

文章编号:1004-4213(2010)09-1672-6

# 基于对偶树复小波变换的红外弱小目标背景抑制\*

张翔<sup>a</sup>, 张建奇<sup>a</sup>, 秦翰林<sup>a</sup>, 刘菁<sup>b</sup>

(西安电子科技大学 a. 技术物理学院; b. 通讯工程学院, 西安 710071)

**摘要:**为解决结构化背景的抑制,利用对偶树复小波良好的方向选择性、平移不变性和可精确重构的特点,提出了一种基于对偶树复小波变换的红外弱小目标背景抑制方法.首先利用对偶树复小波变换对图像进行分解提取多尺度细节特征,然后采用最大中值滤波对各分解层的小波系数进行非线性地调整来改变目标特征的强度,重构获得估计的背景图像,最终从原图中减去所估计的背景图像实现背景抑制.基于真实的红外图像序列进行实验.结果表明:与二维最小均方误差法相比,该方法从主观视觉和数值指标都具有良好的抑制效果.

**关键词:**红外图像;背景抑制;对偶树复小波;最大中值滤波

**中图分类号:** TN911.73

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103909.1672

## 0 引言

结构化背景下低信噪比红外弱小目标的检测与跟踪是精确制导和远距离探测系统的关键技术之一<sup>[1]</sup>.由于作用距离远目标在成像平面上一般只占几个像素,同时由于系统噪声和背景杂波干扰较强,目标与背景的对比度较低,目标信号常常淹没在背景中.为了能够可靠、稳定、准确地检测并跟踪这类目标,必须对图像进行预处理,因此研究高性能的背景抑制技术就显得尤为重要.

近年来背景抑制技术得到了较大发展,主要有空域滤波<sup>[2]</sup>、时域滤波<sup>[3]</sup>、频域滤波<sup>[4]</sup>和高阶累积量<sup>[5]</sup>等方法.在图像信噪比较高的情况下,这些方法效果良好;但若背景表现为复杂的结构化背景,图像信噪比较低时,在背景的起伏边缘就会出现较多的虚警从而导致检测概率降低.为解决这个问题,一些人利用小波变换来抑制背景杂波取得了一定的成果<sup>[6-7]</sup>.小波变换在时频两域都具有表征信号局部特征的能力<sup>[8]</sup>,是一种窗口固定,但时间、频率都可改变的分析方法.这使得小波具有信号的自适应性,这些特征是上述方法所不具备的,因此利用小波变换来抑制背景杂波是很好的选择.然而,传统的小波变换存在一些缺陷:一是不具备平移不变性,二是有限的方向选择性,这使得分解后的子带不能充分表达背景细节,虚警增加,极大地限制了算法的性能.

为此,本文提出一种基于对偶树复小波变换

(Dual-Tree Complex Wavelet Transform, DT-CWT)的弱小目标背景抑制方法.将传统小波扩展到复数域,这样构造出的小波不仅保持了传统小波的优良特性,而且具有良好的方向选择性、平移不变性、可精确重构的特点.利用 DT-CWT 对图像进行分解得到不同尺度下的分解子带,DT-CWT 具有的新特性确保了分解后各子带上的目标信号和背景细节能够充分地表达;采用最大中值滤波非线性的调整来估计小波系数,重构图像获得估计的背景图像,最终从原图中减去背景图像实现弱小目标背景抑制.实验结果表明,本文方法能有效地抑制结构化背景,保持并增强目标信号,提高信噪比,相比二维最小均方误差方法<sup>[9]</sup>,本文方法对红外弱小目标复杂背景无论从主观视觉和数值指标都具有良好的抑制效果.

## 1 基于对偶树复小波变换和最大中值滤波的弱小目标背景抑制

### 1.1 对偶数复小波变换

对偶树复小波变换是 Kingsbury 提出的一种新的小波变换<sup>[10-11]</sup>.其将传统小波扩展到复数域,这样构造出的小波不仅保持了传统小波良好的时频局部化特性,更具有 1) 优良的平移不变性; 2) 良好的方向选择性; 3) 可精确重构; 4) 有限的冗余度; 5) 计算效率高.图 1 给出了 DT-CWT 的分解图,它包含两棵平行的小波树 Tree-A、Tree-B.

\* 国家自然科学基金(60477038)资助

Tel: 029-88204271

Email: zh\_xiang11@163.com

收稿日期: 2009-12-01

修回日期: 2009-02-16

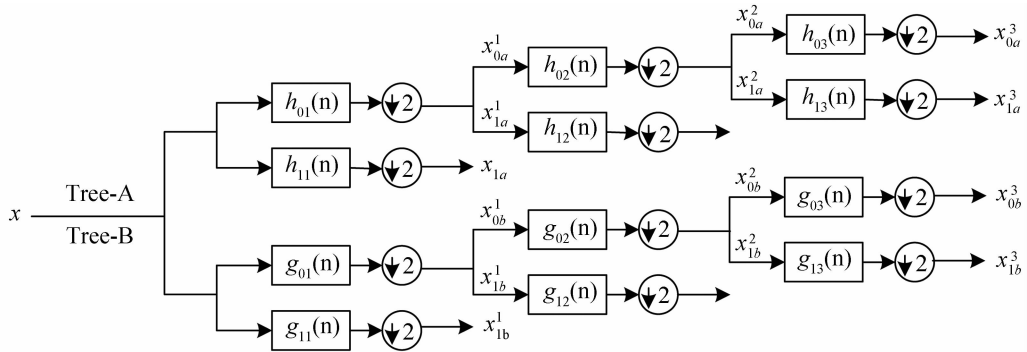


图 1 对偶树复小波分解  
Fig. 1 Decomposition of DT-CWT

本文将 DT-CWT 应用于复杂背景下弱小目标的背景抑制. 利用 DT-CWT 的新特性对图像进行分解提取图像的多尺度细节特征, 分解后各个子带上的目标信号和背景细节得到了充分地表达. 为保证 DT-CWT 的方向选择性, 将每一尺度分解为  $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$  的 6 个复系数子带. Tree-A、Tree-B 中  $h_0(n)$  和  $h_1(n)$ 、 $g_0(n)$  和  $g_1(n)$  分别为共轭正交的滤波器对, 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,  $H_0(\omega)$  与  $G_0(\omega)$  为  $h_0(n)$  和  $g_0(n)$  的傅里叶变换, 满足:

$$G_0(\omega) = H_0(\omega) e^{-j(\omega/2)} \quad |\omega| < \pi \quad (1)$$

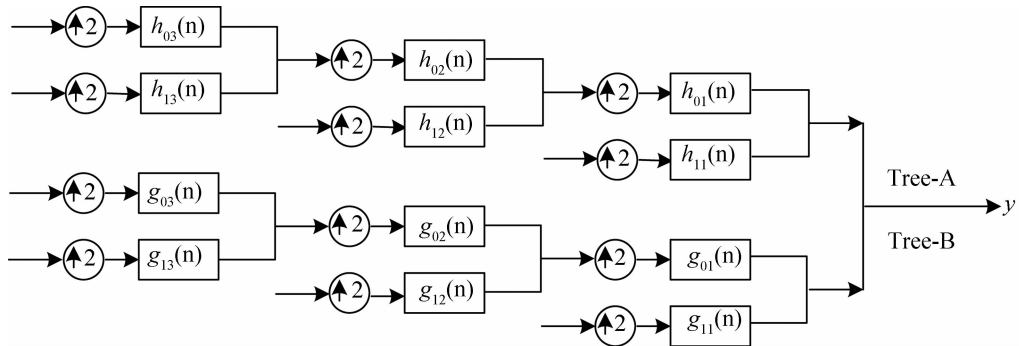


图 2 对偶树复小波重构  
Fig. 2 Reconstruction of DT-CWT

由 DT-CWT 分解得到的小波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信号被充分地表达; 再利用最大中值滤波器非线性的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, 剔除目标信号, 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.

1.2 基于最大中值滤波的小波系数调整

最大中值滤波器 (Maximum Median Filter, MMF) [12] 对经过滤波窗口中心像素点所有可能的直线上的像素点进行采样, 并对每一直线上的采样值做顺序滤波. 相比传统的中值滤波、时域滤波等方法, 最大中值滤波可以很好地保持观测空间维数低的特征量, 避免了因维数变化导致的滤波性能降低,

则它们所对应的小波对为希尔伯特变换  $\Psi_g(t) = H\{\Psi_h(t)\}$  (2)

令  $g_0(n)$  与  $h_0(n)$  间的延迟为一个采样值的间隔, 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

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

对 Tree-A、Tree-B 使用具有完全重构性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, 在重构图像的最后, 对输出结果进行了平均. 图 2 给出了 DT-CWT 的重构过程. 构造过程见参考文献 [10-11].

可以在剔除目标的同时很好地保留边缘信息.

最大中值滤波一般只对灰度域进行操作, 本文将其应用于小波域, 即利用 MMF 对分解后的小波系数进行非线性调整, 调整后的小波系数能够保留背景的细节特征, 特别对于复杂的结构化背景, MMF 能够很好地保存强边缘信息, 为后续的目标检测打下良好的基础. 最大中值滤波器定义为

$$y(m, n) = \max[z_1, z_2, z_3, z_4] \quad (4)$$

式中

$$z_1 = \text{median}(x(m, n-N), \dots, x(m, n), \dots, x(m, n+N)) \quad (5)$$

$$z_2 = \text{median}(x(m-N, n), \dots, x(m, n), \dots, x(m+N, n)) \quad (6)$$

$$z_3 = \text{median}(x(m+N, n-N), \dots, x(m, n), \dots, x(m-N, n+N)) \quad (7)$$

$$z_4 = \text{median}(x(m-N, n-N), \dots, x(m, n), \dots, x(m+N, n+N)) \quad (8)$$

利用 DT-CWT 对经最大中值滤波器处理后的图像重构获得估计的背景图像,再将其与原始图像相减得到目标图像,实现弱小目标背景抑制.图 3 给出了 MMF 的实现示意图,对于大小为  $2N+1$  的窗口对其中  $8N+1$  个点进行采样,本文所使用的窗口大小为  $5 \times 5$  窗口.

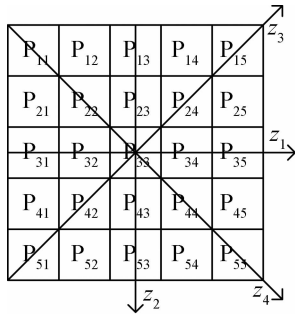


图 3 最大中值滤波器实现示意图  
Fig. 3 Implementation of the Max-Median filter

### 1.3 算法流程

基于对偶树复小波变换的弱小目标背景抑制方法主要流程为:

- 1) 使用 DT-CWT 对红外图像序列进行分解得到不同尺度下的分解子带;
- 2) 基于最大中值滤波对各个子带系数进行非线性地调整,获得所要估计的背景多尺度子带系数;
- 3) 利用 DT-CWT 重构得到估计的背景图像;
- 4) 将背景图像与原始图像相减得到目标信号图像,实现弱小目标背景抑制.

### 1.4 目标分割与检测

经本文方法处理,目标明显增强,结构化背景得到了很好地抑制.目标图像被认为服从高斯分布,根据图像的统计特征,使用全局门限法对目标进行分割得到阈值  $T$

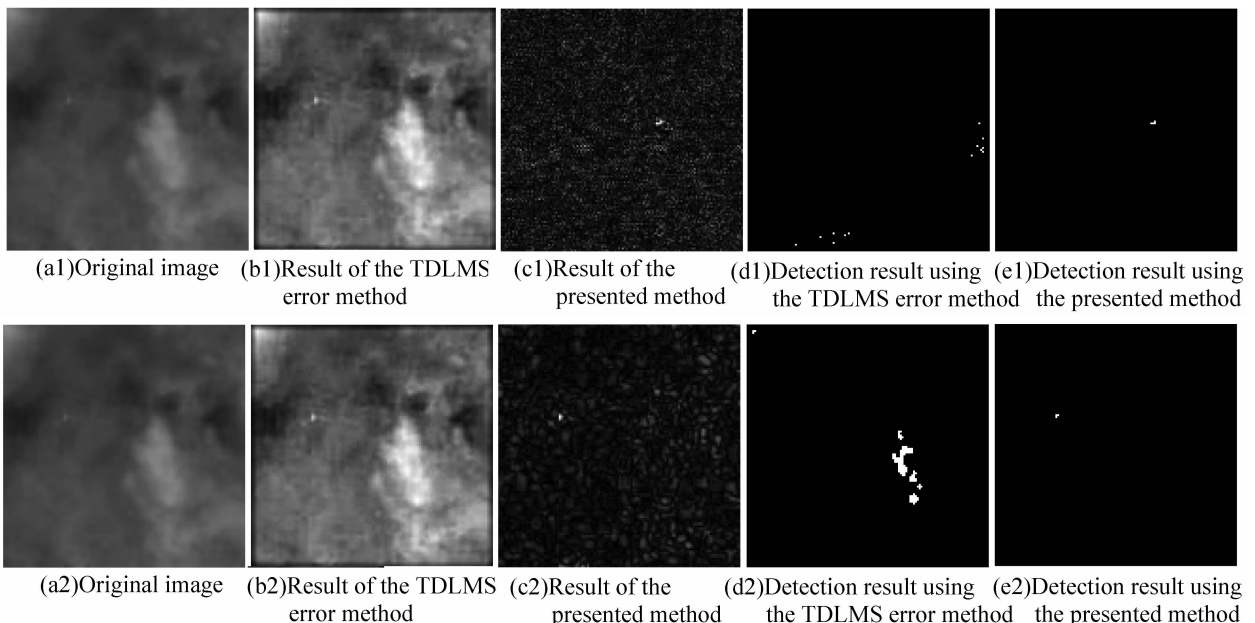
$$T = M + k \cdot \sigma \quad (9)$$

式中  $M$  为背景抑制后图像的均值,  $\sigma$  为背景抑制后图像的标准差,  $k$  为阈值系数.通过综合运用本文方法和全局门限法排除了大量非目标点,得到包含弱小目标和伪目标在内的候选目标点图像.对候选点进行多帧能量累加,若该点在下一帧图像同一位置的某一领域内仍然出现,则予以保留,否则剔除.经过多帧序列的处理,最终检测出真正的目标信号.

## 2 实验结果分析

选取三组有代表性的单目标红外图像序列进行验证,图像大小为  $128 \times 128$ ,信噪比为 2 左右.图 4 给出了实验结果,子图中的数字“1、2、3”代表实验一、二、三; a、b、c、d、e 分别对应图像序列中的一幅原图、二维最小均方 (Two-dimensional Least Mean Squared, TDLMS) 误差法背景抑制的结果、本文方法背景抑制的结果、经最小均方误差法背景抑制后使用全局门限法检测的结果、经本文方法背景抑制后使用全局门限法检测的结果.

如图 4,实验所用的原始图像(图 4(a1)和(a2))目标仅占一个或几个像素,呈现为点状,无形状和结构特征,且强度较弱,整幅图像信噪比较低,受背景杂波干扰强烈;特别对于实验二,存在大片结构化背景,目标更是被强烈的结构化云层所干扰.



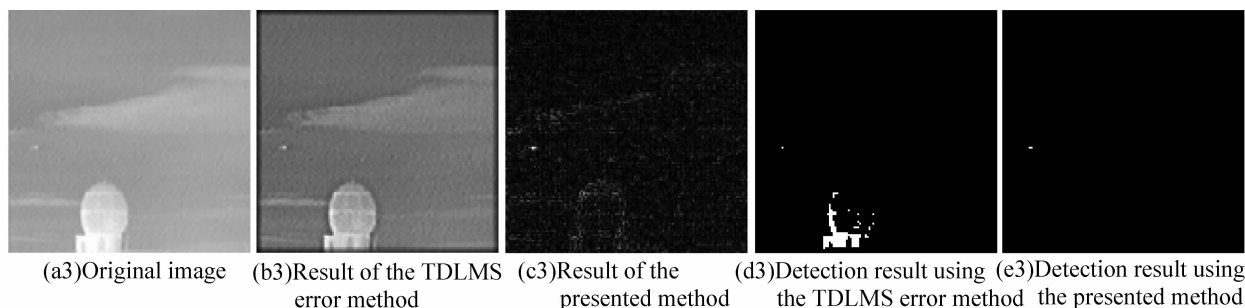


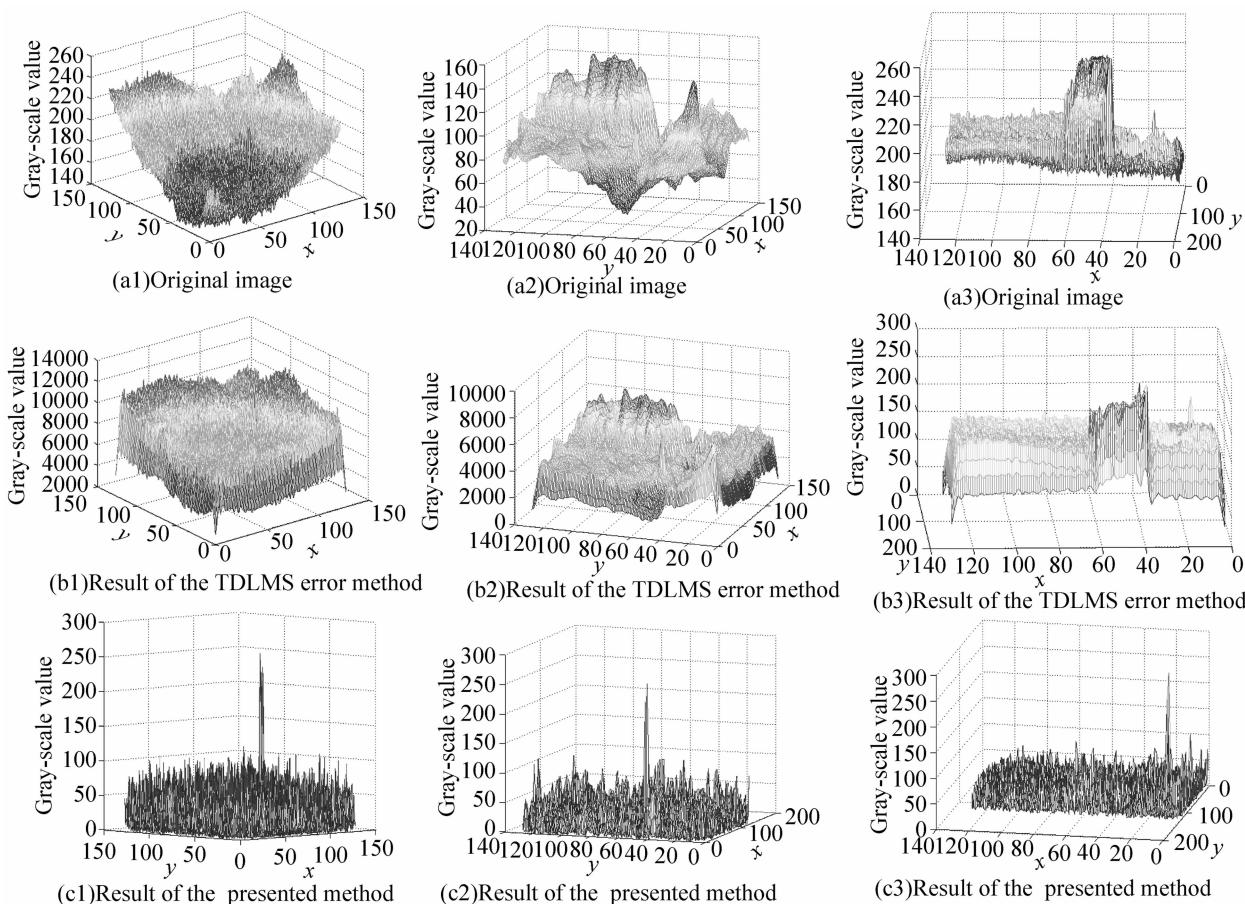
图 4 实验结果  
Fig. 4 Experimental results

图 4(b)和(c)给出了两种方法背景抑制的结果.如图 4(b),采用二维最小均方误差法处理后,尽管目标信号得到了一定地增强但背景也被同时增强;特别对于实验二(图 4(b2)),一些局部背景虽然得到了抑制,但同时云层的边缘也被加强,尤其是图像右侧中央的大面积强云不但未被抑制,其强度反而被大大加强,抑制效果不理想,这必然影响到后续的目标检测.而经本文方法处理后(图 4(c)),目标信号大大增强,同时结构化背景也得到很好的抑制;对于实验二(图 4(c2)),本文方法不但平滑了云层内部,云层的边缘也被平滑,背景强度被削弱,图像整体对比度得到了很大改善.

使用全局门限法检测的结果进一步验证了本文方法的优越性.如图 4(d),经二维最小均方误差法背景抑制后检测的结果显示,目标并未检出,并且在

强杂波处出现了大量虚警;尤其对于实验二(图 4(d2)),受右侧中央大面积强云的干扰,虚警大大增加,目标信号淹没在结构化背景中.而经本文方法背景抑制后检测的结果显示(图 4(e)),两组实验的目标均被准确检出且没有虚警产生;实验二中的强云也被很好地抑制(图 4(e2)).

图 5 给出了对应图 4 各幅图像的三维图.对比两种方法背景抑制的结果(图 5(b1)与 5(c1),5(b2)与 5(c2))可以看出,二维最小均方误差法对目标信号有一定地增强但同时背景信号也被增强(图 5(b1)、5(b2));而本文方法在大大加强目标信号的同时很好地抑制了背景信号(图 5(c1)、5(c2)).目标检测结果显示了本文方法检出的是目标信号且没有虚警产生(图 5(e1)、5(e2)).



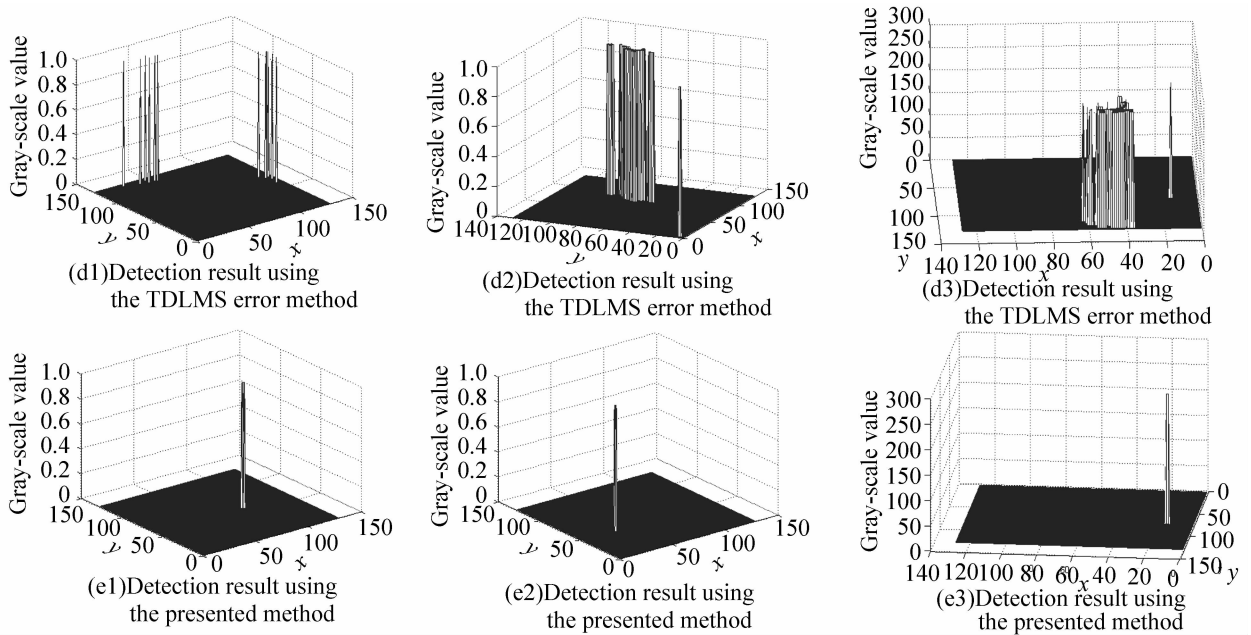


图5 实验结果三维图

Fig. 5 Three-dimensional graphs of experimental results

实验一、二为天空背景,目标主要受到云层的干扰,为了进一步验证本文方法的鲁棒性进行了实验三(图4(a3)),实验三为空地背景,目标同时受到了云层和地面建筑物的干扰.从背景抑制的结果(图4(c3))可以看出本文方法依然能够有效抑制强干扰,突出目标信号,效果明显好于二维最小均方误差法(图4(b3)).

表1给出了两种方法处理后评价参数数值.可以看出,采用二维最小均方误差法处理后对于三组实验图像信噪比增益和图像背景抑制因子均为3倍左右;而采用本文方法处理后,三组实验的信噪比增益和背景抑制因子均达4倍以上,表现出良好的性能.

表1 两种方法性能比较

Table 1 Performance comparison of two methods

Original image		Results of the TDLMS		The proposed method in the paper	
No.	SNR <sub>m</sub>	ISNR	BSF	ISNR	BSF
a1	2.13	2.23	3.08	4.78	4.16
a2	1.95	2.95	3.27	4.12	4.77
a3	2.98	2.64	3.12	4.95	4.43

本文方法对于红外弱小目标复杂背景无论从主观视觉和数值指标都具有良好抑制效果,通过实验得到了充分地验证.

### 3 结论

本文给出了一种针对结构化背景下的红外弱小目标背景抑制方法.主要做了两项工作:一是利用DT-CWT的新特性对图像进行分解,确保了分解后各子带上的目标信号和背景细节能够充分表达;二

是将最大中值滤波应用于小波域,对子带系数进行非线性地调整,在剔除目标信号的同时很好地保留了背景的细节信息.实验结果表明,该方法能够有效地抑制结构化背景,保持并增强目标信号,提高信噪比,具有一定的应用价值.

### 参考文献

- [1] LIU Wen, LIU Zhao-hui, XIONG Ren-sheng. A method to detect IR dim and small objects based on window[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 618-620.  
刘文,刘朝晖,熊仁生.一种利用窗口结构提取红外弱小目标的方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 618-620.
- [2] CHAN D S K, LANGAN D A, STAYER D A. Spatial processing techniques for the detection of small targets in IR clutter[C]. *SPIE*, 1990, **1305**: 53-62.
- [3] HOU Xiao-hui, HU Fang-ming. A new method of small target detection in infrared image[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(4): 389-391.  
侯晓晖,胡方明.基于红外弱小目标门限阈值检测的新方法[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(4): 389-391.
- [4] 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.
- [5] ZOU Yong-xing, ZHOU Ren-kui. Detection and recognition of low velocity body signal based on high order cumulant [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1738-1741.  
邹永星,周仁魁.一种基于高阶累积量的生命体低速运动信号检测和识别方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1738-1741.
- [6] DAVIDSON G, GRIFFITHS H D. Wavelet detection scheme for small target in sea clutter [J]. *IEEE Electron Lett*, 2002, **38**(19): 1128-1130.
- [7] WEI Y, SHI Z L, YU H B. Wavelet analysis based detection algorithm for infrared image small target in background of sea and sky [J]. *IEEE Image and Signal Processing and Analysis*, 2003, **1**(18-20): 23-28.
- [8] ZHANG Min, HE Xiao-hai, TAO Qing-chuan, et al. A depth estimation restoration algorithm based on wavelet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1754-1758.

- 张敏,何小海,陶青川,等. 基于小波变换的深度预测复原算法研究[J]. 光子学报,2007,**36**(9):1754-1758.
- [9] LIN J N, NIE X, UNBEHAUEN R. Two-dimensional LMS adaptive filter incorporating a local-mean estimator for image processing[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems: Analog and Digital Signal Processing*, 1993,**40**(7):417-428.
- [10] YU R Y. Theory of dual-tree complex wavelets[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008,**56**(9):4263-4273.
- [11] CHEN Zhi-xin , XU Jin-wu , YANG De-bin . Design and application of Hilbert transform pairs of wavelet bases [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing* , 2008,**30**(4):446-451.  
陈志新,徐金梧,杨德斌. 互为 Hilbert 变换对的正交小波构造及其应用[J]. 北京科技大学学报,2008,**30**(4):446-451.
- [12] DESHPANDE S D, ER M H, RONDA V. Max-Mean and Max-Median filters for detection of small-targets [C]. *SPIE*, 1999,**3809**:74-83.

## Dual-tree Complex Wavelet Transform for Infrared Dim Target Background Suppression

ZHANG Xiang<sup>a</sup>, ZHANG Jian-qi<sup>a</sup>, QIN Han-lin<sup>a</sup>, LIU Jing<sup>b</sup>

(a. School of Technical Physics; b. School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to solve the structured background suppression which is a difficult problem for infrared dim target detection technique, a method of infrared dim target background suppression based on DT-CWT is presented, considering the shift invariance, directional selectivity and perfect reconstruction of dual-tree complex wavelet transform (DT-CWT). Firstly, the image is decomposed by DT-CWT to extract the multi-scale detail characteristics, then wavelet coefficients of each decomposed level is adjusted nonlinear with a Max-Median filter to change the target strength, and the estimated background image is obtained by wavelet reconstruction. The result image is obtained by subtracting the background image from the original image. Based on the real IR image sequences, the experimental results demonstrate that compared with the two-dimensional least mean square error method, the presented method has good effects both in the subjective vision and numerical indices.

**Key words:** Infrared image; Background suppression; Dual-tree complex wavelet; Max-median filter



**ZHANG Xiang** was born in 1982. He is currently pursuing the Ph. D. degree at Xidian University, and his research interests focus on signal processing and dim dim target detection.