

采用尺度空间理论的红外弱小目标检测方法

龚俊亮^{1,2}, 何 昕³, 魏仲慧³, 朱 弘¹, 郭立俊¹

(1. 中国电子科技集团第 38 研究所, 安徽 合肥 230088; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为了检测红外场景中尺寸大小变化的弱小目标, 针对传统滤波方法中固定大小滤波核对此类特性目标检测表现出的不足, 提出一种基于尺度空间理论的红外弱小目标检测方法。首先对弱小目标特性进行分析, 提出采用点扩散函数形式的目标模型来描述弱小目标; 采用固定自适应邻域的方法对原始红外图像进行预处理, 抑制背景杂波, 增强目标能量; 依据尺度规范化后的拉普拉斯尺度空间对图像不同元素滤波响应的不同, 获取图像中的可疑目标, 利用可疑目标点与其周围像素的梯度关系得到可疑目标点的中心坐标, 并据此得到其在图中的尺寸大小; 对每个可疑目标划分一个自适应大小窗口, 获取分割阈值, 分割出真实目标。实验结果表明, 该方法能较好地检测出弱小目标, 且具有较低的虚警率。

关键词: 红外图像; 尺度空间; 目标检测

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2566-08

Infrared dim and small target detection method using scale-space theory

Gong Junliang^{1,2}, He Xin³, Wei Zhonghui³, Zhu Hong¹, Guo Lijun¹

(1. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to detect small targets with changing size in infrared scene, aiming at the problems in traditional filtering method with fixed size filter, a method for small and dim infrared targets detection based on scale-space theory was proposed. First, the target characteristic was analyzed and point spread function form was used to represent the target model. Then, in order to suppress background clutter and enhance the power of target, fixed adaptive neighborhood method was used in image preprocessing, on the basis of Laplace scale-space after scale standardization which has different filtering responses for different elements, the suspicious targets were obtained in the images, then with the gradient relationship between suspicious target point and its surrounding pixels, the coordinates of the suspicious targets centers and its size were got; Finally, each suspicious targets gained an adaptive window to obtain segmentation

收稿日期: 2013-01-15; 修订日期: 2013-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(60902067)

作者简介: 龚俊亮(1988-), 男, 博士生, 主要从事数字图像处理方面的研究。Email: gongjunliang198802@sina.com

导师简介: 何昕(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电测量等方面的研究。Email: hexin6627@sohu.com

threshold and true targets. Experiments results show that, compared with traditional methods, the new method proposed in this paper has a better performance to detect small targets, and has a lower false alarm rate.

Key words: infrared image; scale-space theory; targets detection

0 引言

在红外搜索与跟踪系统(IRST)中,尽早地检测出来袭导弹与飞机能够给系统提供充足的反应时间,这要求当目标距离较远时系统便能检测出来袭目标。IRST的作用距离通常最远可达上百千米,此时,红外目标占有较少的像元数目,信噪比低且尺寸和形状不固定。

针对红外弱小目标的检测问题,目前国内外提出了不少方法,参考文献[1]提出了一种基于局部极大值的弱小目标检测方法,但其必须通过后续帧来识别真正目标,且当背景复杂时,检测效果较差;参考文献[2]提出了基于动态规划的目标检测方法,但其必须通过多帧有效累积目标能量,实时性较差;参考文献[3]提出了一种基于复滤波器组的弱小目标检测方法,由于该方法对分解的各子频带单独处理并赋予不同权重,因此,权重参数对目标检测有着重要的影响。此外,还有如采用 Top-hat、小波变换的方法等等,虽然这些方法能够在一定程度上抑制背景杂波,在背景不是很复杂时检测出目标,但这些方法普遍没有考虑目标连续成像时其大小发生的变化,选取的滤波器并没有考虑目标连续成像的特性。从滤波理论来说,滤波器的设计形状应该和目标形状与特性一致,这样才能最优最高效地检测出目标,在IRST中,与红外成像系统有着相对运动的小目标成像不可能一直保持同样的尺寸。因此,采用尺寸与形状固定的滤波器来进行小目标检测并不是一个理想的方法。

目前,考虑目标尺度变化且利用多尺度方法进行红外弱小目标检测的相关研究不多,Gregoris提出了一种基于多尺度小波变换的小目标检测方法^[4],该方法能够提供有效的图像结构信息来区分目标及杂波,但该方法计算复杂,且不能提供目标的确切大小及位置信息。文中从图像的尺度空间入手,提出一种新的目标检测方法,在采用固定自适应邻域方法

对图像进行预处理之后,依据尺度规范化后的拉普拉斯尺度空间对图像不同元素滤波响应的不同,获取图像中的可疑目标,从可疑目标与其周围背景像素点的灰度梯度关系入手,获取图中所有可疑目标的中心位置,并得到其在图中的尺寸大小,最后对可疑目标进行阈值分割,得到图像中的真实目标。

1 尺度空间理论

尺度空间的基本思想是在视觉信息(图像信息)处理模型中引入一个尺度因子,通过对视觉信息进行尺度变换并连续变化尺度因子,获得多尺度下的尺度空间视觉信息表示序列,综合序列信息以深入地挖掘视觉信息的本质特征,其在立体匹配、目标识别、基于视觉的移动机器人定位等相关问题上有着重要的应用价值。

以 $I(x, y)$ 代表原始图像, $G(x, y, \sigma)$ 为尺度 σ 可变的二维高斯函数,如公式(1)所示;图像的高斯尺度空间 $L(x, y, \sigma)$ 可以表示为原始图像与高斯函数进行卷积,如公式(2)所示。

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \otimes I(x, y) \quad (2)$$

高斯卷积核是实现尺度变换的唯一线性核,高斯尺度空间图像序列不能提供任何图像结构信息,但其导数在多尺度结构分析中却有着重要的作用。高斯核的二阶导数,即拉普拉斯高斯(LoG)核能提取图像内圆斑结构的某些信息,且其空间导数的幅度随着尺度的不断增大而减小。

$$\text{LoG}(x, y, \sigma) = \frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2+y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

参考文献[5]指出尺度规范化的 LoG 算子具有真正的尺度不变性,尺度规范化后的拉普拉斯尺度空间(LSS)如公式(4)所示,

$$\text{LSS}(x, y) = \{F(x, y, \sigma) | \sigma = \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N\} \quad (4)$$

式中: $F(x, y, \sigma)$ 为尺度因子为 σ 时的尺度规范化后的拉普拉斯图像; σ^2 为规范化因子。

$$F(x, y, \sigma) = \sigma^2 |\text{LoG}(x, y, \sigma) I(x, y)| \quad (5)$$

对于大小为 2×2 的小目标, σ_1 的最小值为 0.5, 为了让尺度体现出连续性, 令相邻两层图像间的尺度因子为 k 倍的关系, 即有 $\sigma_n = k^n \sigma_1$ 。例如, $n=1 \sim 10$, $\sigma_1=0.5, k=1.2$, 那么 σ_n 值域为 [0.50 0.60 0.72 0.86 1.03 1.24 1.49 1.79 2.14 2.57]。

2 红外弱小目标成像模型分析

远距离红外目标由于大气折射与散射、光学离焦、透镜像差等一系列原因, 使得其在图像中呈现出斑点状结构、成像面积小、对比度低、成像模糊且无明显形状特征^[6]。据此, 提出采用点扩散函数形式的目标模型来描述弱小目标, 其描述如公式(6)所示:

$$T(x, y | x_t, y_t, \sigma) = \frac{I_p}{d} \exp \left\{ -\frac{(x-x_t)^2 + (y-y_t)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (6)$$

该目标模型由四个参数构成, 其中 (x_t, y_t) 为目标中心位置; d 为目标大小直径; I_p 为目标峰值强度; σ 为尺度因子; 当目标中心位置确定后, 目标峰值强度也随之确定, 因此, 大小变化的目标检测问题可以归结为参数 (x_t, y_t, σ) 的估计问题。

一些典型的红外小目标斑点状结构成像图如图 1 所示, 目标模型图如图 2 所示, 用于目标滤波的拉普拉斯高斯模型如图 3 所示。



图 1 真实红外目标图像

Fig.1 Examples of real target images

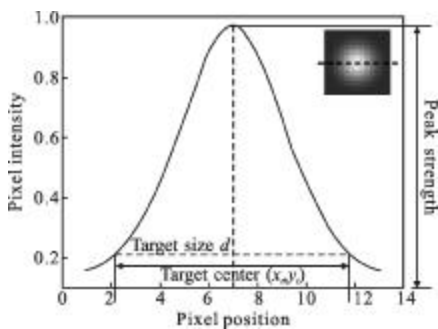


图 2 目标参数模型

Fig.2 Target parametric model

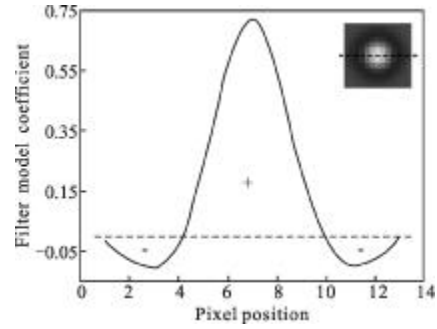


图 3 目标滤波 LoG 模型

Fig.3 Laplacian of Gaussian model for target filtering

在图 3 中, 滤波器零值上方(+区域)的系数用于估计目标信号, 滤波器零值下方(-区域)的系数用于估计背景信息。

3 基于尺度空间的红外弱小目标提取算法

3.1 采用固定自适应邻域的背景抑制

传统的采用固定窗口进行统计平均的滤波方法能很好地抑制图像中的加性白噪声, 但其会模糊图像细节^[7], 由于弱小目标在图像中属于细节成分^[8], 因此, 文中引入自适应邻域的概念进行图像滤波处理, 其基本思想是将每一个待处理的像素视为种子像素, 考察其 8-邻接的邻域像素, 按一定准则将与种子像素属于同一视觉对象的邻域像素划入同一集合, 随后将纳入同一集合的像素视为种子像素, 继续考虑其 8-邻接的邻域像素, 不断纳入新像素点, 这称为自适应邻域的区域扩张。

为了提高处理速度, 文中不使用迭代机制进行区域扩张, 而是定义一搜索区域, 只对搜索区域内的像素进行区域扩张处理, 将搜索区域内与最初种子像素属于同一视觉对象的像素点进行统计平均获得处理后的像素值。

设 $g(i, j)$ 为种子像素, $g(k, l)$ 为其 8-邻接的邻域像素, 定义搜索区域为以 $g(i, j)$ 为中心的 5×5 区域, 定义准则为 $\|g(i, j) - g(k, l)\| < T$, T 为衡量像素相似性的加性容限值, 将满足该准则的像素点纳入种子像素的自适应邻域, 进行区域扩张直至处理完搜索区域内的所有像素, 令 $f(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=n} g(i, j)$, $g(i, j)$ 为该区域内与 $g(i, j)$ 属于同一视觉对象的所有像素, $f(i, j)$ 为 $g(i, j)$ 处理后的像素值。

假如某种子点属于图像边缘或目标点, 则只有

少量的与其属于同一边缘或者目标区域的像素点进行统计平均,其结果基本上保持了其原始值,这便在有效抑制图像加性白噪声的同时很好地保护了图像细节。

3.2 可疑目标分割

对于图像中的斑点状结构元素,尺度规范化后的拉普拉斯尺度空间对其滤波响应与对图像云层边缘和图像角点滤波响应截然不同,如图 4 所示。

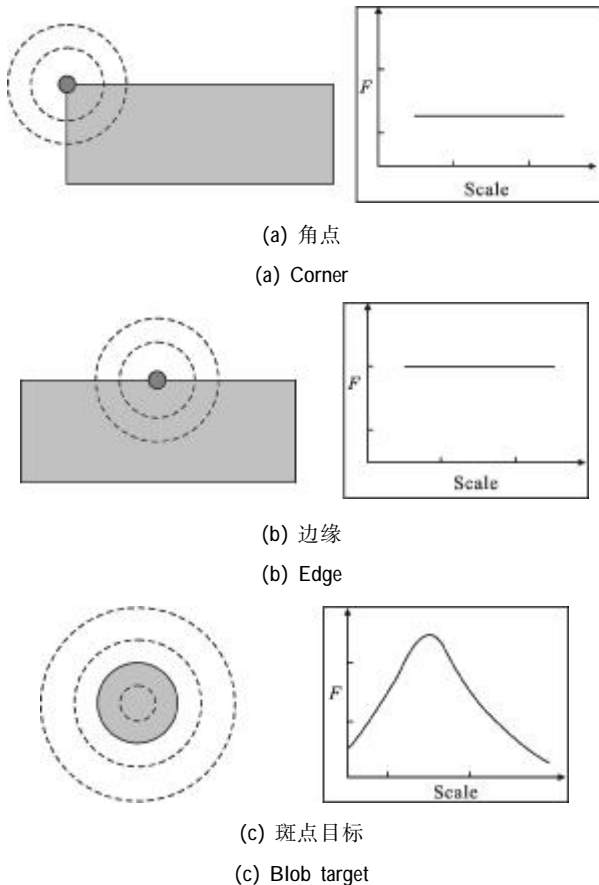


图 4 不同结构拉普拉斯尺度空间响应
Fig.4 Response of LoG filtering for different structures

从图 4(a)、4(b)可以看出,对于图像角点或者边缘,规范化后的拉普拉斯尺度空间对其滤波响应并未随着尺度的不断变化而变化,而是保持输出响应不变;对于斑点状目标,如图 4(c)所示,滤波响应随着尺度变大而不断变大,并在某一特定尺度达到峰值,随后随着尺度变大而变小。

由于红外图像背景变化缓慢,相关性强,其只在某些方向上有着较大的梯度值,而目标在局部区域为极大值^[9],定义图像中像素 $g(x, y)$ 梯度的数学描述如下:

$$K[g(x, y)] = [\partial g / \partial x \quad \partial g / \partial y]^T \quad (7)$$

其模为:

$$K[g(x, y)] = [(\partial g / \partial x)^2 + (\partial g / \partial y)^2]^{1/2} \quad (8)$$

在数字图像中,通常采用差分近似微分,而对于小目标检测,如果仅考虑某一方向梯度,则虚警太多,文中采用 4 向梯度,包括水平正负向和垂直正负向,取梯度步长为 5,当目标各向梯度值均大于零且 4 向平均梯度大于某一阈值 T ,记录该点坐标 (x, y) ,该点为可疑目标点的一个组成像素,以 5×5 为窗口 w ,找出窗口中具有平均梯度最大的像素点 (x_m, y_m) ,将图像与拉普拉斯高斯核进行卷积,以 (x_m, y_m) 为中心, 5×5 为窗口 w ,确立如下条件:

$$F(x_i, y_i, s) > F(x_w, y_w, s) \quad (x_w, y_w) \in w \quad (9)$$

如果 (x_i, y_i) 满足公式 (9),则 (x_i, y_i) 为目标中心位置,连续变化尺度因子,对其进行规范化,通过在尺度空间序列图中点 (x_i, y_i) 处获取具有最大滤波响应的尺度空间,得到目标尺度。图 5 为一 5×5 大小目标,取 $n=1-2, k=1.3, \sigma_1=0.5$ 其在尺度为 $\sigma=0.86$ 时获得最大滤波峰值,因此,估计目标直径为 $6\sigma=5.16$ 个像素。

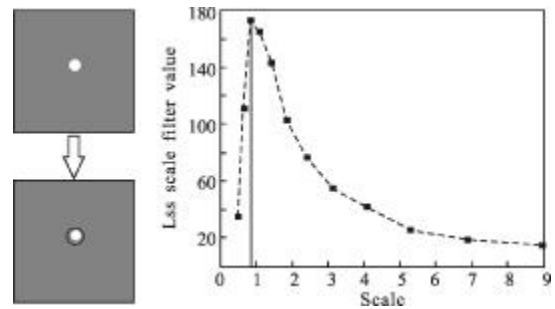


图 5 拉普拉斯尺度空间内 5×5 大小目标响应
Fig.5 Response of Laplacian scale-space for a 5×5 target

3.3 真实目标检测

为了从 3.2 节得出的可疑目标中分割出真实目标,文中使用阈值分割的方法。如果对所有可疑目标最大滤波响应使用同一个全局阈值进行分割,其效果并不是很好,考虑到 3.2 节中通过尺度空间序列图得出了所有可疑目标大小,因此,文中提出一种依据目标大小自适应确定阈值分割窗口,获取分割阈值的方法,即依据目标大小划定一个背景窗口,该窗口随着目标尺寸的变化而变化,这样便克服了传统固定尺寸窗口的缺陷,即目标过大则窗口内背景过小,目标过小则窗口内背景过大。例如,估计出的一可疑目标尺寸为 s ,目标大小为 $6s$,则背景总大小(加上目标)自适应的设置为 $18s \times 18s$,另外,采用均值 M 和标准差 σ 来获取分割阈值, f_i 为背景区域中

的像素值, n 为背景区域中的像素个数。

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i, \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - M)^2} \quad (10)$$

自适应的阈值依照下式选取:

$$T = M + k \in \sigma \quad (11)$$

式中: k 为系数, 是用来平均不同场景下的阈值, 其值通过对不同场景下的红外图像进行反复实验来确定, 通常取 3~5。图 6 为采用自适应阈值分割法后对虚假目标的抑制效果图, 图 6(a) 为目标与背景范围图, 图 6(b) 中白圈为检测出的可疑目标, 其中画黑框的白圈为真实目标, 图 6(c) 为阈值分割后的结果, 可以看出, 阈值分割准确地分割出真实目标, 而把虚假目标剔除出去。

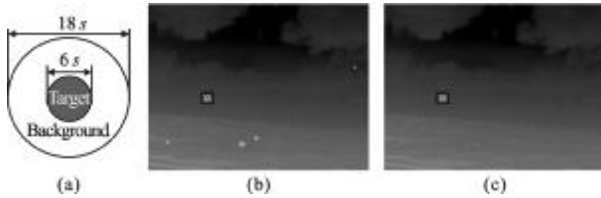


图 6 阈值分割对虚假目标的抑制效果

Fig.6 Inhibition effect of threshold segmentation for false targets

4 实验结果及分析

为了评价文中方法在目标检测中的表现, 利用实际的包含弱小目标的红外图像序列进行实验, 并将其与最近提出的基于非下采样 Contourlet (NSCT)^[10] 以及基于最小二乘支持向量机 (LS-SVM)^[11] 的小目标检测算法进行对比, 图 7 为文中方法和对比算法步骤图示。

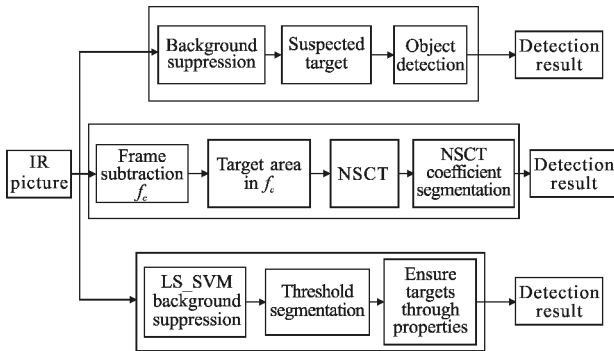


图 7 文中方法与对比方法步骤图

Fig.7 Test platforms of the proposed and baseline method

文中方法中令尺度因子 $\sigma_1=0.6, k=1.2, n=1 \sim 12,$

引入正确检测率 (CP) 与虚警率 (FA) 作为评判标准, 其定义如下:

$$CP[100\%] = \frac{\text{正确检测到的真实目标数}}{\text{真实目标数目}} \times 100\%$$

$$FA[100\%] = \frac{\text{虚警目标数}}{\text{检测出的目标总数}} \times 100\%$$

假若目标的真实位置和检测出来的目标位置相差在一定范围内 (文中为 3 个像素), 则称目标被正确检测到。

实验 1: 图 8(a) 为从预备着陆的飞机视频中每秒抽取 1 帧, 组成的一个 100 帧的图像序列中的某几帧, 飞机由远及近, 成像面积逐渐增大, 图像大小为 240×180 , 图 8(b) 为采用文中方法进行弱小目标检测的结果, 图 8(c) 为基于 NSCT 算法的检测结果, 图 8(d) 为基于 LS-SVM 算法的检测结果, 通过对比可以发现, 在目标较小时, 如抽取的第一帧, NSCT 与 LS-SVM 均未能检测出真实目标, 且 LS-SVM 出现了一个虚警, 随着目标的逐渐加大, NSCT 与 LS-SVM 均能检测出目标, 但 NSCT 方法中由于高频噪声和干扰物也与小目标一样同属高频分量, 且其未引入后续目标运动分析排除虚假目标, 导致虚警较多, LS-SVM 虽然虚警率较低, 但由于其采用 SVM 对背景进行预测, 运算量较大, 尽管参考文献 [11] 中引入粒子群算法对核参数和惩罚系数进行了优化选择, 但其实时性仍然较差。从结果图中可以看出, 两种对比算法均将图像中陆地上的某些成分检测成了目标, 而文中方法很好地区分了陆地干扰物, 成功检测出真实目标。图像序列 100 帧的目标检测结果如图 9 所示, 可以看出: 文中方法在 100 帧中有 3 帧未检测出目标, 有 2 帧检测出来的目标尺寸有错误, $CP=95\%$, 100 帧中共有 8 个虚假目标, $FA=7.4\%$; 基于 NSCT 检测算法在目标较小时检测出目标概率较低, 导致其在 100 帧中只检测出 83 帧, $CP=83\%$, 其中共检测出 21 个虚假目标, $FA=17.3\%$, 基于 LS-SVM 检测算法在 100 帧中有 88 帧成功检测出目标, $CP=88\%$, 共产生 13 个虚假目标, $FA=11.5\%$, 而且基于 NSCT 与基于 LS-SVM 算法均不能检测出目标大小。由于输入图像序列噪声干扰, 因此图 9 估计的目标大小 (半径) 有波动, 从图 9 可以看出, 目标大小的变化趋势为随着图像帧数的增加而逐渐变大, 据此, 可以判定目标正在接近, 这对于评判其是否构成威胁及威胁程度提供了有价值的信息。



(a) 输入序列
(a) Input sequence



(b) 文中方法检测结果
(b) Detection results using proposed method



(c) NSCT 检测结果
(c) Detection results based on NSCT



(d) LS-SVM 检测结果
(d) Detection results based on LS-SVM

图8 飞机目标检测结果

Fig.8 Test results for incoming target sequence

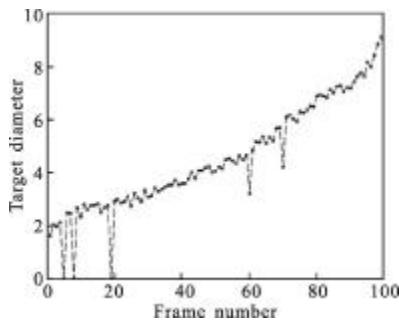


图9 使用文中方法估计目标大小

Fig.9 Estimation of target size using method of this paper

实验 2:不同背景下的目标检测,图 10(a1)~10(d1)为不同背景下的红外图像,大小均为 240×180,背景分

别为简单天空背景图 10(a1),复杂云层背景图 10(b1),海天背景图 10(c1)及海天陆地背景图 10(d1),各图中的真实目标均以方框圈住标记。图 10(a2)~10(d2)为采用文中方法得出的目标检测结果图,检测结果用白色圆标记以便观察目标的尺寸大小。图 10(a3)~10(d3)为基于 NSCT 算法得出的目标检测结果图,图 10(a4)~10(d4)为基于 LS-SVM 算法得出的目标检测结果,该两种对比算法检测结果均以白色方框标记。从图 10 可以看出,文中方法在四种背景下均检测出所有目标,由于海天陆地背景红外图像其背景过于复杂,导致了两个虚警目标,基于 NSCT 算法在简单天空背景图10(a3)、复杂云层背景图 10(b3)也正确检测出目标且无虚警,

但在海天背景图 10(c3)及海天陆地背景图 10(d3)中均出现虚警,而基于 LS-SVM 算法除简单天空背景图10(a4)无虚警外,均出现虚警,且背景越复杂,虚警率越高。从

以上四种背景中各取出连续 100 帧,图 11 为三种方法检测结果虚警率柱形图,从结果可以看出,文中方法在各种不同背景下虚警率均比另外两种算法要低。

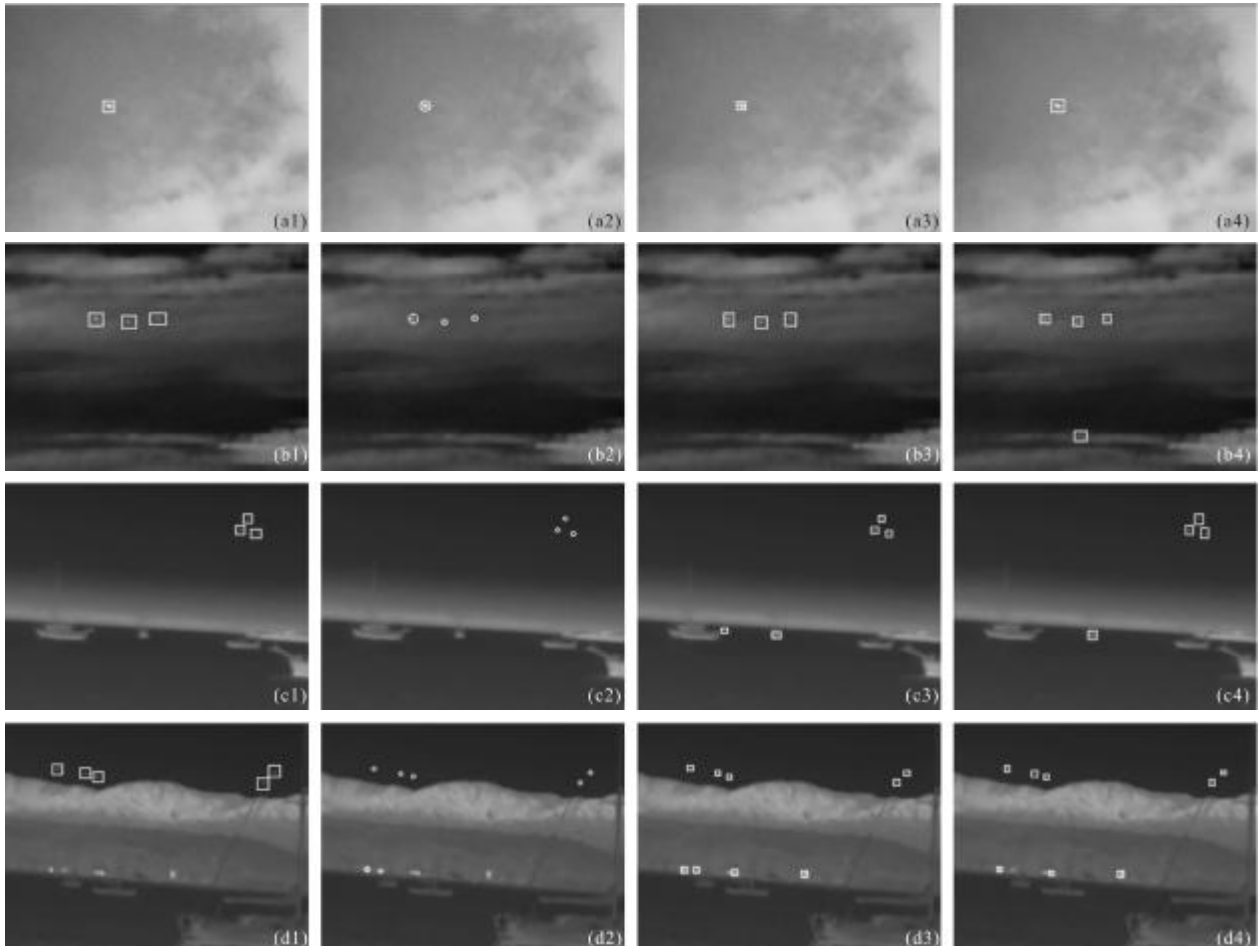


图 10 不同背景目标检测结果

Fig.10 Target detection under different backgrounds

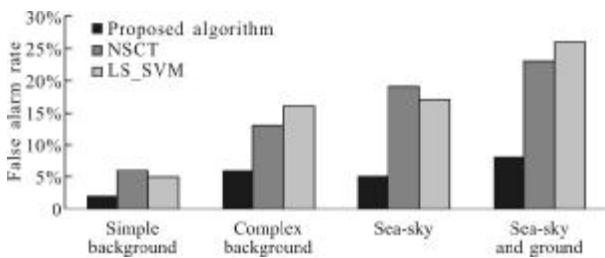


图 11 不同背景目标检测虚警率

Fig.11 False alarm of target detection under different backgrounds

5 结 论

针对传统目标检测方法滤波器尺寸固定,影响其对大小变化目标的检测效率,导致低检测率和高

虚警率的现象。文中提出一种基于拉普拉斯尺度空间的弱小目标检测新方法,新方法提出了采用点扩散函数形式的目标模型来描述弱小目标,首先进行图像预处理,提高信噪比,在拉普拉斯尺度空间序列图中获取图像中所有可疑目标的大小及中心点位置,最后通过对每一个可疑目标单独采取阈值分割的方法判断出真实目标。实验结果表明,文中方法能够获取目标的大小,并从大小变化中得出目标威胁程度,具有较高地检测正确率与较低的虚警率。

参考文献:

[1] Zhang Qiang, Cai Jingju, Zhang Qiheng, et al. Small dim infrared targets segmentation method based on local

- maximum[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(1): 41-44. (in Chinese)
- 张强, 蔡敬菊, 张启衡, 等. 基于局部极大值的红外弱小目标分割方法[J]. *红外技术*, 2011, 33(1): 41-44.
- [2] Wang Bo, Zhang Jianqi. Dynamic programming approach to small moving target detection in infrared image sequences[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(4): 613-616. (in Chinese)
- 王博, 张建奇. 红外运动弱小目标的动态规划检测 [J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(4): 613-616.
- [3] Qin Jian, Chen Qian, Qian Weixian. Dim and small target detection based on complex filter bank [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(10): 2583-2588. (in Chinese)
- 秦剑, 陈钱, 钱惟贤. 基于复滤波器组的红外弱小目标检测算法[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(10): 2583-2588.
- [4] Gregoris D J, Yu S K W, Tritchew S. Detection of dim targets in FLIR imagery using multiscale transforms [C]// *SPIE*, 1994, 2269: 62-71.
- [5] Kong Jun, Tang Xinyi, Jiang Min, et al. IR target tracking based on scale space feature points matching [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2104-2109. (in Chinese)
- 孔军, 汤心溢, 蒋敏, 等. 采用尺度空间特征点匹配的红外目标跟踪[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2104-2109.
- [6] Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Qunchang, et al. Suppression of infrared image background by multiscale hidden Markov model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1950-1956. (in Chinese)
- 秦翰林, 周慧鑫, 刘群昌, 等. 采用多尺度隐式马尔可夫模型的红外图像背景抑制 [J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(8): 1950-1956.
- [7] Li Peng, Chen Qian, Zheng Haiou, et al. Pretreatment method of small targets infrared image based on complex background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 958-962. (in Chinese)
- 李鹏, 陈钱, 郑海鸥, 等. 基于复杂背景的红外小目标图像预处理方法 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 958-962.
- [8] Gao Jing, Sun Jiyin, Liu Jing, et al. FLIR target recognition based on local fuzzy threshold [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 3056-3063. (in Chinese)
- 高晶, 孙继银, 刘婧, 等. 基于区域模糊阈值的前视红外目标识别[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(12): 3056-3063.
- [9] Zhang Z, Cao Z, Zhang T, et al. Real-time detecting system for infrared small target[C]//*SPIE*, 2007, 6786: 648-656.
- [10] Liu Xingmiao, Wang Shicheng, Zhao Jing. Infrared small target detection based on nonsubsampling Contourlet transform and statistical distribution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(4): 908-915. (in Chinese)
- 刘兴淼, 王仕成, 赵静. 结合统计分布和非下采样 Contourlet 变换的红外小目标检测 [J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(4): 908-915.
- [11] Wu Yiquan, Luo Zijuan. Small infrared target detection based on least squares support vector machine temporal background prediction[J]. *ACTA Armamentarii*, 2010, 31(6): 678-684. (in Chinese)
- 吴一全, 罗子娟. 基于最小二乘支持向量机时域背景预测的红外弱小目标检测[J]. *兵工学报*, 2010, 31(6): 678-684.