁—E—D₁—D—B 和 B—D—D₁—E—F₁—FRM2—F₁—E—D₁—D—C—B 两束光发生干涉, 形成一个干涉环路, 记为 IP¹。同理, H 处只有 H—G—F—F₁—E—D₁—FRM1—D₁—E—F₁—F—H 和 H—F—F₁—E—D₁—FRM1—D₁—E—F₁—F—G—H 两束光发生干涉, 形成另一个干涉环路, 记为 IP²。IP¹ 和 IP² 结构对称, 原理相同, 这里仅讨论 IP¹。

两束相干光都经过扰动点, 因此均被扰动信号调制, 两束光的输出表达式分别为

$$E_1 = E_{10} \exp\{j[\omega_c t + \psi(t - \tau_1) + \psi(t - \tau_2) + \varphi_1]\}, \quad (1)$$

$$E_2 = E_{10} \exp\{j[\omega_c t + \psi(t - \tau_3) + \psi(t - \tau_4) + \varphi_2]\}. \quad (2)$$

这两束光的相位变化包含扰动信号对它的影响, 在理想均分耦合器情况下, 两束光的振幅相等为 E_{10} ;

φ_1, φ_2 为两束光的初始相位; ω_c 为光波角频率; $\psi(t - \tau_1)$ 和 $\psi(t - \tau_2)$ 分别为第一束相干光在 $t - \tau_1$ 和 $t - \tau_2$ 时刻受到扰动所发生的相位变化, $\psi(t - \tau_3)$ 和 $\psi(t - \tau_4)$ 分别为第二束相干光在 $t - \tau_3$ 和 $t - \tau_4$ 时刻受到扰动所发生的相位变化。其中 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 分别为

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{n(L_1 + L_3)}{c}, \\ \tau_2 &= \frac{n[L_1 + L_3 + 2(L_2 + L_3)]}{c}, \\ \tau_3 &= \frac{n(L_d + L_1 + L_3)}{c}, \\ \tau_4 &= \frac{n[L_d + L_1 + L_3 + 2(L_2 + L_3)]}{c}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 L_1 为从 2 到扰动点 E 的距离, L_2 为从 E 到 3 的距离, L_d 为延迟线圈的长度。两束光的干涉交流项为

$$I_{12} = E_{10}^2 \cos[\Delta\psi_1(t) + \varphi_1 - \varphi_2], \quad (4)$$

式中 $\Delta\psi_1(t)$ 为 IP¹ 中外部扰动引起的总的相位变化, 表示为

$$\begin{aligned} \Delta\psi_1(t) &= \psi(t - \tau_1) + \psi(t - \tau_2) - \psi(t - \tau_3) - \\ &\psi(t - \tau_4) = \theta\left[t - \frac{n(L_1 + L_3)}{c}\right] + \\ &\theta\left[t - \frac{n(L_1 + L_3)}{c} - \frac{2n(L_2 + L_3)}{c}\right], \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\theta(t) = \psi(t - nL_d/c) - \psi(t)$ 。

同理, $\Delta\psi_2(t)$ 为 IP² 中外部扰动引起的总的相位变化, 表示为

$$\begin{aligned} \Delta\psi_2(t) &= \theta\left[t - \frac{n(L_2 + L_3)}{c}\right] + \\ &\theta\left[t - \frac{n(L_2 + L_3)}{c} - \frac{2n(L_1 + L_3)}{c}\right]. \end{aligned} \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可知, $\Delta\psi_1(t)$ 和 $\Delta\psi_2(t)$ 都由两项与时间 t 有关的信号组成, 其中最先到达的两个信号为 $\theta[t - n(L_1 + L_3)/c]$ 和 $\theta[t - n(L_2 + L_3)/c]$, 而 $\theta[t - n(L_1 + L_3)/c - 2n(L_2 + L_3)/c]$ 和 $\theta[t - n(L_2 + L_3)/c - 2n(L_1 + L_3)/c]$ 这两个信号都与前一信号相差至少 $2nL_3/c$ 的时间, 在它们到达前 $\Delta\psi_1(t)$ 和 $\Delta\psi_2(t)$ 存在一定的时延, 因而当满足 $t \leq 2nL_3/c$ 条件时 $\Delta\psi_1(t)$ 和 $\Delta\psi_2(t)$ 的时间差满足如下关系:

$$\Delta\tau = \frac{n(L_1 - L_2)}{c}. \quad (7)$$

由(4)式可知干涉信号间时延也满足上式关系。

由(7)式可求得扰动点距 2 的长度 L_1 为

$$L_1 = \frac{L + \Delta\tau \cdot c/n}{2}, \quad (8)$$

式中 $L = L_1 + L_2$ 是传感光纤的总长度, 为一定值。

由(8)式可知通过求取延迟时间 $\Delta\tau$ 可以确定扰动点的位置。

3 自适应时延估计

由上述分析可知,图 1 所示的定位系统中 PIN1 和 PIN2 的输出信号在满足 $t \leq 2nL_3/c$ 条件时经采样后可分别表示如下(结构如图 2 虚线部分所示):

$$y_1(n) = s(n) + v_1(n), \quad (9)$$

$$y_2(n) = \lambda s(n-D) + v_2(n), \quad (10)$$

式中 $s(n)$ 为由扰动产生的干涉信号, $v_1(n)$ 和 $v_2(n)$ 为互不相关的平稳噪声, λ 为与耦合器和光纤传输损耗等有关的比例系数。 D 为两信号之间的延迟。可以通过 $y_1(n)$ 和 $y_2(n)$ 之间的信号处理来估计延迟 D , 从而对扰动信号定位。

由此可见,定位系统中时延估计的准确性直接

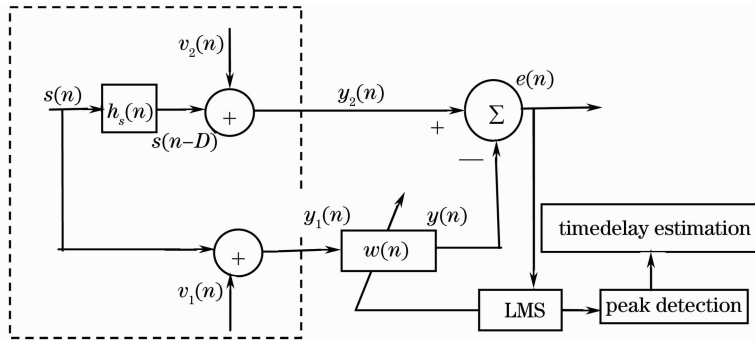


图 2 LMS 自适应时间延迟估计原理图

Fig. 2 Principle of LMS adaptive time-delay estimation

4 实验结果和分析

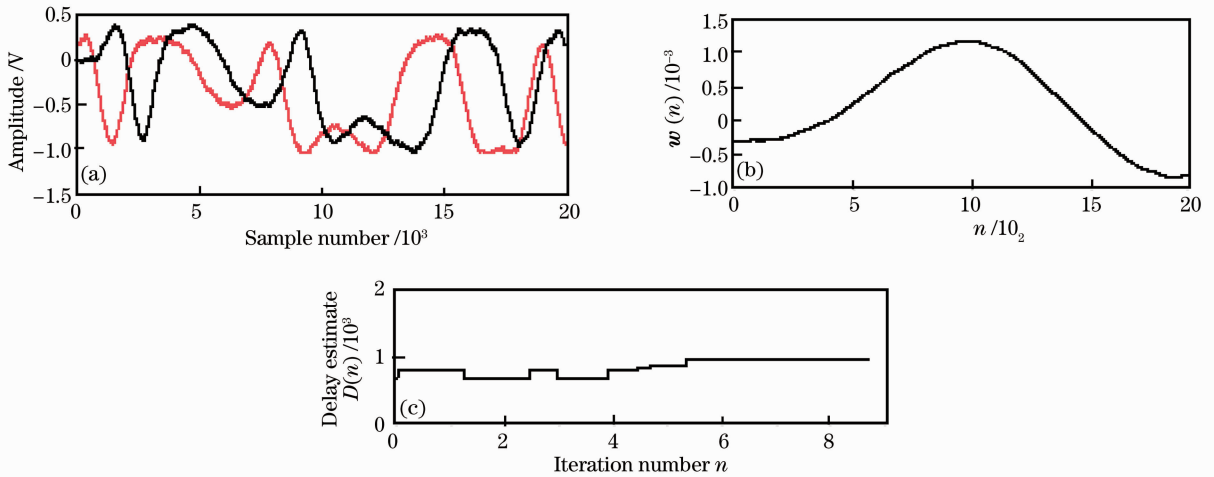
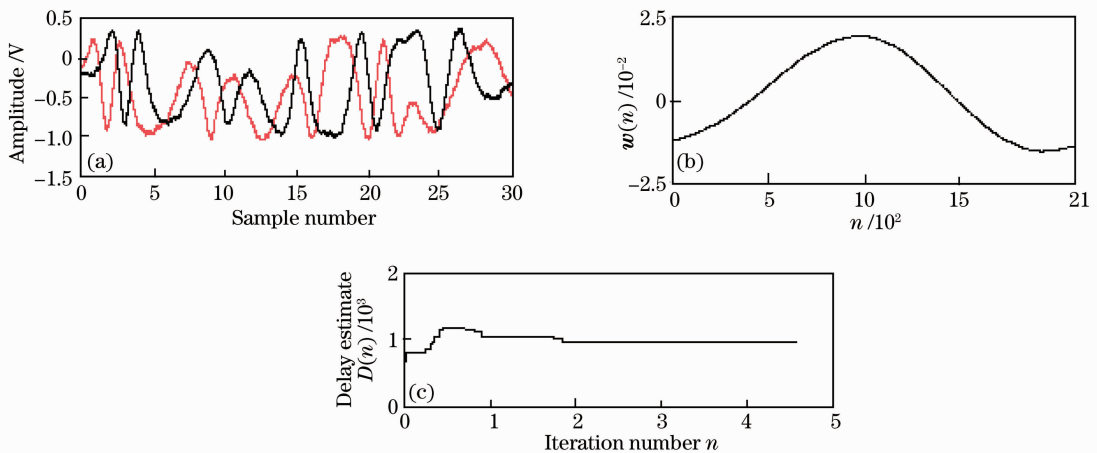
按照图 1 结构进行扰动定位实验。光纤均采用康宁单模光纤,光纤纤芯折射率为 1.5,其中传感光纤 L 为 22 km,导引光纤 L_3 为 3 km,光纤环路总长为 28 km。探测器 PIN1 和 PIN2 采用 InGaAs 光电探测器,光源中心波长为 1310 nm,功率为 3 mW。利用 NI 的数据采集卡和 Labview 软件对检测信号进行采集处理,实验中采样频率为 100 MHz,对传感光缆施加扰动,采用 LMS 自适应时延估计算法^[12]对扰动位置定位。利用 $t \leq 2nL_3/c$ 条件和采样率 f 根据导引光纤长度计算理论数据长度,根据算法求取自适应滤波器阶数等参数,然后通过实验调整确定具体的值。图 3(a)为在距 2 点 12 km 处施加扰动时得到的时域信号波形。由于导引光纤长度为 $L_3 = 3$ km,所取最大数据长度为 $2nL_3f/c \approx 3000$,综合考虑光纤延迟线的长度和实验,确定数据

决定了扰动定位的准确性。因此,选择一个好的时延估计方法是必要的。采用最小均方误差(LMS)自适应时间延迟估计方法可以在迭代过程中不断调整自身的参数和结构,能够自适应地从噪声中提取两信号的相似性,得到较好的时延估计结果。

自适应时延估计方法是将信号的延迟效应转化为信号通过一个相移滤波器 $h_s(n)$ 的效应^[10,11]。 $h_s(n)$ 的峰值坐标对应两信号之间的时间延迟。LMS 自适应时间延迟估计的原理框图如图 2 所示。自适应滤波器的作用是在自适应迭代中逐步实现对相移滤波器 $h_s(n)$ 的模拟,把 $y_1(n)$ 中的 $s(n)$ 加工成 $s(n-D)$ 。当自适应滤波器收敛时, $y_2(n)$ 与 $y(n)$ 的均方误差达到最小,从而使 $s(n-D)$ 与 $s(n)$ 的相似性最大。此时,自适应滤波器权矢量峰值坐标即是估计的时间延迟。

长度选为 2770。自适应滤波器阶数为 1900,步长因子 u 为 0.000135。经自适应时延估计得到的权矢量分布曲线和时延估计跟踪曲线分别如图 3(b), 3(c)所示,时延估计值为 9.6 μs ,由(8)式计算得到的长度为 12.0081 km,绝对误差为 8 m,相对误差为 0.068%。图 4 为导引光纤长度 L_3 增加到 7 km 时在相同位置施加扰动时的情形,此时确定数据长度增加到 6680,自适应滤波器阶数为 2100,步长因子 u 为 0.000135,绝对误差为 9.1 m,相对误差为 0.076%。图 4(b), 4(c)分别为权矢分布曲线和时延估计跟踪曲线。

数据处理结果表明,当导引光纤长度增加时,数据长度增加,此时收敛速度变慢。由图 3(c)可知,当 $L_3 = 3$ km 时,经 533 次迭代后时延估计值趋于稳定;由图 4(c)可知,当 $L_3 = 7$ km 时,经 1840 次迭代后时延估计值趋于稳定。

图 3 $L_3 = 3$ km 时的实验数据Fig. 3 Experimental data at $L_3 = 3$ km图 4 $L_3 = 7$ km 时的实验数据Fig. 4 Experimental data at $L_3 = 7$ km

5 结 论

提出的基于双向 Sagnac 分布式光纤振动传感器通过时延估计的方法克服了传统 Sagnac 干涉仪定位算法上的不足,无需对干涉信号进行相位解调和频域分析,可直接在时间域上用自适应时间延迟估计算法进行定位。实验结果表明,该方法能快速、有效地实现扰动信号的检测,且定位精度高、运行稳定,最大定位误差小于 20 m。如果采取相应措施提高信号的信噪比和改进时延估计算法,可进一步缩小该误差。此系统可在长距离的通信干线、电力传输线和管道等的安全监控领域进行推广,具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

1 M. K. Barnoski, S. M. Jensen. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics[J]. *Appl.*

Opt., 1976, **15**(9): 2112~2115

2 T. R. Parker, M. Farhadiroushan, V. A. Handerek *et al.*. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 979~981

3 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

4 S. J. Russell, K. R. C. Brady, J. P. Dakin. Real-time location of multiple time-varying strain perturbations acting over a 40-km fiber section, using a novel dual-Sagnac interferometer[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(2): 205~213

5 Ma Bin, Xu Jian, Sui Qingmei. Experimental study on coupling high-frequency fiber-optic vibration sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1177~1182

马 宾, 徐 健, 隋青美. 耦合型高频光纤振动传感器实验研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1177~1182

6 Sun Guoxin, Zhou Kejiang. Virtual optical-fiber Sagnac interferometer and analog-digital mixed demodulation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 213~218

孙国鑫, 周柯江. 虚拟光纤 Sagnac 干涉仪及其数模混合解调系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 213~218

- 7 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
- 8 S. C. Huang, W. W. Lin, M. T. Tsai *et al.*. Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks[J]. *Sens. Actuators A*, 2007, **135**(2): 570~579
- 9 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
- 10 H. C. So. Noisy input-output system identification approach for time delay estimation[J]. *Signal Processing*, 2002, **82**(10): 1471~1475
- 11 Qiu Tianshuang. Communication Adaptive Signal Processing [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005. 208~209
邱天爽. 通信中的自适应信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 208~209
- 12 F. A. Reed, P. L. Feintuch, N. J. Bershad. Time delay estimation using the LMS adaptive filter-static behaviour[J]. *IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Processing*, 1981, **29**(3): 561~571