

# 基于小波变换与图像增强技术的红外小目标检测

侯 洁, 辛云宏

(陕西师范大学物理与信息技术学院, 陕西 西安 710062)

**摘 要:**提出了一种基于小波变换的单帧红外图像检测方法,将小目标检测问题简化为带通滤波的过程。该方法首先使用小波变换分解图像,直接舍去低频分量的背景,接着对提取出的三个高频成分分别进行小波分析,去除高频噪声,然后再对各高频分量进行重构,最后采用图像增强技术提高小目标灰度,进一步抑制干扰。计算机仿真结果表明,该方法能准确、高效地检测出小目标,并能克服一定的云层和建筑物干扰问题。

**关键词:**红外小目标;检测;小波变换;图像增强;单帧

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.019

## Detection of infrared small target based on the wavelet transformation and image enhancement technology

HOU Jie, XIN Yun-hong

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** A method based on wavelet transformation for single frame infrared image detection was proposed, which simplified the small target detection problem as a band-pass filtering process. The method firstly decomposes image using a wavelet transformation, and discards the background component located the low-frequency of the image. Next, it removes the high frequency noise by the wavelet analysis, and then reconstructs the new image by the denoised three high-frequency components. Finally, the image enhancement technology is used to improve small target grayscale for the further suppressing the interference. The computer simulation results show that the method presented can detect out the small target precisely and efficiently, and it can overcome some interference problems that come from clouds and buildings.

**Key words:** infrared small target; detection; wavelet transformation; image enhancement; single frame

### 1 引 言

简单地讲,传统的目标检测算法主要有以下几种:背景减法、帧间差分法以及光流法。针对天空背景的红外图像,虽然小目标的运动速度要比背景大很多,但背景并非固定不动,这就限制了背景减法的应用<sup>[1-3]</sup>。帧间差分法也存在同样的问题,而且它自身还会出现一种空洞现象<sup>[3-4]</sup>,红外小目标原本占据的像素数已经很少,该问题使得小目标像素进一步减少,为后续研究跟踪问题带来很大困扰。光

流法是用速度矢量表示物体的运动状态<sup>[5]</sup>,但该方法也存在很大的局限性,不仅计算量较大,而且当背景运动、目标像素较少时,不仅有可能将干扰视为目标,甚至直接丢失小目标,检测效果不佳。目前又出现了一些新兴的方法,例如基于形态学<sup>[6]</sup>,基于图像稀疏表示<sup>[7]</sup>,基于显著性及主成分分析<sup>[8]</sup>的方

**作者简介:**侯 洁(1989-),女,硕士研究生,主要研究领域为红外小目标的检测和跟踪。E-mail:jiehou@stu.snnu.edu.cn

**收稿日期:**2012-11-08

法,以及利用基于最小二乘支持向量机实现红外小目标检测<sup>[9]</sup>,基于粒子滤波<sup>[10]</sup>,人工神经网络<sup>[11]</sup>,混沌 PSO 最小一乘空时预测<sup>[12]</sup>,D-S 证据理论<sup>[13]</sup>的方法等,以上各种方法均能实现对红外小目标的检测,但同时却存在算法复杂度大,不易实现等缺点。

根据以上问题的分析,提出了一种基于小波变换,适合单帧图像的小目标检测方法。实验表明,该方法能很好地检测出小目标,且运算量较小,容易实现。

## 2 算法介绍

### 2.1 红外小目标图像分析及本文思想介绍

通常红外小目标图像用下式描述为:

$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_B(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

其中,  $f(x, y)$  为原始单帧红外图像;  $f_T(x, y)$  为目标;  $f_B(x, y)$  是背景图像;  $n(x, y)$  为噪声及干扰总和。我们知道,背景灰度图像具有较长的相关长度,主要分布于红外小目标图像的低、中频段,噪声图像与背景像素不相关,其统计特性通常可被描述为零均值的高斯白噪声。噪声图像和小目标点灰度图像一样,都主要分布于红外小目标图像的较高频段,但与小目标相比,噪声的频率更高一些<sup>[14]</sup>。

针对上述特点,提出了一种融合了小波变换与图像增强技术的红外小目标检测方法,算法流程图如图 1 所示。该方法首先对红外图像进行小波分解,直接去除低频分量,然后利用小波分析对各高频分量进行去噪,接着根据实际情况重构高频分量,对重构图像中存在的少量干扰和部分噪声,我们舍去传统的阈值方法,采用灰度变换的图像增强技术实现最终分割。

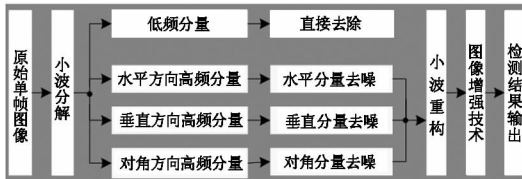


图 1 算法流程图

Fig. 1 flowchart of the presented algorithm

### 2.2 小波分解

假设二维尺度函数  $\phi(x, y)$  可分离为  $\phi(x)$  和  $\phi(y)$  两部分,且有  $\phi(x, y) = \phi(x)\phi(y)$ , 它们的小波函数  $\psi(x, y) = \psi(x)\psi(y)$ , 由尺度函数和小波函数可以组成四个基本变换核<sup>[15-18]</sup>:

$$\begin{cases} \psi^A(x, y) = \phi(x)\phi(y) \\ \psi^H(x, y) = \psi(x)\phi(y) \\ \psi^V(x, y) = \phi(x)\psi(y) \\ \psi^D(x, y) = \psi(x)\psi(y) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\psi^A(x, y)$ ,  $\psi^H(x, y)$ ,  $\psi^V(x, y)$  和  $\psi^D(x, y)$  分别称为低频、水平、垂直、对角线的频带信息。这样,一个二维函数(即我们的红外图像)  $f(x, y)$  就可以展开成如下形式:

$$f(x, y) = \sum_{m, n} S_{k_0, m, n} \psi_{k_0, m, n}^A(x, y) + \sum_{k > k_0} \sum_{m, n} W_{k, m, n}^H \psi_{k, m, n}^H(x, y) + \sum_{k > k_0} \sum_{m, n} W_{k, m, n}^V \psi_{k, m, n}^V(x, y) + \sum_{k > k_0} \sum_{m, n} W_{k, m, n}^D \psi_{k, m, n}^D(x, y) \quad (3)$$

其中,  $\psi_{k, m, n}^l(x, y) = 2^l \psi^l(2^l x - m, 2^l y - n)$ ,  $l = A, H, V, D$ , 表示  $\psi^l(x, y)$  的尺度伸缩和二维位移,变换系数  $S_{k_0, m, n}$  称为小波近似分量,可以通过如下的内积形式计算:

$$S_{k_0, m, n} = \langle f(x, y), \psi_{k_0, m, n}^A(x, y) \rangle \quad (4)$$

式中,  $W_{k, m, n}^H$  代表水平细节分量;  $W_{k, m, n}^V$  代表垂直细节分量;  $W_{k, m, n}^D$  代表对角线细节分量,通过下式获得:

$$W_{k_0, m, n}^l = \langle f(x, y), \psi_{k_0, m, n}^l(x, y) \rangle, l = H, V, D \quad (5)$$

### 2.3 小波分析实现高频分量去噪

从信号能量的观点来看,在小波域上,所有的小波系数都对噪声有贡献,而只有很小一部分小波系数对信号有贡献。因此可以把小波系数分成两类,第一类小波系数仅仅由噪声变换后得到,这类小波系数幅值小,数目较多;第二类小波系数由信号变换得来,并包含噪声的变换结果,这类小波系数幅值大,数目较少。根据这个特点,可以通过小波系数幅值上的差异来降低噪声。对信号的小波系数设置一个阈值,大于这个阈值的小波系数认为属于第二类系数,它同时含有信号和噪声的变换结果,可以简单保留或进行后续操作,而小于阈值的小波系数,则认为是第一类小波系数,即完全由噪声变换而来,直接去掉这些系数。这样就达到了降低噪声的目的,同时由于这种方法保留了大部分包含信号的小波系数,因此可以较好地保持图像细节<sup>[15]</sup>。

设噪声模型为:

$$x(i, j) = s(i, j) + n(i, j) \quad (6)$$

式中,  $s(i, j)$  为原始图像;  $x(i, j)$  为被噪声污染的图像;  $n(i, j)$  为独立分布高斯噪声, 它服从  $N(0, \sigma_n^2)$  分布。利用正交小波变换得:

$$W_x(i, j) = W_s(i, j) + W_n(i, j) \quad (7)$$

其中,  $W_x, W_s, W_n$  分别为  $x, s, n$  对应的小波变换系数。小波域去噪的目的就是从有噪图像的小波系数  $W_x$  中得到原始图像的小波系数  $W_s$  的估计  $\hat{W}_s$ 。

$$\hat{W}_s(i, j) = \begin{cases} \text{sgn}(W_x(i, j))(|W_x(i, j)| - T), & |W_x(i, j)| \geq T \\ 0, & |W_x(i, j)| < T \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $W_x(i, j)$  是小波变换后的系数;  $\hat{W}_s(i, j)$  是阈值处理后得到的估计小波系数;  $T$  为阈值。

### 2.4 小波重构

从前面的分析可知, 噪声和小目标相比频率范围更高, 因此对高频部分去噪后, 所得的信号基本上为小目标成分, 以下是利用去噪后的高频分量重构小目标图像的表达式:

$$g(x, y) = \sum_{k>k_0} \sum_{m,n} W_{k,m,n}^\alpha \psi_{k,m,n}'^\alpha(x, y) + \sum_{k>k_0} \sum_{m,n} W_{k,m,n}^\beta \psi_{k,m,n}'^\beta(x, y) + \sum_{k>k_0} \sum_{m,n} W_{k,m,n}^\gamma \psi_{k,m,n}'^\gamma(x, y) + \sum_{k>k_0} \sum_{m,n} W_{k,m,n}^\varepsilon \psi_{k,m,n}'^\varepsilon(x, y) \quad (10)$$

其中,  $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$  可以根据实际需要选取  $V, H, D$  中的任意一个;  $\psi_{k,m,n}'^\alpha(x, y), \psi_{k,m,n}'^\beta(x, y), \psi_{k,m,n}'^\gamma(x, y)$  和  $\psi_{k,m,n}'^\varepsilon(x, y)$  为小波去噪后的各分量表达式, 其余形式与分解时的含义相同。

### 2.5 图像增强

图像增强就是增强某一部分信息, 并以其他部分信息的损失为代价。目前主要有对比度增强, 直方修正分析, 图像间的相互运算等几种增强技术<sup>[16]</sup>。这里选择对比度增强方法, 并分别用线性变换和非线性变换来处理。

#### 2.5.1 线性灰度变换

线性点运算的实质是: 如果原图像  $f(x, y)$  的灰度范围是  $[m, M]$ , 希望变化后的图像  $g(x, y)$  的灰度范围为  $[n, N]$ , 则可以设计如下的变换:

$$g(x, y) = \frac{N-m}{M-m}[f(x, y) - m] + n \quad (11)$$

令  $\alpha = \frac{N-m}{M-m}, \beta = n - \frac{N-m}{M-m}m$ , 则这个式子就化成了熟悉的线性点的运算公式。对应的变换图像如图 2(a) 所示。若要对图像的对比度做较为精细的

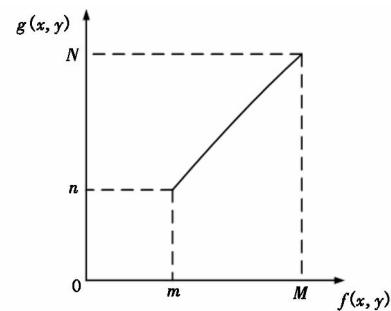
常用的阈值处理方法包括硬阈值函数、软阈值函数、软硬阈值折中法, 因子调节法等。硬阈值函数是将一部分小波系数设置为 0, 将剩下的予以保留。软阈值函数则是将一部分系数置为 0, 而将剩下的进行收缩, 其中硬、软阈值函数分别如式(8)、式(9)所示。

$$\hat{W}_s(i, j) = \begin{cases} W_x(i, j), & |W_x(i, j)| \geq T \\ 0, & |W_x(i, j)| < T \end{cases} \quad (8)$$

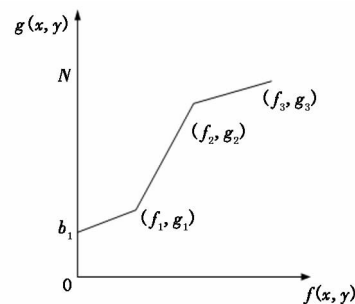
调整, 则可以设计分段的线性变换。对不同的灰度段做不同的调整, 有的压缩, 有的拉伸, 从而利用线性方法最大程度地改善图像的对比度。其变换公式如下:

$$g(x, y) = \begin{cases} k_1 f(x, y) + b_1, & 0 \leq f(x, y) \leq f_1 \\ k_2 f(x, y) + b_2, & f_1 < f(x, y) \leq f_2 \\ k_3 f(x, y) + b_3, & f_2 < f(x, y) \leq f_3 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $k_i, i=1, 2, 3$  表示第  $i$  段直线的斜率。其变换图形如图 2(b) 所示。



(a) 线性灰度变换



(b) 分段线性灰度变换

图 2 灰度变换

Fig.2 gray-scale transformation

#### 2.5.2 非线性灰度变换

常用的非线性变换为对数变换或 Gamma 校正。对数变换常用来扩展低值灰度, 压缩高值灰度。其一般表达式如下:

$$g(x,y) = c \log(f(x,y) + 1) \quad (13)$$

其中,  $c$  为常数。

Gamma 校正: 设  $f$  为图像的灰度,  $\gamma$  为 CCD 图像传感器或胶片等的入射光的强度, 则输入光强度与输出信号之间的关系可表示如下:

$$f = cr^\gamma \quad (14)$$

式中,  $\gamma$  为常数。

从直观上讲, 一般希望图像的灰度和光强成正比, 而不是成上述这个关系。为此构造如下变换式:

$$g = kr = k \left( \frac{f}{c} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (15)$$

式中,  $k$  为一常数, 通常取 1。

图 3 是不同  $\gamma$  时对应的校正函数曲线。

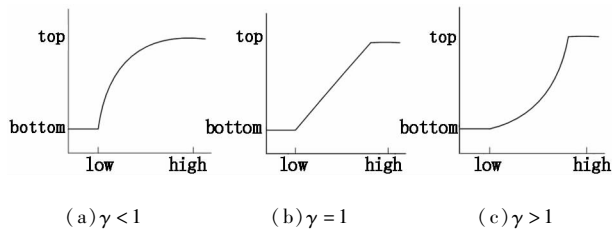


图 3 Gamma 校正函数曲线

Fig. 3 curve of Gamma correction function

$\gamma < 1$  时, 输入越亮输出值越加强;  $\gamma > 1$  时, 输入越亮输出值越减弱; 默认时,  $\gamma = 1$ , 表示线性变换。

### 3 仿真与分析

本文仿真部分使用了三组红外视频序列, 序列 1、2 均为武汉高德 Thermopro™ TP8 系列红外热像仪采集获得, 分辨率为  $288 \times 348$  像素, 序列 3 的分辨率为  $128 \times 128$  像素。算法均采用 Matlab 语言编程。在红外视频序列 1 中, 第 1 帧中的小目标位于云层外部, 第 200 帧中的小目标位于云层内部。序列 2 是存在建筑物遮挡的情况。序列 3 是背景较为复杂的情况。

线性变换与非线性变换检测结果对比如图 4 所示。



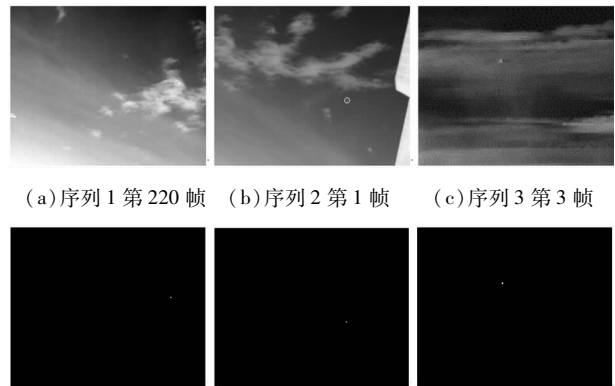
(a) 原图 (b) 线性变换结果 (c) 非线性变换结果

图 4 序列 1 第 1 帧的检测结果

Fig. 4 the test results for frame 1 of sequence 1

从图 4 可以看出, 序列 1 的第 1 帧经小波变换后分别采用线性变换和非线性变换, 均能很好地检测出小目标, 但相比较而言, 非线性灰度变换结果更加清晰, 小目标灰度值较大, 保留了更多的像素数, 以下实验中均采用非线性变换思想。

各种复杂情况的小目标检测结果如图 5 所示, 其中小波分解时的小波函数选用 bior3.7, 分解层数为 1 层, 小波去噪使用软阈值方法, 采用 db1 小波单层分解。从实验结果可以看出, 不同干扰存在的情况下, 通过改变小波函数及其分解层数或对灰度变换重新分段, 可以将本文方法灵活地应用于背景较为复杂的图像。本文方法很好地克服了阻挡检测的困难, 检测效果较好。



(d) 序列 1 第 220 帧 (e) 序列 2 第 1 帧 (f) 序列 3 第 3 帧

图 5 原图及检测结果

Fig. 5 original images and test results

本文方法与背景减法、帧间差分法结果比较, 结果如图 6 所示。可见, 三种方法均能检测出小目标。然而由于背景不固定, 背景减法的杂波去除不彻底, 而帧间差分法自身的局限性则致使检测所得的小目标像素数较少, 相比之下本文方法具有明显的优势, 不仅去噪去杂更彻底, 而且检测出的小目标十分清晰。



(a) 背景减法 (b) 帧间差分法(1,2 帧) (c) 本文方法

图 6 三种方法结果对比

Fig. 6 the results contrast of three methods

### 4 结束语

提出了一种融合小波变化和图像增强技术的红外小目标检测方法, 该方法首先利用小波对图像进

行单层分解,再根据对各高频成分进行小波去噪,然后根据实际需要,选择合适的分量进行重构,之后再利用灰度变换的思想,提取出小目标,淡化干扰。结果表明,本文方法高效、准确,相比其他小目标检测方法,检测效果更好,适应性更强,而且针对不同图像,可以选用不同的小波函数或者对灰度重新分段,灵活性很强。后续工作中将利用本文方法,结合先检测后跟踪的原理,实现对红外小目标图像序列的准确跟踪。

### 参考文献:

- [1] Xu Jianfeng, Wu Yiquan, Zhou Jianjian. Small target detection based on temporal predictions of background infrared image sequences[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(9): 1598 - 1603. (in Chinese)  
徐剑峰, 吴一全, 周建江. 基于时域背景预测检测红外图像序列中的小目标[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(9): 1598 - 1603.
- [2] Sun Y Q, Tian J W, Liu J. Background suppression based on wavelet transformation to detect infrared target [C]. IEEE Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2005: 4611 - 4615.
- [3] Gao Kailiang, Qin Tuanfa, Wang Yizhi, et al. A novel approach for moving objects detection based on frames subtraction and background subtraction[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(10): 86 - 91. (in Chinese)  
高凯亮, 覃团发, 王逸之, 等. 一种基于帧差法与背景减法的运动目标检测新方法[J]. 电讯技术, 2011, 51(10): 86 - 91.
- [4] Wang Xiaoyan, Zhang Yanzhu, Dong Huiying, et al. Algorithm research on three-frame difference for detection of moving target[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2011, 30(6): 82 - 91. (in Chinese)  
王孝艳, 张艳珠, 董慧颖, 等. 运动目标检测的三帧差法算法研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2011, 30(6): 82 - 91.
- [5] Sun Chengzhi, Xiong Tianzhong, Ji Shunping, et al. Application of optical flow algorithms based on difference in target detection and tracking [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(14): 59 - 62. (in Chinese)  
孙承志, 熊田忠, 吉顺平, 等. 基于差分的光流法在目标检测跟踪中的应用[J]. 机床与液压, 2010, 38(14): 59 - 62.
- [6] Zang Chuanji, Li Guixiang, Wang Yuxiang. Infrared dim target detection using morphology-based method[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012, 26(2): 94 - 97. (in Chinese)  
臧传吉, 李桂祥, 王宇翔. 基于形态学方法的红外小目标检测[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(2): 94 - 97.
- [7] Zhao Jiajia, Tang Zhengyuan, Yang Jie, et al. Infrared small target detection based on image sparse representation [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2011, 30(2): 156 - 161. (in Chinese)  
赵佳佳, 唐峥远, 杨杰, 等. 基于图像稀疏表示的红外小目标检测算法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 156 - 161.
- [8] Hu Tun, Zhao Jiajia, Cao Yuan, et al. Infrared small target detection based on saliency and principle component analysis [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2010, 29(4): 303 - 306. (in Chinese)  
胡瞰, 赵佳佳, 曹原, 等. 基于显著性及主成分分析的红外小目标检测[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(4): 303 - 306.
- [9] Zhang Xuejun, Li Hong, Deng He. The detection of small and weak infrared targets based on least squares support vector machine[J]. Mathematica Applicata, 2007, 20(Addition): 163 - 167. (in Chinese)  
张学军, 李红, 邓鹤. 基于最小二乘支持向量机的红外小目标检测[J]. 应用数学, 2007, 20(增): 163 - 167.
- [10] Wang Jiping, Sun Huayan, Zhang Xi. Infrared small target detection and tracking based on improved particle filter algorithm [J]. Infrared Technology, 2011, 33(5): 267 - 274. (in Chinese)  
王继平, 孙华燕, 章喜. 基于改进粒子滤波算法的红外小目标检测跟踪[J]. 红外技术, 2011, 33(5): 267 - 274.
- [11] Jiao Jianbin, Yang Shu, Liu Feng. Small infrared target detection based on artificial neural network[J]. Control Engineering of China, 2010, 17(5): 611 - 613. (in Chinese)  
焦建彬, 杨舒, 刘峰. 基于人工神经网络的红外小目标检测[J]. 控制工程, 2010, 17(5): 611 - 613.
- [12] Wu Yiquan, Yin Danyan. Detection of small infrared target based on spatial temporal prediction by chaotic PSO and least absolute deviation [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(5): 909 - 914. (in Chinese)  
吴一全, 尹丹艳. 混沌 PSO 最小一乘空时预测的红外小目标检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(5): 909 - 914.

- [13] Li Qihua, Li Jicheng, Shen Zhenkang. Dual band IR small target fusion detection using the D-S evidence theory [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34 (3): 266 – 271. (in Chinese)  
李秋华, 李吉成, 沈振康. 采用 D-S 证据理论的双色红外小目标融合检测 [J]. *红外与激光工程*, 2005, 34 (3): 266 – 271.
- [14] Yang Lei. Study on infrared small target detection and tracking algorithm under complex backgrounds [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Institute of Image Processing and Pattern Recognition, 2006. (in Chinese)  
杨磊. 复杂背景条件下的红外小目标检测与跟踪算法研究 [D]. 上海: 上海交通大学图像处理与模式识别研究所, 2006.
- [15] Wang Xuan, Ma Jianfeng. Digital image processing and pattern recognition [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)  
王暄, 马建峰. 数字图像处理与模式识别 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [16] Zhang Defeng. Detailed digital image processing with MATLAB [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)  
张德丰. 详解 MATLAB 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [17] Wei Y, Shi Z L, Yu H B. Wavelet analysis based detection algorithm for infrared image small target in background of sea and sky [C]. *IEEE Proceedings of the 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, 2003: 23 – 28.
- [18] Wang T, Yang S Y. Weak and small infrared target automatic detection based on wavelet [C]. *IEEE Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, 2008: 697 – 701.
-