

基于曲面波变换的红外弱小目标背景抑制

秦翰林¹, 梁宇恒¹, 周慧鑫¹, 赖睿², 刘上乾¹

(1. 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学微电子学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出了一种基于曲面波变换的弱小目标背景抑制新方法, 解决红外搜索跟踪系统探测远距离弱小目标中复杂结构化背景抑制难题。根据红外图像中目标和背景杂波的特性, 首先, 采用曲面波变换对序列图像进行多尺度、多方向和各项异性分解, 提取图像的多尺度和方向细节特征; 其次, 根据目标和背景杂波信号的差异, 通过应用设计的核函数调整分解后的各尺度和方向的子带系数值; 然后, 重构修改后的各子带, 从而将红外图像中弱小目标和背景杂波分离, 达到抑制背景的目的; 最后, 采用自适应阈值分割技术得到真实目标点, 最终实现对弱小目标的精确探测。实验结果显示, 与局部去均值和最大中值滤波方法相比较, 该方法能有效地检测出信杂比 (signal-to-clutter ratio, SCR) 在 1.6 以上的目标。

关键词: 目标检测; 背景抑制; 曲面波变换; 核函数

中图分类号: TP 391.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.10.01

Infrared small and weak targets background suppression based on surfacelet transform

QIN Han-lin¹, LIANG Yu-heng¹, ZHOU Hui-xin¹, LAI Rui², LIU Shang-qian¹

(1. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: For infrared images with the characteristics of low signal-to-clutter ratio (SCR) and contrast ratio (CR), a small and weak target background suppression method based on surfacelet transform is proposed to solve the problem, and a designed function is introduced to boost the ability to suppress false information by background structure. Firstly, the surfacelet transform is adopted to decompose the input infrared image sequences, which extracts multi-scale, anisotropic and directional detail features of the image. Then, according to difference between target and background clutter signal, a kernel function is introduced to suppress background details and enhance target information for suppression background. Finally, the target image is obtained by using an adaptive thresholding method. Several groups of experimental results demonstrate that the proposed method can segment the infrared target image effectively compared with several classical infrared small and weak target detection methods (SCR > 1.6), such as local remove means (LMR) and max median (MMed) methods.

Keywords: target detection; background suppression; surfacelet transform; kernel function

0 引言

在许多军事应用中, 使用红外搜索跟踪系统的目的是为了尽快尽早地发现远距离目标。此时, 所形成的目标图像强度一般较弱, 可以认为其对比度和信杂比 (signal-to-clutter ratio, SCR) 较低; 同时, 相对尺寸也比较小, 可用两种方式定义: 一是图像中目标的几何尺寸小到只是一个亮点或亮

斑; 二是 256 × 256 大小的红外图像中目标尺寸在 4 × 4 或总像素不超过 20 个, 无形状、结构和纹理等信息。而此时的红外图像主要由大面积缓慢变化的云层、地面或者海平面等结构化 (非平稳) 背景所构成, 通常具有强相关的特点, 并且一般占据了整个场景图像的低频空间。另外, 背景图像中还包含了部分空间域中的高频分量, 其主要分布在背景图像各向同性区域的强边缘处。因此, 背景可看作一个不断

收稿日期: 2010-10-13; 修回日期: 2011-04-19。

基金项目: 国家自然科学基金 (60902080); 国家部委科技项目 (7130721, 41101050104); 教育部科学技术研究重点项目 (108114); 中央高校基本科研业务费专项资金 (72005623, 72104810) 资助课题

作者简介: 秦翰林 (1982-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为计算成像及其信息处理。E-mail: hlqin@mail.xidian.edu.cn

变化且非平稳的二维随机过程。

受场景中这些复杂背景的影响,经典的阈值分割方法很难直接将背景杂波和目标信号分离,从而严重影响了红外搜索跟踪系统的作用距离。因此,能否有效地对复杂结构化背景进行抑制,是后续检测和跟踪识别目标的基础。所以,针对复杂背景的特性,人们已经提出了许多背景抑制方法,主要包括时域^[1-3]、空域^[4-7]、频域^[8]、小波域^[9-10]、改进的偏微分方程^[11]和模式匹配^[12]等方法。这些方法在复杂背景抑制上通常具有良好的性能,然而在捕获弱小目标奇异性特征和背景细节信息方面有许多的不足。从而导致检测概率的降低,虚警率增大。在这种情况下,为了使有用的目标信息被保留并得到有效增强,必须要对结构化复杂背景进行自适应的抑制。

为此,本文提出了一种基于曲面波域红外图像序列背景抑制方法,把序列信号作为特殊的三维信号,对信号的空间信息和时间信息整体处理。针对曲面波系数的特点,在系数调整中采用设计的 3D 核函数,能够充分利用信号的三维时空信息,平滑掉非结构化背景。增强目标信号。

1 基于曲面波变换的弱小目标背景抑制

1.1 曲面波变换

文献[13]提出的方向滤波器组用来对二维信号进行有效方向分解。方向滤波器组借助于层树结构分解来实现,如图 1 所示。方向滤波器组的方向选择性使其在图像处理中得到广泛应用。将方向滤波器组和拉普拉斯金字塔结合起来,提出了轮廓波变换^[14],三层分解的频率划分如图 1(a)所示。而曲面波变换^[15-16]构造的第一步由二维方向滤波器扩展到更高维,例如,在三维情况下,从二维楔形频率划分着手,获得的频率划分如图 1(b)所示,其中分量滤波器为理想的带通滤波器,其从原点在 3×2^l ($l \geq 0$) 不同方向和贴片整个频率空间的一个矩形金字塔传递。

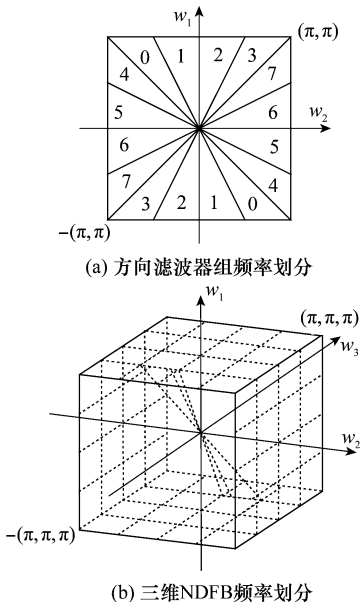


图 1 频率划分示意图

为了获得三维方向滤波器组(3-dimension direction filter banks, 3D-DFB)的一层分解,此处采用三维三通道非下采样滤波器组,如图 2 所示,分量滤波器理想频率支撑为钟形区域。该滤波器组分解输入信号三维频率为 3 个沙漏型子带。图 3 显示 3 个方向的一个方向分解序列层的框图,给出了沙漏滤波器中的一个通道的其他层分解过程。

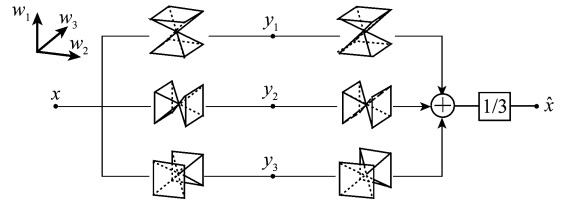


图 2 3D-DFB 第一层分解过程

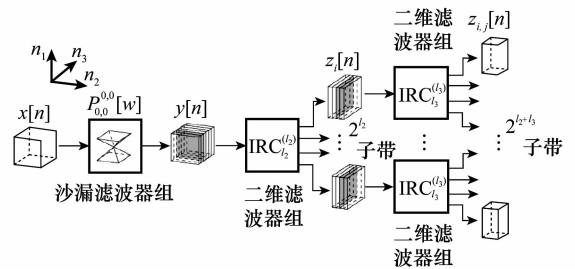


图 3 3D-DFB 的结构图

但是,3D-DFB 只能处理信号的高频部分,在信号通过三维方向滤波器组之前,需要先进行多尺度分解。在轮廓波变换中,图像的多尺度分解由拉普拉斯金字塔(Laplacian pyramid, LP)实现。而在曲面波变换中,采用一种新的塔式结构来实现,如图 4 所示,图中 $D_0(\omega)$ 表示多尺度金字塔高通滤波器, $L_0(\omega)$ 表示低通滤波器, $S(\omega)$ 为反混频滤波器,可避免上抽样操作产生的混频现象,这样由多尺度分解和三维方向滤波器组的结合就构成了一个完整的曲面波变换,I-3D-DFB (inverse 3-dimension direction filter banks) 为逆三维方向滤波器组。

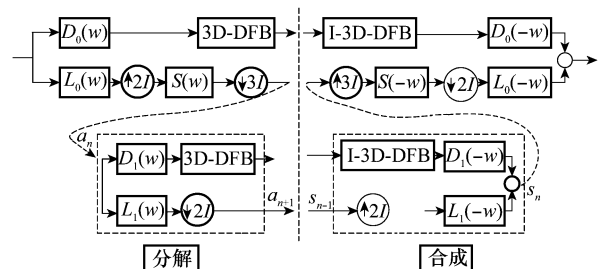


图 4 曲面波变换框图

由于曲面波变换具有多方向分解、高效率树结构滤波器组、完全重建、低冗余度等性质,因此其能够在不同尺度和不同频率的方向子块上准确地捕获三维信号中的面状奇异,并且变换后的曲面波变换系能量非常集中,或者说曲面波变换对于曲面有更“稀疏”的表示。对于红外弱小目标,

其红外辐射强度与周围复杂自然背景辐射强度无关,目标的强度在整个图像序列中即使不是最强的,但与其所处的局部空间-时间域背景间的强度差异较明显,而且一般高于局部背景的辐射强度,也就是说,它们的共同特征是在距离较远处表现为大小变化不大的点源目标,且目标的灰度值与周围的局部背景有差异,但内部比较均匀,可认为弱小目标是红外图像中的一个具有固定特定形状和灰度结构的凸结构。此时可认为弱小目标在不同方向上表现为各向同性,而背景在不同方向中则表现为各向异性;另一方面,强度较高的非目标背景图像通常与周围背景间无明显强度差异。由此可知,低频主要反映的是目标的背景信息,高频主要是系统内部噪声和高亮区,而目标信号主要在图像的中频区。同时,由于弱小目标序列带有二维空间和一维时间,因此在红外序列图像中移动的弱小目标可以被认为是三维空间/时间域刻画的平滑小面片。基于这些特性,认为曲面波能有效地捕获和表达三维空间/时间域平滑曲面中的弱小目标。

1.2 基于曲面波变换的弱小目标背景抑制

由上述曲面波变换对图像分解所得到的系数对应于不同尺度、不同方向上的细节分量(子带系数),再利用设计的核函数来增加子带系数中目标和背景系数值的差别。这不仅能有效地提升各尺度、各方向上细节分量之间的对比度,而且能根据系数的值控制增强的幅度。

本文引入三维核函数来描述分解后各子带系数中不同背景杂波形态对背景抑制性能的影响。图 5(a)是三维核函数(kernel function, KF)中的子单元示意图^[17]。

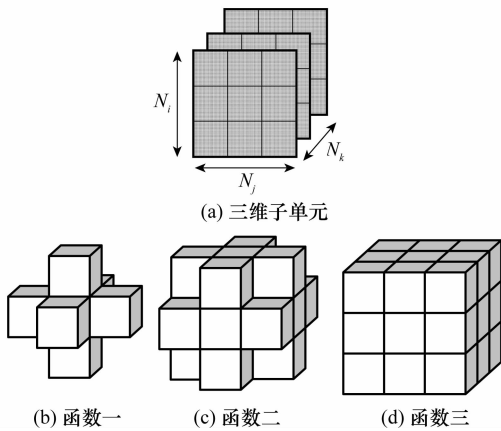


图 5 三维子单元和三种不同形式的核函数示意图

图 5 中, N_k 由选取的子带的维数确定, N_i 和 N_j 的大小由所设计的核函数的形式确定。图 5(b)~图 5(d)给出了三种不同形式的核函数示意图。为了描述方便,采用第一种函数形式进行讨论。图 5 中一个子带的一点 w_{ijk} ($1 \leq i \leq N_i, 1 \leq j \leq N_j, 1 \leq k \leq N_k$) 如图 6 所示。

由此选定的权重因子 w_{ijk} 可由式(1)表示。

$$w_{i,j,k} = \beta_h(w_{i,j-1,k} + w_{i,j+1,k}) + \beta_v(w_{i-1,j,k} + w_{i+1,j,k}) + \beta_t(w_{i,j,k-1} + w_{i,j,k+1}) \quad (1)$$

式中

$$w_{i-1,j,k} = F(I_{i-1,j,k}, I_{i,j,k}), F(t) = \exp(- (t/K)^2)$$

$$t = (I_{i-1,j,k} - I_{i,j,k}), \beta_h + \beta_v + \beta_t = 1$$

β_h, β_v 和 β_t 分别表示横向、纵向以及时间方向上的权重因子,不同的空域和时域分布特性,它们的权重因子是不同的; K 是梯度阈值;核函数 $F(t)$ 满足两个条件,一是单调递减;二是当待处理元素与周围元素相似时(表明该元素为背景)核函数趋近于 1,当待处理元素与周围元素差异较大时(表明该元素为异常)核函数趋近于 0。

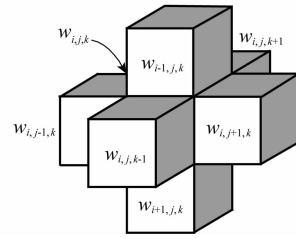


图 6 选定的核函数形式

由此,调整后的子带系数表示为

$$\hat{c}_{i,j,k} = \mathbf{C}_W^T \cdot \mathbf{C}_{\text{unit}} \quad (2)$$

式中

$$\mathbf{C}_W^T = [\omega_{i,j,k}, -\omega_{i,j-1,k}, -\omega_{i,j+1,k}, -\omega_{i-1,j,k}, -\omega_{i+1,j,k}, -\omega_{i,j,k-1}, -\omega_{i,j,k+1}]$$

$$\mathbf{C}_{\text{unit}} = [c_{i,j,k}, c_{i,j-1,k}, c_{i,j+1,k}, c_{i-1,j,k}, c_{i+1,j,k}, c_{i,j,k-1}, c_{i,j,k+1}]$$

综上所述,基于曲面波变换的序列图像背景抑制方法具体步骤为:① 对包含弱小目标的序列图像进行曲面波分解;② 利用式(2)分别对曲面波分解后各方向子块进行抑制;③ 对修改后的曲面波子带系数进行重构,得到抑制背景,增强目标后的红外图像。

2 实验结果与分析

为了验证基于曲面波变换核函数(surfacelet transform kernel function, ST-KF)背景抑制新方法的有效性,选择了两组有代表性的单目标红外图像序列进行实验验证。测试图像大小为 128×128 像素,SCR 为 1 左右。所有实验均在一台配置为酷睿 2.66 GHz 的 CPU、2 GB 内存、Windows XP 操作系统的计算机平台,通过 Matlab7.1 软件平台编程实现。曲面波变换分解层数为 3, $\beta_h = 0.4, \beta_v = 0.4, \beta_t = 0.2, K = 10$ 。图 7 和图 8 分别为天空云层、地面采用 MMed 滤波方法、LMR 滤波方法、ST-KF 背景抑制方法的处理效果比较图。量化结果如表 1 所示,其参数采用文献[18]中的定义,其中 SCR_m (signal-to-clutter ratio) 表示原始图像的信杂比, CR_m (contrast ratio) 为原始图像对比度, ISCR (improvement in SCR) 为背景抑制后图像信杂比增益, ICR (improvement in CR) 为背景抑制后图像对比度增益, BSF (background suppression factor) 为背景抑制因子。

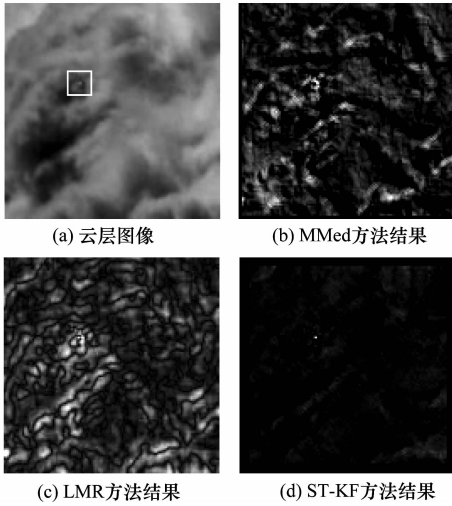


图 7 天空云层背景抑制性能比较

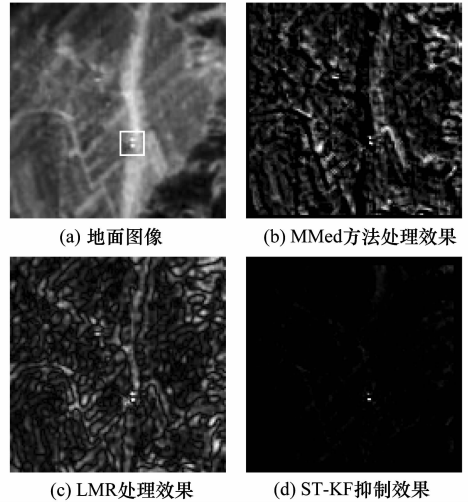


图 8 地面复杂背景抑制性能比较

表 1 不同方法性能比较

序号	原图		MMed			LMR			ST-KF		
	SCR _m	CR _m	ISCR	ICR	BSF	ISCR	ICR	BSF	ISCR	ICR	BSF
图 7	1.25	3.02	1.74	6.38	6.47	1.38	4.97	3.70	3.59	15.74	7.45
图 8	1.02	11.10	1.66	6.20	4.01	1.97	2.94	3.15	4.28	21.35	6.64

从图 7 和图 8 所示的实验结果可看出,原图中目标仅占一个或几个像元,呈现为点状,无形状与结构特征等,且强度较弱,特别是图 7(a)中的目标更是被强烈的结构化云层和地面路网所干扰。采用 LMR 滤波方法处理后,目标虽然被增强,但同时背景也被增强,而未获得较好地抑制;采用 MMed 滤波方法处理后,目标虽然被增强,大面积的结构化背景也被抑制,但同时云层边缘和地面路网的强边缘也得到加强;这样必然影响后续的检测处理。

经本文 ST-KF 处理后,在很好地保存并增强弱小目标信号的同时较好地抑制了结构化背景。特别对目标受到大面积云层和地面路网干扰的情况。与 LMR 和 MMed 滤波方法结果相比较,ST-KF 方法不但平滑了云层和地面路网内部,而且将云层和地面路网的边缘也平滑掉,使得图像整体对比度得到了很大改善。

主观视觉感觉给出了直观比较,然而,其结果易受视觉心理因素的影响,因此,要全面衡量融合效果,需要从主观感知和客观指标衡量两个方面综合考察。为了比较全面地对融合结果进行衡量,这里采用文献[18]中定义的衡量指标,在表 1 中给出了基于上述客观衡量指标的红外弱小目标背景抑制效果,图像 SCR 增益达 3 倍以上,背景抑制因子达 6 倍以上。实验表明:客观指标的衡量结果与主观视觉相一致,本文提出的 ST-KF 方法取得了比较理想的抑制效果,目标信息得到保存和增强。

为了进一步验证 ST-KF 方法的稳定性和对复杂环境的适应能力,此处采用处理效果较好的 MMed 和本文方法,利用真实红外背景嵌入不同信杂比弱小目标的方式对两种方法的处理结果进行比较。图 9(a)给出了原始红外图像序列中的一帧图像,图 9(b)和图 9(d)分别为 MMed 和本文方法对序列图像背景抑制效果在时间轴上的投影,图 9(c)和图 9(e)分别是对图 8(b)和图 9(d)进行阈值分割的结果。由图 8(b)可看出,MMed 方法仍然包含许多高、亮杂波区域和

纹理边缘以及其他残留的杂波,而本文方法将云层背景的边缘、纹理和高亮区域均很好的剔除,如图 9(d)所示。实验结果验证了 ST-KF 方法在抑制背景的同时保留并增强弱小目标的能力比 MMed 方法要好。

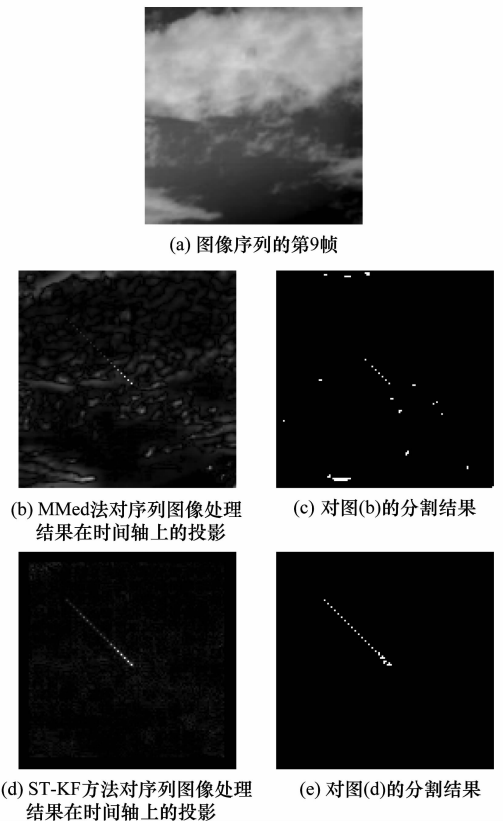


图 9 方法性能比较

同时针对云层背景,采用 ISCR 和 BSF 两个指标从定量地角度对 MMed 和本文两种方法的背景抑制效果进行比较。图 10 给出了 MMed 和本文方法在处理序列图像时具体每帧的参数数值的比较,从结果可以明显看出,所提的 ST-KF 方法的量化指标均高于 MMed 方法。

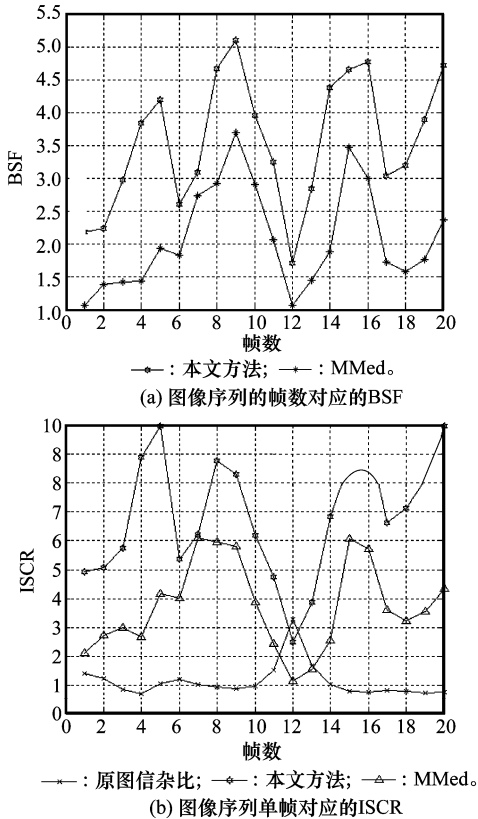


图 10 图像序列比较分析

3 结论

本文提出了一种基于曲面波变换的弱小目标背景抑制新方法,利用其多尺度、多方向和各向异性等特点进行背景抑制,最终实现对目标的检测。基于真实和模拟的红外图像序列的实验效果,验证了本方法对目标点极少的红外弱小目标背景抑制具有较好的效果,并能取得比其他方法更好的结果,在有效抑制图像中背景杂波的同时,更最大限度地保持和增强了目标的位置和强度信息,在视觉效果和客观衡量指标两方面均取得了更优的抑制效果。

参考文献:

[1] Chen J Y, Reed I S. A detection algorithm for optical targets in clutter [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23(1): 46 - 59.
 [2] Larson R E, Peschon J. Dynamic programming approach to trajectory estimation [J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1996, 11(3): 537 - 540.
 [3] Johnston L A, Krishnamuthy V. Performance of a dynamic pro-

gramming track before detect algorithm [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(1): 228 - 242.
 [4] Lin J N, Nie X, Unbehauen R. Two-dimensional LMS adaptive filter incorporating a local-mean estimator for image processing [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems: Analog and Digital Signal Processing*, 1993, 40(7): 417 - 428.
 [5] Huang K, Mao X. Detectability of infrared small targets [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53(3): 208 - 217.
 [6] Li H, Wei Y T, Li L Q, et al. Infrared moving target detection and tracking based on tensor locality preserving projection [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53(2): 77 - 83.
 [7] Deshpande S D, Er M H, Venkateswarlu R, et al. Max-mean and max-median filters for detection of small targets [C] // *Proc. of the Conference on Signal and Data Processing of Small Targets*, 1999: 71 - 83.
 [8] Porat B, Friedlander B. A frequency domain algorithm to multiframe detection and estimation of dim targets [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(4): 398 - 401.
 [9] Davidson G, Griffiths H D. Wavelet detection scheme for small target in sea clutter [J]. *IEEE Electronics Letters*, 2002, 38(19): 1128 - 1130.
 [10] Li L Q, Tang Y Y. Wavelet-Hough transform and its applications to edge and target detections [J]. *International Journal of Wavelets, Multi-Resolution and Information Processing*, 2006, 4(3): 567 - 587.
 [11] Zhang B Y, Zhang T X, Cao Z G, et al. Fast new small target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter [J]. *SPIE Optical Engineering*, 2007, 46(10): 1 - 6.
 [12] Liu R M, Zhi H L. Infrared point target detection with fisher linear discriminant and kernel fisher linear discriminant [J]. *Journal of Infrared Millimeter Terahertz Waves*, 2010, 31(12): 1491 - 1502.
 [13] Bamberger R H, Smith M J T. A filter bank for the directional decomposition of images; theory and design [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1992, 40(4): 882 - 893.
 [14] da Cunha A L, Zhou J P. The nonsubsampling contourlet transform; theory, design, and applications [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089 - 3101.
 [15] Lu Y, Do M N. Multidimensional directional filter banks and surfacelets [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2007, 16(4): 918 - 931.
 [16] 闫敬文, 屈小波. 超小波分析及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. (Yan J W, Qu X B. *Beyond wavelets and its applications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
 [17] 刘德连. 遥感图像的目标检测方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. (Liu D L. *Research on target detection in remote sensing images* [D]. Xi'an: Xidian University, 2008.)
 [18] 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. (Qin H L, Liu S Q, Zhou H X, et al. Background suppression for dim small target with Gabor kernel non-local means [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 737 - 741.)