

文章编号 1004-924X(2010)09-2109-07

# 基于时间差法的共焦测头信号处理

裘祖荣<sup>1</sup>, 魏芳坤<sup>1</sup>, 谢利勤<sup>1</sup>, 李杏华<sup>1</sup>, 肖功剑<sup>2</sup>

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 泰格林纸集团(永州) 湘江纸业有限责任公司, 湖南 永州 425000)

**摘要:** 基于时间差法的共焦测头测量的位移量是测头输出的光电信号中相邻驼峰之间对应时间差的一一映射。为了更加准确稳定地计算出光电信号中的时间差, 本文分析了改进后测头输出光电信号的特点, 指出了目前信号处理方法的缺陷, 进而提出了相似形态分析法, 用于计算相邻驼峰之间对应的时间间隔。实验数据显示, 在采样频率为 2 MHz 的数据采集系统中, 使用相似形态分析法计算得到的时间间隔的标准差为 0.33  $\mu\text{s}$ , 高于最大值法的 3.37  $\mu\text{s}$ 。结果表明, 相似形态分析法计算结果准确, 不受噪声的影响, 对信号的前期处理要求低, 易于实现, 计算结果稳定且不受激光光强变动的影响和环境光的干扰。

**关键词:** 位移测量; 共焦测头; 时间差; 相似形态分析; 光电信号

**中图分类号:** TP274; TB92 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.2109

## Signal processing for confocal probe based on time difference

QIU Zu-rong<sup>1</sup>, WEI Fang-kun<sup>1</sup>, XIE Li-qin<sup>1</sup>, LI Xing-hua<sup>1</sup>, XIAO Gong-jian<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and  
Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

2. *Xiangjiang River Paper Co. Ltd., Tiger Forest & Paper Group, Yongzhou 425000, China*)

**Abstract:** The displacement measured by a confocal probe based on time difference method is an one-to-one mapping to the time difference between the two peaks in a photo-electric signal. In order to calculate the time difference accurately, the characteristics of photo-electric signal output from an improved probe was analyzed and then the defects in the current signal processing method were pointed out. A processing method named similar pattern analysis was presented to calculate the time interval between the two peaks. Experimental data show that in the data acquisition system with sampling frequency of 2 MHz, the standard deviation of time difference by using the similar pattern analysis is 0.33  $\mu\text{s}$ , which is better than 3.37  $\mu\text{s}$  by using the maximum value method. With the similar pattern analysis, it is easy to implement the signal pre-processing. The calculated results are accurate and stable and are not influenced by the changes of laser intensity and ambient light interference.

**Key words:** displacement measurement; confocal probe; time difference; similar pattern analysis; photo-electric signal

收稿日期: 2009-11-25; 修订日期: 2010-03-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50775160)

## 1 引言

基于时间差法的共焦测头<sup>[1-2]</sup>的测量原理是通过计算光电接收器输出电信号中两个相邻驼峰峰值点之间的时间差来计算出被测位置距测头物镜焦平面的位移量,可以看出,对时间差计算的准确性和稳定性直接反映了测量结果的准确性和稳定性。

目前,国内外计算时间差的方法主要有电子计数法、模拟内插法、延迟线内插法、游标法、时间-幅度转换法等 5 种。前 4 种都是基于计数法对具有确定边沿的脉冲宽度进行计数,其均存在一定的原理误差;时间-幅度转换法是对时间的测量转换成对其它物理量的测量,思路新颖,但结构复杂,转换过程中会引入新的误差。

常用的基于时间差法的共焦测头的光电信号中驼峰的半腰宽度较宽,驼峰顶部变化平缓,引入噪声较大,所以它的峰值点不好确定,也就是说采用计数原理测量的触发条件不确定,这影响了时间差计算的准确性和稳定性。研究发现,光电信号一个周期内的两个驼峰形状是相似的,基于这个特点并结合相关原理,本文提出了一种基于波形形态相似的测量方法来计算共焦测头信号中相邻驼峰峰值<sup>[3]</sup>间的时间差。

## 2 测量原理

实验使用了基于时间差法的 GJ-4 型共焦测头,它是在激光扫描共焦显微检测法原理<sup>[4]</sup>的基础上,引入动态主动调焦的方法和时间差法<sup>[5-6]</sup>而产生的。本文针对以前共焦测头(文献[1]中所述)的测量光斑大且光斑质量差的问题,对其做了改进,改进后的光路原理如图 1 所示。

改进后的光路在激光光源处增加了一个会聚透镜,使激光器射出的平行光束会聚成一点,同时在会聚透镜的焦点处放置一个小孔光阑,使会聚光斑的中心光能最强且均匀地部分通过,形成理想的点光源,而且将周围的杂散光滤除;此外,在音叉透镜的后续光路中增加一个凹透镜和一个非球面物镜,改善了光斑的质量。经过这项措施,将

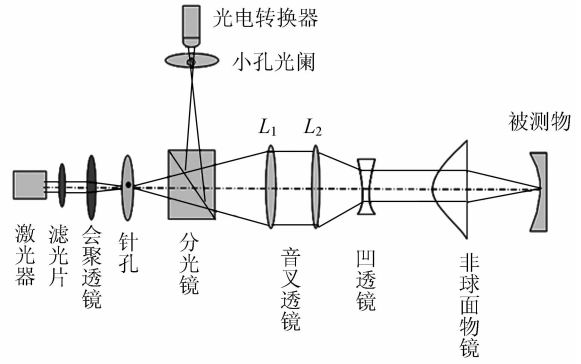


图 1 改进后的光路原理图

Fig. 1 Diagram of improved optical path

照射到被测面上的光斑直径减少到  $10\ \mu\text{m}$ 。

在 GJ-4 型共焦测头中,经过光学公式的推导,得出被测点偏离测头物镜焦平面的位移  $\Delta'$ (如图 2 所示)与光电信号中相邻驼峰峰值间时间差  $t_d$ (如图 3 所示)的函数关系为:

$$\Delta' = -\frac{f_4'^2}{\frac{f_3'M}{f_3'-M} + f_1 - d}, \quad (1)$$

$$M = \frac{f \left[ \frac{f(\Delta - f)}{\Delta} - (b + 2\Delta) \right]}{f + \frac{f(\Delta - f)}{\Delta} - (b + 2\Delta)} + \Delta - c, \quad (2)$$

$$\Delta = A \cos \frac{\omega_0 t_d}{2}, \quad (3)$$

式(3)中, $\Delta$ 为音叉透镜偏离其平衡位置的位移, $f = f_1' = f_2'$ , $f_1'$ 和 $f_2'$ 分别为音叉透镜 $L_1$ 和 $L_2$ 的像方焦距, $f_4'$ 和 $f_4'$ 分别为凹透镜和非球面透镜的像方焦距, $b$ 为两透镜的间距, $A$ 为音叉振幅, $\omega_0$ 为音叉振动频率。

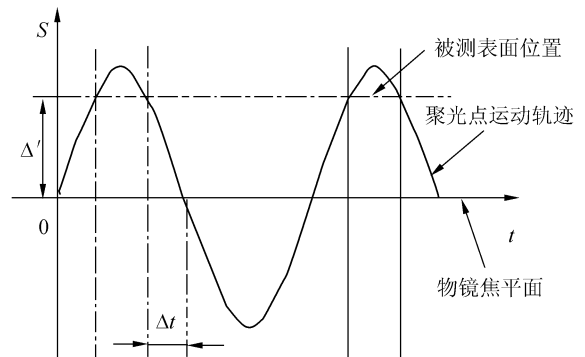


图 2 光焦点的运动轨迹

Fig. 2 Trajectory of optical focus

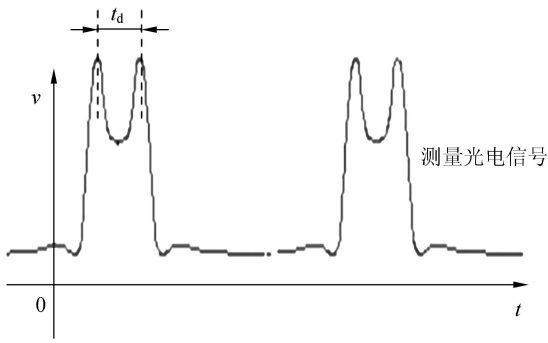


图 3 光电转换器输出的电压信号

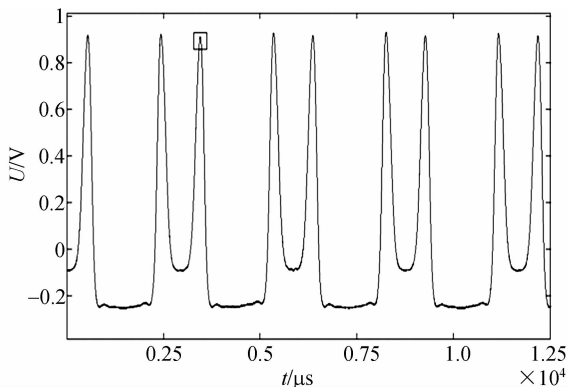
Fig. 3 Voltage signal from photoelectric converter

结合式(1)和式(2)即可得出  $\Delta$  与  $t_d$  的函数关系,对于一个特定共焦测头,  $f_1', f_2', f_3', f_4', A, b, \omega_0$  都是定值,所以测量点位移量只是光电信号中相邻驼峰峰值间时间差的函数。

### 3 算法改进

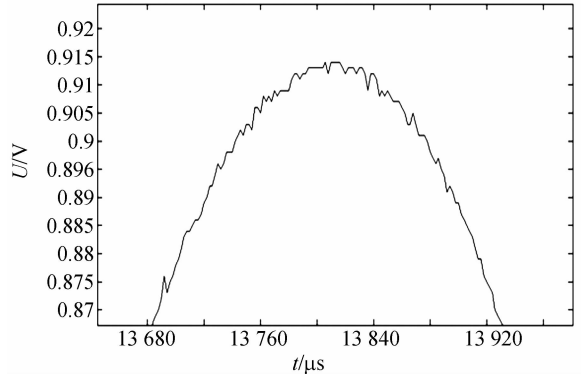
#### 3.1 驼峰信号分析

图 4(a)为 GJ-4 型共焦测头输出的光电信号的波形,由图中数据可以看出,一个周期内的两个相邻驼峰的波形是相似的。将图 4(a)中的矩形框内数据放大,如图 4(b)所示。根据基于时间差法共焦测头的原理可知,光电信号中驼峰的周期等于测头中音叉振动的周期,而音叉振动频率为 340.7 Hz,也为它的固有频率,所以光电信号波形变化缓慢,驼峰的半腰宽度较宽,峰值处的波形平缓,同时峰值处引入的噪声也相对于波形中部较大。然而,从一个周期内的两个相邻驼峰波形



(a) 连续多个周期波形

(a) Waveform of continuous multiple cycles



(b) 峰值处放大波形

(b) Enlarged waveform around peak

图 4 光电信号波形

Fig. 4 Waveform of photo-electric signal

来看,它们的形态相似,相同部位处的波形变化相同。

#### 3.2 目前算法

目前用于处理基于时间差法的共焦测头光电信号的算法是最大值法,它是基于计数法的原理,以一个高频率时钟作为计数时钟,对所要计算的具有确定边沿的脉冲的宽度进行计数。通过上述对共焦测头输出的光电信号中的驼峰波形的分析可知,由于驼峰峰值处波形变化平滑且缓慢,同时引入噪声又较大,如上述图 4(b)所示,所以不能准确地确定所要计算宽度的脉冲的上升沿与下降沿的位置。因此,用最大值法对同一测量点的计算结果的稳定性较差,而用相似形态分析法则可以很好地解决这个问题。

#### 3.3 相似形态分析法

相似形态分析法是根据相邻驼峰波形相似的特点,依据相关计算原理<sup>[7-8]</sup>而得出的。

##### 3.3.1 相关计算原理及噪声影响分析

对于 2 个周期信号  $x(t)$ 、 $y(t)$ (周期为  $T$ ),它们的相关函数<sup>[9-10]</sup>定义为

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} x(t)y(t - \tau)dt, \quad (4)$$

当  $y(t) = x(t)$  时,这两个信号的相关函数称为自相关函数,而在计算时,都从 0 开始,所以式(3)可写成:

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t - \tau)dt, \quad (5)$$

式(5)描述了  $x(t)$  与自身时延信号  $x(t - \tau)$

的相似程度。对于离散的信号  $x(n)$ , 其自相关函数定义为:

$$R_{xx}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n-k) \quad k=0,1,2\cdots \quad (6)$$

设 AD 采集的驼峰信号  $x(n)$  由有用信号  $s(n)$  和噪声  $u(n)$  组成, 即  $x(n) = s(n) + u(n)$ , 代入式(5):

$$\begin{aligned} R_{xx}(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (s(n) + u(n))(s(n-k) + u(n-k)) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (s(n)s(n-k) + s(n)u(n-k) + u(n)s(n-k) + u(n)u(n-k)) = R_{ss}(k) + R_{su}(k) \\ &+ R_{us}(k) + R_{uu}(k) \quad k=0,1,2\cdots \quad (7) \end{aligned}$$

式(7)中  $R_{su}(k)$  与  $R_{us}(k)$  是有用信号和噪声的互相关函数, 而噪声一般是随机的, 与有用信号不相关, 所以这两项的值都很小;  $R_{uu}(k)$  是噪声的自相关函数, 它只在  $k=0$  时较大, 随着  $k$  值的增大, 它将迅速减小。

所以, 用相关计算原理来计算共焦测头的光电信号中相邻驼峰间的时间间隔, 受噪声的影响很小。

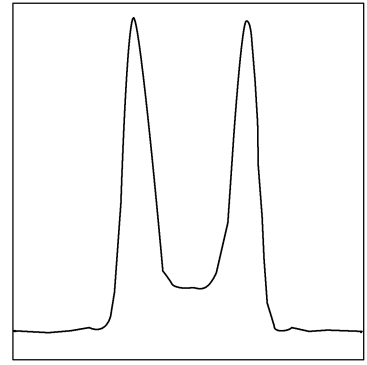
### 3.3.2 算法实现

根据上述的驼峰波形分析和相关计算原理分析, 本文实现了一种基于形态相似的分析方法用于计算测头输出的光电信号中相邻驼峰峰值间时间差。该方法简单, 易于实现。

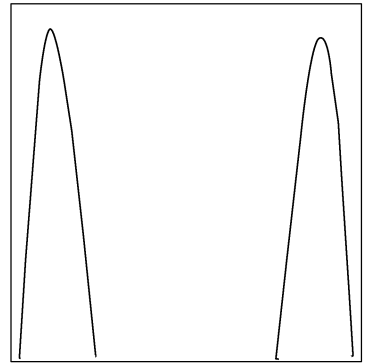
首先, 依据上述中基于时间差法的共焦测头的测量原理, 根据音叉振动信号与光电信号的相位关系, 按照周期分割光电信号中的驼峰信号, 如图 5(a)所示。然后对波形进行阈值分割, 将截取的数据记为  $x(n)$ , 波形如图 5(b)所示。将图 5(b)中的前驼峰的数据记为  $y(n)$ 。依据相关计算原理, 将式 5 做适当变形, 得到如式(8)所示的计算公式。

$$\begin{aligned} R_{xy}(k) &= \sum_{n=0, m=n+k}^{N-1} y(n)x'(m) \\ k &= 0, 1, 2\cdots M+N/2-1, \quad (8) \end{aligned}$$

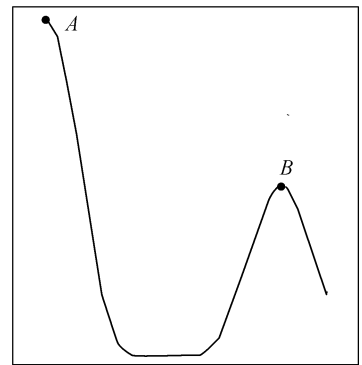
式(8)中  $M, N$  分别为  $x(n), y(n)$  的长度,  $x'(n)$  为将  $x(n)$  扩展成长度为  $M+N/2-1$  的数据, 扩展值为 0。根据式(7)对  $x(n), y(n)$  进行计算, 结果如图 5(c)所示。



(a)单周期驼峰信号  
(a)Single-cycle hump signal



(b)阈值分割后的驼峰信号  
(b)Hump signal after thresholding



(c)计算结果  
(c)Calculation result

图 5 相似形态分析法实现示意图

Fig. 5 Implementation diagram of similar pattern analysis method

图 5(c)数据中第二个极大值对应的横坐标, 即为光电信号中相邻驼峰峰值点之间的时间间隔。

基于这种算法简单、乘积累加运算重复性强、运算速度要求高的特点,本文选用 FPGA<sup>[11]</sup> 作为运算核心处理器。将整个信号处理系统中的各个功能部分模块化,在 FPGA 中实现并行运行,从而提高整个系统的性能。在 FPGA 中实现的模块间连接关系框图如图 6 所示。

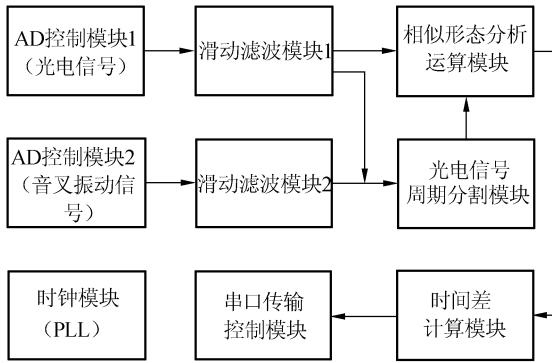


图 6 FPGA 中模块连接框图

Fig. 6 Block diagram of modules in FPGA

## 4 相似形态分析法实验

### 4.1 计算时间差的稳定性实验

本文信号处理电路中 AD 的采样频率设为 2 MHz,对 GJ-4 型共焦测头处理电路板上经过电路处理放大后的光电信号进行采集,然后用相似形态分析法对采集后的数据进行处理,计算了相邻驼峰峰值点之间的时间差,结果如表 1 所示。表 1 中的均值 1 为对第 1 个至第 11 个周期计算结果的平均值,均值 2 为对第 12 个至第 22 个周期计算结果的平均值,均值 3 为对第 23 个至第 33 个周期计算结果的平均值;标准差 1 为均值 1、均值 2 和均值 3 的标准差,它反映了对连续的多个周期的计算结果的稳定性;标准差 2 为对第 1 个至第 33 个周期计算结果的标准差,它反映了对连续的单一周期的计算结果的稳定性。

从表 1 中的标准差 2 可以看出,用相似形态分析法对不同测量点的连续单个周期的计算结果的标准差 < 1 μs;从标准差 1 可以看出,对不同测量点的多个周期的计算结果的标准差 < 0.5 μs,即一个采样时间。

表 1 相似形态分析法的稳定性实验

Tab. 1 Stability experiment of similar pattern analysis method

被测位置	均值 1/μs	均值 2/μs	均值 3/μs	标准差 1 /μs	标准差 2 /μs
1	1 281.91	1 282.04	1 282.00	0.07	0.99
2	1 192.82	1 192.58	1 192.36	0.23	0.84
3	1 235.59	1 235.71	1 235.59	0.07	0.92
4	1 323.50	1 323.46	1 323.46	0.03	1.01
5	2 142.68	2 143.21	2 143.00	0.27	1.32
6	1 850.05	1 849.96	1 849.91	0.07	1.33
7	1 239.32	1 239.04	1 239.50	0.23	1.12
8	1 189.18	1 189.13	1 189.18	0.03	1.42
9	1 092.14	1 092.25	1 091.64	0.33	1.37

### 4.2 受光电信号幅值变动的影响

在测量过程中,由于激光光源的不稳定或是外界环境光的干扰,光电信号的幅值有可能发生变动,如果计算结果受光电信号幅值变动的影 响,则测量结果将受到影响。本文用实验验证了用相关分析法计算的结果是否受到光电信号幅值变动的影 响。对同一测量点,通过改变激光光源的强度,使得光电信号的最大幅值从 780 mV 变动到 1 400 mV,计算得出的实验数据如表 2 所示。

表 2 光电信号幅值变动实验

Tab. 2 Experiment of changing amplitude of photo-electric signal

信号幅值	均值 1/μs	均值 2/μs	均值 3/μs	标准差 1 /μs	标准差 2 /μs
780 mV	1 133.05	1 133.42	1 133.27	0.19	1.14
1 400 mV	1 134.09	1 133.54	1 133.50	0.33	0.84

从表 2 的数据可以看出,用相似形态分析法计算的结果不受光电信号幅值变动的影 响,从而保证了最终的测量结果不受激光光源或是外界干扰光的影 响。

### 4.3 与目前算法对比实验

进行了相似形态分析法与最大值法的比较验证,实验如下。

仍用上述中的处理电路对共焦测头输出的光电信号进行采集,采样频率为 2 MHz,对采集的数据进行 32 步长的滑动滤波,然后再用相似形态分析法和最大值法分别处理,对处理后的结果进行比较,结果如表 3 所示。

从表 3 的数据可知,相似形态分析法处理结果的标准差 1 和标准差 2 的最大值分别为  $0.33 \mu\text{s}$ 、 $1.42 \mu\text{s}$ ,用最大值法处理结果的标准差 1 和标准差 2 的最大值分别为  $3.37 \mu\text{s}$ 、 $7.76 \mu\text{s}$ ,由此可得出相似形态分析法处理结果的稳定性比最大值法处理结果的稳定性好。

表 3 处理结果的比较实验

Tab. 3 Comparison of experiment result

被测位置	相似形态分析法		最大值法	
	标准差 $1/\mu\text{s}$	标准差 $2/\mu\text{s}$	标准差 $1/\mu\text{s}$	标准差 $2/\mu\text{s}$
1	0.07	0.99	1.75	3.12
2	0.23	0.84	1.93	4.58
3	0.07	0.92	0.54	3.32
4	0.03	1.01	1.30	4.45
5	0.27	1.33	1.78	3.92
6	0.07	1.33	1.04	4.11
7	0.23	1.12	1.18	6.83
8	0.03	1.42	3.37	6.11
9	0.33	1.37	0.23	7.76

## 参考文献:

- [1] ZHANG G X, FAN Y M, GAO X, *et al.*. A confocal probe based on time difference measurement [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2004, 53(1): 417-420.
- [2] FAN Y M, ZHAO S Z, REN J F, *et al.*. Study on optical confocal probe based on time difference measurement with no reference path[C]. *2nd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment, China: SPIE*, 2006, 61501Q: 1-6.
- [3] BUCKENS P F, VEATCH M S. A high performance peak-detect & hold circuit for pulse height analysis[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1992, 39(4): 753-757.
- [4] TAKAMASA T, HAZUKU T. Measuring interfacial waves on film flowing down a vertical plate wall in the entry region using laser focus displacement meters [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43: 2807-2819.
- [5] XIE B. Interchannel time difference and stereophon-

## 5 结 论

本文介绍了新型的基于时间差法的共焦测头的测量原理及改善光斑大小与质量的措施,分析了测头输出的光电信号中驼峰波形的特点,提出了相似形态分析的信号处理方法,用于计算相邻驼峰之间对应的时间间隔。该方法计算结果准确,算法简单,易于实现。

此方法解决了基于计数原理的最大值法处理结果不稳定的问题。实验数据表明,采用相似形态分析法对共焦测头的光电信号进行处理,得到的连续单个周期的计算结果的标准差最大为  $1.42 \mu\text{s}$ ,连续的多个周期的计算结果均值的标准差最大为  $0.33 \mu\text{s}$ ,而且计算结果不受激光光强变动的影响和环境光的干扰。

- ic sound image localization[J]. *Science Press*, 2002, 27(4): 332-338.
- [6] ABAS A M, BYSTROV A, KINNIMENT D J, *et al.*. Time difference amplifier[J]. *Institution of Engineering and Technology*, 2002, 38(23): 1437-1438.
- [7] BENESTY J, CHEN J D. Time-delay estimation via linear interpolation and cross correlation[J]. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2004, 12(5): 509-519.
- [8] GUEVARA N L, SAGAR R P, ESQUIVEL R O. Local correlation measures in atomic systems[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2005, 122(8): 1-8.
- [9] 沈学举,王永仲,姚广涛,等. 扩展等相关峰综合鉴别函数算法研究[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(1): 156-160.
- SHEN X J, WANG Y ZH, YAO G T, *et al.*. Study on extended equal correlation peak synthetic discriminant function algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 156-160. (in Chinese)
- [10] 邓晓鹏. 基于马赫-曾德尔干涉仪的单相关峰联合变换相关技术[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(3): 499-505.

DENG X P. Only-one correlation-peak joint transform correlator based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 499-505. (in Chinese)

- [11] 范进,金声震,孙才红. 超高速 FFT 处理器的设计与实现[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2241-

2246.

FAN J, JIN SH ZH, SUN C H. Design and implementation of hyper-speed FFT processor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2241-2246. (in Chinese)

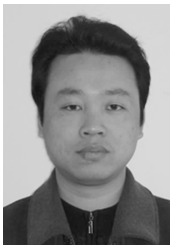
#### 作者简介:



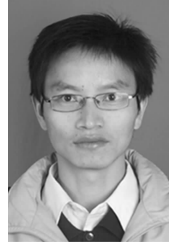
**魏芳坤**(1985—),男,湖南永州人,硕士研究生,2008年于北京邮电大学获得学士学位,主要从事测试计量技术与微靶在线监测系统方面的研究。E-mail: weifangkun@gmail.com



**谢利勤**(1981—),男,湖南新化人,硕士研究生,2008年于湘潭大学获得学士学位,主要从事测试计量技术与智能测量仪器方面的研究。E-mail: xieliqin@tju.edu.cn



**肖功剑**(1979—),男,湖南永州人,助理工程师,2004年于长沙理工大学获得学士学位,现为泰格林纸集团(永州)湘江纸业有限责任公司火力发电厂主任,主要从事传感器仪器仪表、嵌入式智能控制技术的研究。E-mail: xgjw-fh090715@163.com



**李杏华**(1976—),男,江西南昌人,副教授,硕士生导师,2003年于天津大学获得博士学位,主要从事于测试信息处理技术、测量与控制技术和机器视觉方面的研究。E-mail: Li\_xinghua@126.com

#### 导师简介:



**裘祖荣**(1958—),男,上海人,教授,博士生导师,主要从事精密测试理论与技术、智能测量仪器、精密机械设计、新型传感器研制、三坐标测量等方面的研究。E-mail: qzr@tju.edu.cn