

# 激光陀螺合光装配中信号的稳健高斯滤波方法

马立 周辅君 谢炜\* 刘波

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘要** 为了对激光陀螺合光装配中的信号进行去噪处理,并有效抑制残差污染,提出了基于高斯滤波的稳健估计算法。根据合光装配中信号的特点,采用 IGGIII 和 eHuber 两种稳健高斯滤波方法与传统高斯滤波方法进行对比分析,并利用迭代算法进行求解,得到其残差占比、残差平均值、残差均方根、信噪比四个指标参数。实验结果表明,IGGIII 稳健高斯滤波方法更能够提高高斯滤波的稳健性能,有效滤除了激光陀螺合光装配中信号的误差,使得滤波后的信号最接近真实信号,验证了稳健高斯滤波方法的有效性。

**关键词** 信号处理; 去噪处理; 高斯滤波; 稳健估计

**中图分类号** TP273 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1002003

## Robust Gaussian Filtering of Signals for Beam-Coupling Assembly of Ring Laser Gyroscopes

Ma Li Zhou Fujun Xie Wei Liu Bo

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract** In order to eliminate the signal noises and restrain the residual errors in the beam-coupling assembly process of ring laser gyroscopes, a robust estimation based on Gaussian filtering algorithm is presented. According to the signal characteristics in the beam-coupling assembly process, IGGIII robust estimation and eHuber robust estimation are used to deal with the signals. And the signal processing results between the two robust estimation methods and traditional Gaussian filtering method are compared and analyzed. By using iterative algorithm, proportion error, mean absolute error, root mean square error and signal-to-noise ratio are obtained. Experimental results show that IGGIII robust Gaussian filter can improve the robust performance of traditional Gaussian filtering and the signal errors in the beam-coupling assembly process are filtered effectively, and the signals after filtering are closest to the real signals. Therefore, the results validate the robust Gaussian filtering method.

**Key words** signal processing; noise elimination; Gaussian filtering; robust estimation

**OCIS codes** 070.2025; 140.3370; 100.3008

## 1 引言

激光陀螺是捷联式惯性导航系统的理想器件,尤其在军事领域占有举足轻重的地位。合光装配是激光陀螺制造过程中一个至关重要环节,它直接影响激光陀螺角速度测量的准确性。激光陀螺谐振腔内顺时针、逆时针光束经合光后产生干涉信号,这两路信号是微弱的,其传输及接收过程中经常会受到各种噪声的干扰,包括测量环境的振动、空气扰动、

光源功率不稳定、暗电流和电机噪声等因素,从信号表现上来看就是信号突变、曲线不平滑等异常情况,噪声干扰较大。这两路信号分析的准确程度直接决定了激光陀螺的性能,因此必须对这两路信号进行去噪处理,获得其实际情况,进而准确得到这两路信号的幅值和相位信息,保证后续信号分析处理的正确性,以提高合光装配的质量。

采用传统高斯滤波对激光陀螺合光装配中的电

**收稿日期**: 2014-03-10; **收到修改稿日期**: 2014-05-05

**基金项目**: 国家自然科学基金(50905105)、上海市自然科学基金(13ZR1415800)、上海市教育委员会科研创新项目(14YZ008)、江苏省先进机器人技术重点实验室基金课题(JAR201304)

**作者简介**: 马立(1977—),女,博士,副教授,主要从事微操作机器人技术方面的研究。E-mail: malian@shu.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: lancelot512@126.com

信号进行滤波处理,能够剔除和滤掉异常点和误差,但它不是一种稳健的算法。当所处理的信号具有很高波峰或很低波谷的轮廓时,传统高斯滤波会在这里拉高或降低波形,使得滤波得到的波形畸变,偏离真实的波形。

稳健估计在测量中也称为抗差估计,它是针对最小二乘法抗粗差干扰差这一缺陷提出来的,在粗差不可避免的情况下,选择适当的估计方法,使未知量估计值尽可能减免粗差的影响,得出最佳估值<sup>[1]</sup>。稳健算法是基于异常值检测而发展起来的统计方法,可以很好地检测并规避异常值的影响,在许多领域得到应用。Rousseeuw 等<sup>[2]</sup>应用稳健估计研究表面轮廓粗糙度;Xavier 等<sup>[3]</sup>基于形状直径函数应用稳健估计对三维(3D)物体的外形进行估计,从而提高了外形估计的精确度;吕进国等<sup>[4]</sup>结合稳健算法和单纯形法来提高矿井微震的定位精度;李毅等<sup>[1]</sup>采用稳健估计的方法提高了井眼轨迹工程的测量精度;邓黎等<sup>[5]</sup>基于稳健独立基元特征来提高目标图像特征点识别的稳定性;Sergio 等<sup>[6]</sup>提出了全局稳健估计法,并将其应用于 GPS 定位。目前,稳健估计算法还被广泛应用于光学影像<sup>[7-8]</sup>、土壤检测<sup>[9]</sup>、

军事<sup>[10-11]</sup>、图像识别<sup>[12]</sup>等领域。此外,一些新型高效的稳健算法也在被研究<sup>[13-17]</sup>。

本文针对激光陀螺合光装配中信号的特点,鉴于上述稳健算法具有的抗差能力好、精度高、稳定性好等优点,提出了基于高斯滤波的稳健估计算法,并采用 IGGIII 和 eHuber 两种估计方法与传统高斯滤波方法进行对比,以验证所提稳健高斯滤波方法的有效性。

## 2 合光装配原理

合光装配原理如图 1 所示,它是在激光陀螺谐振腔体处于高频抖动下进行的[图 1(a)],通过精确调整棱镜位姿 $(x, y, \theta_z)$ 使得从激光陀螺谐振腔的输出镜透射出的顺时针、逆时针激光束分别经过棱镜的反射、透射后耦合产生干涉,同时精确调整二象限光电管位姿 $(x', y', \theta'_z)$ 准确接收该干涉信号[图 1(b)],并将其转化成两路电流信号,该电流信号经过放大器后转换为电压信号,该电压信号经过分析处理得到两路信号的幅值差和相位差,并使其满足合光装配要求,进而可以获得对应于陀螺角速度的频差信息。

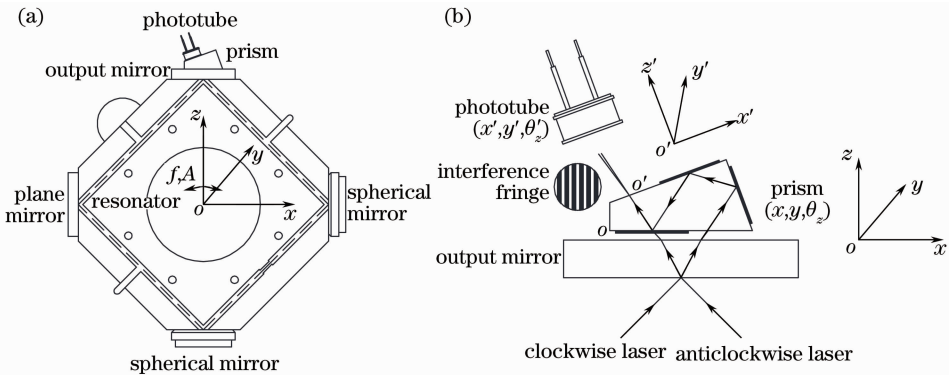


图 1 合光装配原理。(a) 合光装配过程示意图;(b) 原理示意图

Fig. 1 Principle of beam-coupling assembly. (a) Diagram of beam-coupling assembly process; (b) diagram of principle

## 3 稳健高斯滤波

高斯滤波的基本思想就是用原始信号与高斯函数进行卷积得到滤波后的处理信号,其高斯函数为

$$g(i, \sigma) = \exp\left(-\frac{i^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1)$$

原始信号经过高斯滤波处理后得到

$$y(x) = \int_0^l z(\xi)g(x - \xi)d\xi, \quad (2)$$

式中  $y(x)$  为处理后的数据,  $z(\xi)$  为原始数据,  $l$  为采样点数。通过计算得到残差函数

$$e(x) = z(x) - y(x). \quad (3)$$

引入稳健权函数对传统高斯滤波进行稳健估计处理,以获得可靠的处理信号:

$$y_k(x) = \int_0^l z(\xi)w_k(\xi)g(x - \xi)d\xi, \quad (4)$$

式中  $w(x)$  为稳健权函数。权函数的选取常用的方法有 Huber 法、Hampel 法、Tukey 双权估计、Andrews 正弦波法、丹麦法、IGGI 法等。稳健估计是采用选权迭代法来实现的方法,通过多次迭代,使得含有粗差的观测值的权函数为零(或接近零),进

而使其在平差中不起作用,从而在变权过程中实现参数估计的稳健性。根据测量误差理论及激光陀螺合光装配中信号的特点,为了尽量减小残差,采用以下两种稳健估计方法,一种是结合支持向量机<sup>[18]</sup>的IGGIII法,一种是扩展的Huber法,即eHuber法。

### 3.1 IGGIII法

IGGIII法是基于最小二乘估计的稳健方法,其稳健权函数为

$$\omega(v) = \begin{cases} 1, & |v| < k_0 \\ \frac{k_0}{|v|} \left( \frac{k_1 - |v|}{k_1 - k_0} \right)^2, & k_0 \leq |v| \leq k_1 \\ 0, & |v| > k_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中 $k_0, k_1$ 为可调参数,一般 $k_0 = 1.5, k_1 = 2.5, v$ 为标准化残差,即 $v = \frac{e_k}{s}$ , $s$ 为 $e$ 的标准差稳健估计, $k$ 为迭代次数,即

$$s = 1.483\text{MAD}(e_k), \quad (6)$$

式中MAD表示中位差,即

$$I_{\text{MAD}}(e_k) = I_{\text{med}}[|e_k - I_{\text{med}}(e_k)|]. \quad (7)$$

### 3.2 eHuber法

eHuber法是设定阈值的稳健方法,其稳健权函数为

$$\omega(v) = \begin{cases} 1, & |v| < \beta \\ \frac{\beta}{|v|^n}, & |v| \geq \beta \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\beta$ 为常数, $n \in [1, 3]$ ,当 $n = 1$ 时为标准Huber估计,这里 $n = 2$ 。

从上述(5)和(8)式可以看出其共同点在于将权函数分为若干个区间,根据变量不同而决定其权重的不同。不同的区间划分和权重选取将影响数据处理效果。eHuber的权函数是单调的,确定了阈值,当变量大于临界值 $\beta$ 时,其所占权重与其成反比,误差愈大,对应的权重愈小。IGGIII是基于IGGI方案基础上衍生而来,对于测量抗差估计比较有效,计算方便。该方法增加了淘汰域,对于处于淘汰域里的数据直接将其置零,根据不同数据的不同特点,可采用不同的阈值范围,通过将超出范围的误差值直接剔除,能显著提高计算速度。这两种方法计算方便,运行速度快,容易剔除异常值,适用于激光陀螺合光装配中信号的实时处理。

稳健高斯滤波算法的基本思想是采用迭代加权的处理方法,分段的选取不同的权函数。其迭代计算流程如下:

- 1) 令 $k=0$ ,迭代次数为 $K$ ;
- 2) 起始迭代权为1,根据残差公式计算残差 $e_k$ ;
- 3) 选取合适的可调参数 $k_0, k_1, \beta$ ,根据标准化残差公式得到权重 $\omega_k$ ;
- 4) 根据稳健高斯函数方程(4)式处理后的数据;
- 5) 判断 $k$ 是否满足迭代要求,如果 $k=K$ ,则结束迭代;否则 $k=K+1$ ,进行数据替换,以现有的权重 $\omega_k$ 代替原有的权重 $\omega_{k-1}$ ,返回步骤3)继续。

## 4 激光陀螺合光装配中信号处理实验

### 4.1 实验测试

激光陀螺合光装配中信号处理实验系统如图2所示,主要由棱镜与光电管运动机构及其控制系统、激光电源、信号发生器、激光陀螺(RLG)、放大器、数据采集卡及主控计算机等组成。

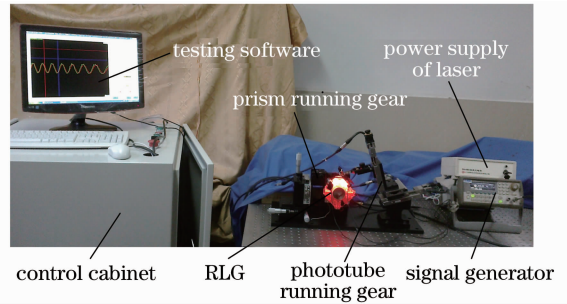


图2 实验系统实物图

Fig. 2 Photo of experimental system

实验系统原理如图3所示,激光陀螺合光装配时,首先由信号发生器发出信号使激光陀螺抖动,接着打开激光电源激发激光陀螺谐振腔内氦氖气体产生顺时针、逆时针两束激光。然后,主控计算机通过运动控制系统控制棱镜及光电管运动机构运行,精确调整棱镜和光电管在激光陀螺谐振腔体上的位姿,使得从激光陀螺谐振腔透射出的顺时针、逆时针激光束耦合产生干涉且被光电管准确接受,使这两路信号的幅值差和相位差满足合光装配工艺要求。光电管将接受的干涉光信号转化为电流信号,该电流信号经过放大器后转换为电压信号,并由数据采集卡采集并将其传输给主控计算机,最后在显示器上显示出有一定相位差的两路电信号,它们即是陀螺谐振腔内顺时针、逆时针光束经合光后产生的干涉信号。由于电机、电源、信号传输及环境等影响,此信号包含许多噪声信号,该信号即为所要处理的信号。

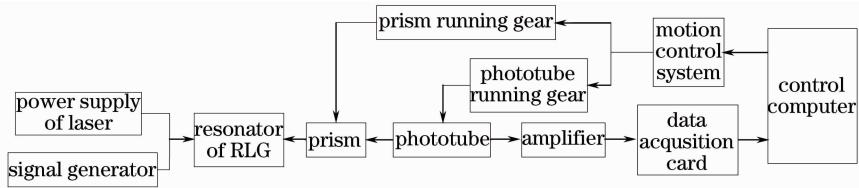


图 3 实验系统原理框图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

由上述实验系统采集的原始信号如图 4、5 中实线所示,其中,图 4(a)为合光系统采集的一路电信号,图(b)为另一路电信号。由图可以看出,原始信号上含有许多噪声,为去除这些噪声的影响,采用传统高斯滤波方法及上述的 IGGIII 和 eHuber 两种

稳健高斯滤波方法对这两路信号进行处理,处理结果如图 4、5 中非实线所示。图 4 为 IGGIII 稳健高斯滤波与传统高斯滤波处理结果,图 5 为 eHuber 稳健高斯滤波与传统高斯滤波处理结果。

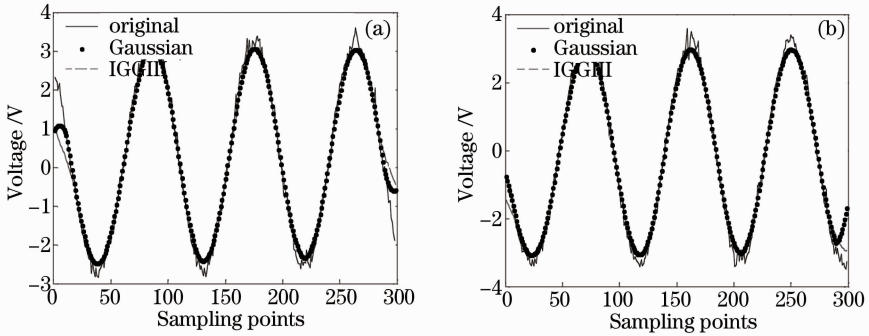


图 4 IGGIII 稳健高斯滤波与传统高斯滤波处理结果。(a) 一路电信号处理结果; (b) 另一路电信号处理结果

Fig. 4 Result comparison between IGGIII robust processing and traditional Gaussian filtering. (a) Processing result of an electrical signal; (b) processing result of the other electrical signal

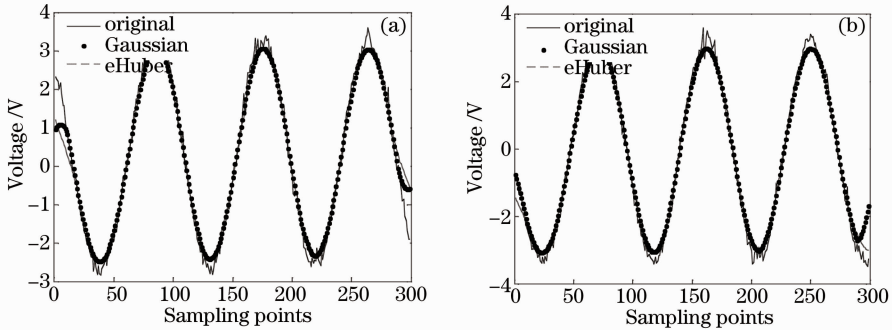


图 5 eHuber 稳健高斯滤波与传统高斯滤波处理结果。(a) 一路电信号处理结果; (b) 另一路电信号处理结果

Fig. 5 Result comparison between eHuber robust processing and traditional Gaussian filtering. (a) Processing result of an electrical signal; (b) processing result of the other electrical signal

由图 4 和图 5 可以看出,传统高斯滤波对激光陀螺合光装配中信号的噪声处理有一定的效果,但处理后得到的波形在末端边界处有较大变形,与原始波形相比有了较大偏差;而经过稳健高斯滤波后的结果几乎不受误差的干扰,滤波后的波形变化较少,有较强的抗干扰能力,比较接近原始波形,较之传统高斯滤波有更好的稳健性。

#### 4.2 稳健性能分析

为定量分析上述滤波方法效果,通过残差占比

( $R_{PE}$ )、残差平均值( $R_{MAE}$ )、残差均方根( $R_{MSE}$ )、信噪比( $R_{SN}$ )四个指标来确定传统高斯滤波、IGGIII 稳健高斯滤波、eHuber 稳健高斯滤波的性能。四个指标的定义分别为

$$R_{PE} = \frac{\sum_{i=1}^l |e_i|}{\sum_{i=1}^l |z_i|}, \quad (9)$$

$$R_{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^l |e_i|}{l}, \quad (10)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l |e_i|^2}{l}}, \quad (11)$$

$$R_{SN} = 10 \lg \left( \frac{\sum_{i=0}^l y_i^2}{\sum_{i=0}^l e_i^2} \right), \quad (12)$$

式中  $l$  为采样点个数,  $i=1, \dots, l$ 。计算结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 稳健估计高斯滤波在残差占比、残差平均值、残差均方根三个指标上明显比传统

高斯滤波的值要大, 表明所滤除的异常值或误差要多, 因此效果上明显比传统高斯滤波要好。从信噪比来看, 这里的信噪比值绝对值愈小, 所滤除的噪声就愈多, 因为当信噪比值愈小, (12) 式中分母噪声的比重就大, 滤除的噪声就愈多。所以, 稳健估计高斯滤波的效果要比传统高斯滤波要好。同时, 对比 IGGIII 法和 eHuber 法的结果, 发现在基于高斯滤波的基础上, IGGIII 法处理后的效果要比 eHuber 法处理后的效果要好, 从四个指标上可以直观地看出 IGGIII 法比 eHuber 法更优, 表明对激光陀螺合光装配中的信号而言, IGGIII 法更有利于提高抗差能力, 有利于提高高斯滤波的稳健性。

表 1 滤波结果比较

Table 1 Comparison of filtering results

		$R_{PE} / \%$	$R_{MAE} / V$	$R_{MSE} / V$	$R_{SN} / \text{dB}$
Traditional Gaussian filtering	A signal	11.001	0.202	0.214	21.445
	The other	9.868	0.207	0.149	24.023
IGGIII robust estimation	A signal	14.222	0.273	0.261	18.491
	The other	10.436	0.219	0.156	23.451
eHuber robust estimation	A signal	13.653	0.251	0.247	19.208
	The other	10.231	0.215	0.152	23.817

### 4.3 幅值差和相位差计算

经过上述稳健高斯滤波处理之后, 分别提取这两路信号中每个周期的峰值, 形成两组幅值数据, 即  $b_{1(i)}, b_{2(i)}, i=1, 2, \dots, N$ ; 通过每路信号的峰值所对应的横坐标得到对应的时间数据, 即  $a_{1(i)}, a_{2(i)}, i=1, 2, \dots, N$ 。由此可得两路信号幅值差百分比为

$$\Delta b = \left| \frac{\sum_{i=1}^N b_{2(i)} - \sum_{i=1}^N b_{1(i)}}{\sum_{i=1}^N b_{1(i)}} \right| \times 100\%, \quad (13)$$

相位差为

$$\Delta c = 360 \times \left| \frac{(N-1) \sum_{i=1}^N [a_{2(i)} - a_{1(i)}]}{N \sum_{i=1}^{N-1} [a_{1(i+1)} - a_{1(i)}]} \right|. \quad (14)$$

主控计算机控制运动机构带动棱镜与光电管按照预定轨迹进行运动, 直至两路信号幅值差及相位差满足合光装配工艺要求。

## 5 结 论

针对激光陀螺合光装配中信号的特点, 提出了基于高斯滤波的稳健估计算法, 并采用 IGGIII 稳健高斯滤波、eHuber 稳健高斯滤波及传统高斯滤波方

法分别对合光装配中的信号进行处理。结果表明稳健高斯滤波方法比传统高斯滤波方法滤波效果要好。其中, IGGIII 稳健高斯滤波方法得到的两路信号的残差占比分别为 14.222% 和 10.436%、残差平均值为 0.273 和 0.219、残差均方根为 0.261 和 0.156、信噪比为 18.491 和 23.451, 具有更强的稳健性, 可以有效地滤除误差, 得到近似于实际信号的结果。提出的稳健高斯滤波方法保证了合光装配后续信号分析处理的准确性, 有助于提高合光装配的质量, 进而提高激光陀螺角速度测量的准确性, 同时为信号去噪处理提供了参考。

### 参 考 文 献

- Li Yi, Zhang Chunxi. Research on robust estimation algorithm for well logging data anti-outlier processing[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(2): 72-76.
- 李 毅, 张春熹. 一种用于测井数据抗差处理的稳健估计算法研究[J]. 现代电子技术, 2012, 35(2): 72-76.
- Rousseeuw P J, Hubert M. Robust statistics for outliers detection[J]. Data Min Knowl Discov, 2011, 1(1): 73-79.
- Xavier Rolland-Nevière, Gwenael Doerr, Pierre Alliez. Robust diameter-based thickness estimation of 3D objects[J]. Graph Models, 2013, 75(6): 279-296.
- Lü Jinguo, Jiang Yaodong, Zhao Yixing, et al.. Study of microseismic positioning based on steady simulated annealing-simplex hybrid algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2195-2203.

- 吕进国, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 基于稳健模拟退火-单纯形混合算法的微震定位研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2195-2203.
- 5 Deng Li, Wang Chunhong, Rao Changhui. Fast detection of expanded target based on binary robust independent elementary features[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s109002.
- 邓 黎, 王春鸿, 饶长辉. 基于二进制稳健独立基元特征的扩展目标快速检测[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s109002.
- 6 Sergio Baselga, Luis Garcia-Asenjo. Global robust estimation and its application to GPS positioning[J]. Comput Math Appl, 2008, 56(3): 709-714.
- 7 Wu Suyong, Yang Kaiyong, Tan Zhongqi. Robust design of a high-performance laser thin-film polarizing beam splitter with lower layer errors sensitivity[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0231004.
- 吴素勇, 杨开勇, 谭中奇. 低误差灵敏度的高性能激光偏振分光膜的稳健设计[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0231004.
- 8 Shao Jie, Zhang Aiwu, Wang Shumin, *et al.*. Research on fusion of 3D laser point clouds and CCD image[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0514001.
- 邵 杰, 张爱武, 王书民, 等. 三维激光点云与 CCD 影像融合的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0514001.
- 9 Wang Shuai, Wang Hongqi, Zhou Qintao, *et al.*. Determination and application of soil environmental background concentrations based on robust statistics [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(8): 944-949.
- 王 帅, 王红旗, 周庆涛, 等. 基于稳健统计的土壤环境背景值研究及应用[J]. 环境科学研究, 2009, 22(8): 944-949.
- 10 Wang Yong, Liu Hongwei, Jiu Bo, *et al.*. Robust adaptive mismatched filter in MIMO radar [J]. Journal of Xidian University (Natural Sciences), 2012, 39(4): 17-23.
- 王 勇, 刘宏伟, 纠 博, 等. MIMO 雷达稳健的自适应失配滤波器设计算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2012, 39(4): 17-23.
- 11 Huang Youpeng, Cao Wanhua, Li Lin, *et al.*. Infrared sensor and passive radar track robustness correlation algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2629-2634.
- 黄友澎, 曹万华, 李 琳, 等. 一种红外传感器与被动雷达航迹稳健相关算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2629-2634.
- 12 N Vretos, A Tefas, I Pitas. Using robust dispersion estimation in support vector machines [J]. Patt Recog, 2013, 46(12): 3441-3451.
- 13 Pavel Čížek. Semiparametric robust estimation of truncated and censored regression models[J]. J Econometrics, 2012, 168(2): 347-366.
- 14 Jia Runda, Liu Junhao, Mao Zhizhong, *et al.*. Outlier detection for batch processes based on robust M-estimation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1726-1731.
- 贾润达, 刘俊豪, 毛志忠, 等. 基于鲁棒 M 估计的间歇过程离群点检测[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1726-1731.
- 15 Ana M Bianco, Graciela Boente, Susana Sombielle. Robust estimation for nonparametric generalized regression[J]. Statistics and Probability Letters, 2011, 81(12): 1986-1994.
- 16 Tong Wang, Yongsheng Ding, Lei Zhang, *et al.*. Robust state estimation for discrete-time stochastic genetic regulatory networks with probabilistic measurement delays [J]. Neurocomputing, 2013, 111: 1-12.
- 17 Guo Yulan, Lu Min, Tan Zhiguo, *et al.*. A novel method for ladar target orientation estimation [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0414002.
- 郭裕兰, 鲁 敏, 谭志国, 等. 一种新的激光雷达目标姿态估计算法[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0414002.
- 18 Zhou Weiqin, Si Fengqi, Qiao Zongliang, *et al.*. Iterative support vector machine based on robust estimation and its application in data validation in power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(11): 113-118.
- 周卫庆, 司凤琪, 乔宗良, 等. 基于稳健估计的迭代型支持向量机及其在电站数据检验中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(11): 113-118.

栏目编辑:何卓铭