

doi: 10.3788/gzxb20174607.0706004

# 基于二次相关算法的双 M-Z 光纤传感器的定位方法

杨顺智, 张志勇, 邵理阳, 闫连山

(西南交通大学 信息科学与技术学院 信息光子与通信研究中心, 成都 610031)

**摘 要:** 双马赫-曾德干涉仪型分布式光纤传感系统因灵敏度高而易受环境噪声及系统噪声的影响, 使得利用直接互相关算法计算扰动信号位置存在较大误差. 采用二次互相关算法, 先对两路接收信号做互相关运算, 再与其中一路信号的自相关结果做互相关运算, 通过对两路信号的时延估计对扰动信号定位, 减小了噪声带来的误差并提高计算准确度. 对该算法进行了理论仿真和分析, 搭建了实验装置进行了实验验证. 实验结果表明, 与采用直接互相关定位算法结果比较, 采用本文算法能够有效提高系统对扰动信号的定位准确度, 且具有较高的实时性.

**关键词:** 分布式光纤传感器; 定位技术; 二次互相关; 时延估计; 周界防护

**中图分类号:** TP212.1; TP274+.2; TN929.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2017)07-0706004-6

## A Quadratic Correlation Method for Vibration Localization Based on Dual M-Z Fiber Sensor

YANG Shun-zhi, ZHANG Zhi-yong, SHAO Li-yang, YAN Lian-shan

(Center for Information Photonics & Communications, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The dual Mach-Zehnder interferometer-type distributed optical fiber sensing system is susceptible to environmental noise and system noise due to its high sensitivity, which makes a large error in calculating the position of the disturbance signal by direct cross correlation algorithm. The quadratic cross correlation algorithm was used to process the two received signals, and then process the autocorrelation of one signal. The disturbance signal was located by estimating the delay of the two signals. With the improved method, it can reduce the error caused by noise and improve the calculation accuracy. The theoretical simulation and analysis of the algorithm were carried out, and the experimental device was experimentally verified. The experimental results show that compared with the results of using the direct correlation algorithm, the proposed algorithm can effectively improve the positioning accuracy of the disturbance signal and has higher real-time performance.

**Key words:** Distributed optical fiber sensor; Locating technology; The quadratic cross-correlation; Time delay estimation; Perimeter protection

**OCIS Codes:** 060.2370; 060.2310; 060.2330

## 0 引言

分布式光纤传感器系统受周围环境电磁干扰小, 且具有探测距离远、灵敏度高、布设方便等特点, 成为国

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(No. 61475128)和科技部国际合作专项(No. 2014DFA11170)资助

**第一作者:** 杨顺智(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: 961117951@qq.com

**导师(通讯作者):** 张志勇(1974-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光纤传感与光信息处理. Email: zhiyongzhang@home.swjtu.edu.cn

**收稿日期:** 2017-02-15; **录用日期:** 2017-04-19

<http://www.photon.ac.cn>

内外研究的热点<sup>[1-2]</sup>. 其中, 基于双马赫-曾德 (Mach-Zehnder, M-Z) 干涉仪结构的分布式光纤传感系统能够探测到光纤沿线的扰动信号, 实时性高并能精确定位, 在长距离周界安防领域有着重要的应用<sup>[3-4]</sup>. M-Z 干涉仪结构对外界振动敏感, 且易受系统光源噪声与后向散射噪声的影响, 使得定位算法的结果有较大误差. 为了减小定位误差, 文献[5]提出通过计算原始信号的短时过零点进行三次样条插值拟合, 将拟合数据相关时延估计可以减小噪声影响. 文献[6]采用连续小波变换处理, 提取原始信号在一定小波变换尺度下的信号, 将变换后信号的包络进行相关时延估计的方法. 文献[7-8]提出将数据通过离散小波变换滤除噪声, 以提高定位准确度; 或是通过小波变换提取原始信号高频信号数据段, 再进行互相关时延估计. 由于采用互相关方法进行时延估计的误差较大, 通过曲线拟合等减小噪声对互相关时延估计影响的方法计算复杂. 本文采用二次相关算法进行时延估计, 可以有效降低定位误差和运算时间<sup>[9]</sup>.

## 1 双 M-Z 光纤干涉仪传感系统

基于双 M-Z 结构的分布式光纤扰动定位传感系统的结构如图 1 所示.

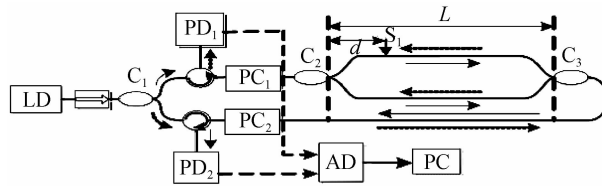


图 1 双 M-Z 干涉仪光纤扰动定位传感系统

Fig. 1 Dual M-Z fiber interferometry vibration location Sensor system

由单频激光光源 LD (Laser Diode) 输出的光信号, 通过耦合器  $C_1$  (Coupler 1) 分成顺时针与逆时针的两路, 再分别通过臂长为  $L$  的干涉结构传感光纤到达 PD (Photoelectric Detector). 图中的  $PC_1$  (Polarization Controller 1)、 $PC_2$  进行偏振控制, 使传感臂与参考臂的光信号在  $C_2$  和  $C_3$  两端进行干涉时偏振态一致. 将 PD 探测的两路干涉信号进行采样, 并将数据上传到计算机 (PC) 进行扰动定位. 光波通过长度为  $l$  的光纤, 会产生相位延迟<sup>[10]</sup>, 即

$$\phi = \beta \times l \quad (1)$$

式中,  $\beta$  为光在光纤中的传播常量. 在光纤扰动位置  $S_1$  处, 由于外界扰动引起光纤相位的变化量为

$$\Delta\phi = \Delta(\beta l) = \beta l (\Delta l / l) + l (\partial\beta / \partial n) \Delta n + l (\partial\beta / \partial a) \Delta a \quad (2)$$

式中,  $\Delta l$  为光纤的变化量,  $\Delta n$  为纤芯折射率的变化量,  $\Delta a$  为纤芯半径  $a$  的变化量. 第一项表示光纤长度变化引起的相位差; 第二项为光纤折射率变化引起的相位差; 第三项为传感光纤纤芯直径变化引起的相位差 (因其值较小, 一般可忽略不计). 由材料性质  $\beta = nk_0$ ,  $\epsilon_3 = \Delta l / l$ ,  $k_0$  为光在真空中的波数;  $\epsilon_3$  为应力作用下光纤的应变, 其中  $\epsilon_3 = -P(1 - 2\mu)E$ . 通过代入式 (2) 得到

$$\Delta\phi = \beta l P (1 - 2\mu) [n^2 (p_{11} + 2p_{12}) / 2 - 1] / E \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为光纤的泊松常量,  $E$  为光纤的弹性模量,  $P$  为压强,  $p_{ij}$  为光纤光弹系数. 由式 (3) 可知, 相位差的变化正比于外界压强变化, 振动信号通过改变光纤所受压力, 直接对传感光纤中的光相位  $\Delta\phi$  进行调制.

由光学干涉的原理, 传感臂的光场强度和参考臂的光场强度值为

$$E_1 = E_0 \exp \{ i[\omega_0 t + S(t) + \phi_x + \epsilon_0(t)] \} \quad (4)$$

$$E_2 = E_0 \exp \{ i[\omega_0 t + \phi_y + \epsilon_1(t)] \} \quad (5)$$

式中,  $E_0$  为传感信号光和参考光的场振幅,  $\omega_0$  为传感信号光和参考光的角频率,  $S(t)$  为传感信号光的相位调制量 (正比于外界振动信号  $P$ ),  $\phi_x$ 、 $\phi_y$  分别为传感臂和参考臂的传输累计相位值,  $\epsilon_0(t)$ 、 $\epsilon_1(t)$  为环境附加在光纤上的噪声. 在耦合器  $C_2$ 、 $C_3$  处干涉得到的场分布为

$$E(t) = E_1 + E_2 = E_0 \exp \{ i[S(t) + \phi_x - \phi_y + \xi(t)] \} \exp(i\omega_0 t) \quad (6)$$

再经过平方率器件 PD 探测得到

$$I = K E E^* = K I_0 \{ 1 + \alpha_1 \cos [S(t) + \phi_x - \phi_y + \xi(t)] \} \quad (7)$$

式中,  $K$  光电探测器件的光电转换系数,  $\alpha_1$  为干涉条纹的可见度系数 ( $0 < \alpha_1 \leq 1$ ),  $\xi(t)$  为干涉信号两臂的环境噪声差值.

图 1 中逆时针的光与顺时针的光分别到达 PD<sub>1</sub> 与 PD<sub>2</sub> 进行探测得到两路信号为

$$I_1 = KI_0 \{1 + \alpha_1 \cos [S(t-t_1) + \phi_0 + \xi_0(t)]\} + n_1 \quad (8)$$

$$I_2 = KI_0 \{1 + \alpha_2 \cos [S(t-t_2) + \phi_1 + \xi_1(t)]\} + n_2 \quad (9)$$

式中,  $n_1$ 、 $n_2$  为 PD 探测电路热噪声,  $\xi_0(t)$ 、 $\xi_1(t)$  为环境噪声,  $t_1$  和  $t_2$  分别为振动点信号传输到 PD<sub>1</sub> 和 PD<sub>2</sub> 所经过的时间. 设扰动点到耦合器 C<sub>2</sub> 的光纤长度为  $d$ , 则

$$\begin{cases} t_1 = nd/c \\ t_2 = n(2L-d)/c \end{cases} \quad (10)$$

式中, 光速  $c = 3 \times 10^8$  m/s,  $n$  为光纤折射率,  $L$  为传感臂与参考臂的光纤长度. 通过计算两路信号的时延和测量两路信号的时间差即可确定扰动的位置, 即

$$\tau = t_2 - t_1 = 2n(L-d)/c \quad (11)$$

$$d = L - c\tau/2n \quad (12)$$

## 2 时延估计与定位原理

### 2.1 相关法时延估计

时间延迟估计是信号处理领域中重要的研究方向, 广泛应用于雷达、声呐、语音、故障诊断定位等各个方面. 常用的时延估计方法有解相位法、谱分析法、互相关法、自适应滤波等方法<sup>[11]</sup>.

互相关算法是常用的时延估计方法, 通过寻找相关峰值来确定两路信号的时延大小. 由 PD<sub>1</sub> 和 PD<sub>2</sub> 探测两路信号分别为式(8)、(9), 则两路信号的互相关函数为<sup>[12]</sup>

$$R_{I_1 I_2} = E[I_1(t)I_2(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I_1(t)I_2(t+\tau) dt \quad (13)$$

在式(8)、(9)中, 假设

$$h(t) = KI_0 \cos [S(t-t_1) + \phi_0] \quad (14)$$

在实际采样中, 时间  $T$  不可能无限大, 通常截断数据与离散化的互相关函数表达式为

$$\hat{R}_{I_1 I_2}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_1(n)I_2(n+m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [\alpha_1 h(n) + n_1(n)][\alpha_2 h(n+m - [\tau f_s]) + n_2(n+m)] \quad (15)$$

式中,  $N$  为采样长度,  $m$  为相关变量. 由式(15)简化计算得到

$$\hat{R}_{I_1 I_2}(m) = \alpha_1 \alpha_2 \hat{R}_{hh}(m - [\tau f_s]) + \alpha_2 \hat{R}_{h n_1}(m - [\tau f_s]) + \alpha_1 \hat{R}_{n_2}(m) + \hat{R}_{n_1 n_2}(m) \quad (16)$$

假设信号与噪声、噪声与噪声之间没有相关性. 则可以忽略掉后三项对时间估计的影响. 时延估计值表示为

$$\hat{R}_{I_1 I_2}(m) = \alpha_1 \alpha_2 \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} h(n)h(n+m - [\tau f_s]) \quad (17)$$

当相关函数取得最大值时, 则

$$m = [\tau f_s], \tau = t_2 - t_1 \quad (18)$$

式中,  $[\cdot]$  表示向两边取整数,  $T_s$  表示采样点时间间隔即采样频率  $f_s = 1/T_s$ .

将式(8)带入式(12)得到

$$d = L - cmT_s/2n = L - cm/2nf_s \quad (19)$$

对式(19)求对  $m$  的导数, 即

$$\partial d = -(c/2nf_s) \partial m \quad (20)$$

因此采样率的大小决定采样准确度, 采用 10 MHz 采样率可以得到 10 m 的定位准确度.

### 2.2 二次相关法时延估计

由于噪声的影响, 在基本互相关方法基础上, 提出二次相关时延估计方法. 该方法先将信号自身作自相关和两路信号的互相关运算, 再将得到的自相关与互相关二次作相关运算结果, 通过二次相关峰值进行时延估计可以有效降低噪声对信号的影响. 由式(16), 忽略信号与噪声的相关性得到自相关函数与互相关函数分别为

$$\hat{R}_{I_1 I_1}(m) = E[I_1(n)I_1(n+m)] = \alpha_1 \alpha_1 R_{hh}(m) + R_{n_1 n_1}(m) \quad (21)$$

$$\hat{R}_{I_1 I_2}(m) = E[I_1(n)I_2(n+m)] = \alpha_1 \alpha_2 R_{hh}(m - [\tau f_s]) + R_{n_1 n_1}(m) \quad (22)$$

将式(21)、(22)再进行相关运算,忽略信号与噪声、噪声与噪声的相关性得到二次相关结果为

$$\hat{R}_{I_1 I_1, I_1 I_2}(m) = \alpha_1^3 \alpha_2 R_{hh, hh}(m - [\tau f_s]) \quad (23)$$

可以看出(21)、(22)两式第一项只存在时延 $[\tau f_s]$ 的区别,通过二次相关得到式(23)就可以得到时延估计值.将(17)式表示为

$$\hat{R}_{I_1 I_2}(m) = \alpha_1 \alpha_2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n) R_N(n) h(n+m - [\tau f_s]) R_N(n+m), R_N(n) = 1, (0 \leq n \leq N-1) \quad (24)$$

假设 $h(n)$ 为周期的余弦信号 $KI_0 \cos(\Omega n)$

$$\hat{R}_{I_1 I_2}(m) = \alpha_1 \alpha_2 (KI_0)^2 \cos[\Omega(m - [\tau f_s])] \sum_{n=-\infty}^{+\infty} R_N(n) R_N(n+m) \quad (25)$$

式中 $\Omega$ 为数字频率.由式(25)可知,通过相关运算使截断两路信号的矩形窗相关得到三角窗,相关结果 $R_{hh}(m)$ 相比于原信号 $h(n)$ 的信号带宽增大.时延估计均方误差的克拉美罗(CRLB)下界为<sup>[13]</sup>

$$\sigma_{\text{CRLB}}^2 = \frac{1}{8\pi^2 TB \left(f_0^2 + \frac{B^2}{12}\right)} \left[ \frac{1}{\rho^2} \left(1 + \frac{1}{\text{SNR}}\right)^2 - 1 \right] \quad (26)$$

式中 $f_0$ 表示PD探测信号的中心频率; $B$ 为PD探测信号的带宽; $T$ 为采样总时间;SNR为信噪比; $\rho$ 为相关系数.将相关结果进行二次相关运算,由式(26)带宽 $B$ 的增大,使得估计均方误差减小.同时噪声与噪声相关性不能忽略,相关运算使得 $R_{n_1 n_1}(m)$ 只在极少数点存在较大值,再通过二次相关算法使得噪声影响减小.

由维纳-辛钦定理,平稳随机过程的相关函数与功率谱互为傅里叶变换与傅里叶逆变换,即满足<sup>[14]</sup>

$$F[R_{I_1 I_2}(\tau)] = G_{I_1 I_2}(f) = F_{I_1}^*(f) F_{I_2}(f) \quad (27)$$

式中 $F[\cdot]$ 为傅里叶变换, $G_{I_1 I_2}(f)$ 为两路信号的互功率谱, $F^*$ 表示傅里叶变换后的复共轭.通过时域的相关运算变换到频域共轭相乘,把二次相关算法的复杂度降低到.

### 3 实验与分析

#### 3.1 仿真分析

将PD探测信号式(8)、(9)建模仿真进行二次相关时延估计:在1000 Hz扰动中心频率下,忽略环境噪声项 $\xi_0(t)$ 、 $\xi_1(t)$ 的影响得到不同系统噪声信噪比下,采样频率10 MHz(对应为10 m/point)、采样长度为 $50 \times 1024$ (50 K)个数据点的时延估计值如图2(a)所示;再考虑到存在环境噪声时,假设环境噪声为低频和高斯噪声的叠加噪声,得到时延估计如图2(b)所示.图中二次相关法时延估计误差优于相关时延估计方法.其中时延估计的根均方误差RMSE的计算公式为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (m_i - \tau f_s)^2} \quad (28)$$

式中 $K$ 取30次.

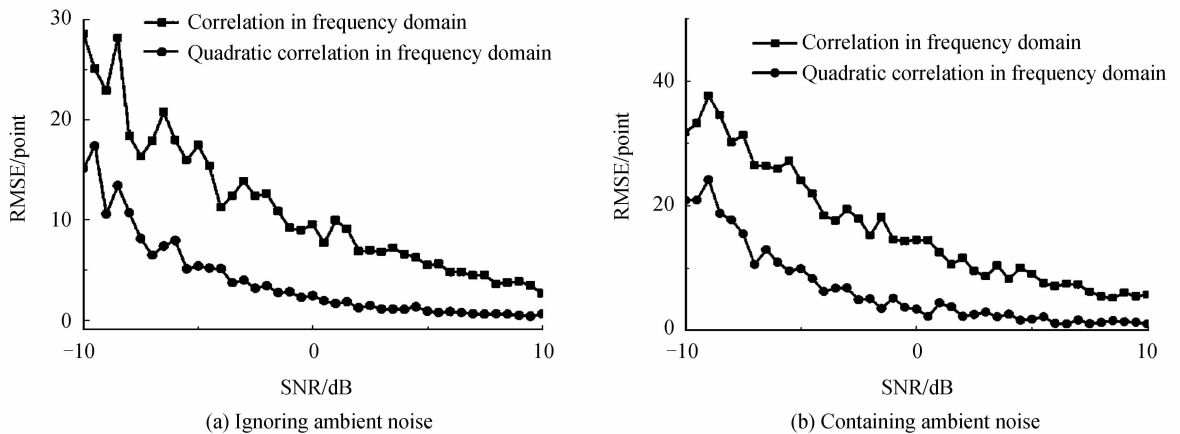


图2 环境噪声与系统噪声下的时延估计

Fig. 2 The time-delay estimate under the ambient noise and system noise

在 MATLAB 下对采样长度为  $100 \times 1024$  点的数据进行时延估计,每次估计所用的时间如图 3 所示,图中频域进行相关运算具有更低的运算复杂度.

信噪比 SNR 为  $-1$  dB 时,不同频率扰动下的时延估计结果如图 4 所示,图中高频下相关估计拥有更小的估计均方误差与式(26)分析吻合.同时,二次相关时延估计算法相比于相关时延估计方法对低频扰动信号具有更低的估计误差.

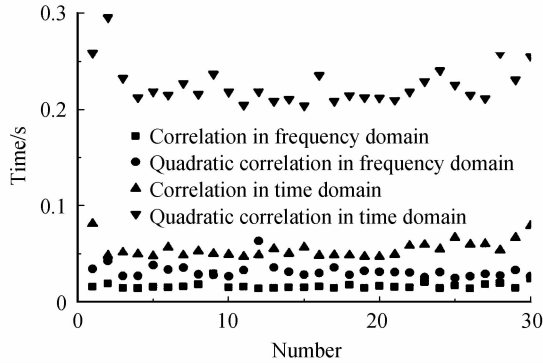


图 3 不同时延估计方法实现时间  
Fig. 3 The calculated time of different time delay estimation method

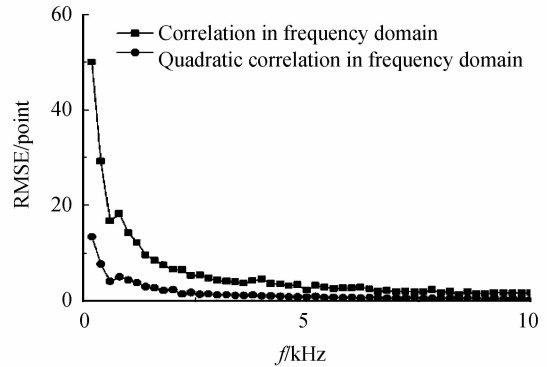


图 4 不同振动频率下的时延估计值  
Fig. 4 Estimation of time delay at different vibration frequencies

### 3.2 实验分析

由双 M-Z 干涉仪结构的分布式光纤扰动定位传感系统原理,进行实验平台搭建.采用中科院半导体所研制的  $1550$  nm 的窄线宽激光光源,北京康冠公司的  $10$  M 光电探测模块;采集卡采样频率为  $5$  MHz,传感光纤长度为  $6$  km.双 M-Z 干涉仪结构分布式系统中不仅存在大量的环境噪声的影响,还受系统本身光路后向散射光与激光光源噪声影响,以及干涉的传感光信号与参考光信号的偏振状态不一致所带来的影响.通过图 1 中两个偏振控制器  $PC_1$ 、 $PC_2$  的自动调节,使干涉的传感光信号与参考光信号的偏振状态相近,降低由于干涉时偏振引起的噪声对时延估计的影响.PD 探测得到两路扰动时的振动信号如图 5 所示.

通过对扰动位置为  $6$  km 处振动信号进行时延估计,采样数据长度为  $50 \times 1024$  点,频域相关法、频域二次相关法的根均方误差分别为  $22.67$ 、 $12.46$ (Point).在长度为  $100 \times 1024$  采样数据点下,两种估计方法根均方误差分别为  $11.18$ 、 $3.72$ (Point).其中  $100 \times 1024$  采样点数据下的时延估计值如图 6 所示,图中二次相关方法使估计误差限定在更小的范围内.

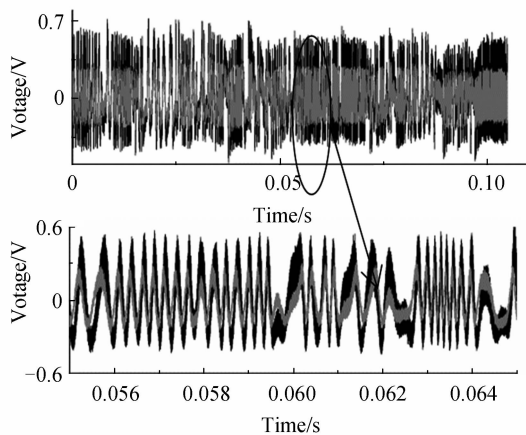


图 5 PD 探测两路扰动信号  
Fig. 5 PD detection of two-way disturbance signal

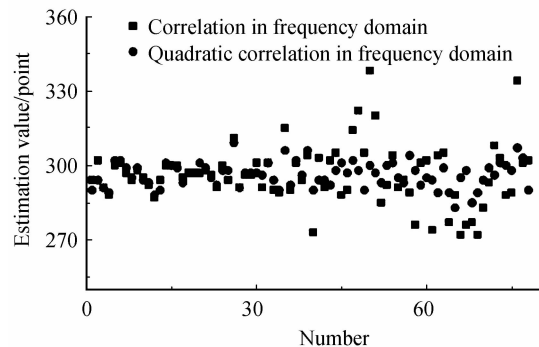


图 6  $100 \times 1024$  采样点数据下的时延估计值  
Fig. 6 Time delay estimation under  $100 \times 1024$  sample points

## 4 结论

双 M-Z 干涉仪结构分布式传感系统对扰动信号进行定位时,计算结果准确度受到系统噪声与环境噪声影响较大.理论分析与实验结果表明,采用二次相关算法提高相关数据的带宽,减少了噪声对于平稳信号时

延估计的影响,提高了系统对扰动信号定位准确度.通过实验验证,在5M采样率、 $100 \times 1024$ 采样点数据下,与直接相关时延估计算法相比,二次相关时延估计算法结果的根均方误差减少7个点(对应140 m),定位准确度有了显著提高,且平均计算时间为27 ms.因此,本文采用的二次相关时延估计算法能够满足双M-Z光纤传感系统高精度与实时性的要求.

### 参考文献

- [1] WANG Li. Research on intelligent technology of environment perception based on distributed optical fiber sensor[D]. Tianjin: Nankai University, 2008.  
王立. 基于分布式光纤传感的智能环境感知技术研究[D]. 天津,南开大学, 2008.
- [2] 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.
- [3] LIU Bo, YANG Yi-fei, ZHANG Jian, *et al.* A fiber fence system based on M-Z interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1013-1017.  
刘波,杨亦飞,张建,等. 基于M-Z干涉的光纤围栏系统实验研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(6): 1013-1017.
- [4] ZHANG Ying, CHEN Jia-mei, LI Gang, *et al.* Location method of distributed fiber-optic perimeter security system based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(06): 112-115.  
张颖,陈佳妹,李刚,等. 马赫-曾德尔分布式光纤周界防范系统定位算法研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(06): 112-115.
- [5] MA Chun-yu, LIU Tie-gen, LIU Kun, *et al.* Long-range distributed fiber vibration sensor using an asymmetric dual Mach-Zehnder interferometers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(9): 2235-2239.
- [6] MA Chun-yu, LIU Tie-gen, LIU Kun, *et al.* A continuous wavelet transform based time delay estimation method for long range fiber interferometric vibration sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(16): 3785-3789.
- [7] ZHONG Xiang, ZHANG Chun-xi, LIN Wen-tai, *et al.* Fiber-optic perimeter location system based on wavelet transformation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, **39**(3): 396-400.  
钟翔,张春熹,林文台,等. 基于小波变换的光纤周界定位系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, **39**(3): 396-400.
- [8] CHEN Qin-nan, LIU Tie-gen, LIU Kun. An improved positioning algorithm with high precision for dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensing system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(10): 1954-1960.
- [9] TANG Juan, XING Hong-yan. Time delay estimation based on second correlation[J]. *Computer Engineering*, 2007, **33**(21): 265-267.  
唐娟,行鸿彦. 基于二次相关的时延估计方法[J]. 计算机工程, 2007, **33**(21): 265-267.
- [10] CHEN Jun. Research on an interferometric optical fiber fence alarm system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.  
陈俊. 一种干涉型光纤围栏报警系统的研究[D]. 成都,电子科技大学, 2012.
- [11] YANG De-sen, SHI Jie, LIU Bo-sheng. Research of time-delay estimation algorithm for passive localization based on cepstrum analysis[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, **21**(2): 610-612.  
杨德森,时洁,刘伯胜. 基于倒谱分析的水声信号被动定位时延估计算法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, **21**(02): 610-612+616.
- [12] XIE Shang-ran, ZOU Qi-lin, WANG Li-wei, *et al.* Positioning error prediction theory for dual Mach-Zehnder interferometric vibration sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(3): 362-368.
- [13] CESPEDES I, OPHIR J, ALAM S K. The combined effect of signal decorrelation and random noise on the variance of time delay estimation[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 1997, **44**(1): 220-225.
- [14] COHEN L. Generalization of the wiener-khinchin theorem[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1998, **5**(11): 292-294.