

文章编号: 1672-8785(2011)01-0035-05

基于非下采样 Contourlet 变换的红外小目标检测方法

刘兴淼 王仕成 赵 静 刘志国 刘太阳

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘 要: 对存在背景干扰和噪声情况下的红外小目标检测方法进行了分析, 提出了一种时空结合的红外小目标检测算法。首先根据背景图像变化较慢的特点, 运用相邻帧相减以减少背景和噪声的干扰, 接着对残差图像进行非下采样 Contourlet 变换, 利用非下采样 Contourlet 分解后子图像的特性抑制剩余的背景并消除噪声, 提高了目标信噪比, 最后通过对得到的增强图像进行自适应阈值分割处理, 检测出了小目标。仿真实验结果表明, 与基于小波变换的红外小目标检测算法相比, 该方法能够较精确地检测出红外小目标, 具有较高的检测率和较小的平均虚警数。

关键词: 小目标检测; 非下采样 Contourlet 变换; 时域特性; 红外图像

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.01.007

Small Infrared Target Detection Based on Nonsubsampled Contourlet Transform

LIU Xing-miao, WANG Shi-cheng, ZHAO Jing, LIU Zhi-guo, LIU Tai-yang

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: The small infrared target detection methods used in the presence of background interference and noises are analyzed. A small infrared target detection algorithm combining temporal domain with spatial domain is put forward. First, the interference from background and noises is reduced by using conjoint frame subtraction because of the slow change of background. Then, the nonsubsampled Contourlet transform is implemented for the residual image so as to eliminate the residual background and noises and enhance the signal-to-noise ratio of the small targets. Finally, the enhanced image is processed by using the adaptive threshold and the small target is detected. The simulation result shows that compared with the small infrared target detection algorithm based on wavelet transform, this method can more precisely detect small infrared targets and has a higher detection effectiveness and a lower average false alarm rate.

Key words: small target detection; nonsubsampled Contourlet transform; temporal domain characteristics; infrared image

收稿日期: 2010-09-16

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20080441274); 航空科学基金资助项目 (20080112005)

作者简介: 刘兴淼 (1981-), 男, 山东东明人, 博士研究生, 研究方向为控制科学与控制工程。E-mail: liouxm_99@163.com

1 引言

红外制导技术在武器装备系统中有着广泛的应用。通过目标红外辐射可尽早识别并锁定跟踪目标,从而为武器装备争取到足够的反应时间。然而,远距离拍摄的红外图像的信噪比一般比较低,目标与背景的对比度差,且目标边缘模糊,使红外小目标检测成为目标识别领域中的一个难点。

单帧红外小目标检测方法可以分为三类:

(1) 基于变换域的红外小目标检测方法,常用的变换有小波变换、contourlet 变换^[1]等; (2) 基于背景估计与抑制的检测方法,常用的有高通滤波、中值滤波^[2]、均值滤波以及自适应背景估计等; (3) 基于形态学滤波^[3]的红外小目标检测方法。其中,小波分析的多尺度特性,使其适用于在低信噪比的环境下进行红外小目标检测。它的伸缩特性可使部分图像特征在某个尺度下被有效抑制,而某些感兴趣的特性可以被突显出来。但是,由于二维小波是一维小波的张量积,其方向性十分有限,对二维图像只能在水平、垂直和对角三个方向上进行分解,因此将小波分析用于红外小目标检测也具有一定的局限性。2002 年, Donoho 等人在多尺度思想的基础上,将拉普拉斯分解与方向滤波器相结合,构造出了离散有向多分辨率图像表示方法的 Contourlet 变换^[4],为解决二维或更高维奇异性提供了一种新的分析工具。这种变换的主要特征是具有很好的方向性和各向异性,在每个尺度所分解的方向上都灵活可变。2006 年, Cunha 等人对 Contourlet 变换的一些局限性进行了改进,提出了一种完全具备平移不变性的无下采样 Contourlet 变换^[5] (NSCT),解决了传统 Contourlet 变换不具备平移不变性的不足。它是一种平移不变的多尺度多方向超完备变换。

吴一全等人^[6]则对图像进行了 NSCT 变换,他们在利用 NSCT 进行分解后再采用能量法提取了图像的局部纹理特征,最终实现了目标检测。但是该算法只是用单帧图像中的目标“奇异

性”来实现弱小目标检测的,而并未考虑到目标运动的时域特征,因此其检测过程中容易出现较高的虚警率。考虑到红外小目标序列的时域特性,本文结合 NSCT 变换的特点,提出了一种先对图像进行帧差处理,然后利用 NSCT 分解后的子图像特性来抑制背景和噪声的红外小目标检测方法。

2 非下采样 Contourlet 变换

NSCT 是在 Contourlet 变换的基础上新近发展起来的一种崭新的多尺度、多方向变换,其完全平移不变性弥补了 Do 和 Vetterli 提出的下采样 Contourlet 变换的不足。NSCT 是一种灵活的多尺度、多方向且具有平移不变性的图像分解方法。与传统的 Contourlet 变换相似,它也是先利用塔式滤波器组对图像进行多尺度分解,然后采用方向滤波器对所得到的各尺度子带图像进行分解,从而得到不同尺度、不同方向的子带图像的。其中不同的是,传统的 Contourlet 变换所采用的塔式滤波器组和方向滤波器组在变换过程中都存在下采样操作,造成 Contourlet 变换不具有平移不变性,而 NSCT 所采用的塔式滤波器组和方向滤波器组是非下采样塔式滤波器组 (NSPFB) 和非下采样方向滤波器组 (NSDFB)。因此, NSCT 在图像的分解和重构过程中,避免了对图像进行下采样和上采样操作,使 NSCT 变换在保留传统 Contourlet 变换特性的同时还具有平移不变性,并使各子带图像之间具有相同尺度大小相等的特性。图 1 为 NSCT 的分解流程图。

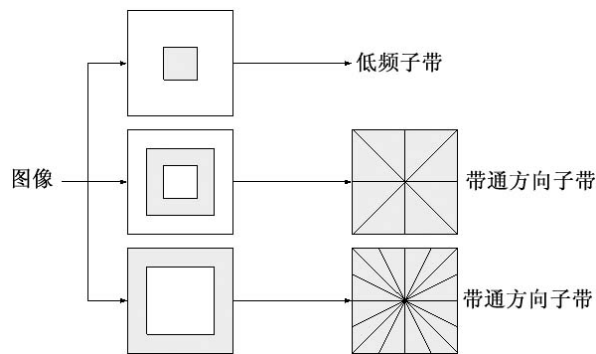


图 1 NSCT 的分解流程图

与小波分解相比, Contourlet 变换和 NSCT 同样是多尺度、多分辨率分解, 但它们同时还具有很好的方向性和各向异性, 在每个尺度所分解的方向上都灵活可变。而与 Contourlet 变换相比, NSCT 由于采用非下采样塔式滤波器组 and 方向滤波器组, 其变换得到的各个子带中的视觉特征及信息更加完整, 而且得到的低频子带不会发生频率混淆现象, 具有更强的方向选择性。

3 检测算法

3.1 帧差处理

红外小目标序列图像的背景图像通常在图像灰度分布空间上具有较大的相关长度, 它占据了场景图像空间频率中的低频部分。由于场景和传感器内部的热分布不均匀, 背景图像是一个缓慢变换且非平稳的二维随机过程, 对于大部分探测系统来说是比较固定的场景。或者说, 在某一个时间段内, 场景是相对固定的。因此, 相邻帧之间的背景变化是不大的^[7]。

小目标的灰度值通常比背景的大。为了降低背景起伏的影响, 须提高图像的可辨识度 and 增加目标像素对直方图的贡献, 这样有利于后续目标检测。本文利用背景图像在时域中变化不大的特点, 通过进行相邻帧相减处理 (若目标移动较慢, 可以每隔几帧采集一帧图像) 拉大了目标与背景之间的灰度差, 从而抑制了背景和杂波。经过帧差处理得到的残差图像主要包含小目标、剩余背景以及部分噪声点。

3.2 基于 NSCT 变换的去噪增强处理

经过前面的帧差处理, 目标得到了增强, 背景杂波得到了抑制, 但是图像中还会存在一些背景杂波和高频噪声。此时, 残差图像中的小目标与噪声一起处于图像的高频部分, 而剩余的背景杂波则位于图像的低频部分。为了进一步剔除剩余的背景杂波和高频噪声, 增加小目标的信噪比以便于后续目标检测时的阈值分割, 我们利用 NSCT 变换的多分辨率特性, 设计了红外图像去噪增强方法: 首先根据红外小目标的大小及

图像噪声的强弱, 确定非下采样 Contourlet 分解的层数, 并对残差图像作非下采样 Contourlet 变换, 得到低频系数和高频系数; 接着确定合适的阈值, 在非下采样 Contourlet 变换域对高频系数进行阈值处理, 剔除高频噪声, 同时将低频系数置零, 消除剩余背景杂波的影响; 最后, 对处理后的高频系数和低频系数作非下采样 Contourlet 逆变换, 得到去噪并被增强的小目标图像。

这里, 阈值的确定采用 Donoho 剔除的通用阈值法, 即

$$t = \sigma_n \sqrt{2 \log(N)} \quad (1)$$

式中, t 为通用阈值, σ_n 为噪声标准差, N 为给定细节图像中非下采样 Contourlet 系数的总数。阈值处理采用硬阈值处理。

3.3 阈值分割

经过非下采样 Contourlet 去噪增强处理后, 图像中只有目标点和少量的背景噪声, 而且目标比大多数背景噪声要明亮一些, 即目标的灰度级要高一些。因此可以采用阈值分割方法将灰度值高于阈值门限的图像部分属于小目标置为 1, 将灰度值低于门限阈值的属于背景区域置为 0。其中关键的一点是要根据某个判断准则来确定最佳阈值的过程。由于红外小目标图像经过帧差和非下采样 contourlet 去噪增强处理后, 目标的信噪比已经得到了很大提高, 目标灰度值明显大于背景灰度, 因此可采用文献 [8] 中的阈值确定法对图像进行二值化。阈值表达式为

$$T = \mu + l\sigma \quad (2)$$

式中, μ 为图像的均值; σ 为图像的标准差; l 为通过实验数据确定的常数, 一般取 3 ~ 10。

设经过非下采样 Contourlet 去噪增强处理后的图像为 D , 利用门限 T 对 D 作二值处理, 即高于门限的为目标像素点, $f(x, y)$ 即为最终的检测结果:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1; & D(x, y) > T \\ 0; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

4 实验结果及分析

为了验证算法的有效性, 根据文中提出的算法, 对多幅红外小目标图像分别进行了非下采样 Contourlet 变换和小波变换, 并利用基于目标灰度特征和运动特征的时空域联合检测方法对小目标进行了检测实验。实验中, 采用“maxflat”塔形滤波器和“dmaxflat7”方向滤波器进行二级非下采样 Contourlet 变换, 同时按照 Mallat 算法进行二级小波变换。

阈值分割前的信噪比改善程度是算法性能优劣的一个衡量标准。为了验证算法的处理效果, 定义了以下两个评价参数^[9]:

信噪比:

$$SNR = \frac{G_t - G_b}{\sigma} \quad (4)$$

式中, G_t 为局部窗口内的目标最大灰度值, G_b 为局部窗口内的像素灰度均值, σ 为局部窗口内的像素灰度标准差。

信噪比增益:

$$G_{SNR} = \frac{SNR_0}{SNR_1} \quad (5)$$

式中, SNR_0 为处理后输出图像的信噪比, SNR_1 为输入图像的信噪比。

表 1 为分别采用 NSCT 和小波变换对红外图像进行预处理的结果。从中可以看出, 两种算法都大幅度提高了目标的信噪比, NSCT 对小目标信噪比的改善程度明显优于小波变换, 表明 NSCT 具有更加优越的去噪增强性能。

表 1 两种算法的预处理效果对比

参数	原始图像	小波变换	NSCT 变换
SNR	3.1543	21.9164	41.6582
G_{SNR}	1	6.9481	13.2068

为了验证算法的检测效果, 本文分别使用非下采样 Contourlet 变换和小波变换对红外序列图像中某帧图像进行了小目标检测, 其结果如图 2 至图 6 所示。其中, 图 2 为原始图像, 图 3 和图 4 为采用非下采样 Contourlet 变换的处理结

果, 图 5 和图 6 为采用小波变换的处理结果。



图 2 原始图像

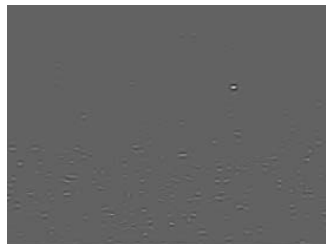


图 3 NSCT 去噪增强后的图像

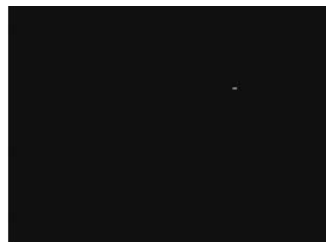


图 4 NSCT 变换的检测结果

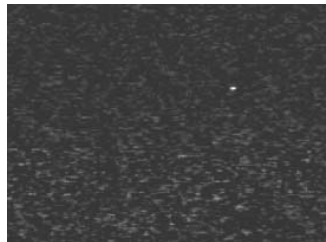


图 5 小波去噪增强后的图像

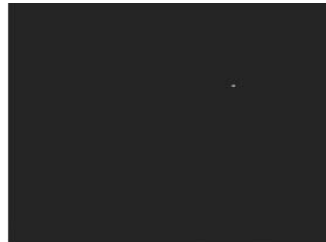


图 6 小波变换的检测结果

由检测结果可以看出, 无论是小波变换还是非下采样 Contourlet 变换, 都较为准确地找到了目标的位置, 检测出了小目标, 同时消除了噪

声点的干扰,取得了很好的检测效果。与小波变换相比,非下采样 Contourlet 变换检测出的小目标形状信息更多,检测效果更加明显。

为了评价各种算法的检测性能,分别利用本文算法、小波变换算法和文献 [6] 所提出的算法进行了小目标检测,并使用检测概率 P_d 和平均虚警数 F_a 评价了算法的检测性能^[10]。

$$P_d = \frac{N_a}{N_b}, \quad F_a = \frac{N_f}{N_i} \quad (6)$$

式中, N_a 为序列中检测到的真实目标个数, N_b 为序列中所有的真实目标个数, N_f 为序列中检测到的虚假目标个数, N_i 为序列中图像的帧数。

表 2 三种算法的检测效果对比

指标	小波变换	文献 [6]	NSCT 变换
P_d	95%	92%	97%
F_a	0.12	1.8	0.07

表 2 为利用三种算法分别对 100 帧图像进行目标检测后得到的检测概率和平均虚警数。从中可以看出,三种算法都具有很高的检测概率,证明了本文算法的可行性和有效性。由于文献 [6] 中的算法仅仅利用了小目标的灰度“奇异性”,而未利用序列图像的时域特性,因此产生了较高的虚警率。另外两种算法都明显优于文献 [6] 中的算法。同时,非下采样 Contourlet 变换无论在检测概率方面还是在平均虚警数方面都优于小波变换。与小波分解相比,NSCT 同样是多尺度多分辨率分解,却具有完全平移不变性,在图像去噪和增强的应用中具有明显的优越性。而且,NSCT 在方向分解上具有灵活性,在图像分解过程中可以得到更多的细节信息,提取更多的图像纹理特征,从而得到更好的图像恢复结果。

5 结论

本文根据非下采样 Contourlet 变换和红外小目标图像时域特性,提出了一种基于非下采样 Contourlet 变换的红外小目标检测算法。该算法根据红外小目标图像的时域特性,先利用相邻帧差分法抑制大部分背景,然后利用基于非下采样 Contourlet 变换的图像去噪增强,对得到的残差图像进行处理,消除剩余背景和噪声的干扰,最后通过阈值分割检测出小目标。实验结果表明,该算法具有较高的检测率和较小的平均虚警数,比基于小波变换的方法更好。

参考文献

- [1] 吴文怡, 吴一全. 基于 Contourlet 变换的红外弱小目标检测方法 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 136–138.
- [2] Barnett J. Statistical analysis of median subtraction filtering with application to point target detection in infrared backgrounds [J]. *SPIE*, **1050**, 1989: 10–18.
- [3] Tom V T, Peli T, Leung M. Morphology-based algorithm for point-target detection in infrared backgrounds [J]. *SPIE*, **1954**, 1993: 2–11.
- [4] Do M N, Vetterli M. Contourlets: a directional multiresolution image representation [C]. *IEEE Int. Conf. on Image Processing*, 2002: 357–360.
- [5] Cunha L D, Zhou Jian-ping, Do M N. The nonsubsampled Contourlet transform: theory, design, and applications [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089–3101.
- [6] 吴一全, 罗子娟, 吴文怡. 基于 NSCT 的红外图像小目标检测技术 [J]. *中国图象图形学报*, 2009, **14**(3): 477–481.
- [7] 高陈强, 田金文, 王鹏. 基于时域特性分析的红外运动小目标检测算法 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 907–910.
- [8] 赵晶晶, 湛海新, 刘星彤. 能量累积与均值漂移聚类结合的红外小目标检测方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2008, **13**(10): 1878–1881.
- [9] 罗军辉, 姬红兵, 刘靳. 一种基于空间滤波的红外小目标检测算法及其应用 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(3): 209–212.
- [10] 高陈强, 田金文, 王鹏, 等. 复杂天空背景下基于 GST 的红外斑点小目标检测 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2009, **37**(7): 10–13.