

文章编号: 0253-2239(2010)10-2812-05

# 基于多尺度截断的弱小目标复杂背景抑制

周慧鑫<sup>1</sup> 秦翰林<sup>1</sup> 赖睿<sup>2</sup> 刘上乾<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071; <sup>2</sup> 西安电子科技大学微电子学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 红外复杂背景抑制是红外告警等系统发现远距离弱小目标的难题之一。提出了一种将奇异值分解与对偶树复小波变换(DTCWT)相结合的多尺度截断复杂背景抑制新方法。首先采用DTCWT对图像进行正变换,获得图像的多尺度和方向细节特征;然后根据目标和背景杂波信号系数在不同尺度之间的差异,对各子带采用奇异值分解进行处理,并利用最大的特征值重构子带;最后将系数调整后的各子带逆变换到图像域,从而将弱小目标和背景杂波分离,达到抑制背景的目的。实验结果表明,该算法可以在很大程度上抑制结构化背景,保存并增强目标信号。

**关键词** 图像处理;背景抑制;对偶树复小波变换;奇异值分解;目标检测

**中图分类号** TN911.7;TN941.2<sup>+</sup>8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2812

## Multiscale Truncation for Dim and Small Target Background Suppression

Zhou Huixin<sup>1</sup> Qin Hanlin<sup>1</sup> Lai Rui<sup>2</sup> Liu Shangqian<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Technology Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)  
(<sup>2</sup> School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** Complex background suppression of infrared dim and small target detection is a key problem for finding long-distance target in infrared warning system. A complex background suppression algorithm based on multiscale truncation, which combines the singular value decomposition with the dual tree complex wavelet transform (DTCWT), is presented. Firstly, DTCWT is adopted to decompose the input infrared image, which extracts multi-scale detail features of images. Then, according to difference between targets and background clutter signals, the singular value decomposition is introduced to process sub-bands, and maximum eigenvalues are utilized to compose the sub-bands. Finally, the image is synthesized by the modified sub-bands, then targets and background details are separated, by which background suppression is realized. Experimental results validate that the presented method could suppress the structured background in some degree, and preserve and enhance the target signal.

**Key words** image processing; background suppression; dual-tree complex wavelet transform; singular value decomposition; target detection

## 1 引言

红外技术具有隐蔽性好、抗干扰能力强和检测精度高等优点,而被广泛地应用于军事领域中。尽早尽快地发现目标是决定未来战争胜利的一个重要因素,但大量的低空背景景物以及远距离目标的“弱小”特点,增加了红外目标检测和跟踪的难度。因此

复杂背景下红外运动目标的检测和跟踪是红外成像制导和红外预警等系统中的一项关键技术难题。为了可靠、稳定且又准确地检测并跟踪这类目标,则必须对图像进行预处理,而高性能的复杂红外背景抑制技术又是其中重要而关键的一项预处理技术。

近二十多年来,红外图像背景抑制技术得到较

收稿日期: 2010-06-17; 收到修改稿日期: 2010-08-06

基金项目: 国家部委科技项目(7130721.41101050104)、教育部科学技术研究重点项目(108114)、国家自然科学基金(60902080)和中央高校基本科研业务费专项资金(72104810)资助课题。

作者简介: 周慧鑫(1975—),男,博士,副教授,主要从事红外成像及图像处理、红外对抗等方面的研究。

E-mail: hxzhou@mail.xidian.edu.cn

大的发展,主要采用滤波法<sup>[1~6]</sup>。但这类滤波方法不能完全平滑背景边缘,特别是结构化的复杂背景,从而导致检测概率的降低和虚警概率的增大。在这种情况下,为了使有用的目标特征被保留并得到有效增强,则必须要对结构化背景实行自适应的抑制。

为此,本文提出了一种基于多尺度截断的红外弱小目标背景抑制方法,该算法将奇异值分解与对偶树复小波变换相结合,以平滑掉结构化背景,增强其突变部分,即目标信号。基于真实红外图像的实验结果,验证了该算法可有效地抑制图像中的结构化背景杂波,突出目标图像,提高图像的信杂比。

## 2 基于多尺度截断的弱小目标背景抑制

### 2.1 对偶树复小波变换

对偶树复小波变换(DTCWT)<sup>[7]</sup>是将传统小波扩展到复数域,其所构造出的小波不仅保持了传统小波良好的多分辨率、局部化和临界采样等特性,而且更具有优良的平移不变性、良好的方向选择性、可精确重构、有限的冗余度以及计算效率高等特点。图 1 给出了 DTCWT 的分解过程示意图,其包含两棵平行的小波树 Tree-A 和 Tree-B。

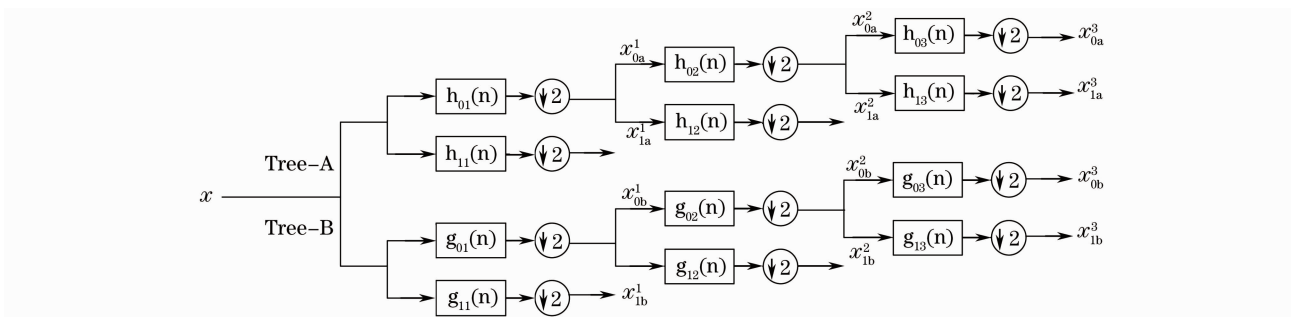


图 1 对偶树复小波变换分解过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of signal analysis of DTCWT

为保证 DTCWT 的方向选择性,每一尺度被分解为  $\pm 15^\circ, \pm 45^\circ$  和  $\pm 75^\circ$  共 6 个复系数子带。在 Tree-A 和 Tree-B 中,  $h_0(n)$  和  $h_1(n)$ ,  $g_0(n)$  和  $g_1(n)$  分别为共扼正交的滤波器对,其对应的尺度函数和小波函数分别为  $\varphi_h(t), \psi_h(t), \varphi_g(t), \psi_g(t)$ , 其中  $\psi_g(t)$  是  $\psi_h(t)$  的希尔伯特变换。设  $H_0(\omega)$  与  $G_0(\omega)$  为  $h_0(n)$  和  $g_0(n)$  的傅里叶变换,满足以下关系:

$$G_0(\omega) = H_0(\omega) \exp[-j(\omega/2)] \quad |\omega| < \pi, \quad (1)$$

则它们所对应的小波互为希尔伯特变换为

$$\psi_g(t) = H\{\psi_h(t)\}. \quad (2)$$

令  $g_0(n)$  与  $h_0(n)$  间的延迟为一个采样间隔,以确保 Tree-B 中该层的下采样取到 Tree-A 中因隔点采样而舍弃的采样值。对于图 1 的输入信号  $x$ ,变换后第  $i$  层的复系数为

$$x^i = x_{1a}^i + jx_{1b}^i. \quad (3)$$

Tree-A 和 Tree-B 采用可完全重构的对偶正交滤波器来实现各自的逆变换。为确保图像的平移不变性,在重构的最后一步,对输出结果进行平均处理。DTCWT 的重构过程示意图如图 2 所示。

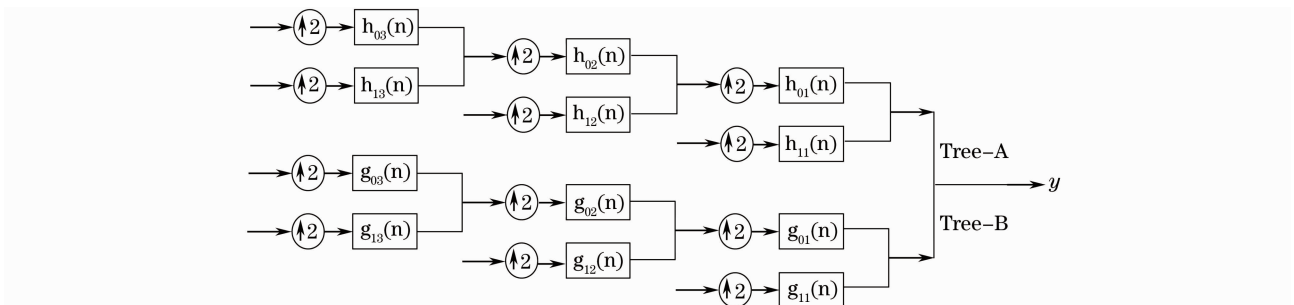


图 2 对偶树复小波变换重构过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of signal synthesis of DTCWT

### 2.2 奇异值分解(SVD)

假设经 DTCWT 后各个子带构成的系数矩阵  $A$  是  $M \times N$  的矩阵,且  $A$  的秩为  $r, r \leq \min(M, N)$ ,

则存在正交(或酉)矩阵  $U_{M \times M}$  和矩阵  $V_{N \times N}$ ,使得  $A$  的 SVD 可表示为<sup>[8]</sup>

$$A_{M \times N} = U_{M \times M} \Gamma_{M \times N} V_{N \times N}, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{\Gamma}_{M \times N} = \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$ , 且有  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$ 。  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$  连同  $\sigma_{r+1} = \sigma_{r+2} = \dots = \sigma_n = 0$  一起是  $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$  并且也是  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  的非零特征值的全体, 并称作矩阵  $\mathbf{A}$  的奇异值。  $\mathbf{U}_{M \times M} = [U_1, U_2, \dots, U_M]$  称为  $\mathbf{A}$  的左奇异矩阵, 由  $M$  阶列向量  $\mathbf{U}_i = [u_{1i}, u_{2i}, \dots, u_{Mi}]^T (i = 1, 2, \dots, M)$  构成,  $\mathbf{U}_i$  又称为  $\mathbf{A}$  的左奇异向量。  $\mathbf{V}_{N \times N} = [V_1, V_2, \dots, V_N]$  称为  $\mathbf{A}$  的右奇异矩阵, 由  $N$  阶列向量  $\mathbf{V}_i = [v_{1i}, v_{2i}, \dots, v_{Ni}]^T (i = 1, 2, \dots, N)$  构成,  $\mathbf{V}_i$  又称为  $\mathbf{A}$  的右奇异向量。  $\mathbf{U}_i$  和  $\mathbf{V}_i$  分别是  $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$  和  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  对应于非零特征值  $\sigma_i$  的特征向量,  $i = 1, 2, \dots, r$ 。 由此(4)式可改写为向量表达式为

$$\mathbf{A}_{M \times N} = \sum_{i=1}^r \sigma_i \mathbf{U}_i \mathbf{V}_i^T. \quad (5)$$

(5)式可以理解为系数矩阵的零奇异值没有携带矩阵重构时所需要的重要信息, 且接近于零的奇异值也只含有少量矩阵重构信息, 因此重构系数矩阵时可以将其忽略, 只利用携带其信息的非零奇异值进行重构即可。 即有

$$\hat{\mathbf{A}}_{m \times n} = \sum_{i=1}^V \sigma_i \mathbf{U}_i \mathbf{V}_i^T, \quad (6)$$

式中  $V (V \leq r)$  表示重构  $\mathbf{A}$  时所需的奇异值数目。 (6) 式为矩阵  $\mathbf{A}$  的截断奇异值分解<sup>[8]</sup>。

### 2.3 基于多尺度截断的复杂背景抑制算法

经过 DTCWT 后图像的各尺度、各方向子带系数的大量细节信息体现在系数矩阵的两个正交矩阵中。 将这个概念引入到红外弱小目标图像中, 即在含有弱小目标的子带系数中, 大量关于弱小目标的信息主要体现在前几个最大的奇异值所对应的左、右奇异向量中。 因此, 可以通过 SVD, 将分解得到的各方向和尺度系数在其奇异值分解左奇异矩阵  $\mathbf{U}$  上作正交投影, 就可以将包含弱小目标信息的矩阵分解到一系列奇异值和奇异值矢量对应的子空间中。 由于经过 DTCWT 后的各子带系数稀疏性较强, 因此可通过选取最大特征值重构子带系数, 可得到背景图像。 然后通过与原图像进行相减操作, 即可得抑制背景后的目标图像。

该算法的具体执行步骤如下:

1) 对原始图像进行 DTCWT (如图 1 所示), 得到图像的各尺度、各方向子带系数矩阵。

2) 对图像的各尺度、各方向子带系数矩阵进行 SVD [即(4)式], 即将分解得到的各方向和尺度系数矩阵在其 SVD 左奇异矩阵  $\mathbf{U}$  上作正交投影。

3) 选取最大的奇异值  $\sigma_i$  (即系数矩阵的最大特征值) 所对应的左、右奇异向量重构子带系数矩阵 [即截断 SVD(6)式的反操作]。

4) 利用重构子带系数矩阵经 DTCWT (如图 2 所示), 得到背景图像。

5) 将原图像与得到的背景图像进行相减操作, 最终得到抑制背景后的目标图像。

由 DTCWT 分解所得到的子带系数对应于不同尺度上的细节分量, 分解后各子带上的目标和背景信号强度被充分的表达。 再利用 SVD 后不同特征值数目调整来估计小波系数而不是灰度值, 这样不仅能够保留背景边缘, 去除目标信号, 同时还能保留背景的细节信息, 降低由背景细节引起的虚警概率。 除此之外, 该算法不需要加判定条件来决定采用的特征值数目, 从而避免了奇异值数目的选取, 同时也减少了该方法的计算复杂度。

## 3 实验结果及分析

给出了两组采用基于多尺度截断 (或称 SVD-DTCWT) 的复杂背景抑制方法对单帧图像中的弱小目标背景进行抑制处理的实验结果。 测试原始图像为  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ , 256 级灰度, 对比度小于等于 7%, 信噪比小于 2。

### 3.1 性能指标参数

实验中采用信噪比增益和背景抑制因子两个性能指标参数来衡量背景抑制算法的性能。

1) 信噪比增益 ( $f_{\text{ISCR}}$ ) 用于衡量背景抑制方法对背景杂波的抑制程度。 定义为

$$f_{\text{ISCR}} = f_{\text{SCR, out}} / f_{\text{SCR, in}}, \quad (7)$$

式中  $f_{\text{SCR, in}}$  和  $f_{\text{SCR, out}}$  分别表示输入图像和输出图像的信噪比。 信噪比定义为

$$f_{\text{SCR}} = |G_t - G_b| / \sigma_{bc}, \quad (8)$$

其中  $G_t$  和  $G_b$  分别表示目标灰度均值和目标周围区域内灰度值的均值,  $\sigma_{bc}$  表示背景加杂波的均方差。 信噪比表现了目标邻域内目标灰度值和背景杂波的灰度差。

2) 背景抑制因子 ( $f_{\text{BSF}}$ ) 表示处理前后目标周围邻域内背景的平坦度。 背景抑制因子越大, 表明该方法处理后目标周围的背景越平坦, 抑制效果越好。 其定义为

$$f_{\text{BSF}} = \sigma_{\text{in}} / \sigma_{\text{out}}, \quad (9)$$

式中  $\sigma_{\text{in}}$  和  $\sigma_{\text{out}}$  分别表示原始图像的均方差和处理后图像的均方差。

### 3.2 实验结果

实验中设置分解层数  $N=3$ 。为了验证所提方法的稳健性,分别随机从两组包含弱小目标的红外图像序列中选择了一帧图像进行实验验证。实验结果如图 3 所示。图 3(a1)和(a2)分别为两组序列中的一帧原始图像(目标用白色方框标示),前者为天空背景,后者为地面背景。图中目标仅占一个或几个像元,呈现为点状或斑点状,无形状与结构特征,

同时和目标周围的背景相比,目标的强度较弱,而且目标更是分别被强烈的云层、地势起伏和地面路网所干扰,即呈现“弱小”特性。图 3(b1)和(b2)分别是采用二维最小均方滤波法(TDLMS)<sup>[1]</sup>进行背景抑制后的结果,该算法执行中采用  $5 \times 5$  邻域。图 3(c1)和(c2)分别为本文所提 SVD-DTCWT 方法的处理结果。图 4 给出了对应方法的三维显示图。处理前后评价参数数值如表 1 所示。

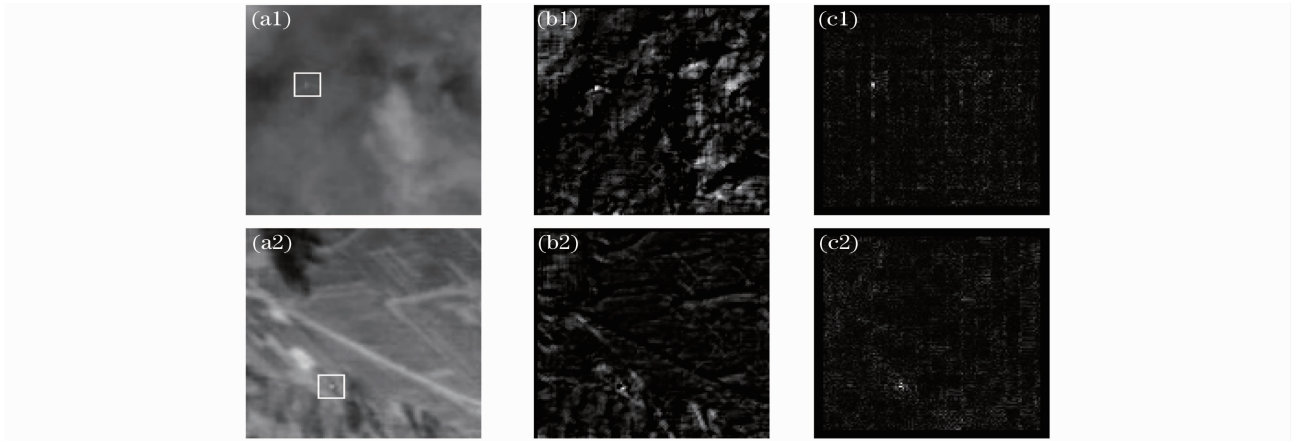


图 3 实验结果。(a1)和(a2)原始图像,(b1)和(b2)TDLMS 法处理结果,(c1)和(c2)SVD-DTCWT 法处理结果

Fig. 3 Experimental results. (a1) and (a2) original images, (b1) and (b2) results of TDLMS, (c1) and (c2) results of SVD-DTCWT

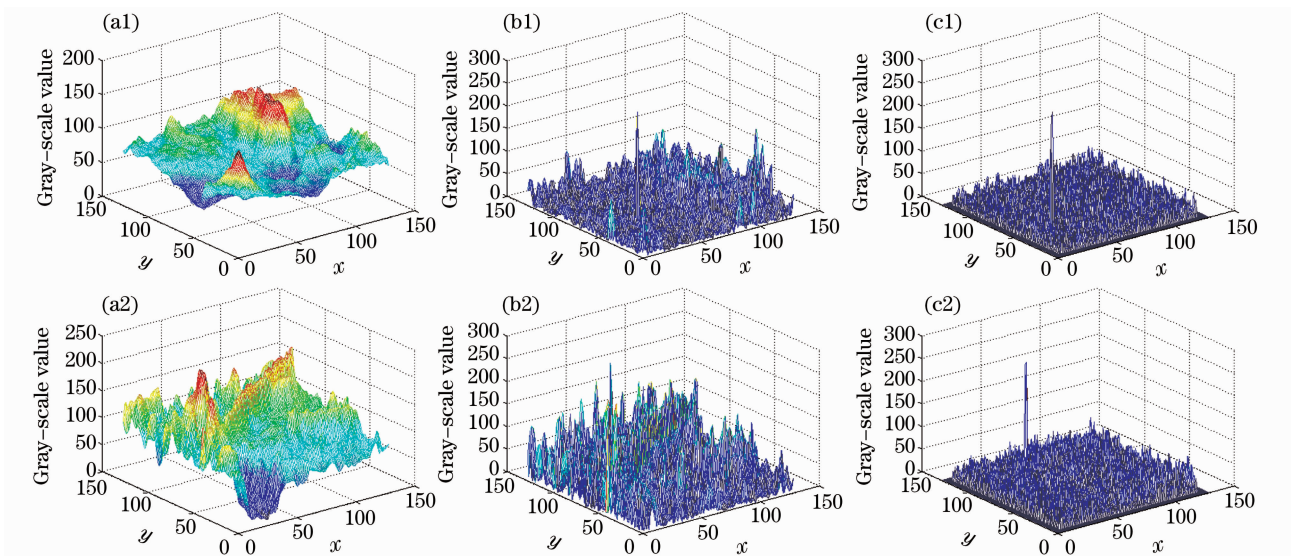


图 4 图 3 对应的三维显示图。(a1)和(a2)原始图像,(b1)和(b2)TDLMS 结果,(c1)和(c2)SVD-DTCWT 结果

Fig. 4 Corresponding 3D images of Fig. 3. (a1) and (a2) original images, (b1) and (b2) results of TDLMS, (c1) and (c2) results of SVD-DTCWT

表 1 算法性能比较

Table 1 Performance comparison of different methods

Original image		TDLMS			SVD-DTCWT		
Index	$f_{SCR,in}$	$f_{ISCR}$	$f_{BSF}$	Time cost /s	$f_{ISCR}$	$f_{BSF}$	Time cost /s
a1	1.58	1.42	8.14	0.35	8.19	9.39	0.14
a2	0.96	1.55	2.57	0.36	2.61	3.48	0.13

由结果可以看出,经 TDLMS 方法处理后,目标虽被增强,但云层的边缘、地形起伏和地面道路的边缘也得到加强,没能被较好地抑制,其结果必然会影响到后续的检测、跟踪和告警等处理环节。而采用 SVD-DTCWT 方法处理后,在很好地保存并增强弱小目标信号的同时,复杂背景也得到了较好地抑制。特别对目标受到大面积云层干扰的情况,不但平滑了云层,而且将云层和地形的边缘也被平滑掉,使得图像整体对比度和信噪比得到了很大的改善。其运算速度和 TDLMS 法相近,但图像信噪比增益最高可达 8.19,背景抑制因子最高为 9.39。两组实验结果显示,本文算法对  $f_{SCR} > 1$  的目标图像获得的效果更好。

## 4 结 论

针对红外弱小目标检测中的复杂背景(特别是结构化背景)抑制问题,利用 DTCWT 具有的平移不变性、好的方向选择性、可完全重构、有限的冗余度和计算简单等优点,将其与奇异值截断理论相结合,提出了一种新的弱小目标背景抑制方法。利用真实红外序列图像进行实验,结果验证了该方法抑制结构化背景的性能。该算法在提高整个图像的信噪比和背景抑制方面的性能都明显优于二维最小均

方滤波法。为后续有效地对目标实施检测提供了一个很好的基础,具有一定的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 J. N. Lin, X. Nie, R. Unbehauen. Two-dimensional LMS adaptive filter incorporating a local-mean estimator for image processing[J]. *IEEE T. Circ. Systoid, II: Analog Digital Signal Processing*, 1993, **40**(7): 417~428
- 2 S. D. Deshpande, M. H. Er, R. Venkateswarlu *et al.*. Max-mean and max-median filters for detection of small targets[C]. *SPIE*, 1999, **3809**: 74~83
- 3 D. S. K. Chan, D. A. Langan, D. A. Stayer. Spatical processing techniques for the detection of small targets in IR clutter[C]. *SPIE*, 1990, **1305**: 53~62
- 4 Tom V. T., Peli T. Morphology-based algorithm for point target detection in infrared backgrounds [C]. *SPIE*, 1993, **1954**: 25~32
- 5 E. Ercelebi, S. Koc. Lifting-based wavelet domain adaptive wiener filter for image enhancement [J]. *Vision, IEE Proceedings, Image and Signal Processing*, 2006, **153**(1): 31~36
- 6 Biyin Zhang, Tianxu Zhang, Zhiguo Cao *et al.*. Fast new small target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(10): 106401-1~6
- 7 Ivan W. Selesnick, Richard G. Baraniuk, Nick G. Kingsbury. The dual-tree complex wavelet transform[J]. *IEEE Signal Proc. Mag.*, 2005, **22**(6): 123~151
- 8 Zhang Xiada. *Matrix Analysis and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 341~400  
张贤达. *矩阵分析与应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 341~400