

doi:10.3788/gzxb20154409.0910002

多尺度各向异性扩散方程的红外弱小目标检测算法

周慧鑫¹, 赵莹¹, 秦翰林¹, 殷世民², 刘刚³, 赵东¹, 延翔¹, 荣生辉¹

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 桂林电子科技大学 生命与环境科学学院, 广西 桂林 541004)

(3 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘要:针对复杂背景下红外弱小目标检测效果不佳的问题,结合多尺度分析法和各向异性扩散方程,利用图像尺度和方向信息,提出一种新的红外弱小目标检测算法.首先,采用 Surfacelet 变换对图像进行多尺度、多方向分解,得到不同尺度下高频子带系数和低频子带系数;其次根据不同频带的特点,分别采用改进的各向异性扩散方程差分滤波和局部去均值滤波对高频子带系数和低频子带系数进行处理;最后,采用逆 Surfacelet 变换重构处理后的子带系数,并采用自适应阈值分割对重构的图像进行分割,以实现目标检测.采用多组红外图像进行试验,并与小波滤波以及各向异性扩散滤波进行比较,实验结果显示,该算法能有效抑制背景及其边缘,可以获得比另外两种算法更好的红外弱小目标检测效果.

关键词:红外与夜视技术;目标检测;多尺度分析;图像处理;弱小目标;图像滤波;各向异性扩散方程;阈值分割

中图分类号:TN215

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)09-0910002-5

Infrared Dim and Small Target Detection Algorithm Based on Multi-scale Anisotropic Diffusion Equation

ZHOU Hui-xin¹, ZHAO Ying¹, QIN Han-lin¹, YIN Shi-min², LIU Gang³, ZHAO Dong¹,
YAN Xiang¹, RONG Sheng-hui¹

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 School of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541004, China)

(3 Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: For the poor performance of dim and small infrared target detection under complex background, a novel target detection algorithm inspired by the anisotropic diffusion equation and the multi-scale analysis was presented. Firstly, the raw target image is decomposed by the surfacelet transform into multi-scale and multi-direction details characteristics. Then, the improved anisotropic diffusion equation difference filter and the local mean removal filter are adopted to refine the high-frequency and the low-frequency subbands respectively. Reconstruct the refined subbands by the inverse surfacelet transform to obtain the result image with target enhancement and background suppression. Finally, the classical adaptive threshold segmentation method is used to implement target detection. Various infrared images with dim and small targets are used to verify the efficiency of the algorithm. Compared with wavelet filter and anisotropic diffusion equation filter, the experimental results show that the proposed algorithm can effectively suppress the background and its edge, and acquires a better performance of the target

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61107007, 61265006)、航空基金(No. 20120181005)和中央高校基本科研业务费专项资金(Nos. JDZD140202, JDYB140105, WRYB142312)资助

第一作者:周慧鑫(1975-),男,教授,博士,主要研究方向为光电成像及图像处理、目标检测跟踪及制导、光电对抗、高光谱异常检测等.
Email: hxzhou@mail.xidian.edu.cn

通讯作者:秦翰林(1982-),男,副教授,博士,主要研究方向为光谱成像与智能感知. Email: hlqin@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2015-05-05; **录用日期:**2015-07-02

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

detection.

Key words: Infrared night vision technique; Target detection; Multiscale analysis; Image processing; Dim and small target; Image filtering; Anisotropic diffusion equation; Threshold segmentation

OCIS Codes: 100.4999; 110.2970; 110.3080; 260.3060

0 引言

红外弱小目标检测是被动感知的红外搜索跟踪 (Infrared Search and Track,IRST)、自动目标检测与识别 (Automatic Target Detection and Recognition, ATDR) 以及精确制导 (Precision Guidance, PGD) 等系统的一项核心技术. 然而, 远距离下的红外目标成像面积太小, 信号强度相对较弱, 成像时没有明显的形状和结构特征, 在图像上表现为弱小目标, 尤其是在复杂天空和地面背景下, 目标几乎被淹没在背景中, 图像整体信杂比低, 极大地增加了红外弱小目标检测的难度.

为了有效检测红外弱小目标, 近些年国内外学者提出了许多方法, 如 Max-Mean 和 Max-Median 滤波^[1], Top-Hat 滤波^[2-3] 和 TDLMS 滤波^[4-5], 以及小波^[6-7] 和超小波领域的多尺度几何分析方法^[8-11]. 但是这些方法也存在一些缺点, 例如当背景与目标差异不明显时, Max-Mean 和 Max-Median 滤波检测性能大大下降; 结构元素的选择对 Top-Hat 滤波的检测结果影响较大, 需寻找合适的结构元素; TDLMS 滤波在平滑噪声的同时也平滑掉了图像的边缘, 背景预测的准确性较差; 小波滤波在一定程度上损失了图像中小目标的有效信息, 且对于噪声较大的小目标图像, 其检测效果有待进一步提高.

本文提出一种基于多尺度各向异性扩散方程的红外弱小目标检测算法, 利用多尺度几何分析中的 Surfacelet 变换 (Surfacelet Transform, ST)^[12] 对含有弱小目标的红外图像进行多尺度多方向分解, 再利用改进的各向异性扩散方程 (Anisotropic Diffusion Equation, ANDE)^[13-14] 差分滤波显著的各向异性对不同尺度下方向特征信息加以处理, 最后通过分割算法实现红外弱小目标检测.

1 基于多尺度各向异性扩散方程的红外弱小目标检测算法

1.1 Surfacelet 变换

Surfacelet 变换由一种新的多尺度塔式分解和多维方向滤波器组 (N -dimensional Direction Filter Banks, NDFB) 结合而成. NDFB 借助一个简单高效的树形结构实现任意 N 维 ($N \geq 2$) 信号的定向分解, 图 1 为一种 2 维方向滤波器组 (2D-DFB) 的频率分割图. 但是 NDFB 只能处理信号的高频部分, 因此在信号通过 NDFB 之前, 需要先进行多尺度分解. 图 2 给出了这种多尺度分解塔式结构的实现, 图中 $L_i(\omega)$ ($i = 0, 1$) 表

示多尺度分解的低通滤波器; $D_i(\omega)$ ($i = 0, 1$) 表示高通滤波器; $S(\omega)$ 为反混频滤波器, 可避免上抽样操作产生的混频现象; $\uparrow 2I$ 和 $\downarrow 2I$ 分别表示 2 阶上采样和 2 阶下采样, $\uparrow 3I$ 和 $\downarrow 3I$ 分别表示 3 阶上采样和 3 阶下采样, $L_i(-\omega)$ 和 $D_i(-\omega)$ 分别为 $L_i(\omega)$ 和 $D_i(\omega)$ 的逆操作, I-NDFB 表示逆多维方向滤波器组. 为了获得更高层次的分解, 可以在点 a_{n+1} 和 s_{n+1} 递归插入方框中的结构.

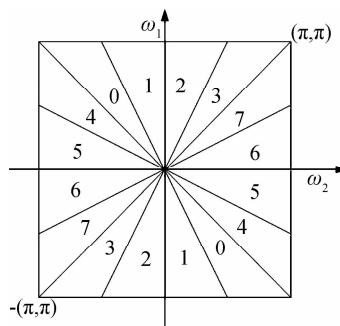


图 1 2D-DFB 的频率分割图

Fig. 1 Frequency partitioning of 2D-DFB

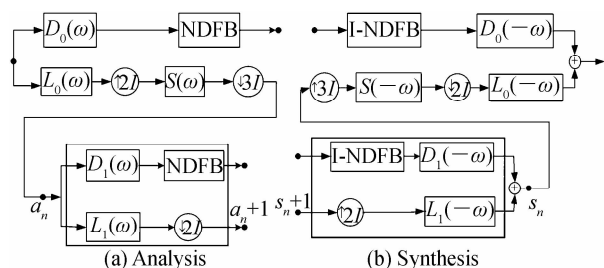


图 2 Surfacelet 变换结构图

Fig. 2 Block diagram of surfacelet transform

对信号进行 ST 分解的方向数可以设定为 2^l ($l = 1, 2, 3, \dots$). 图 3 是对 128×128 像素的红外成像图进行 2 层次 ST 分解的结果, 其中第一层分解方向数为 2, 第二层分解方向数为 8. 经 ST 分解后, 目标、背景边缘和噪声主要包含于高频子带, 而背景信息和少部分的目标残留信息包含于低频子带中.

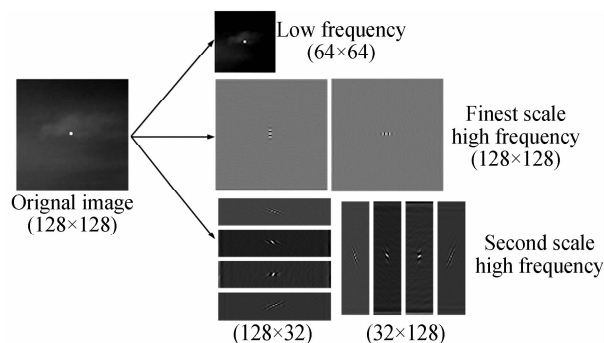


图 3 图像的 ST 分解图

Fig. 3 Decomposed images by surfacelet transform

由于图像中的弱小目标在不同方向上表现为各向同性,而背景在不同方向上则表现为各向异性,因此本文使用改进的各向异性扩散方程差分滤波对高频方向子带进行滤波以突显目标。

1.2 改进的 ANDE 差分滤波

Perona P 和 Malik J 提出的各向异性扩散方程 (ANDE) 是偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE) 理论应用于图像处理的一种主流模型。ANDE 的本质是用一个随图像灰度梯度递减的微分系数来控制微分过程的强度,在灰度变化剧烈的区域(如边缘),梯度较大,微分系数很小,微分作用也很小;而灰度变化较小或只有孤立噪声点的区域,则采用较强的平滑处理。其最大特点是微分过程具有很强的方向性,避免了线性扩散中存在的模糊和局部化问题。ANDE 的形式为

$$\frac{\partial f(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}\{c|\nabla f(x, y, t)|\nabla f(x, y, t)\} \quad (1)$$

式中, div 为散度算子; $\nabla f = [f_x, f_y]$ 为图像的梯度; $|\nabla f|$ 为图像的梯度模; t 是时间参数, $c(|\nabla f(x, y, t)|)$ 是扩散系数,是非负递减函数,且 $c(0) = 1, c(t) > 0, c(\infty) = 0$; (x, y) 为空间位置, $f(x, y, 0)$ 为原始图像, $f(x, y, t)$ 为变化过程中的图像。

理想的扩散系数应该使式(1)在图像灰度变化不大的区域内扩散程度大,而在边缘区域内扩散程度小。两个扩散系数为

$$c_1(\nabla f) = e^{-(\nabla f/k)} \quad (2)$$

$$c_2(\nabla f) = \frac{1}{1 + (\nabla f/k)^2} \quad (3)$$

式中参数 k 为梯度阈值,一般取 5、10 和 20 等大于 0 的常数。

红外弱小目标图像中,目标仅占几个像素,需要同时抑制平稳背景和边缘轮廓,并且保留弱小目标。通过 ANDE 保留红外图像中平稳背景和边缘轮廓,仅仅平滑目标部分,再通过与原图像的差分就可得到仅含有红外弱小目标的图像。据此,将式(2)和(3)的扩散系数修正为

$$c_1^*(\nabla f) = 1 - e^{-(\nabla f/k)} \quad (4)$$

$$c_2^*(\nabla f) = 1 - \frac{1}{1 + (\nabla f/k)^2} \quad (5)$$

为了将式(1)应用于数字图像处理,需进行离散化,再结合修正后的扩散系数,得到四邻域离散形式的 ANDE 为

$$f_{i,j}^{t+1} = f_{i,j}^t + \lambda [C_1^* \cdot \nabla_1 f + C_2^* \cdot \nabla_2 f + C_3^* \cdot \nabla_3 f + C_4^* \cdot \nabla_4 f] \quad (6)$$

在该迭代方程中, t 是迭代次数,参数 λ 通常不超过 0.25,以保证其稳定性。其中

$$C_t^* = c^*(\nabla_i f) \quad t=1,2,3,4 \quad (7)$$

$$\begin{cases} \nabla_1 f_{i,j} = f_{i-1,j} - f_{i,j}, \nabla_2 f_{i,j} = f_{i+1,j} - f_{i,j} \\ \nabla_3 f_{i,j} = f_{i,j+1} - f_{i,j}, \nabla_4 f_{i,j} = f_{i,j-1} - f_{i,j} \end{cases} \quad (8)$$

迭代次数每增加一次,算法所用的时间和计算量也增加一倍,使算法的复杂度成倍增加。实验表明,经一次滤波处理后的效果已经相当好,再次迭代的代价太大,而且效果提升并不明显。因此,本文进行一次迭代,得到改进的 ANDE 差分滤波结果表达式为

$$\tilde{f}_{i,j} = f_{i,j}^0 - f_{i,j}^1 = -\lambda [C_1^* \cdot \nabla_1 f + C_2^* \cdot \nabla_2 f + C_3^* \cdot \nabla_3 f + C_4^* \cdot \nabla_4 f] \quad (9)$$

1.3 基于多尺度各向异性扩散方程的红外弱小目标检测算法

为了更好地利用图像的尺度信息和方向信息,将改进的 ANDE 差分滤波应用于 ST 分解后的高频子带。设 $f_{l,k}$ 表示 ST 分解后在尺度 l 和方向 k 的子带系数,则对 $f_{l,k}$ 进行改进的 ANDE 差分滤波后得到的高频子带系数 $\tilde{f}_{l,k}$ 为

$$\tilde{f}_{l,k} = \text{ANDE}(f_{l,k}) \quad (10)$$

综上所述,本文提出的基于多尺度各向异性扩散方程的红外弱小目标检测算法 (ST-ANDE) 流程图如图 4,具体步骤为:

- 1) 设置 ST 分解的层数与方向数,对含有弱小目标的红外图像进行 ST 分解,得到相应的高频子带与低频子带;
- 2) 对低频子带进行局部去均值滤波^[15]处理,以提取残留在低频子带的目标信息;
- 3) 对高频子带进行改进的 ANDE 差分滤波,以突显目标,抑制背景;
- 4) 再将滤波后的子带通过逆 ST 变换进行重构,得到重构后的图像,即得到抑制了背景和凸显了目标的图像;
- 5) 最后对重构的图像进行自适应阈值分割^[16],实现最终的目标检测。

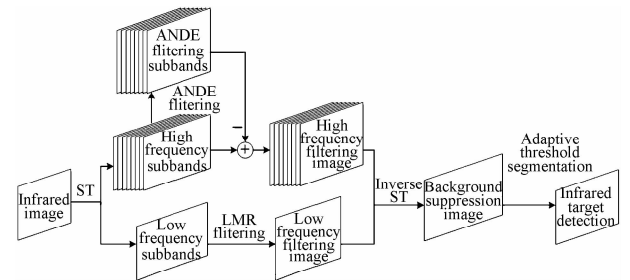


图 4 ST-ANDE 算法流程图
Fig. 4 Schematic diagram of ST-ANDE

2 实验与分析

为了验证本文提出的 ST-ANDE 算法的有效性,选取两组 128×128 像素的红外图像进行实验。实验中,ST 分解层数均为 2,第一层分解方向数为 2,第二层分解方向数为 8;改进的 ANDE 差分滤波的扩散系

数采用式(5),其中 $k=5$;迭代1次,且 λ 取1;局部去均值滤波的邻域大小为 3×3 像素;自适应阈值分割的系数为5;并与小波(Wavelet)滤波、ANDE滤波处理结果进行对比,其中小波滤波采用“DB4”小波进行3层分

解;ANDE滤波的参数设置与ST-ANDE相同.实验均在配置为酷睿2.6GHz的CPU、2GB内存、Windows 7操作系统的计算机平台上,基于Matlab 2013b仿真实现.实验结果如图5和图6所示.

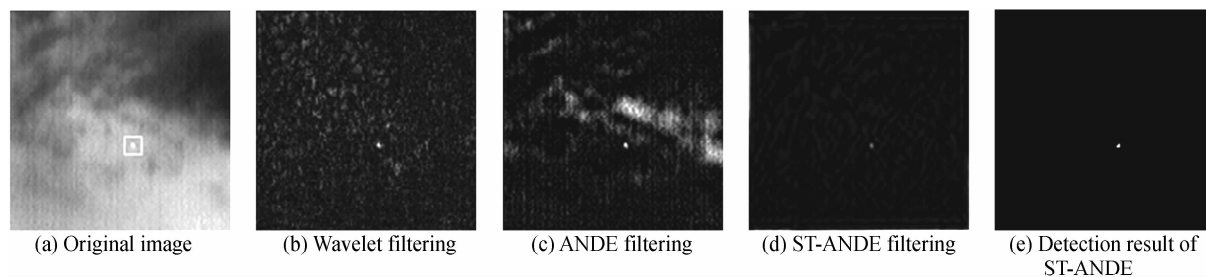


图5 天空背景下目标检测结果

Fig. 5 Target detection results under sky background

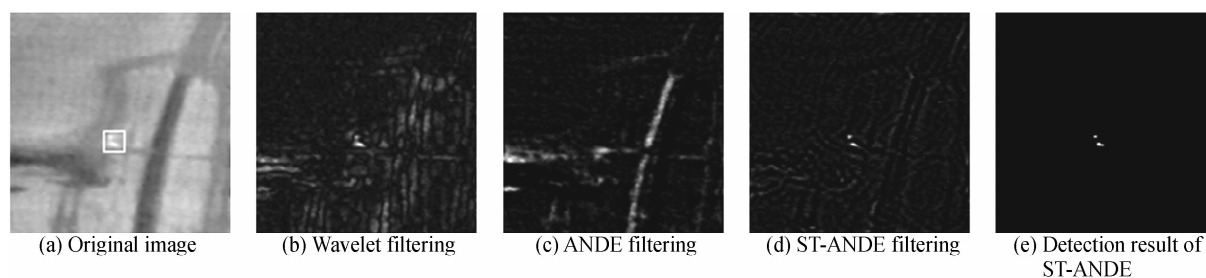


图6 地面背景下目标检测结果

Fig. 6 Target detection results under ground background

图5(a)为复杂天空云层背景下的单个弱小目标,目标大小为 3×3 像素,处在云层边缘;图6(a)为地面背景下单弱小目标图像,目标形状不规则,包含在 6×6 像素之内,由于路面和田地等背景对目标形成强烈干扰.两幅原图中的目标均呈现为点状,无明显的形状与结构特征,强度较弱,几乎淹没在背景中.图5(b)和图6(b)分别为采用小波滤波对两组原图进行处理的结果.结果显示该方法可以增强目标信号,但是对背景的抑制不足,尤其是大面积的地面结构化背景,抑制效果更差.图5(c)和图6(c)为直接进行ANDE滤波的结

果.结果显示该方法虽然增强了目标,但同时也加强了云层、路面和田地等边缘结构化条块的边缘.图5(d)和图6(d)为本文提出的ST-ANDE滤波结果,可以看到其很好地保持并增强了弱小目标信号,同时更好地平滑掉云层和地面结构化的背景边缘,使得目标对比度得到很大改善.图5(e)和图6(e)分别为ST-ANDE滤波处理后再进行阈值分割的结果,即最终的目标检测结果,可以看到目标被有效地检测出来.

图7给出了本文提出的ST-ANDE对采集的红外图像序列的检测结果,第一行图像为红外图像的原图,

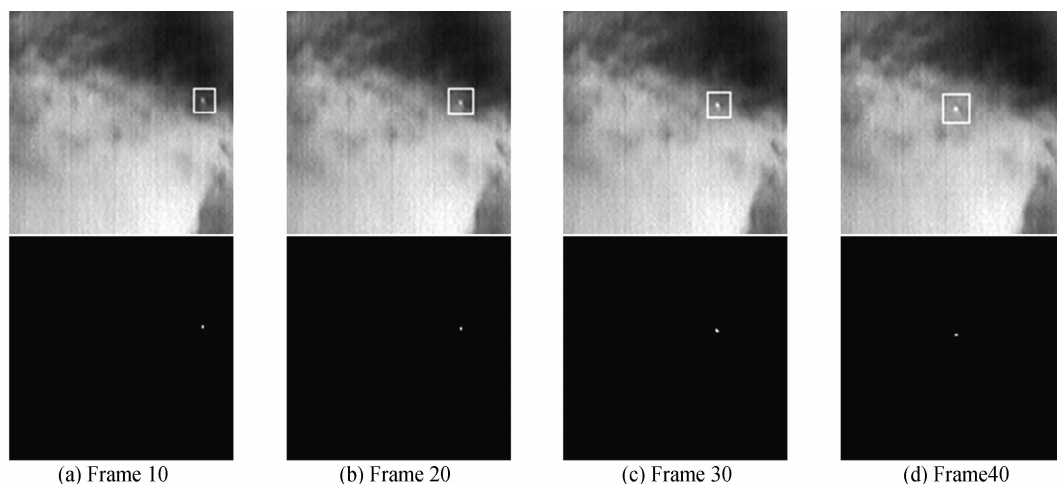


图7 红外图像序列的目标检测结果

Fig. 7 Target detection results of infrared image sequence

第二行图像为第一行图像对应的检测结果.从图7中可看出红外弱小目标被正确有效地检测出来,说明ST-ANDE具有较好的鲁棒性和适应性.

为了客观说明本文算法的有效性,采用了信杂比(Signal to Clutter Ratio, SCR)、信杂比增益(Improvement in SCR, ISCR)和背景抑制因子(Background Suppression Factor, BSF)三个指标参数^[17]来评价,其中SCR和ISCR用于衡量算法保持目标信号的能力,BSF用于衡量算法抑制复杂背景的能力.

表1 不同方法性能的比较

Table 1 Performance comparison of different methods

Original image			Wavelet filter			ANDE filter			ST-ANDE filter(proposed)		
Frame	Target Size	SCR _m	ISCR	BSF	EST/s	ISCR	BSF	EST/s	ISCR	BSF	EST/s
Fig. 5	3×3	1.203	2.235	2.613	0.013	2.294	2.572	0.051	3.726	4.086	0.133
Fig. 6	6×6	1.263	1.696	2.005	0.015	1.792	2.186	0.050	2.750	3.652	0.131

3 结论

本文提出一种基于多尺度各向异性扩散方程的红外弱小目标检测算法(ST-ANDE),充分利用了目标图像的多尺度、多方向和各向异性的特性,抑制图像中的背景和边缘信息,保存并增强弱小目标信息,提高了目标对比度,从而实现对红外弱小目标的有效检测.实验效果证明了ST-ANDE方法的有效性、较好的鲁棒性和适应性.本文的后续工作是进一步优化算法,提高其执行效率,以便于实际工程中应用.

参考文献

- [1] DESHPANDE S D, MENG H E, VENKATESWARLU R, *et al.* Max-mean and max-median filters for detection of small targets[C]//SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 1999: 74-83.
- [2] ZENG Ming, LI Jian-xun, PENG Zhang. The design of top-hat morphological filter and application to infrared target detection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, **48**(1): 67-76.
- [3] BAI Xiang-zhi, ZHOU Fu-gen. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. *Pattern Recognition*, 2010, **43**(6): 2145-2156.
- [4] CAO Yuan, LIU Rui-ming, YANG Jie. Small target detection using two-dimensional least mean square (TDLMS) filter based on neighborhood analysis[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, **29**(2): 188-200.
- [5] BAE T W, KIM Y C, AHN S H, *et al.* An efficient two-dimensional least mean square (TDLMS) based on block statistics for small target detection[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2009, **30**(10): 1092-1101.
- [6] DELMARCO S, AGAIAN S. The design of wavelets for image enhancement and target detection[C]. SPIE, 2009, **735103**: 1-12.
- [7] CHEN Fang-han, WANG Wen-sheng, YANG Kun, *et al.* Detection and recognition of infrared target based on the multiwavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 295-298.
陈方涵,王文生,杨坤,等.基于多小波变换的红外目标探测与识别[J].光子学报,2011,**40**(2): 295-298.
- [8] LIU Xing-miao, WANG Shi-cheng, ZHAO Jing. Infrared small target detection based on nonsubsampling Contourlet transform and statistical distribution[J]. *Optics and Precision*

Engineering, 2011, **19**(4): 908-915.
刘兴淼,王仕成,赵静.结合统计分布和非下采样Contourlet变换的红外弱小目标检测[J].光学精密工程,2011,**19**(4): 908-915.

[9] MA Ke, PENG Zhen-ming, HE Yan-min, *et al.* An improved method for dim infrared target detection with nonsubsampling Contourlet transform[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(11): 2811-2815.
马科,彭真明,何艳敏,等.改进的非下采样Contourlet变换红外弱小目标检测方法[J].强激光与粒子束,2013,**25**(11): 2811-2815.

[10] RONG Sheng-hui, LIU Gang, ZHOU Hui-xin, *et al.* Infrared dim and small target background suppression based on the improved shearlet transform and the guide filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 2100021-2100026.
荣生辉,刘刚,周慧鑫,等.基于改进的剪切波变换和引导滤波的红外弱小目标背景抑制方法[J].光子学报,2015,**44**(2): 2100021-2100026.

[11] ZONG Jing-guo, QIN Han-lin, LIU De-lian, *et al.* Multiple resolution bilateral filter for infrared clutter suppression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 241-244.
宗靖国,秦翰林,刘德连,等.基于多分辨率双边滤波的红外场景杂波抑制[J].光子学报,2013,**42**(2): 241-244.

[12] LU Y, DO M N. Multidimensional directional filter banks and surfacelets[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**(4): 918-931.

[13] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, **12**(7): 629-639.

[14] ZHANG Bi-yin, ZHANG Tian-xun, CAO Zhi-guo, *et al.* Fast new small-target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(10): 106401-1-6.

[15] LIU Yun-long, XUE Yu-li, YUAN Su-zhen, *et al.* Infrared small targets detection using local mean[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(3): 814-822.
刘运龙,薛雨丽,袁素真,等.基于局部均值的红外弱小目标检测算法[J].红外与激光工程,2013,**42**(3): 814-822.

[16] CHEN C L P, LI H, WEI Y, *et al.* A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(1): 574-581.

[17] QIN Han-lin, LIU Shang-qian, ZHOU Hui-xin, *et al.* Background suppression for dim small target with Gabor kernel non-local means[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4): 737-741.
秦翰林,刘上乾,周慧鑫,等.采用Gabor核非局部均值的弱小目标背景抑制[J].红外与激光工程,2009,**38**(4): 737-741.