

基于无下采样 Contourlet 变换和独立分量分析的 红外弱小目标检测

吴一全^{1,2} 纪守新¹ 占必超¹

(¹ 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 210016
² 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要 针对存在背景干扰和噪声情况下的红外弱小目标检测问题, 提出一种基于无下采样 contourlet 变换(NSCT)和独立分量分析(ICA)的检测方法。首先原始图像减去通过快速 ICA 分离出的背景图像, 再经 NSCT 去噪, 接着利用新型 Top-hat 变换滤波得到预处理图像, 然后采用基于类内方差及背景与目标面积差的阈值选取方法来分割预处理图像。针对红外小目标图像进行了大量实验, 并和基于快速 ICA、基于 NSCT 的红外目标检测方法进行了比较, 结果表明所提出的方法抗噪性强, 具有更为优越的检测性能。

关键词 图像处理; 红外弱小目标检测; 无下采样 contourlet 变换; 独立分量分析; 类内方差; 背景与目标面积差
中图分类号 TN911.73; TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0510002

Infrared Dim Target Detection Based on Nonsampled Contourlet Transform and Independent Component Analysis

Wu Yiquan^{1,2} Ji Shouxin¹ Zhan Bichao¹

(¹ School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China
² State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract Aiming at the detection problem for dim target in infrared image that contains background interference and noise, a detection method for dim target is proposed based on nonsampled contourlet transform (NSCT) and independent component analysis (ICA). Firstly, the background image separated from the original image by fast independent component analysis is subtracted from the original image. The residual image is denoised based on nonsampled contourlet transform and the new Top-hat transform is used as a filter, thus the preprocessed image is obtained. Then, the preprocessed image is segmented by the threshold selection algorithm based on the within-class variance and area difference between background and target. Lots of experiments are done with infrared images including small targets and a comparison is made with the detection methods of infrared target based on fast independent component analysis and nonsampled contourlet transform. The experimental results show that the suggested method is stronger in anti-noise performance and more superior in detection performance.

Key words image processing; infrared dim target detection; nonsampled contourlet transform; independent component analysis (ICA); within-class variance; the area difference between background and target

OCIS codes 100.0100; 100.2000; 100.2980; 100.7410

1 引言

弱小目标的检测是精确制导武器和机载警戒系

统中的关键技术之一^[1~4]。为了尽早地发现目标, 使防御武器系统对目标有足够的反应时间, 要求在

收稿日期: 2010-10-18; 收到修改稿日期: 2010-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(60872065)、南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放基金(KFKT2010B17)和航空科学基金(20105152026)资助课题。

作者简介: 吴一全(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事图像处理、目标检测与识别等方面的研究。

E-mail: gumption_s@yahoo.com.cn

尽可能远的距离处就能快速有效地进行可靠检测。但由于远距离条件下目标图像无形状和纹理信息,当低信噪比强背景杂波干扰时,远距离弱小目标极易被背景和噪声淹没^[5~10],要准确地检测出小目标的位置并把目标从背景和噪声中提取出来有一定难度。红外小目标检测的思路通常是先抑制背景,突出潜在目标,再剔除噪声干扰。常采用高通滤波^[11]、形态滤波^[12~14]、最小一乘预测^[15]及小波变换^[16~18]等方法。但仅采用高通滤波、形态滤波、最小一乘预测方法在有噪声干扰的情况下,得到的预处理图像不够理想,在其基础上的分割图像虚警点较多,检测结果不佳;而基于小波变换的红外小目标检测算法相对来说较为有效,它通过对红外图像的多尺度分解,再选择相应的频率分量来抑制背景并增强目标,从而大大提高信噪比。但是文献^[16~18]中的方法只是简单地选择经小波分解后得到的高频或低频分量,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,其检测效果尚有待进一步提高。此外,当图像中的小目标较弱时,与背景的灰度值相差较小,上述方法的检测率相对较低。

近年来伴随着盲信号分离问题发展起来的独立分量分析(ICA)^[19,20]和在小波变换基础上拓展的无下采样 Contourlet 变换(NSCT)^[21]可望解决上述较弱目标的检测问题。ICA 是指在独立性假设的前提下,从多路观测信号中分离出隐含的独立源信号。对于红外小目标图像序列而言,目标在背景中的运动相对突出,可认为相对背景运动独立,因而可将目标视为平缓背景中的一个独立分量。张国伟等^[22]根据红外小目标的这种特性,提出基于快速 ICA 的红外目标检测方法。对于相邻的多帧图像应用快速 ICA,将目标从背景中分离出来。但红外图像往往受噪声干扰,此方法所得到的预处理图像也势必含有噪声,这使得准确地分割小目标变得困难。另一方面,NSCT 的变换系数具有平移不变性及更多方向选择性,且在塔式分解过程中没有采样环节。因而,吴一全等^[23]提出基于 NSCT 的红外目标检测方法,通过对高频子带求取距离像来检测小目标。但对不同尺度、不同方向的高频子带求取的距离像与原始图像中的红外小目标大小不一致,且其目标分割方法易使目标定位不准确。此外,新型 Top-hat 变换^[12]能够抑制图像平缓变化的背景和不相关结构信息,可以提取出形状类似于结构元素的孤立目标。

基于以上分析,本文针对存在背景干扰和噪声

情况下的红外图像弱小目标检测问题,提出一种基于 NSCT 和 ICA 的红外小目标检测方法。首先原始图像减去通过快速 ICA 分离出的背景图像,再经 NSCT 去噪,接着利用新型 Top-hat 变换滤波得到预处理图像;然后针对预处理图像,提出基于类内方差及背景与目标面积差的阈值选取方法进行分割,有效地保留了目标点,摒弃了虚假目标点,提高了检测率;最后针对红外小目标图像进行了大量实验,在实验结果和分析中给出了预处理图像及其分割结果,并与基于快速 ICA、基于 NSCT 的红外目标检测方法进行了比较。

2 基于 NSCT 和 ICA 的红外图像预处理

2.1 NSCT

NSCT^[21]由无下采样塔式分解(NSP)和无下采样方向滤波器组(NSDFB)构成,其结构如图 1 所示。

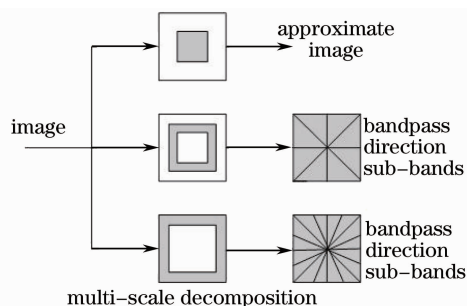


图 1 NSCT 结构图

Fig. 1 Structure chart of NSCT

NSP 把原始图像分解为低频和高频子带,高频子带再经过 NSDFB 分解为 2 的整数幂个方向子带。对低频子带重复上述过程可实现图像的多分辨率、多方向分解。NSCT 因 NSP 和 NSDFB 中均无下采样操作而具有平移不变性。由于在塔式分解过程中没有采样环节,即使系统滤波器的带宽大于 $\pi/2$,其低频子带也不会有频谱混淆现象产生。鉴于 NSCT 具有平移不变性及更多方向选择性等优点,将其用于红外图像的去噪可望得到较好的效果。

2.2 ICA 模型和新型 Top-hat 算子

ICA 的基本目的就是要找到一个线性变换,使变换后的各信号之间尽可能统计独立。设 m 维观测信号 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$,它是 n 维源信号 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$ 的线性组合,即 $\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s}$ 。ICA 的任务就是要找到一个分离矩阵 \mathbf{W} ,使输出信号 $\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x}$,要求 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 的各个分量 y_i 之间尽可能保持独立,那么 \mathbf{y} 在统计独立意义下最逼近于未

知源信号 \mathbf{s} 。为此,建立一个合适的目标函数,再采用某种优化算法分离源信号。FastICA 算法是一种采用牛顿迭代法,通过使负熵 J 最大化来求解独立分量的快速收敛算法:

$$J(\mathbf{w}^T \mathbf{x}) \propto \{E[G(\mathbf{w}^T \mathbf{x})] - E[G(\mathbf{v})]\}^2, \quad (1)$$

式中 G 是一种非线性、非二次函数, \mathbf{v} 是具有零均值和单位方差的高斯随机变量。可以得到定点算法对于一个独立分量的迭代公式为

$$\begin{cases} \mathbf{w}^+ = E[\mathbf{x}G'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})] - E[G''(\mathbf{w}^T \mathbf{x})]\mathbf{w} \\ \mathbf{w}^* = \mathbf{w}^+ / \|\mathbf{w}^+\| \end{cases}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{w}^+ 是某一次牛顿迭代的结果, \mathbf{w}^* 是 \mathbf{w}^+ 归一化后的更新值。若要估计 n 个独立分量,则在每次提取一个分量之后,需从观测信号中减去该独立分量,如此重复,直到所有分量都被提取出来为止。

新型 Top-hat 变换^[12]是形态学中膨胀、腐蚀的联合。设 $f(x, y)$ 为原始输入图像中像素点 (x, y) 的灰度值; B_i 和 B_o 为形状相同并有相同原点的平坦结构元素,且 B_o 的尺寸大于 B_i ; $\Delta B = B_o - B_i$ 为 B_i 和 B_o 之间的环状边缘区域; B_b 为介于 B_i 和 B_o 之间且与其形状相同的平坦结构元素。现定义运算 $f \blacksquare B_{io}$:

$$f \blacksquare B_{io}(x, y) = (f \oplus \Delta B) \ominus B_b, \quad (3)$$

式中 B_{io} 表示运算 $f \blacksquare B_{io}$ 用到的结构元素与 B_i 和 B_o 有关, \oplus 和 \ominus 分别为形态学中的灰度膨胀和腐蚀运算。则新型 Top-hat 变换 $T_{\text{hat}}(f)$ 为

$$T_{\text{hat}}(f) = f(x, y) - f \blacksquare B_{io}(x, y). \quad (4)$$

2.3 基于 NSCT 和 ICA 的红外小目标图像预处理算法

通常,目标的红外辐射强度与其周围自然背景的辐射强度无关,且一般高于背景辐射强度。可以将小目标看成是灰度和位置均未知的暂态信号,与噪声(近似为高斯噪声)一起,属于图像的高频部分,而背景属于低频部分。鉴于 ICA 可以去除图像的背景,而 NSCT 可用于去除高斯噪声,并较好地保留图像细节。所以,本文设计了利用 ICA 和 NSCT 的红外小目标图像预处理方法。

设含噪红外小目标图像 $f_\eta = \gamma + \eta$, 其中 γ 表示无噪图像, η 表示高斯噪声。去噪的目的就是从含噪图像 f_η 中恢复无噪图像 γ 。现给出基于 NSCT 的阈值去噪算法流程:

1) 设定 NSCT 分解的层数 K , 高频子带数 J 。对含噪图像进行 NSCT 分解,得到低频系数和低频系数 $d_0, d_1, d_2, \dots, d_{J-1}$ 。

2) 在 NSCT 域内设定阈值 δ , 并按下列两种阈值

函数对变换系数 d_i 进行处理,得到新的变换系数 \hat{d}_i 。

硬阈值处理为

$$\hat{d}_i = \begin{cases} d_i, & |d_i| \geq \delta \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad i = 0, 1, \dots, J-1 \quad (5)$$

软阈值处理为

$$\hat{d}_i = \begin{cases} \text{sgn } d_i (|d_i| - \delta), & |d_i| \geq \delta \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad i = 0, 1, \dots, J-1 \quad (6)$$

式中 $|\cdot|$ 为绝对值运算, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

3) 对处理后的高频系数 $\hat{d}_0, \hat{d}_1, \dots, \hat{d}_{J-1}$ 和低频系数进行 NSCT 的逆变换,得到无噪红外小目标图像 γ 的估计图像。

基于上述的去噪过程,所提出的红外小目标图像预处理算法可描述为:

1) 原始图像减去通过快速 ICA 分离出的背景图像。由于红外小目标在背景中的运动相对突出,并可认为相对背景运动独立,因此可以将目标视为平缓背景中的一个独立分量。分离目标的同时,背景也作为另一个独立分量而被得到。由于原始红外图像减去背景图像后得到的残差图像仍然含有噪声,所以为了得到较为理想的目标图像,需要再对其进行阈值去噪。

2) 对 1) 所得到的残差图像进行 NSCT 去噪处理。对分解后的高频子带依据 Donoho 统一阈值^[24]进行硬阈值函数去噪,其中阈值 δ 表示为

$$\delta = \sigma \sqrt{2 \ln Z}, \quad (7)$$

式中 Z 为图像像素总数, σ 为噪声标准差估计:

$$\sigma = \text{median}(|Y|) / 0.6745, \quad (8)$$

式中 Y 为 NSCT 第 1 层高频子带系数。阈值函数的选择应尽量使小目标的能量较高,以便更易于分割。由于软阈值函数中变换域高频系数需要减去阈值 δ , 去除高斯噪声的同时也削减了小目标的能量,因此,为了尽量避免小目标的能量损失,选择硬阈值函数对高频系数处理。

3) 对经上述去噪后的红外图像,根据小目标的大小选定合适的结构算子,对其应用新型 Top-hat 变换进行滤波,得到预处理图像。

3 基于类内方差及背景与目标面积差的阈值分割

经上述 ICA, NSCT 和新型 Top-hat 变换预处理后的红外图像中,目标像素在整幅图像中所占的

比例很小,目标和背景区域的面积相差悬殊,常规的阈值分割方法无法直接将小目标准确地分割出来。为此,本文引入反映背景与目标面积差的因子,提出采用基于类内方差及背景与目标面积差的阈值分割方法。

设 $M \times N$ 图像的灰度级取 $0, 1, \dots, L-1$, 像素点 (m, n) 的邻域平均灰度级为 $g(m, n) = \frac{1}{N_D} \sum_{(i,j) \in D} f(i, j)$, 其中 D 一般取 8-邻域, N_D 为 D 中像素个数。若用 $r(i, j)$ 表示 (灰度级 f , 邻域平均灰度级 g) 对出现的频数 $[0 \leq r(i, j) \leq M \times N]$, 其联合概率 $p(i, j) = \frac{r(i, j)}{M \times N}$, $i, j = 0, 1, \dots, L-1$ 。这样, $\{p(i, j)\}$ 即为图像的二维直方图。假设阈值向量 $[t, s]$ 将二维直方图分为 4 个区域, 如图 2 所示。区

域 0 和背景对应, 区域 1 和目标对应; 而区域 2 和区域 3 表示边界点和残余噪声点, 与整幅图像的像素点相比, 数量极少, 可假定在区域 2 和区域 3 上所有的 $p(i, j) \approx 0$ 。

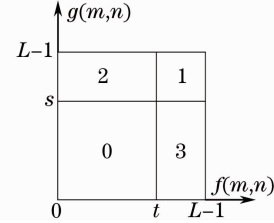


图 2 图像二维直方图的 4 个区域
Fig. 2 Four regions of 2-D histogram

图像中背景和目标的概率 $\omega_b(t, s), \omega_o(t, s)$ 及灰度级均值 $\mu_{bi}(t, s), \mu_{bj}(t, s), \mu_{oi}(t, s), \mu_{oj}(t, s)$ 为

$$\begin{cases} \omega_b(t, s) = \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^s p(i, j) \approx \omega_b(t, L-1) = \sum_{i=0}^t h(i) \text{ or } \omega_b(t, s) \approx \omega_b(L-1, s) = \sum_{j=0}^s \tau(j) \\ \omega_o(t, s) = \sum_{i=t+1}^{L-1} \sum_{j=s+1}^{L-1} p(i, j) = 1 - \omega_b(t, s) \end{cases}, \quad (9)$$

式中 $h(i) = \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j), \tau(j) = \sum_{i=0}^{L-1} p(i, j)$ 。

$$\begin{cases} \mu_{bi}(t, s) = \frac{1}{\omega_b(t, s)} \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^s ip(i, j) \approx \frac{1}{\omega_b(t, L-1)} \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^{L-1} ip(i, j) \stackrel{\text{def}}{=} \mu_{bi}(t) \\ \mu_{bj}(t, s) = \frac{1}{\omega_b(t, s)} \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^s jp(i, j) \approx \frac{1}{\omega_b(L-1, s)} \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^s jp(i, j) \stackrel{\text{def}}{=} \mu_{bj}(s) \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mu_{oi}(t, s) = \frac{1}{\omega_o(t, s)} \sum_{i=t+1}^{L-1} \sum_{j=s+1}^{L-1} ip(i, j) \approx \frac{1}{\omega_o(t, 0)} \sum_{i=t+1}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} ip(i, j) \stackrel{\text{def}}{=} \mu_{oi}(t) \\ \mu_{oj}(t, s) = \frac{1}{\omega_o(t, s)} \sum_{i=t+1}^{L-1} \sum_{j=s+1}^{L-1} jp(i, j) \approx \frac{1}{\omega_o(0, s)} \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=s+1}^{L-1} jp(i, j) \stackrel{\text{def}}{=} \mu_{oj}(s) \end{cases}. \quad (11)$$

实现(9)~(11)式的快速递推方式为

$$\begin{cases} \omega_b(t, L-1) = \omega_b(t-1, L-1) + h(t) \\ \omega_b(L-1, s) = \omega_b(L-1, s-1) + \tau(s) \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} \mu_{bi}(t) = \frac{1}{\omega_b(t, L-1)} \left[\omega_b(t-1, L-1) \mu_{bi}(t-1) + \sum_{j=0}^{L-1} tp(t, j) \right] \\ \mu_{bj}(s) = \frac{1}{\omega_b(L-1, s)} \left[\omega_b(L-1, s-1) \mu_{bj}(s-1) + \sum_{i=0}^{L-1} sp(i, s) \right] \\ \mu_{oi}(t) = \frac{1}{\omega_o(t, 0)} \left[\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} ip(i, j) - \omega_b(t, L-1) \mu_{bi}(t) \right] \\ \mu_{oj}(s) = \frac{1}{\omega_o(0, s)} \left[\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} jp(i, j) - \omega_b(L-1, s) \mu_{bj}(s) \right] \end{cases}. \quad (13)$$

背景和目标的类内方差 $\sigma_b^2(t, s), \sigma_o^2(t, s)$ 分别为

$$\begin{aligned}
 \sigma_b^2(t, s) &= \frac{1}{\omega_b(t, s)} \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^s \{ [i - \mu_{bi}(t, s)]^2 + [j - \mu_{bj}(t, s)]^2 \} p(i, j) = \\
 &= \frac{1}{\omega_b(t, s)} \left\{ \sum_{i=0}^t [i - \mu_{bi}(t, s)]^2 \sum_{j=0}^s p(i, j) + \sum_{j=0}^s [j - \mu_{bj}(t, s)]^2 \sum_{i=0}^t p(i, j) \right\} \approx \\
 &= \frac{1}{\omega_b(t, s)} \left\{ \sum_{i=0}^t [i - \mu_{bi}(t, s)]^2 h(i) + \sum_{j=0}^s [j - \mu_{bj}(t, s)]^2 \omega(j) \right\}, \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_o^2(t, s) &= \frac{1}{\omega_o(t, s)} \sum_{i=t+1}^{L-1} \sum_{j=s+1}^{L-1} \{ [i - \mu_{oi}(t, s)]^2 + [j - \mu_{oj}(t, s)]^2 \} p(i, j) = \\
 &= \frac{1}{\omega_o(t, s)} \left\{ \sum_{i=t+1}^{L-1} [i - \mu_{oi}(t, s)]^2 \sum_{j=s+1}^{L-1} p(i, j) + \sum_{j=s+1}^{L-1} [j - \mu_{oj}(t, s)]^2 \sum_{i=t+1}^{L-1} p(i, j) \right\} \approx \\
 &= \frac{1}{\omega_o(t, s)} \left\{ \sum_{i=t+1}^{L-1} [i - \mu_{oi}(t, s)]^2 h(i) + \sum_{j=s+1}^{L-1} [j - \mu_{oj}(t, s)]^2 \omega(j) \right\}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

总体类内方差小能确保分割后类的内聚性好，而背景与目标的面积差可有效抑制均等分割的趋势，两者综合构成更为合理的阈值选取准则函数为

$$\Phi(t, s) = \frac{[\omega_b(t, s) - \omega_o(t, s)]^2}{\omega_b(t, s)\sigma_b^2(t, s) + \omega_o(t, s)\sigma_o^2(t, s)}. \quad (16)$$

当准则函数 $\Phi(t, s)$ 取最大值时获得最佳阈值向量为

$$[t, s]^* = \text{Arg} \max_{0 \leq t, s \leq L-1} [\Phi(t, s)]. \quad (17)$$

残差图像经分割后如果仍然存在噪声点，可以根据小目标的运动特性，采用多帧红外图像序列分析对噪声点进行剔除^[25]。在图像序列中，噪声点是随机出现的，而真实目标点的运动具有连续性和一致性。由此即可确定真正的红外小目标。

4 实验结果及分析

针对实际的红外小目标图像序列，分别采用文献[22]中基于快速 ICA 的红外目标检测方法、文献[23]中基于 NSCT 的红外目标检测方法及本文提出的方法进行了大量实验。其中 NSCT 选择“9-7”塔式分解和方向滤波器组进行 2 层分解，方向数分别为 4, 8, 小目标运行速度约为 1 pixel/frame。任取 300 frame 图像(256 pixel×340 pixel)，本文方法正确检测 285 frame，检测概率为 95%；基于快速 ICA 的红外目标检测方法正确检测 250 frame，检测概率为 83%；基于 NSCT 的红外目标检测方法正确检测 265 frame，检测概率为 88%。由此可见，本文提出的基于 NSCT 和 ICA 的红外小目标检测方法明显优于基于快速 ICA 及基于 NSCT 的红外目标检测方法。为便于说明，下面给出其中两组图像序列的实验结果。图 3(a)和图 4(a)分别是两组不同

背景的红外图像序列中的某一帧，其特点是信噪比很低，目标很小且掩盖在云层中，较难检测。实验中 ΔB 的边缘宽度为 1，对于图 3(a)和图 4(a)，所采用的圆盘形平坦结构元素 ΔB 和 B_b 的半径分别为 3 和 2。

图 3(a)是原始红外小目标图像，清楚地显示出云层背景在空间上呈大面积的连续分布状态，而运动小目标的红外辐射强度与其周围自然背景的辐射强度不相关，在图像中表现为孤立的小亮斑，其灰度级和面积与背景的灰度级和面积差异较大。同时，红外图像中存在大量的噪声，较难识别。图 3(b)为经 ICA 去除背景后的图像，明显看到含有噪声(图像放大后很清楚)，经 NSCT 去噪后得到的图像如图 3(c)所示。可以清楚地看到，去噪后的图像中噪声被平滑，呈现出低频片状杂波，再利用新型 Top-hat 变换滤波便可得到预处理图像图 3(d)。由于 NSCT 具有平移不变性和更多方向选择性，且在塔式分解过程中没有采样环节，这使得图像去噪更为彻底，同时避免了小目标的能量损失。从图中可以清楚地看到本文方法所得预处理图像去噪效果明显，目标和背景的对比度大大增强，使得后续分割更为容易。图 3(e)为基于快速 ICA 的红外目标检测方法的预处理结果，可以看到图像中存在较多的噪声，小目标淹没在噪声之中，目标和背景的对比度相对较低，使得后续分割较为困难。图 3(b)和图 3(e)都为 ICA 处理后得到的图像，图 3(b)是原始图像减去通过快速 ICA 分离出的背景图像得到的，而图 3(e)是直接通过快速 ICA 分离出来的。连续的红外小目标图像序列，背景较为稳定，图像中的小目标却是运动变化的。直接通过 ICA 得到的小目标图像不稳定，目标与背景的对比度较低；用原始图像

减去通过 ICA 分离出的背景图像得到的小目标图像较为稳定,目标与背景的对比如较高。图 3(f)为基于 NSCT 的红外目标检测方法的预处理图像,图中目标和背景的对比如较高,但小目标的尺寸与真实小目标相比偏大,且去噪效果不佳,不利于目标的定位。图 3(c)和图 3(f)都经 NSCT 处理,图 3(c)是利用 NSCT 良好的去噪特性,去除

了背景抑制后图像的噪声,提高了小目标的信噪比;而图 3(f)则是通过对高频子带求取距离像来检测小目标。图 3(g)为基于类内方差及背景与目标面积差的阈值选取方法对预处理图像分割后,再根据小目标的运动特性,由多帧红外图像序列分析剔除噪声的最终检测结果。分割阈值的自动选取,避免了通过大量的人为试验来确定合适的阈值参数。

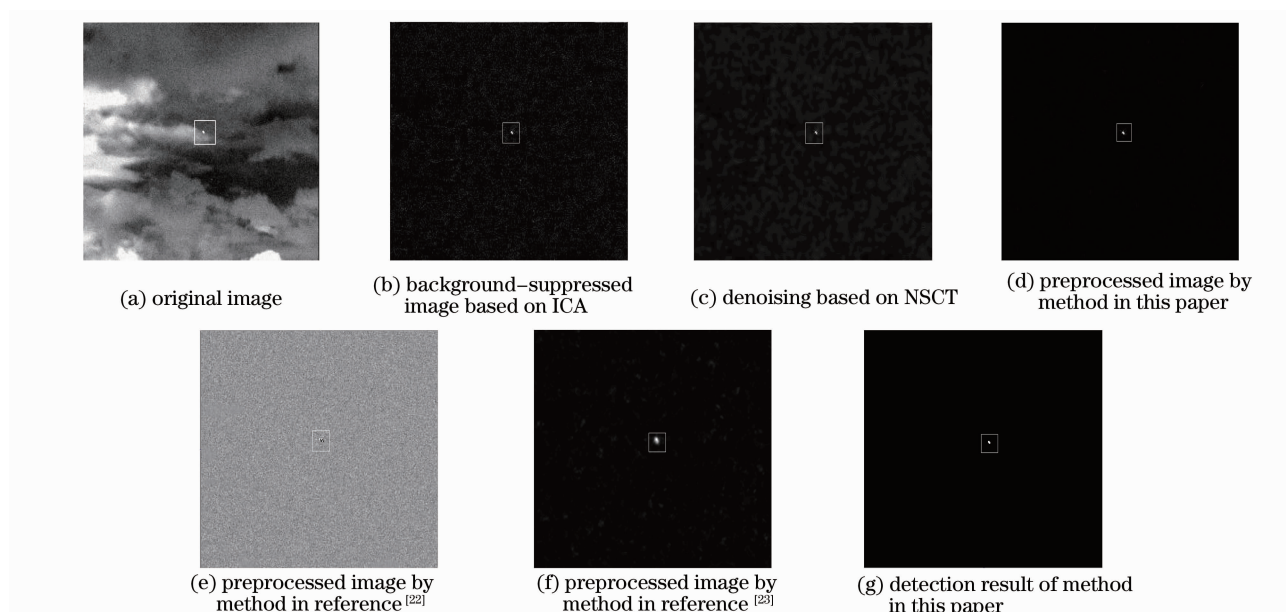


图 3 本文方法与现有方法的检测结果比较

Fig. 3 A comparison of detection results of the suggested method with existing methods

图 4 中,可以看到原始图 4(a)中的目标更小,根本无法辨别。由于小目标灰度级较小,能量较低,且存在噪声的干扰,这就要求预处理方法更为有效,

才能使得后续分割图像中所含虚警点较少。本文的预处理过程采用了 ICA, NSCT 及新型 Top-hat 变换,既去除了噪声,又较好地保留了目标点。预处理

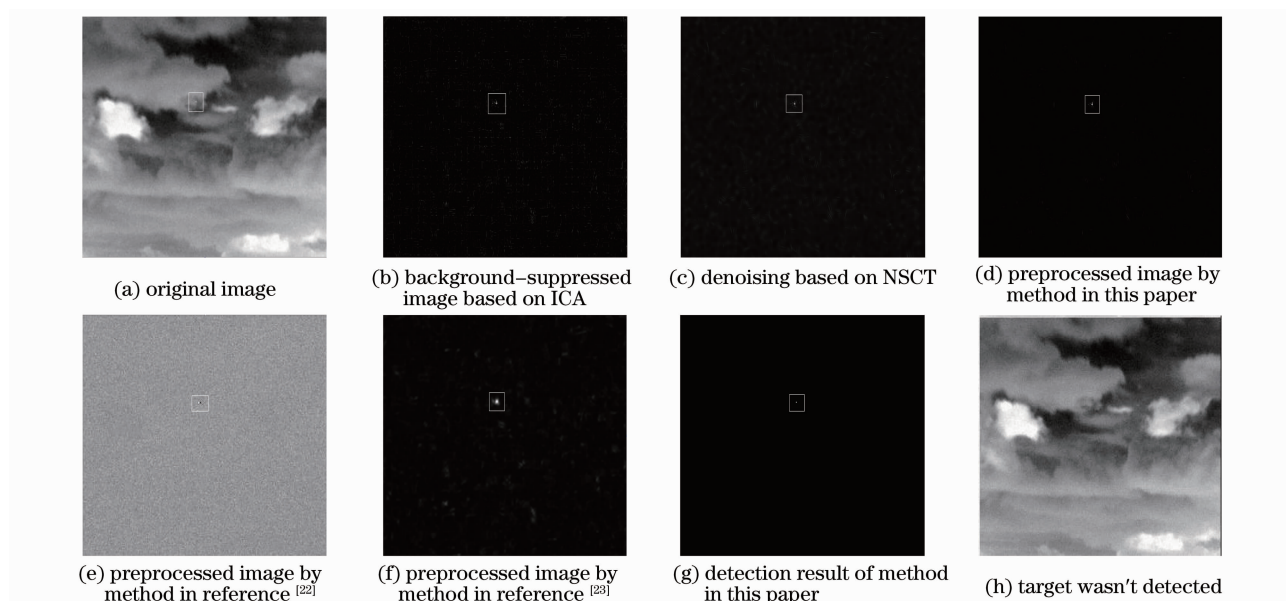


图 4 本文方法与现有方法的检测结果比较

Fig. 4 A comparison of detection results of the suggested method with existing methods

图 4(d)中目标与背景的对比值增大,去噪效果明显。与基于快速 ICA、基于 NSCT 的红外目标检测方法的预处理图像相比,更易准确地分割出红外小目标。此外,图 4(f)给出了红外小目标进入云层的情况,目标被云层遮挡,各种方法均未能检测出小目标。

对于上述实验结果,进一步采用信噪比 R_{SN} 和信噪比增益 G_{SNR} 来定量评价检测算法的性能:

$$\begin{cases} R_{SN} = (G_t - G_b) / \sigma_b \\ G_{SNR} = R_{SN}^0 / R_{SN}^1 \end{cases}, \quad (18)$$

式中 G_t 和 G_b 分别表示小目标和背景的灰度均值, σ_b 表示背景的标准差; R_{SN}^1 和 R_{SN}^0 分别为处理前后图像的信噪比。表 1 列出了基于快速 ICA, 基于 NSCT 的红外目标检测方法以及本文方法的性能比较。由表 1 可见,本文方法的性能明显优于基于快速 ICA 及基于 NSCT 的红外目标检测方法。

表 1 本文方法与现有方法的性能比较

Table 1 Performance comparison of the suggested method with existing methods

Image	Method	R_{SN}^1	R_{SN}^0	G_{SNR}
3(a)	Method in reference ^[22]	2.8	15.2	5.4
	Method in reference ^[23]	2.8	47.9	17.1
	Method in this paper	2.8	197.1	70.3
4(a)	Method in reference ^[22]	1.5	11.0	7.3
	Method in reference ^[23]	1.5	55.6	37.1
	Method in this paper	1.5	187.8	125.2

5 结 论

提出基于 NSCT 和 ICA 的红外弱小目标检测的方法,可以对强起伏背景下红外小目标的检测取得很好的效果。针对实际的红外小目标图像序列进行大量实验结果表明,基于 ICA, NSCT 及新型 Top-hat 变换的红外图像预处理方法有效地抑制了背景、去除了噪声;而基于类内方差及背景与目标面积差的阈值选取方法分割预处理图像行之有效。与基于快速 ICA 及基于 NSCT 的红外目标检测方法相比,本文提出的方法抗噪性强,具有更为优越的检测性能。

参 考 文 献

- Zhu Fengyun, Qin Shiyin. A moving IR point target detection algorithm based on reverse phase feature of neighborhood in difference between neighbor frame images [J]. *Chinese J. Aeronautics*, 2006, **9**(3): 225~232
- T. X. Zhang, M. Li, Z. R. Zuo *et al.*. Moving dim point target detection with three-dimensional wide-to-exact search directional filtering [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, **28**(2): 246~253

- Li Xin, Zhao Yigong, Chen Bing. A new approach of small and dim target detection in cloud cluster infrared image based on classification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3036~3042
- 李欣, 赵亦工, 陈冰. 基于分类的红外云层背景弱小目标检测方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3036~3042
- Zhu Jinbiao, Li Jianxun. Novel matching filter design and its application on dim point target detection in infrared image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2128~2133
- 朱金标, 李建勋. 匹配滤波器优化设计及在红外弱小点目标检测中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2128~2133
- Wu Honggang, Li Xiaofeng, Li Zaiming. Adaptive strong clutter suppression and moving point target detection [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, **27**(5): 908~912
- 吴宏刚, 李晓峰, 李在铭. 自适应强杂波抑制与点状动目标检测[J]. *航空学报*, 2006, **27**(5): 908~912
- Cao Qi, Bi Duyan. Characteristic-selecting filtering in infrared small target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2408~2412
- 曹琦, 毕笃彦. 红外弱小目标检测中的特征选择性滤波方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2408~2412
- B. Y. Zhang, T. X. Zhang, K. Zhang *et al.*. Adaptive rectification filter for detecting small IR targets[J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2007, **22**(8): 20~26
- Zhao Gaopeng, Bo Yuming, Lü Ming. Dim small target detection method based on nonsubsampling contourlet transform in infrared image[C]. Chinese Conference on Pattern Recognition, 2009, **1**(4-6): 1~5
- 赵高鹏, 薄煜明, 吕明. 基于 NSCT 的红外图像弱小目标检测方法[C]. 全国模式识别学术会议, 2009, **1**(4-6): 1~5
- Wu Yiquan, Yin Danyan. Detection of small target in infrared image based on background prediction by FLS-SVM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2806~2811
- 吴一全, 尹丹艳. 基于 FLS-SVM 背景预测的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2806~2811
- Luo Huan, Wang Fang, Chen Zhongqi *et al.*. Infrared target detecting based on symmetrical displaced frame difference and optical flow estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1715~1720
- 罗寰, 王芳, 陈中起等. 基于对称差分 and 光流估计的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1715~1720
- L. Yang, J. Yang, K. Yang. Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(17): 1083~1085
- X. Z. Bai, F. G. Zhou. Analysis of new Top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. *Pattern Recognition*, 2010, **43**(6): 2145~2156
- M. Zeng, J. X. Li, Z. Peng. The design of Top-hat morphological filter and application to infrared target detection [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, **48**(1): 67~76
- U. Braga-Neto, M. Choudhary, J. Goutsias. Automatic target detection and tracking in forward-looking infrared image sequences using morphological connected operators [J]. *J. Electronic Imaging*, 2004, **4**(13): 802~813
- Wu Yiquan, Wu Wenyi, Luo Zijuan. A method of small target detection in infrared image sequences based on the least absolute deviation and chaos-genetic algorithms [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 736~739
- 吴一全, 吴文怡, 罗子娟. 基于最小一乘和混沌遗传算法检测红外弱小目标[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 736~739
- Pei Lili, Luo Haibo, Geng Yanfeng *et al.*. Automatic sea target detection based on wavelet transform[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, **29**(4): 401~404
- 裴立力, 罗海波, 耿彦峰等. 基于小波变换的海面目标自动检测[J]. *兵工学报*, 2008, **29**(4): 401~404

- 17 Guo Runqiu, Li Dapeng, Lin Xiaochun. Research on wavelet transform methods in infrared small target detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 465~467
过润秋, 李大鹏, 林晓春. 红外点目标检测的小波变换方法研究 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(4): 465~467
- 18 Y. Q. Sun, J. W. Tian, J. Liu. Background suppression based on wavelet transformation to detect infrared target [C]. Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, China, 2005: 18~21
- 19 A. Hyvarinen. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis [J]. *IEEE Trans. Neural Networks*, 1999, **10**(3): 626~634
- 20 A. Hyvarinen, E. Oja. Independent component analysis: algorithms and applications [J]. *Neural Networks*, 2000, **13**(4-5): 411~430
- 21 A. L. Cunha, J. P. Zhou, M. N. Do. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089~3100
- 22 Zhang Guowei, Li Hong. Detection of small moving target in infrared image based on fast independent component analysis [J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(10): 567~569
张国伟, 李 红. 基于快速独立分量分析的红外运动小目标的检测 [J]. *红外技术*, 2006, **28**(10): 567~569
- 23 Wu Yiquan, Luo Zijuan, Wu Wenyi. A method of small target detection in infrared image based on nonsubsampling contourlet transform [J]. *J. Image and Graphics*, 2009, **14**(3): 477~481
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
- 24 D. L. Donoho. De-noising by soft-threshold [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1995, **41**(3): 613~627
- 25 Wu Yiquan, Wu Wenyi. Infrared small target detection based on adaptive prediction of background by variable neighborhood and step-size LMS algorithm [J]. *J. Astronautics*, 2009, **30**(2): 735~739
吴一全, 吴文怡. 基于变邻域变步长 LMS 背景预测检测红外小目标 [J]. *宇航学报*, 2009, **30**(2): 735~739