

文章编号:1002-2082(2011)02-0492-06

# 基于小波双尺度分析的光电小目标检测

陈 东,林建霖,马德宝

(信息工程大学 信息工程学院,河南 郑州 450002)

**摘 要:**空间光电图像中的小目标检测可视为对目标信号的奇异值检测问题,而基于小波变换的多尺度分析是信号奇异值检测的重要方法。文中阐述了现有小波多尺度分析方法进行小目标检测的原理,并针对其运用中存在的模极大值线难以搜索以及目标定位精度不高的问题,利用小波函数的对称性及空间小目标信号近似对称的特点,提出了一种通过分析小波大小两个尺度来直接对光电小目标进行检测的方法,并对该方法进行了实现与仿真。仿真结果表明,该方法可以有效提高小目标的检测速度和定位精度。

**关键词:**信号处理;小目标检测;双尺度分析;小波变换

**中图分类号:**P123

**文献标志码:**A

## Small electro-optical target detection based on two-scale wavelet analysis

CHEN Dong, LIN Jian-lin, MA De-bao

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University,  
Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** As the small targets in the electro-optical image are composed of tiny pixels, the detection of small targets can be regarded as the singular value detection of the target signal, and the wavelet-based multi-scale analysis is an important detection method of signal singular value. This paper analyzed the principle of small target detection using the existing wavelet-based multi-scale analysis method, and its use in the estimation of the modulus maxima value line is difficult and target location accuracy is not good. Based on the symmetry of wavelet function and small target signal, a method is presented to detect the small target in electro-optical image directly based on the wavelet analysis over two different scales. Finally, experiments proved that the method can improve the detection speed and location accuracy effectively.

**Key words:** signal processing; small target detection; two-scale analysis; wavelet transform

## 引言

弱小运动目标检测是红外搜索与跟踪系统<sup>[1]</sup>、卫星遥感系统及空间目标监视系统中的关键技术之一。运动弱小目标检测的方法根据检测与跟踪先后顺序,大体上可以分为 DBT 和 TBD 两大类<sup>[2]</sup>,对于实时性要求较高的应用场合,单帧

图像的目标检测仍是研究的重点。由于小波变换具有良好的时频分辨能力和算法鲁棒性<sup>[3]</sup>,对信号的奇异性检测具有良好的优越性<sup>[4]</sup>,同时 Mallat 从理论上证明了运用小波对信号进行分析,不但可以检测出信号发生突变的位置,而且能定量描述信号的奇异性大小,使得小波分析在小目标检

收稿日期:2010-07-19; 修回日期:2010-08-31

基金项目:863 高技术基金项目

作者简介:陈东(1963—),男,江苏江阴人,高级工程师,博士研究生,主要从事空间目标信息处理研究工作。

通信作者 林建霖 E-mail:lj120070819@163.com

测领域得到广泛应用<sup>[5]</sup>。

目前, 利用小波多尺度分析进行信号奇异值检测来实现对图像小目标的检测主要有以下两种方式: 一是通过小波对图像进行噪声抑制和目标增强, 再通过空域判决来检测目标<sup>[3,6]</sup>; 二是通过小波对图像进行背景预测后, 将图像与背景差分处理, 再对去背景的图像进行目标检测<sup>[7]</sup>。第一种方式主要通过对各尺度模极大值相乘来实现, 但由于突变点的模极大值点在不同尺度处存在偏移, 限制了尺度维数的选择; 第二种方式通过对模极大值线的搜索来实现, 其效果受到了搜索算法准确度的影响。同时, 这两种方式都不能实现对小目标的直接检测和定位。本文主要考虑空间光电图像中小目标像素少与形状近似对称的特点, 给出一种直接利用小波双尺度进行目标检测的方法, 在大尺度上实现对目标的粗检测, 小尺度上实现对目标的进一步分离。

## 1 小波多尺度分析与信号奇异性检测原理

在数学上, 奇异性是函数光滑性的量度, 只有无限可微的函数才没有奇异性, 若函数在某点有间断或某阶导数不连续, 则函数在这点有奇异性, 通常以 Lipschitz 指数来刻画奇异性大小。关于 Lipschitz 指数, 在数学上有如下定义<sup>[3,8-9]</sup>:

设  $n$  是一个非负整数, 当且仅当存在两个常数  $K$  和  $h_0 > 0$ , 以及一个  $n$  阶多项式  $P_n(t)$ , 使得对于任意  $|h| < h_0$ , 函数  $f(t)$  在  $t_0$  的邻域内有  $|f(t_0+h) - P_n(t_0+h)| \leq K|h|^\alpha$ ,  $\alpha \in (n, n+1)$ , 则称  $f(t)$  在  $t_0$  处的 Lipschitz 指数为  $\alpha$ 。

由定义可知, Lipschitz 指数表明了函数在某点附近可用其泰勒展开式近似的程度, 因此, 在一定程度上, Lipschitz 指数表征了函数在该点的奇异性大小,  $\alpha$  越大, 该点的光滑度越高;  $\alpha$  越小, 该点奇异性越大, 则对于具有  $n$  阶可微的信号函数, 需要对其至少进行  $n+1$  次连续求导才能体现出奇异性。

假设信号  $f(t)$  具有  $n$  阶连续可微, 小波变换用于信号奇异值检测的原理为: 设有实函数  $\theta(t)$ , 满足  $\int_{-\infty}^{\infty} \theta(t) dt = 1$ , 且  $\theta(t) = O(\frac{1}{1+t^2})$ , 则称其为光滑函数<sup>[8]</sup>, 在计算机视觉领域里一般取为高斯函数, 选择光滑函数的  $n+1$  次导数作为小波函数, 即  $\Psi_s(t) = \frac{d^{n+1}\theta(t)}{dt^{n+1}}$ , 同时, 令  $s$  作为尺度因子,

光滑函数在不同尺度的表达式为  $\theta_s(t) = \frac{1}{s}\theta(\frac{t}{s})$ ,

则小波变换为

$$W_f(s, t) = f(t) * \Psi_s(t) = f(t) * s^{n+1} \frac{d^{n+1}\theta_s(t)}{dt^{n+1}} = s^{n+1} \frac{d^{n+1}f(t)}{dt^{n+1}} * \theta_s(t) \quad (1)$$

式中  $*$  代表卷积运算。当  $f(t)$  的  $n$  阶微分在  $t_0$  点处存在奇异时,  $n+1$  阶求导结果在该点表现为冲激特性, 则信号小波变换模的极大值点可对应于信号的突变点<sup>[3,8]</sup>, 文献[8]对此做了理论上的推导和分析。不同尺度空间  $(s, t)$  中所有的模极大值点的连线称为模极大值线, Mallat<sup>[10]</sup> 证明了不同尺度上的模极大值与信号奇异值存在如下关系<sup>[3]</sup>

设  $f \in L^2(R)$  在  $[a, b]$  上一致,  $\alpha \leq n$ , 则存在  $A > 0$  使得  $\forall (s, t) \in [a, b] \times R^+$ , 有  $|W_f(s, t)| \leq As^\alpha$ ; 反之, 其逆命题亦成立。

Mallat 指出高斯白噪声是一个几乎处处奇异的随机分布, 具有负的 Lipschitz 指数, 而信号具有正的 Lipschitz 指数。因此, 信号与噪声在不同尺度下的小波变换模极大值表现完全不同<sup>[3]</sup>。根据该关系可知, 尺度越大, 信号的模极大值越强, 而噪声越弱; 分析模极大值线上模极大值与尺度的对应关系, 可以得到反映奇异程度的 Lipschitz 指数, 用于对信号的区分。

小波函数的模极大值受白噪声的影响较大, 大尺度下的平滑作用使模极大值的定位产生了偏差, 尺度越大, 其位置偏移的距离会相应增大<sup>[11]</sup>。因此, 若直接对不同尺度的模极大值相乘, 在对相邻几个尺度进行处理时, 可实现对噪声的抑制, 但当所用尺度较多时, 反而不能增强目标信号的能量。Witkin 在其尺度模极大跟踪理论里提到, 如果尺度空间是连续的, 那么同一特征的模极大可以沿着连续曲线跟踪<sup>[11]</sup>, 但在实际处理中尺度空间往往不能保证连续。同时, 在小的尺度上, 边缘定位精度高, 但对噪声敏感<sup>[12]</sup>, 这将使得小尺度上受噪声影响的模极大值连线准确度难以保证, 影响目标信号的边缘检测精度。

## 2 基于小波双尺度的目标检测方法

由于图像中的小目标所占像素少, 没有可识别的形状和纹理信息, 在空间光电小目标检测中所关心的主要是目标的星点坐标信息。目标信号的边缘模极大值位置随尺度变化产生偏移, 但只要小波满足对称性, 则奇异特性相同的上下边缘模极大值位

置在不同尺度上的偏移量相等,方向相反。因此,虽然在噪声影响弱的较大尺度上,边缘模极大值产生偏移,定位精度较差,但根据目标在同一尺度上的上下边缘模极大值位置求平均,即可得到定位精度较高的目标中心位置,然后再通过对小尺度的分析,进一步提高信号检测的分辨能力。

为了保证良好的空间局部性和提高检测的准确度,合适的小波基选择需要满足以下条件:1)紧支集;2)连续可微;3)具有对称性;4)有阶消失矩<sup>[13]</sup>。对光电图像中的小目标进行检测,这里选择采用具有二阶消失矩的二阶高斯函数作为小波基母函数,在本节里首先通过对一维信号的处理来说明本方法流程。规范化后的小波基母函数一维表示为

$$\Psi(t) = \frac{(2-4t^2)e^{-t^2}}{\text{erf}(5) \cdot \sqrt{\pi}} \quad (2)$$

其紧支撑集为 $[-\Delta, \Delta]_{\Delta=5}$ ,函数形状如图1所示。

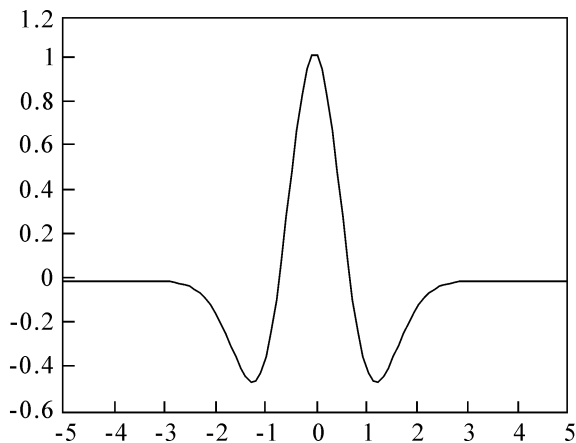


图1 小波基母函数图

Fig.1 Mother function of wavelet

基于小波双尺度的目标检测方法设计如下:

两个尺度的选择要求在该尺度上的噪声影响弱,由第2小节的分析可知,尺度越大,目标信号的模极大值越强,而噪声的模极大值越弱。因此,可以通过信噪比来划分合适的选择尺度,并在该尺度上通过门限判决对目标信号和噪声进行区分。根据以上原则具体操作如下,记选择的小尺度为 $L$ ,令 $L = \max(1, \text{ceil}(\tau/\sqrt{\text{SNR}}))$ , $\text{SNR}$ 为测量数据的信噪比; $\text{ceil}(\cdot)$ 表示向正无穷取整运算; $\tau$ 为调整因子,与目标信号特征有关,可选取经验值为10;记选择的大尺度为 $H$ ,若目标信号的平均宽度为 $D$ 个分辨单元,则令 $H \geq \max(L+1, D)$ ,以保证对目标信号进行处理时能得到目标的中心位置。

确定两个尺度后,分别对信号进行分析。首先,在大尺度 $H$ 上对目标信号 $f(t)$ 进行模极大值点检测,再对模极大值进行筛选,以实现目标的粗检测,即满足以下条件:

$$LM(s) = \arg(W_f(s, t) > \max_t(\delta, \lambda \cdot \max(|W_f(s, t)|), W_f(s, t-1) \leq W_f(s, t) \leq W_f(s, t+1)) \quad (3)$$

$$T = LM(s) |_{s=H} \quad (4)$$

式中: $\delta$ 为数据的标准差; $\lambda$ 为比例因子,可选取经验值0.3,则 $LM(s)$ 中记录着所检测的目标信号模极大值点位置。

其次,在小尺度上进行小波分析,由于小尺度具有更高的分辨率,对粗检测的目标进行细分,判断其是否由两个间隔很近的目标组成。若在大尺度上确定的目标实际上为两小目标的变换信号合成时,则根据图1所示的小波基及目标信号的对称性,其在大尺度上对应大尺度的目标点位置处将为极小值点,否则小尺度上的对应位置仍然为极大值点。因此,先获取小尺度上的目标模极大值点位置。

$$P = LM(s) |_{s=L} \quad (5)$$

对于 $T$ 中的任意一个目标点 $T(i), i=1, 2, 3, \dots, N(T), N(\cdot)$ 表示集合中元素总数。在 $T(i)$ 的一个邻域内找与其最近的模极大值点,即在以下范围内搜索:

$$P_T = \arg \min_{p(j)} (|P(j) - T(i)|) \quad (6)$$

式中: $J = \{j | |P(j) - T(i)| \leq 2\text{ceil}(\Delta/2)\}, j=1, 2, 3, \dots, N(P)$ 。根据高斯函数的对称性,则 $W_f(L, P_T) < 0$ ,说明大尺度上检测出的一个目标 $T(i)$ 实际上是由可分割的两目标组成,则新的目标点位置由(7)式确定:

$$T_i(1) = \text{mean}(\{P\}), P_{iT} < P < P_{iT} \quad (7)$$

$$T_i(2) = \text{mean}(\{P\}), P_{iT} < P < P_{uT}$$

式中: $\text{mean}(\cdot)$ 表示求平均运算; $P_{iT}$ 和 $P_{uT}$ 分别是变换值为负,在 $P_T$ 左右两侧与 $P_T$ 最近的模极大值点。若上式有值存在,则更新目标位置点,否则保留 $T(i)$ 作为目标点。

### 3 实验分析

为便于分析本文所给方法,首先选择一组类空间光电小目标信号分布特性的一维信号进行实验分析,其各信号中心位置坐标为 $[40, 70, 105, 247, 257, 300, 400]$ ,并设置一缓变的背景信号,目标平均宽度为10个分辨单元,如图2所示。

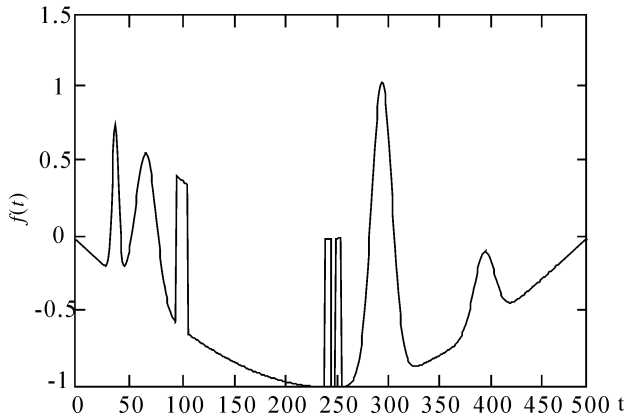


图 2 目标及背景信号图

Fig. 2 Signal of target and background

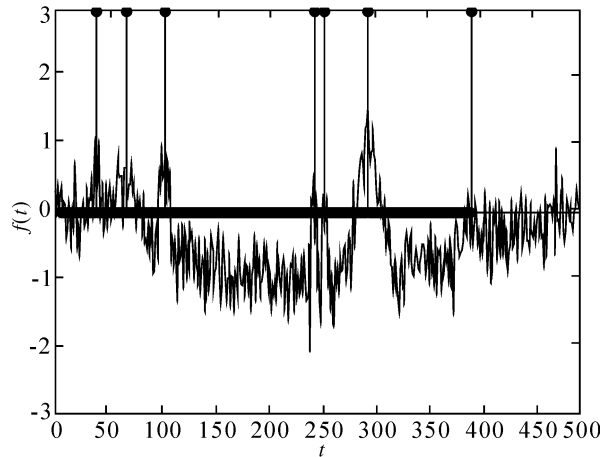


图 5 目标检测结果图

Fig. 5 Result of target detection

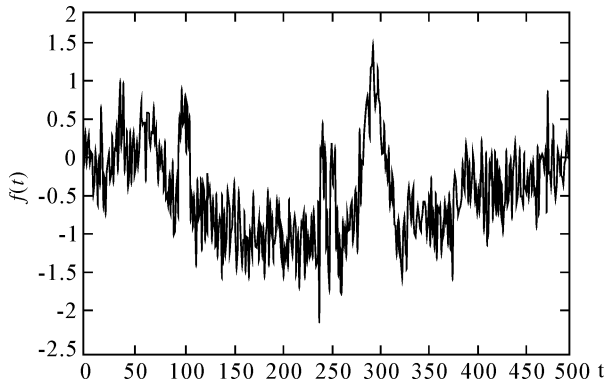


图 3 观测信号图

Fig. 3 Observed signal

对原始目标信号叠加信噪比为 10 dB 的高斯白噪声,生成观测信号如图 3 所示。从图 3 中可知,由于背景和噪声的影响,从时域进行阈值分割难以将信号提取出。根据本文检测方法尺度选择原则,取大尺度为 10,小尺度为 4,在这两尺度对目标进行小波分析,其结果如图 4 所示。

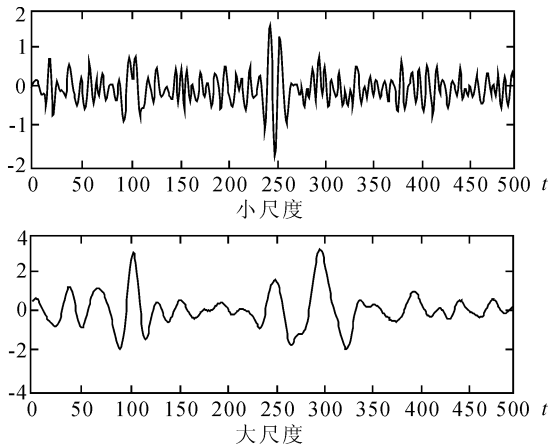


图 4 不同尺度上的小波变换结果图

Fig. 4 Wavelet transform on different scale

对大小尺度上的模极大值进行分析,可得到如图 5 所示目标检测结果,检测出的目标中心位置分别为 $[41, 70, 105, 248, 258, 300, 405]$ ,如图中圆头直线所标位置。与目标真实位置相比,检测结果较好地反映了目标点位置信息,同时对两个间隔较近的目标也通过双尺度分析实现了有效的分离,如图 4 中时间点为 250 的位置所示,说明本文方法在实现小目标检测上是有效的。

运用本方法对实际采集的二维空间目标光电图像进行分析,原理与一维处理类似,不再复述。其中关于二维可分小波的构造及模极大值的求法,可参考文献[3]。对信噪比为 10 dB 的图像进行分析,目标在图像中的坐标位置分别为 $(51, 101)$ 、 $(204, 193)$ 及 $(213, 194)$ ,平均像素宽度为 5,如图 6 所示。图 7 为其三维显示图,从图 7 可更直观地看到弱小目标几乎淹没在噪声下。

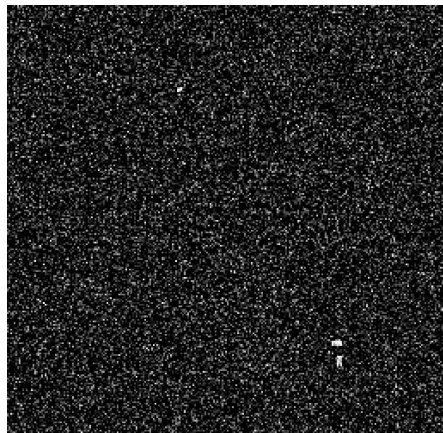


图 6 原始目标图像

Fig. 6 Original image

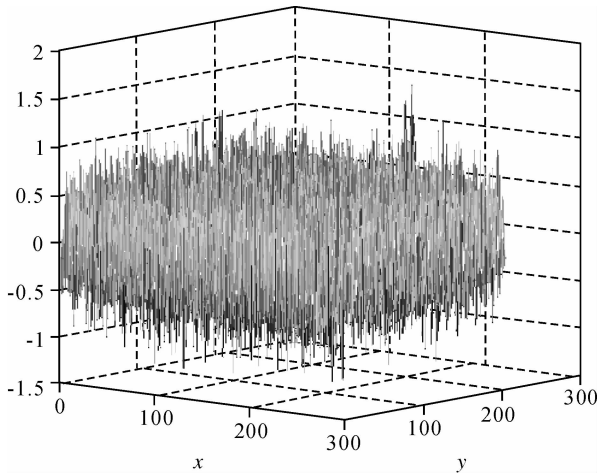


图7 原始图像三维显示图

Fig. 7 3-D show of original image

分别对图像进行两个方向上的小波变换<sup>[3]</sup>,并构造模极大值进行分析,图8为大尺度等于5上的信号小波变换模值。从图8中可见,噪声在大尺度上得到抑制,而信号得到加强,运用本文检测方法对目标进行检测,得到如图9所示检测结果,检测的目标位置分别为(50,100)、(203,192)和(212,193),以“+”字形在图中标识。

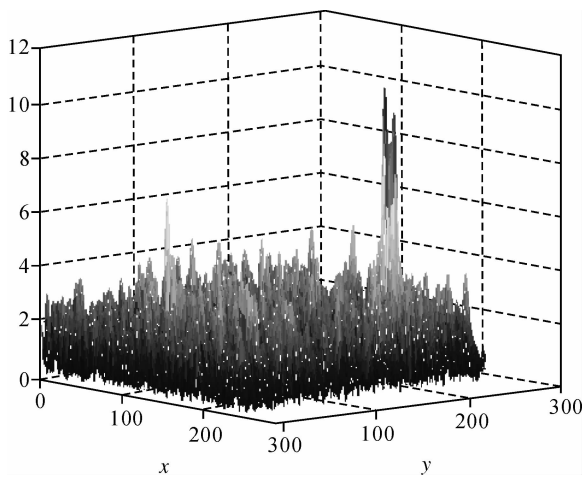


图8 大尺度上的信号小波模值图

Fig. 8 Signal's wavelet transform modulus on big scale

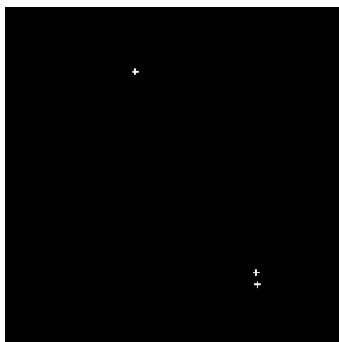


图9 本文方法检测结果图

Fig. 9 Detection result based on this paper's method

从结果来看,检测的目标坐标与实际目标坐标相比,较为准确地反映了图像中目标位置信息。采用多尺度分析方法对图6中的目标进行检测,得到图10检测结果,可见多尺度分析提取小目标的边缘信息时,受噪声影响模极大值线难以保证良好的跟踪,目标的边缘位置定位不准确,并且不能实现对小目标的直接检测和提取。

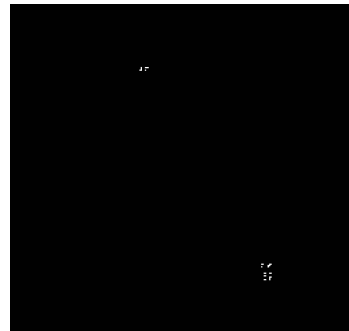


图10 多尺度检测结果图

Fig. 10 Detection result based on multi-scale method

### 4 结论

针对空间弱小目标像素少与目标坐标位置难以提取的问题,本文分析了现有小波多尺度分析方法中存在的不足,并在此基础上,给出了只利用小波两个大小不同尺度的分析方法,实现对目标的快速检测和目标坐标位置的直接提取。通过实验分析,证实了本文所给方法在小目标检测上的有效性和可行性。但本文方法对3个以上近距离目标尚不能进行有效分离,需要对方法进一步改进。同时,结合噪声和背景的预处理方法可进一步提高方法的检测性能。

### 参考文献:

[1] 武斌,姬红兵,郭辉. 一种新的红外弱小运动目标检测算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 26(1): 116-121.  
WU Bin, JI Hong-bing, GUO Hui. New detection algorithm for a small moving target in the infrared image[J]. Journal of Xidian University, 2009, 26(1): 116-121. (in Chinese with an English abstract)

[2] 许彬,郑链,王永学,等. 红外序列图像小目标检测与跟踪技术综述[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 482-486.  
XU Bin, ZHENG Lian, WANG Yong-xue, et al. Survey of dim target detection and tracking in infra-

- red image sequences[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 482-486. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 许彬, 郑链, 王克勇, 等. 基于信号奇异性分析的小目标检测方法[J]. *红外技术*, 2005, 27(3): 245-249.  
XU Bin, ZHENG Lian, WANG Ke-yong, et al. Dim target detection method based on singularity analysis[J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(3): 245-249. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 普运伟, 朱明, 金炜东, 等. 小波基和噪声对信号奇异性检测性能的影响[J]. *计算机应用研究*, 2007, (1): 238-240.  
PU Yun-wei, ZHU Ming, JIN Wei-dong, et al. Effect of wavelet bases and noise on performance of signal singularity detection[J]. *Application Research Of Computers*, 2007, (1): 238-240. (in Chinese with an English abstract)
- [5] ABDELKAWY E, MCGAUGHY D. Wavelet-based image target detection methods[J]. *SPIE*, 2003, 5094: 337-347.
- [6] STEPHEN DELMARCO, SOS AGAIAN. The design of wavelets for image enhancement and target detection[J]. *SPIE*, 2009, 7351: 1-5.
- [7] 姜凌. 模极大值小波算法在红外图像点目标检测中的应用研究[J]. *软件导刊*, 2009, 8(7): 53-55.  
JIANG Ling. Basic principle of wavelet transform and research of maximum value arithmetic on point target detection in infrared image sequences[J]. *Software Guide*, 2009, 8(7): 53-55. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 郑庆庆. 利用小波变换极大值来检测信号奇异性[J]. *遥感信息*, 2006, (1): 6-8.  
ZHENG Qing-qing. Singularity detection via wavelet transform modulus maxima[J]. *Remote Sensing Information*, 2006, (1): 6-8. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 龙兴明, 周静. 连续小波变换的一维信号检测[J]. *重庆邮电学院学报*, 2004, 16(3): 77-79.  
LONG Xing-ming, ZHOU Jing. Measurement of 1-D signal based on continuous wavelet transform[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2004, 16(3): 77-79. (in Chinese with an English abstract)
- [10] MALLAT S, ZHANG S. Characterization of signal from multiscale edge[J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(7): 681-693.
- [11] 何永红, 文鸿雁, 靳鹏伟. 一种基于小波模极大值去噪的改进算法[J]. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27(4): 94-98.  
HE Yong-hong, WEN Hong-yan, JIN Peng-wei. An improved de-noising algorithm based on wavelet modular maximum [J]. *Journal of Geodesy and Geod Ynamics*, 2007, 27(4): 94-98. (in Chinese with an English abstract)
- [12] 苏赋, 杨文淑, 徐智勇. 红外小目标小波多尺度相关检测方法[J]. *半导体光电*, 2007, 28(4): 591-595.  
SU Fu, YANG Wen-shu, XU Zhi-yong. Infrared small target detection based on wavelet scale correlations[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(4): 591-595. (in Chinese with an English abstract)
- [13] 郭黎利, 刘微, 叶桂林. 小波分析在信号奇异性检测中的应用[J]. *信息技术*, 2011, (5): 58-60.  
GUO Li-li, LIU Wei, YE Gui-lin. Application of wavelet analysis on testing singular signal[J]. *Information Technology*, 2011, (5): 58-60. (in Chinese with an English abstract)