

基于形态学带通滤波和尺度空间理论的 红外弱小目标检测

程 堃 郭 雷 韩军伟* 钱晓亮

(西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要 针对复杂背景下的红外弱小目标检测问题,提出了一种基于形态学带通滤波和尺度空间理论的红外弱小目标检测算法。采用形态学带通滤波对红外图像进行预处理,得到红外弱小目标的潜在区域;利用高斯差分算子获得预处理后的红外图像的尺度空间,并通过尺度空间的极大值检测获得候选目标的位置和尺度;通过对候选目标的信杂比进行阈值化实现红外弱小目标的检测。实验结果和现有方法的对比证明了算法的有效性和稳健性。

关键词 图像处理;弱小目标检测;尺度空间;形态学带通滤波;信杂比

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1015001

Infrared Dim Small Target Detection Based on Morphological Band-Pass Filtering and Scale Space Theory

Cheng Gong Guo Lei Han Junwei Qian Xiaoliang

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract A novel approach is proposed to detect infrared dim target from cluttered background by using morphological band-pass filtering and scale space theory. The infrared image is pre-processed by means of morphological band-pass filter, which results in regions of interest (RoI) containing dim small targets. Then, difference-of-Gaussian function is adopted to obtain scale space of pre-processed infrared image. Scale space maximum detection is then performed to generate candidate targets with their positions and scales. Infrared dim small target detection is achieved by using thresholding signal-to-clutter ratio of candidate targets. Experimental results on real-world infrared images and comparisons with state-of-the-art methods can demonstrate the effectiveness and robustness of the proposed approach.

Key words image processing; dim small target detection; scale space; morphological band-pass filtering; signal-to-clutter ratio

OCIS codes 100.3008; 100.5010; 100.2000

1 引 言

红外弱小目标检测是红外搜索与跟踪系统、红外告警系统和精确制导系统等领域的一项关键技术。受红外传感器技术、大气辐射、作用距离和探测器噪声等因素的影响,红外图像的对比度和信噪比

(SNR)都很低,加之远距离目标的成像面积较小,在红外图像上仅有几个像素到几十个像素,因此,目标很容易被复杂背景和噪声所淹没。

复杂背景下的红外弱小目标检测已成为计算机视觉和模式识别领域的一个热点问题,也一直是国

收稿日期: 2012-03-30; **收到修改稿日期**: 2012-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(61005018, 91120005)和西北工业大学基础研究基金(JC201041)资助课题。

作者简介: 程 堃(1984—),男,博士研究生,主要从事遥感图像目标检测与识别等方面的研究。

E-mail: isuccess@126.com

导师简介: 郭 雷(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事图像处理和模式识别等方面的研究。

E-mail: lguo@nwpu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: junweihan2010@gmail.com

内外学者研究的重点和难点问题。Kim 等^[1]利用拉普拉斯-高斯(LoG)尺度空间理论实现了红外小目标的检测,但存在计算量大的缺点;Bai 等^[2]提出了一种新的 Top-hat 变换并将其用于红外弱小目标的增强,该方法对于相对简单的背景具有很好的抑制作用;Wang 等^[3]在小波域实现了基于支持向量机的小目标检测,主要适用于海天背景下的红外小目标图像;Zhang 等^[4]提出了一种基于改进偏微分方程的红外小目标检测算法,该方法检测速度快但漏警率偏高;万明等^[5]在分析红外弱小目标各向梯度特征的基础上,提出了一种计算相对简单的红外小目标检测算法;罗寰等^[6,7]针对天空背景下低 SNR 的红外小目标检测问题,分别提出了基于对称差分 and 光流估计的小目标检测算法以及基于模糊分类的小目标检测算法,实现了复杂云层背景图像的弱小目标检测;吴一全等^[8]提出了一种基于模糊最小二乘支持向量机(FLS-SVM)进行背景预测,然后利用模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵实现阈值分割的红外弱小目标检测方法;赵佳佳等^[9]提出了一种基于稀疏表示的小目标检测算法,通过子图像块表示系数的稀疏程度实现小目标的检测;胡墩等^[10]将红外小目标检测视为目标与背景的二分类问题,提出了一种基于显著性和主成分分析的小目标检测算法;吴一全等^[11]针对背景干扰和噪声情况下的红外弱小目标检测问题,提出了一种基于无下采样 Contourlet 变换变换和独立分量分析的检测方法。

本文提出了一种基于形态学带通滤波和尺度空间理论的红外弱小目标检测算法。采用形态学带通滤波器对红外图像进行预处理,得到红外弱小目标的感兴趣区域(RoI),再利用高斯差分(DoG)尺度空间实现弱小目标的精确检测和定位。实验结果表明,该检测算法快速而准确,同时具有很低的虚警率(FAR)。

2 红外弱小目标模型及算法原理

2.1 红外弱小目标模型

弱小目标的定义没有统一的标准,目前常用的描述包括“弱”和“小”两个方面,它们分别描述目标属性的两个方面。“弱”描述了目标的强度,在红外图像上指目标的亮度大小。“小”描述了目标的尺寸,在图像上表现为目标所占的像素面积。根据点扩散原理,通常采用下面的模型对红外弱小目标进行描述^[12]:

$$T(x, y | x_c, y_c, s) = I_{\max} \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中 (x_c, y_c) 为目标中心坐标, I_{\max} 为目标的灰度峰值,可以通过目标中心坐标间接得到(即目标中心的像素值), σ 为目标大小扩散参数,它决定了目标的大小。

2.2 算法原理和流程图

根据红外弱小目标的模型可知,目标检测实际上就是目标参数 (x_c, y_c, σ) 的检测,只要得到目标参数,即可实现弱小目标的精确检测和定位。LoG 算子具有内兴奋外抑制特性,因此基于 LoG 算子的尺度空间理论可用于红外小目标检测^[1]和微钙化点检测^[13]。DoG 算子是尺度归一化 LoG 算子的近似,具有 LoG 算子的所有特性,采用 DoG 算子代替 LoG 算子进行尺度空间变换,可以大大降低运算时间和空间复杂度^[14]。基于此,提出了一种基于形态学带通滤波和 DoG 尺度空间理论的红外弱小目标检测算法。图 1 为算法整体流程图。首先采用形态学带通滤波器对红外图像进行预处理,提取红外弱小目标的 RoI,然后利用 DoG 算子对预处理后的红外图像进行多尺度空间变换,并通过尺度空间的极大值检测获得候选目标的位置和尺度,最后通过对候选目标的信杂比进行阈值化实现红外弱小目标的检测。

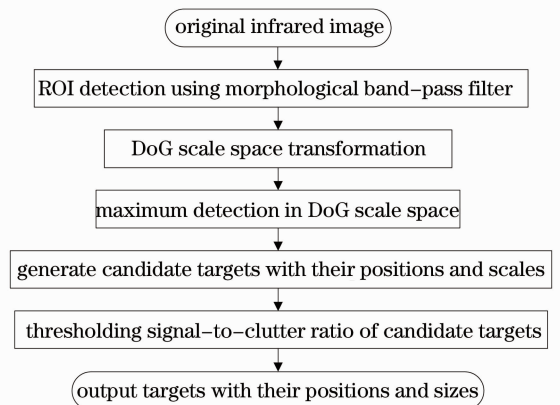


图 1 算法整体流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

3 形态学带通滤波检测 RoI

在含有弱小目标的红外图像中,目标所占的像素非常少,而绝大部分图像属于背景杂波,为了降低系统的计算复杂度、提高检测速度,有效提取目标的 RoI 成为检测系统的关键步骤。形态学带通滤

波^[15]是由灰度形态学滤波演变而成的一种信号处理方法,它采用两种不同的结构元素分别对图像进行开运算,然后将开运算后的两幅图像相减实现带通滤波。采用图 2 所示的形态学带通滤波检测目标的 RoI,假设 f_{in} 为一幅待检测红外图像,实现步骤如下:1)采用和目标大小接近的结构元素 B_1 对红外图像 f_{in} 进行开运算得到排除所有潜在目标的图像 f_{o1} ;2)采用与噪声大小接近的结构元素 B_2 对红外图像 f_{in} 进行开运算得到含有潜在目标且排除噪声干扰的图像 f_{o2} ;3)计算 f_{o2} 和 f_{o1} 的差分图像,然后对差分图像利用阈值 T_{th1} 进行二值化即可得到所有目标的 RoI,可表示为

$$f_{o1} = f_{in} \circ B_1 = (f_{in} \ominus B_1) \oplus B_1, \quad (2)$$

$$f_{o2} = f_{in} \circ B_2 = (f_{in} \ominus B_2) \oplus B_2, \quad (3)$$

式中,为开运算符, \oplus 为膨胀运算符, \ominus 为腐蚀运算符,结构元素 B_k ($k=1,2$)对 f_{in} 的膨胀和腐蚀定义为

$$f_{in} \oplus B_k = \max\{f_{in}(x-i, y-j) + B_k(i, j) \mid (i, j) \in D_{B_k}\}, \quad (4)$$

$$f_{in} \ominus B_k = \min\{f_{in}(x+i, y+j) - B_k(i, j) \mid (i, j) \in D_{B_k}\}, \quad (5)$$

式中 D_{B_k} 为结构元素 B_k 的定义域。最终,目标的 RoI 可表示为

$$f_{RoI} = \begin{cases} 0, & f_{o2} - f_{o1} < T_{th1} \\ 1, & f_{o2} - f_{o1} \geq T_{th1} \end{cases} \quad (6)$$

由于检测的弱小目标的大小为 $2 \times 2 \sim 10 \times 10$,所以设定 B_1 为 10×10 的正方形结构元素(即 10×10 且所有元素全为 1 的矩阵), B_2 为 2×2 的正方形结构元素(即 2×2 且所有元素全为 1 的矩阵);同时,为了得到较高的目标检测率和较低的 FAR,根据实验验证,选取差分图像的二值化阈值 $T_{th1} = 0.2$ 。图 3 为采用形态学带通滤波对红外弱小目标图像进行 RoI 检测的结果,从图中可以看出,形态学带通滤波检测得到的 RoI 可以显著缩小目标的检测范围。

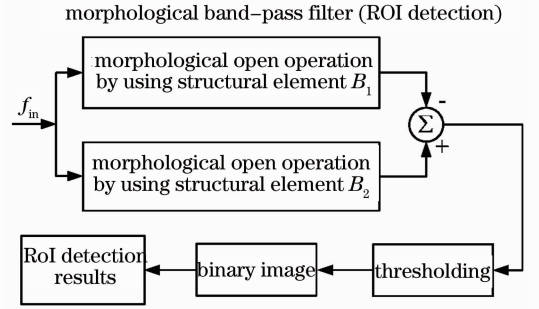


图 2 形态学带通滤波检测 RoI

Fig. 2 RoI detection by means of morphological band-pass filtering

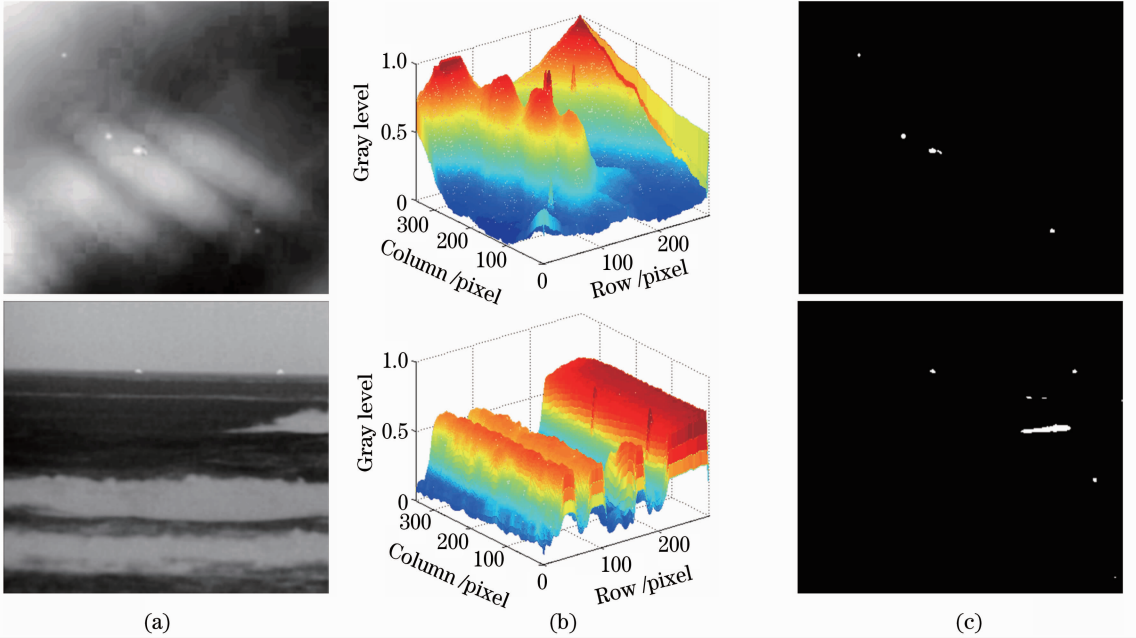


图 3 (a)原始红外图像;(b)原始图像的三维显示;(c) RoI 检测结果

Fig. 3 (a) Original infrared image; (b) three-dimensional display of original image; (c) RoI detection result

4 基于尺度空间理论的红外弱小目标检测

4.1 DoG 尺度空间理论

尺度空间理论是通过将原始图像进行尺度变换,获得图像多尺度下的空间表示序列^[14,16,17]。DoG 尺度空间可以由原始图像与不同尺度的 DoG 算子卷积生成^[14]。因此,一幅图像 $f(x, y)$ 的 DoG 尺度空间定义为

$$S_s(x, y, \sigma) = \{D(x, y, \sigma) \mid \sigma = \sigma_0, \dots, \sigma_{N-1}\}, \quad (7)$$

式中 σ 为尺度因子,取不同的尺度因子可以得到一系列不同分辨率的图像, N 为 DoG 尺度空间的层数, $D(x, y, \sigma)$ 表示尺度为 σ 的 DoG 算子与图像 $f(x, y)$ 的卷积:

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * f(x, y), \quad (8)$$

式中 $G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)$ 为 DoG 算子, $G(x, y, \sigma) = (1/2\pi\sigma^2) \exp[-(x^2 + y^2)/2\sigma^2]$ 为高斯核函数, $*$ 表示卷积运算。根据红外弱小目标的大小,选取 $\sigma_0 = 0.6, N = 11, k = 1.2, \sigma_n = \sigma_0 \cdot k^{n-1}$ 。

4.2 候选目标检测

利用 DoG 尺度空间进行红外弱小目标检测的基本思想如下:1)当 DoG 算子的中心坐标和目标中心坐标重合时,红外弱小目标在 DoG 尺度空间中会出现峰值响应,据此可以检测出目标的中心位置;2)通过寻找 DoG 尺度空间的极大值可以实现红外弱小目标尺度的检测,进而得到红外弱小目标的大小。图 4 为大小分别为 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$, $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$, $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ 的 3 个目标在 DoG 尺度空间中的峰值响应和尺度检测示意图,可以看出,目标大小 d 和目标尺度 σ 的关系为 $d \approx 2\sqrt{2}\sigma$ 。

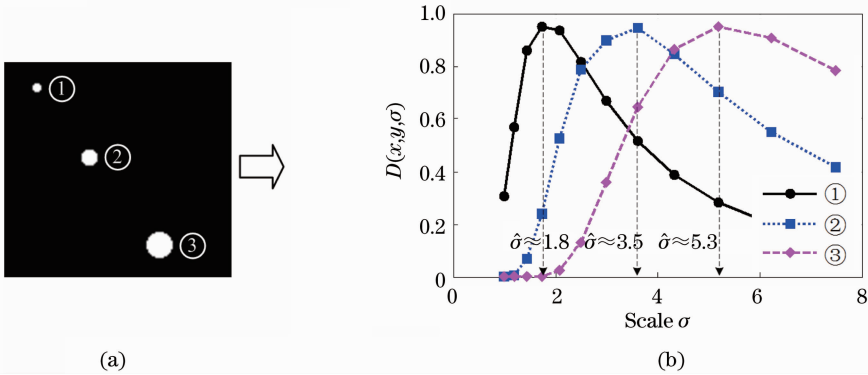


图 4 (a) 3 个不同大小的目标及其 (b) 在 DoG 尺度空间中的峰值响应和尺度检测

Fig. 4 (a) Three targets with different sizes and (b) peak response and corresponding scale detection for three targets in DoG scale space

根据红外弱小目标的模型和上面的描述可知,利用 DoG 尺度空间进行候选目标检测实际上就是候选目标参数 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\sigma})$ 的检测,它可以通过图 5 所示的 DoG 尺度空间的极大值检测来实现,用公式为

$$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\sigma}) = \max_{(x, y, \sigma)} D(x, y, \sigma). \quad (9)$$

具体实施过程为:对 DoG 尺度空间中的每个像素点的值分别和它同尺度的 8 个相邻点和上下相邻尺度对应的 9×2 个点共 26 个点比较,如果该像素点的值为极大值,则该像素点为候选目标坐标点,就认为在 (\hat{x}, \hat{y}) 处有尺度为 $\hat{\sigma}_n$ 的候选目标,且目标大小 d 和目标尺度 $\hat{\sigma}_n$ 的关系为 $d \approx 2\sqrt{2}\hat{\sigma}_n$ 。

4.3 目标验证

对得到的所有候选目标需要进行验证才能得到

最终的检测结果。需要在 DoG 尺度空间计算候选目标的局部信杂比^[1,4] (LSCR),候选目标 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\sigma})$ 的 LSCR 计算公式为

$$R_{LSCR}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\sigma}) = \frac{|\mu_T - \mu_B|}{\sigma_B}, \quad (10)$$

式中 μ_T 为候选目标灰度均值, μ_B 为背景灰度均值, σ_B 为背景灰度方差。由 DoG 尺度空间的计算公式可知,对于每一个候选目标 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\sigma})$,其灰度均值和背景灰度均值之差的绝对值等于坐标点 (\hat{x}, \hat{y}) 在尺度 $\hat{\sigma}$ 上的响应,即 $|\mu_T - \mu_B| = D(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\sigma})$,而背景灰度方差 σ_B 可以根据候选目标的尺度 $\hat{\sigma}$ 计算,其中目标区域大小取 $2\sqrt{2}\hat{\sigma}$,背景区域大小取 $4\sqrt{2}\hat{\sigma}$ 。通过阈值化操作:

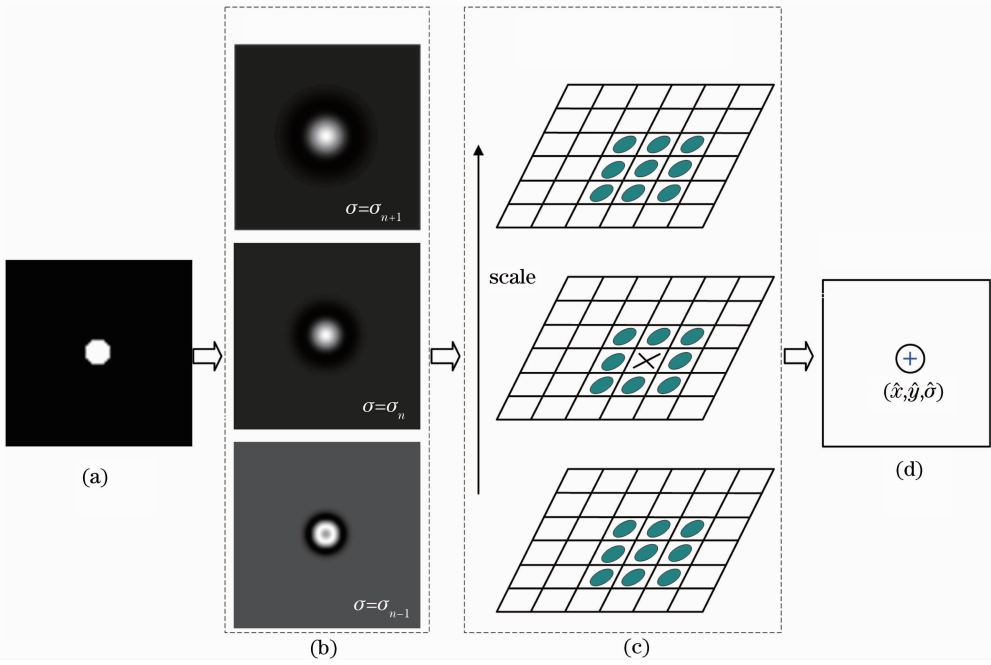


图 5 (a) 测试图像; (b) DoG 尺度空间; (c) DoG 尺度空间极大值检测; (d) 检测结果

Fig. 5 (a) Test image; (b) DoG scale space; (c) DoG scale space maximum detection; (d) detection result

$$R_{LSC}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\delta}) \geq T_{h2} \quad (11)$$

实现红外弱小目标的检测。式中 $T_{h2} > 0$ 为信杂比阈值,可以根据实际情况进行设定,通常情况下取值范围为 3~5,这里设定信杂比阈值 $T_{h2} = 4$ 。

5 实验结果与分析

5.1 检测算法的实验结果

为了验证算法的有效性,从帧频为 30 frame/s、分辨率为 352 pixel \times 288 pixel 的 3 段视频中选取了 100 幅复杂背景下的红外图像(成像器件:非制冷型凝视焦平面探测器,视场: $24^\circ \times 18^\circ$)进行红外弱小目标检测实验,其中天空背景 27 幅(飞机类小目标,作用距离 29 km),海空背景 34 幅(船只类小目标,作用距离 24 km),地面背景 39 幅(车辆类小目标,作用距离 10 km),每幅图像至少有 1 个弱小目标,100 幅图像共包含 268 个弱小目标,图像的 SNR 范围为 0.61~2.19。选用的评价指标为正确检测率(CDR)、FAR、每幅图像的运行时间和每幅图像的平均运行时间(ARTPI)。CDR 和 FAR 定义为

$$R_{CDR} = (N_c / N_t) \times 100\%, \quad (12)$$

$$R_{FAR} = [N_f / (N_f + N_c)] \times 100\%, \quad (13)$$

式中 N_c 为正确检测的弱小目标个数, N_t 为总的弱小目标个数, N_f 为虚警个数。每幅图像的运行时间是指在设定的硬件环境(Intel Pentium 2.13 GHz CPU, 2.0 GB 内存)和软件环境(Windows XP 和

Matlab R2010b 平台)下,从图像输入开始到输出最终检测结果(目标的局部 SNR、目标坐标和目标尺度)的整个处理过程所消耗的时间,然后对所有图像的运行时间求均值得到每幅图像的 ARTPI。

采用上述提出的方法对选取的 100 幅红外图像进行了弱小目标检测实验,总共有 262 个弱小目标被正确检测出来,另外有 3 个虚警,即检测率和 FAR 分别为 97.76% 和 1.13%,另外 100 幅图像的 ARTPI 为 0.2268 s。图 6 显示了其中 5 幅不同背景(第 1 幅为天空云层背景,第 2 幅和第 3 幅为地面背景,第 4 幅和第 5 幅为海空背景)的红外弱小目标图像以及它们的三维立体图、RoI 检测结果、DoG 尺度空间 [DoG 尺度空间共有 10 个不同尺度,图 6(d)和(e)是尺度因子 $\sigma = 2.5799$ 的图像]、候选目标检测结果和最终的目标检测结果,其中白色方框代表实际目标,箭头指示目标的位置,蓝色“+”代表候选目标的坐标位置,红色“+”代表最终目标的坐标位置,白色圆圈代表正确检测的目标。从图 6 中可以看出这 5 幅图像共包含 9 个弱小目标,它们几乎都被背景杂波所淹没,尤其是第 1 幅和第 4 幅图像,目标几乎成点状,上述的方法很好地将目标检测了出来,并且无一漏检和虚警(彩图请详见电子版)。表 1 详细列出了图 6 中 9 个不同目标的检测结果,包括图像 SNR、目标检测前后的 LSCR、目标坐标、目标尺度和每幅图像的运行时间。

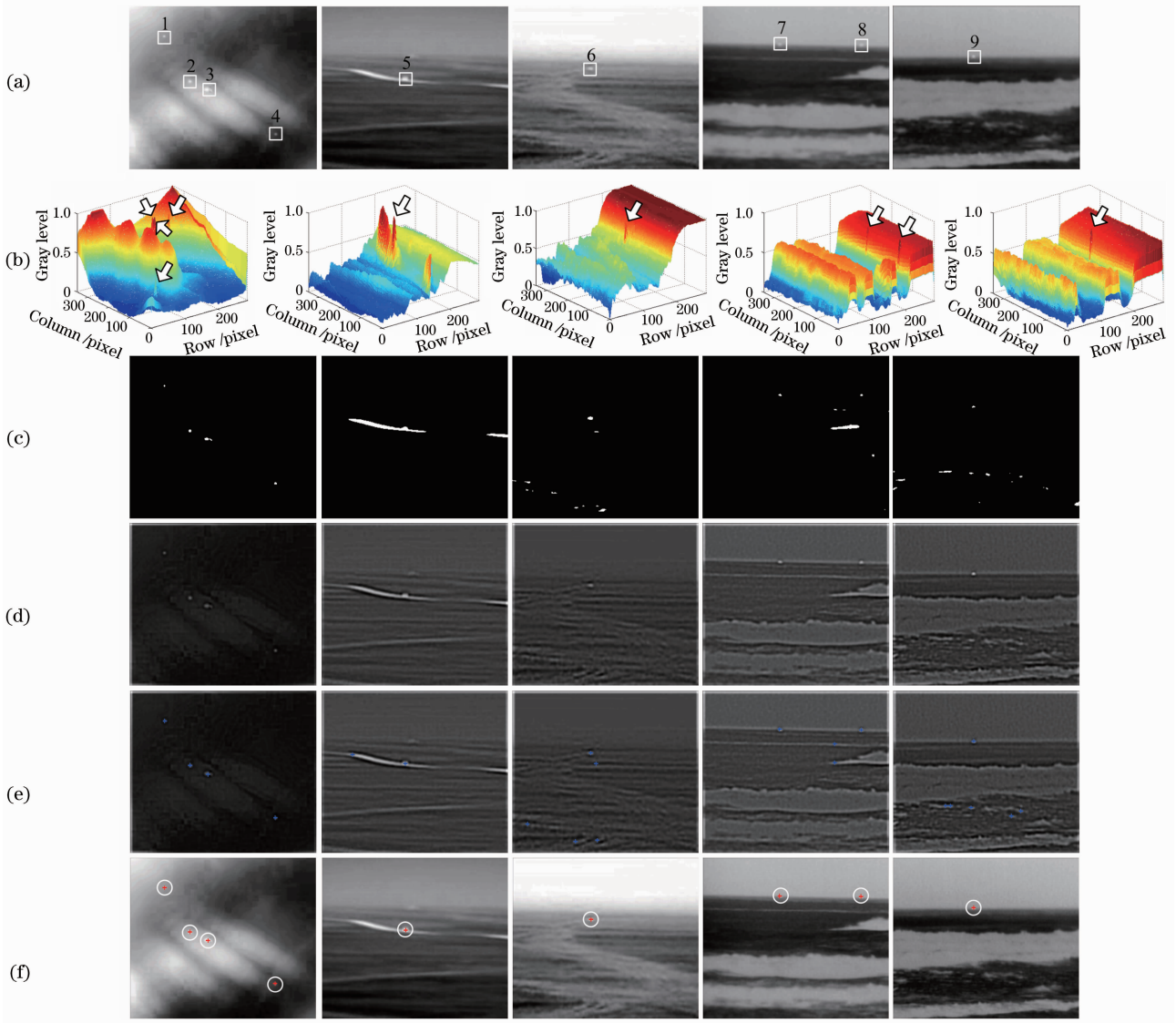


图 6 (a)原始红外图像;(b)原始图像的三维显示;(c) RoI 检测结果;(d) DoG 尺度空间($\sigma=2.5799$);
(e)候选目标检测;(f)目标检测结果

Fig. 6 (a) Original infrared image; (b) three-dimensional display of original image; (c) RoI detection result; (d) DoG scale space ($\sigma=2.5799$); (e) candidate target detection; (f) target detection results

表 1 图 6 中 9 个不同弱小目标的检测结果

Table 1 Detection results of nine dim small targets from Fig. 6

Dim small target	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SNR		1.0536			1.6629	0.7930	1.2136		1.1769
LSCR before detection	1.3145	0.8716	0.8135	1.5213	1.5098	0.8532	1.2367	1.3561	1.6109
LSCR after detection	7.2782	5.9817	5.6712	6.8712	5.1892	4.7298	5.8712	6.0981	6.2135
Target position (x,y)	(66,54)	(114,133)	(148,149)	(275,226)	(159,130)	(149,111)	(146,69)	(300,70)	(153,90)
Target scale	1.4930	1.4930	2.1500	1.2442	2.5799	2.1500	2.1500	3.0959	1.4930
Running time /s		0.2265			0.2292	0.2283	0.2271		0.2263

5.2 与其他算法的对比和分析

为了进一步衡量算法的有效性和检测速度,将该算法和基于 LoG 尺度空间的小目标检测算法^[1]、

基于图像稀疏表示的小目标检测算法^[9]进行了对比。实验中所有参数均按照文献[1,9]提供的数据进行设定。文献[9]中字典的原子个数未提供,本文

取 1500。然后分别对上述的 100 幅红外图像进行弱小目标检测实验。表 2 为 3 种不同检测算法的 CDR、FAR 以及 ARTPI 的对比结果。图 7 显示了一幅天空背景下的红外弱小目标图像采用 3 种不同

算法的检测结果,其中,方框为实际目标,白色圆圈为正确检测,黑色圆圈表示漏检,黑色虚线圆圈表示虚警(彩图请详见网络电子版)。

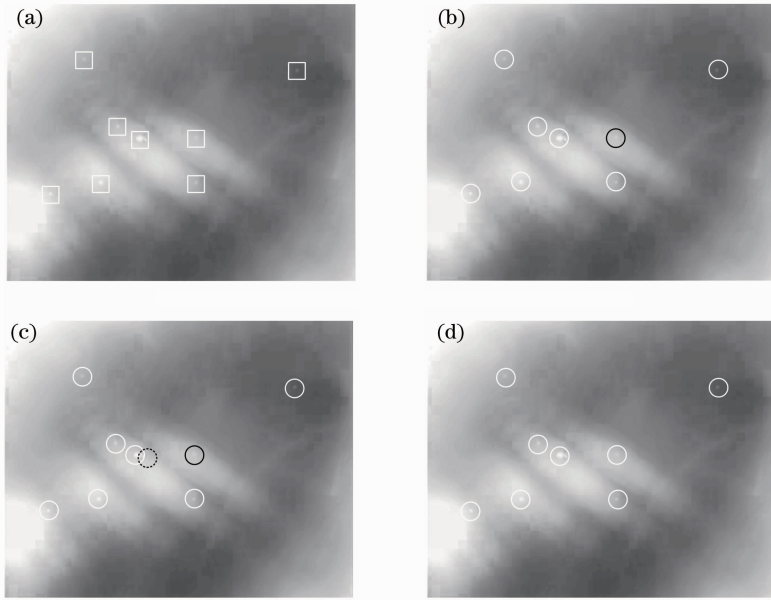


图 7 (a) 原始红外图像; (b) 文献[1]检测结果; (c) 文献[9]检测结果; (d) 本文方法检测结果

Fig. 7 (a) Original infrared image; (b) detection result using reference [1]; (c) detection result using reference [9]; (d) detection result using the proposed method

表 2 3 种检测算法的性能对比

Table 2 Performance comparison of three detection algorithms

Method	CDR / %	FAR / %	ARTPI / s
Method in Ref. [1]	96.27	3.73	2.3662
Method in Ref. [9]	95.15	7.27	0.6113
Our method	97.76	1.13	0.2268

从表 2 和图 7 中可以看出,本文方法在 CDR、FAR 和 ARTPI 等 3 个评价指标上全部优于文献[1,9]的方法。原因有以下几个方面:1)本文方法在进行弱小目标检测之前,采用了形态学带通滤波对红外图像进行预处理,提取出目标的 RoI,这样做一方面可以缩小目标的检测范围、降低 FAR,另一方面可以大大降低系统的运行时间、提高检测速度,而文献[1,9]均没有采用图像预处理这一关键环节;2)文献[1]中的尺度空间是基于 LoG 算子生成的,而本文采用 DoG 算子代替 LoG 算子进行尺度空间变换,大大降低了时间和空间复杂度^[14],因此本文方法的单幅运行时间不及文献[1]的 1/10,检测速度有了很大的提高;3)文献[9]中的小目标检测方法是先将整幅图像划分为多个子图像块,然后再对每一个子图像块根据系数的稀疏程度进行检测,这样做

很容易将尺寸稍大的弱小目标划分为多个目标,从而导致 FAR 增加。

6 结 论

提出了一种基于形态学带通滤波和尺度空间理论的红外弱小目标检测算法。采用形态学带通滤波器对红外图像进行预处理并提取目标的 RoI,以降低系统的运行时间,然后利用 DoG 多尺度空间实现弱小目标的精确检测和定位。实验结果表明,在复杂背景和低 SNR 条件下,该检测算法快速而准确,同时具有很低的 FAR。

参 考 文 献

- 1 S. Kim, J. Lee. Scale invariant small target detection by optimizing signal to clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track [J]. *Pattern Recognition*, 2012, **45**(1): 393~406
- 2 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
- 3 Z. C. Wang, J. W. Tian, J. T. Liu *et al.*. Small infrared target fusion detection based on support vector machines in the wavelet domain [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(7): 076401
- 4 B. Zhang, T. Zhang, Z. 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
- 5 Wan Ming, Zhang Fengming, Hu Shuang. Novel infrared dim and small target detection algorithm based on multi-scale gradient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 98~103
万明, 张凤鸣, 胡双. 基于多步长梯度特征的红外弱小目标检测算法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 98~103
- 6 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. 基于对称差分和光流估计的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1715~1720
- 7 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
- 8 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
- 9 Zhao Jiajia, Tang Zhengyuan, Yang Jie *et al.*. Infrared small target detection based on image sparse representation [J]. *J. Infrared & Millimeter Waves*, 2011, **30**(2): 156~161
赵佳佳, 唐峥远, 杨杰等. 基于图像稀疏表示的红外弱小目标检测算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(2): 156~161
- 10 Hu Tun, Zhao Jiajia, Cao Yuan *et al.*. Infrared small target detection based on saliency and principle component analysis [J]. *J. Infrared & Millimeter Waves*, 2010, **29**(4): 303~306
胡瞰, 赵佳佳, 曹原等. 基于显著性及主成分分析的红外弱小目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(4): 303~306
- 11 Wu Yiquan, Ji Shouxin, Zhan Bichao. Infrared dim target detection based on nonsubsampling contourlet transform and independent component analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0510002
吴一全, 纪守新, 占必超. 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[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0510002
- 12 J. P. Ardouin. Point source detection based on point spread function symmetry [J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(9): 2156~2164
- 13 H. D. Cheng, J. Wang, X. Shi. Microcalcification detection using fuzzy logic and scale space approaches [J]. *Pattern Recognition*, 2004, **37**(2): 363~375
- 14 D. G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *Int. J. Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91~110
- 15 J. C. Yang, D. S. Park. Detecting region-of-interest (RoI) in digital mammogram by using morphological bandpass filter [C]. IEEE Int. Conf. Multimedia and Expo (ICME), 2004, 1279~1282
- 16 T. Lindeberg. Feature detection with automatic scale selection [J]. *Int. J. Computer Vision*, 1998, **30**(2): 79~116
- 17 K. Mikolajczyk, C. Schmid. Indexing based on scale invariant interest points [C]. Eighth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2001. 525~531

栏目编辑: 李文喆