

一种基于方差标记的形态学红外小目标检测算法

方义强^{1,2},程正东²,樊 祥²,朱 斌²,陈晓斯^{1,2}

(1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽合肥 230037;2. 合肥电子工程学院,安徽合肥 230037)

摘要: 形态学算法在红外小目标检测上具有良好的性能,先对该算法的处理过程进行了分析,结合实际拍摄的红外小目标图像研究发现,算法在处理过程中存在很多不必要的计算,因此从提高算法的实时性出发,提出了一种基于方差标记的形态学方法.该方法首先计算图像每个像素的局部方差,然后由方差根据阈值判断条件对图像进行标记,标记完后再通过形态学算法对标记的部分进行 Top-hat 运算.理论分析和仿真实验表明,该方法能够极大的提高形态学的检测效率,而且对算法的检测性能有一定的提高.

关键词: 红外小目标;形态学;方差标记;检测

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2015)02-0338-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.02.020

A Morphology Algorithm for IR Dim Target Detection Based on Variance-Mark

FANG Yi-qiang^{1,2}, CHENG Zheng-dong², FAN Xiang², ZHU Bin², CHEN Xiao-si^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei, Anhui 230037, China;

2. Electronical Engineering Institute of Hefei, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract: The morphology algorithm has proved to have good performance in IR small target detection, an analysis for the process of the algorithm was done firstly, and combined with the real IR small target images, the factor that much unnecessary calculation in the process of the algorithm was found. So, aimed at promoting the real-time demand, a morphology method that based on variance-mark was proposed. The local variance of every pixel in the image was firstly calculated according to this method, and then the image was marked by the variance and the threshold qualification. After marking the image, the Top-hat operation was carried on the marked pixels by morphology algorithm. The theory analysis and the simulation demonstrated that the detection efficiency was promoted remarkably through the proposed algorithm; furthermore, the detection performance of the algorithm was also improved.

Key words: IR small target; morphology; variance-mark; detection

1 引言

红外小目标检测是红外精确制导、红外搜索跟踪系统研究的关键技术之一,得到了广泛的关注^[1~3].经典的检测算法有中值滤波、高通滤波、形态学滤波等,这些算法都具有较好的检测效果,许多算法都是在这些算法的基础上发展而来的;另外一些学者也提出了将一些新的理论引用到红外小目标的检测中.如文献[4]在 Lindeberg 尺度空间理论的基础上,结合小目标的尺度信息,提出了改进的小目标检测算法;文献[5]提出了基于视觉注意的红外小目标检测算法.除此之外,如各种机器学习^[6,7]相关理论,也在小目标检测算法中得到了应用.可以看到,红外小目标检测算法的发展可大致分为两个方向:一是对传统算法进行改进、优化,得到更优的

检测效果,该类算法的检测性能比较可靠;另一类是引进新的理论,进行探索性的研究,这类算法就近几年的发展来看,取得的效果不太明显,尤其是在实时性、可实现性方面.

红外小目标具有成像面积小、信号弱、背景复杂等特点,使得对红外小目标的检测非常困难,很多算法都只能在一定的条件下实现有效的检测.如中值滤波算法要求目标具有较高的信噪比^[1];文献[4]的算法要求目标具有相对稳定的形状特性.在众多的红外小目标检测算法中,数学形态学算法因具有优良的检测效果和鲁棒性,得到了广泛的认可和应用^[8],除此之外,该算法还具有结构简单、实时性好、易于硬件开发等诸多的优点,应用前景广.许多文献对形态学算法在小目标检测中的应用进行了研究^[9,10].综合来看这些研究主要是为了提

高算法的检测性能,采取的手段主要有:

(1) 针对目标的特点,对形态学中的结构元素进行改进,包括对结构元形状、大小等的改进;

(2) 使形态学算法和其他算法相结合,取各自算法的优点来提高检测效果;

(3) 对形态学的基本运算(腐蚀、膨胀、开运算、闭运算等)进行多样化的组合,如对这些基本运算计算顺序的改变或者多次对图像进行基本运算等。

本文通过对形态学中 Top-hat 运算进行研究,结合红外小目标图像,对如何提高算法的运算效率进行了研究,提出了一种基于方差标记的方法,使得算法的效率得到了极大的提高,并且改善了检测效果。

2 形态学算法过程分析

运用形态学检测红外小目标的典型运算是 Top-hat 运算.那么对输入图像 f 进行 Top-hat 运算可表示为^[11]:

$$f(x, y) = f(x, y) - (f \circ \mathbf{B})(x, y) \\ = f(x, y) - ((f \otimes \mathbf{B}) \oplus \mathbf{B})(x, y) \quad (1)$$

其中 \mathbf{B} 为结构元素, \otimes 、 \oplus 和 \circ 分别为灰度图像的腐蚀、膨胀和闭运算符。

$$(f \otimes \mathbf{B})(x, y) = \min \{ f(x-i, y-j) - \\ B(i, j) \mid (x-i, y-j) \in D_f, (i, j) \in D_b \} \quad (2)$$

$$(f \oplus \mathbf{B})(x, y) = \max \{ f(x-i, y-j) + \\ B(i, j) \mid (x-i, y-j) \in D_f, (i, j) \in D_b \} \quad (3)$$

D_f 和 D_b 分别为 f 和 \mathbf{B} 的定义域.在红外小目标检测中,结构元素的选取对算法的性能具有决定性的作用,许多文献都针对结构元素进行了详细的研究^[12-14],实际中红外小目标一般占几个到几十个像素,因此选择 5×5 的结构元素比较合适。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

图 1 为一帧包含红外小目标的图像.根据公式(1), Top-hat 运算主要包括三个步骤:腐蚀、膨胀和减运算,运算流程可以用图 2 表示.图 3、图 4 分别为通过腐蚀

和膨胀运算后的得到的结果.两个步骤在运算时,都需按照公式(2)从原图像左上角开始计算,对整个图像进行遍历计算后得到处理结果。



图1 原始红外小目标图像

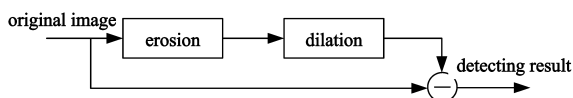


图2 Top-hat运算流程图

按照 Top-hat 运算的思想,膨胀后的图像是原图像的一个背景估计图像,将原图像减去膨胀后的图像就可以将背景滤除,而得到只包含目标的图像,经过减运算后的结果如图 5 所示.从图中可以看到,经过 Top-hat 运算后,云层背景得到了很大的抑制,而且经过进一步的阈值分割就可以很容易将剩余的背景部分滤除.经计算,一帧图像的运算时间为 140.6ms.从结果可以看出,形态学检测算法无论从检测效果上还是实时性上都具有明显的优越性。

可以看到,Top-hat 运算所需的时间主要消耗在腐蚀和膨胀两个步骤,因为两个步骤均需要以结构元尺寸为单位对整个图像进行遍历计算.而在原图像中可以看到,对于那些背景比较平稳的区域,如目标所在的没有云层覆盖的背景部分和大部分的云层,理论上并不对结果产生任何影响,但是在 Top-hat 运算中这些区域仍然参与了运算,显然这些运算从检测结果的角度来说是“多余”的.因此可以预见,如果能够找到一种方法,减小甚至省略这些“多余”的计算,那么 Top-hat 运算的效率将得到很大的提高。

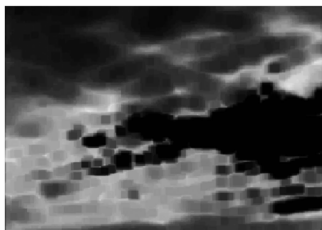


图3 经腐蚀运算后的图像



图4 经膨胀运算后的图像

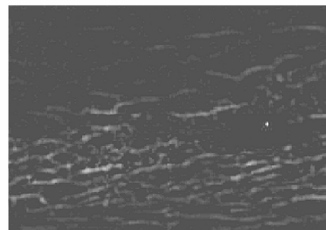


图5 经Top-hat运算后的图像

3 对形态学算法的改进

通过研究,本文提出了一种方差标记的方法来解决前面提出的问题.根据前面的分析,认为 Top-hat 运算不需要对那些灰度平稳的地方进行计算,因为对于 Top-hat 运算而言,运算只对那些灰度值变化大的点状区域敏感,因此只需要将这些区域在标记出来,然后在 Top-hat 运算时只对这些标记的区域进行计算,那么 Top-hat 运算的时间将会较大的减少.当然,这种标记的方法不能过于复杂,否则反而会增加计算量.在描述图像的各种量中,方差是一个描述灰度起伏的量,因此本文提出采用局部方差来对图像进行标记.

方差的计算方法如下:

$$\sigma^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i,j) - \mu]^2 \quad (4)$$

其中 g 为参与方差计算的图像区域, μ 为该图像区域的均值,其计算公式如下:

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i,j) \quad (5)$$

本文提出的方差标记的计算步骤为:

第一步:在图像的第一个像素点,以 3×3 像素尺寸大小为计算范围,计算该图像区域的方差;

第二步:得到该点的方差后进行阈值的判断,如果满足阈值条件,则将该点标记为需要进行 Top-hat 运算的点;

第三步:在下一个像素点重复第一、二两个步骤,并依次遍历整个图像.

上面计算中的第二步涉及到方差阈值的判断,该阈值可以为一个固定的值,也可以是一个变量.本文通过对比研究,提出了以下的阈值判断条件,假设用 x_{bj} 来表示某像素点的标记值,那么:

$$x_{bj} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sigma^2 > k\mu \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

其中 k 是权重系数,目标信噪比较高时取值较大,为了在尽可能的保留目标信息,在大量不同情况下的实验基础上,本文的计算和实验中均取 $k = 0.5$.

根据上面的步骤,对图 1 进行标记,计算得到的方差二维图像如 6 所示,图 7 为标记值的二值图像.对于

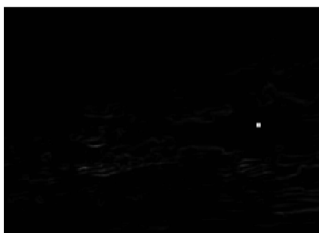


图6 方差二维图像

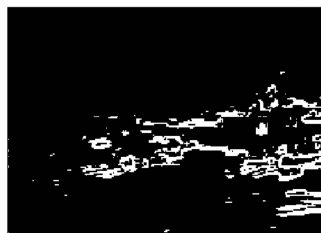


图7 标记值二值图像

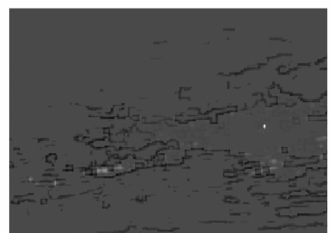


图8 标记后Top-hat运算的检测结果

图 6 中的方差值,其取值最大达 10^3 量级,如图中可以明显看到的目标区域;而对于灰度值平稳的区域,其取值仅为 10^1 量级,可见对于方差矩阵的阈值分割相对于灰度图像更容易实现.

从图 7 中可以看到,标记的区域只占到整个图像的一小部分,即需要参与 Top-hat 运算的像素点极大的减少.在对图 1 进行标记后,再根据标记的点对该图进行 Top-hat 运算后得到的检测结果如图 8 所示:

采用本文提出的方差标记的方法,一帧图像的计算时间为 109.4ms,相对于改进前的计算方法,该方法的计算时间减少了很多.另外从图 8 可以看到,相比于图 5 得到的检测结果,采用本文的方法背景得到了更大的抑制,检测结果更为理想.结合图 7 的标记图像可以看到,不仅是图像中的平稳区域由于不满足标记的条件而未被标记,同时一些易引起虚警的边缘部分也未被标记,因此算法可以得到更佳的效果.

4 实验及结果分析

为了进一步对本文提出的方法进行论证,采用了多组不同背景下的红外小目标图像进行了仿真实验.红外小目标图像大小为 320×240 个像素.仿真计算机参数为:CPU 为 $i5 \times 4$;内存 3.2GB;主频为 3.2GHz;仿真程序统一用 Matlab 7.8.0 编写.实验从采集的图像库中总共共选用了 10 组图像序列进行了仿真实验,每组图像序列包括 100 幅图像.形态学结构元素尺寸选择 5×5 ,为了较好的对比原始形态学算法和本文改进后的形态学算法,通过设定合适的阈值对处理后得到的结果进行阈值分割,使得每组图像序列中,两种算法的检测概率 DR 相等,且大于 90%,然后统计两种算法的计算时间 T 和虚警个数 FAR ^[4,15].

图 9 所示为其中的 3 组实验,其中 (a) 为这 3 组实验所采用的原图, (b) 为原始形态学算法的检测结果, (c) 为采用本文改进的方法得到的检测结果.图中目标所在位置用矩形框标识,虚警点用椭圆标识;表 1 为两种算法得到的处理结果对比,包括图像的输入信噪比 SNR_{in} 、算法的单帧运算时间 T 、算法的信噪比增益 $ISNR$ ^[16]、探测概率 DR 和虚警个数 FAR.从表中可以看到,尽管输入图像的输入信噪比很低,但是两种算法都

能够实现较高的探测概率和较少的虚警个数,这充分说明了形态学算法非常适合于各种背景下的的小目标检测.而本文提出的形态学算法相对于传统的算法而言,具有少的运算时间和少的虚警点,以第1组图像序列为例:两种算法的运行时间分别为 133.281ms 和 88.500ms,改进后的算法只有原来的 66.4%;而在相同的探测概率下,两种算法的虚警个数分别为 15.32 个和 1.36 个,很明显本文的算法更能够抑制背景引起的虚

警,具有更好的检测性能.另一个比较明显的是,本文算法的信噪比增益在多数情况下要小于原始的算法,这是因为当采用方差标记算法后,图像中的很多像素都不需要参与 Top-hat 运算,这样得到的输出图像中会存在小于 0 的点,如图 9 中(c1)中云层的黑色边缘,虽然这些点的值是负数,不会影响阈值分割后的结果,但是它们会使输出图像的方差变大,从而使得输出的信噪比降低.

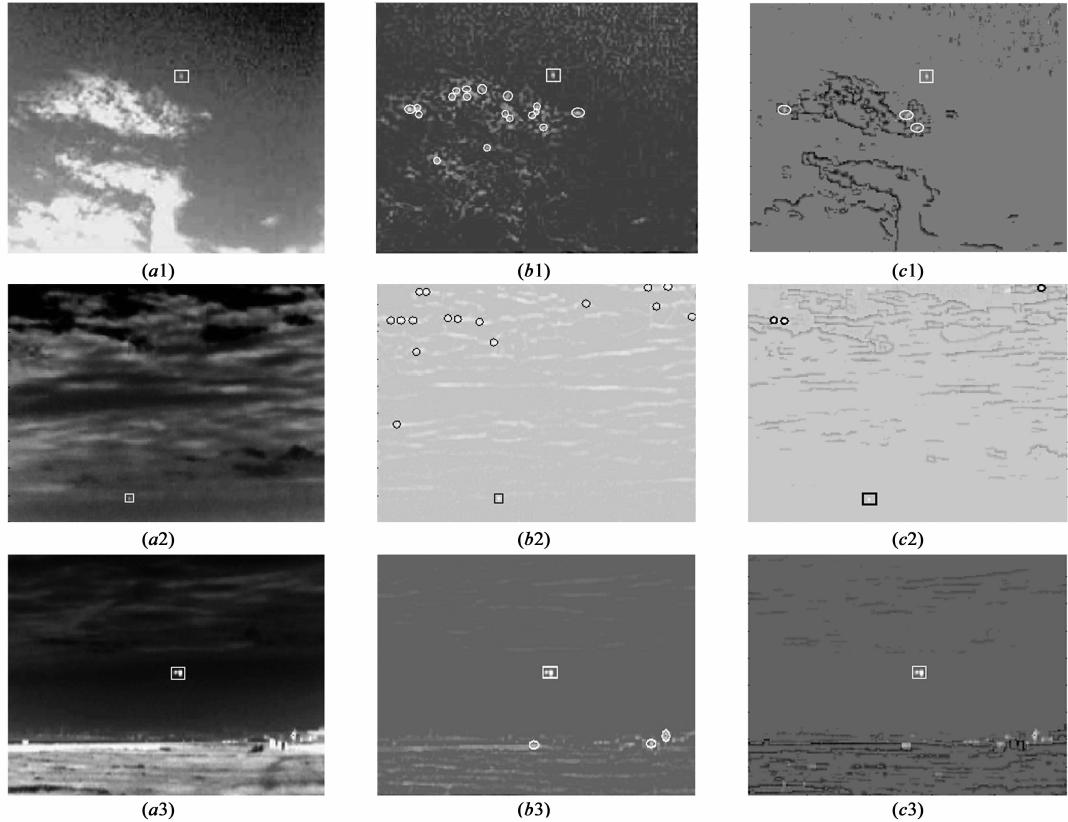


图9 不同背景下的红外小目标检测仿真实验

表 1 两种算法的结果对比

input images		the original algorithm				the proposed algorithm			
NO.	SNR _{in}	T(ms)	ISNR	DR	FAR	T(ms)	ISNR	DR	FAR
1	0.0200	133.281	17.3596	0.90	15.32	88.500	60.5697	0.90	1.36
2	0.2840	133.938	6.5530	0.91	7.51	107.594	11.6689	0.91	3.42
3	0.1035	132.031	113.6309	0.97	1.28	101.375	54.4801	0.97	0.33
4	0.0637	133.281	9.4412	1.00	3.54	100.156	15.9146	1.00	0.00
5	0.2866	133.281	30.5534	1.00	0.83	108.906	18.7947	1.00	0.00
6	0.3621	134.688	11.3602	1.00	0.02	89.219	13.4483	1.00	0.00
7	1.6625	131.563	14.5621	1.00	0.00	77.656	8.5195	1.00	0.00
8	3.4488	131.562	40.6311	1.00	0.00	78.844	26.4788	1.00	0.00
9	0.4519	135.313	30.4343	1.00	0.00	86.813	32.4296	1.00	0.00
10	0.9965	134.063	21.3276	1.00	0.00	78.125	11.9403	1.00	0.00

前面已经指出,结构元素的选取对形态学的性能起关键的作用.下面分析不同尺寸结构元素对检测结果的影响,这里选用 3×3 和 7×7 大小的结构元素作对比,实验样本选用图像序列 1.实验结果如表 2 所示.

表 2 不同结构元尺寸的结果对比

size parameters	3×3	5×5	7×7
DR	0.91	0.90	0.88
FAR	3.64	1.36	> 30
$T(\text{ms})$	154.688	88.500	276.719

从表 2 的结果中可以看到,在近似相等的检测概率下,采用 3×3 和 7×7 的结构元素得到的结果的虚警概率都高于 5×5 的结构元素.采用 3×3 的结构元素时,目标的中心像素很容易在腐蚀步骤不能得到滤除,那么膨胀运算时,高灰度值的目标像素将得到膨胀,导致减运算后得到的最终结果中目标区域的灰度值降低,因此需要采用较低的阈值才能保证一定的检测概率,但是同时虚警概率得到增加;采用 7×7 的结构元素时,由于结构元素较大,很多面积较小的背景都得不到有效的抑制,因而这种情况下得到的虚警概率很大,此时基本上可以认为算法失效.

从 3 种情况的时间消耗来看,同样是采用 5×5 结构元素的时间消耗最少.这是因为,采用 3×3 结构元素时,很多像素点都满足被标记的条件,从而导致标记阶段不能有效的去除平稳区域,使得采用标记的方法不但不能减少时间消耗,反而增加了时间消耗;而 7×7 的结构元素由于其本身的尺寸较大,从而导致运算量增大.

最后,为了比较本文算法和其它非形态学滤波算法的性能,文章选取了中值滤波算法、高通滤波算法和小波滤波算法作为对比算法,同样选取图像序列 1 作为实验样本.实验的结果如表 3 所示.

表 3 不同检测算法的结果对比

algorithms parameters	median filter	high pass filter	wavelet filter	the proposed algorithm
DR	0.91	0.91	0.89	0.90
FAR	3.11	7.06	17.08	1.36
$T(\text{ms})$	364.063	54.688	82.813	88.500

从表 3 中可以看到,近似相等的检测概率下,本文的算法具有最低的虚警概率,而小波变换的虚警概率最高.在算法的时间消耗上,本文算法要略高于高通滤波和小波滤波算法,但是中值滤波算法因为涉及到排序的问题,其时间消耗要远大于其他 3 种算法.综合而言,本文算法具有明显的优越性.

5 结语

本文对如何提高形态学算法的检测性能进行了研究.通过对该算法流程的分析,并结合红外小目标图像的特点,提出了基于方差标记的形态学算法.该算法在对图像进行 Top-hat 运算前先采用方差标记的方法对图像进行标记,通过文章的分析可以看到,标记部分起到了两个作用:一是图像中的平稳区域因不满足标记条件而未被标记,从而减少了后续 Top-hat 运算的运算量,最终使得算法的效率得到提高;另一方面是图像一些容易引起虚警的边缘部分也因不满足标记条件而未被标记,从而降低了算法的虚警率.最后通过大量的仿真实验对本文算法的性能进行了验证,结果表明本文提出的方法能够极大的改善算法的实时性,而且在一定程度上提高了算法的检测效果,降低了虚警率.

参考文献

- [1] 刘运龙,薛雨丽,袁素真,等.基于局部均值的红外小目标检测算法[J].红外与激光工程,2013,42(3):814-822.
Liu Yun-long, Xue Yu-li, Yuan Su-zhen, et al. Infrared small targets detection using local mean [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 814-822. (in Chinese)
- [2] Xiaopeng Shao, Hua Fan, Guangxu Lu, et al. An improved infrared dim and small target detection algorithm based on the contrast mechanism of human visual system [J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55: 403-408.
- [3] 张玉叶,王春歆.基于改进 DPA 的空间小目标检测算法[J].电子学报,2010,38(3):556-560.
Zhang Yu-ye, Wang Chun-xin. Space small target detection based on improved DPA [J]. Acta Electronic Sinica, 2010, 38(3): 556-560. (in Chinese)
- [4] 林建■,平西建,马德宝.基于二阶方向导数尺度空间的小目标检测算法[J].电子与信息学报,2012,34(12):2992-2998.
Lin Jian-lin, Ping Xi-jian Ma De-bao. Small target detection based on second order directional derivative scale-space [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(12): 2992-2998. (in Chinese)
- [5] Xin Wang, Guofang, Xu Lizhong. Infrared dim target detection based on visual attention [J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55: 513-21.
- [6] Peng Zhang, Jianxun Li. Neural-network-based single-frame detection of dim spot target in infrared images [J]. Optic Engineering, 2007, 46(07): 076401.
- [7] 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.
Wu Yi-quan, Yin Dan-yan. Detection of small target in infrared image based on background predication by FLS-SVM [J]. Acta

- Optica Sinica, 2010, 30(10): 2806 – 2811. (in Chinese)
- [8] Jufeng Zhao, Huajun Feng, Zhihai Xu, et al. Real-time automatic small target detection using saliency extraction and morphological theory [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 47: 268 – 77.
- [9] Lisha He, Liangjing Mao, et al. Dynamic programming algorithm for detecting dim infrared moving targets [J]. SPIE, 2009, 7495: 74954X. 2 – 74954X. 7.
- [10] Xiangzhi Bai, Fugen Zhou Hit-or-miss transform based infrared dim small target enhancement [J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43: 1084 – 1090.
- [11] Xiangzhi Bai, Fugen Zhou, Zhaoying Liu, et al. Analysis of top-hat selection transformation and some modified top-hat transformations [J]. Optik, 2012, 123: 892 – 895.
- [12] 魏长安, 姜守达. 基于形态学重构与跟踪的红外小目标检测算法 [J]. 电子学报, 2009, 37(4): 850 – 853.
Wei Chang-an, Jiang Shou-da. Infrared small target detection algorithm based on morphological reconstruction operator and tracking [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 850 – 853. (in Chinese)
- [13] 程 ■, 郭雷, 韩军伟, 等. 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 [J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1015001 – 1 – 8.
Cheng Gong, Guo Lei, Han Jun-wei, et al. Infrared dim small target detection based on morphological band-pass filter and scale space theory [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 32(10): 1015001 – 1 – 8. (in Chinese)
- [14] M Nachtgael, P Sussner, T Mélange, et al. On the role of complete lattices in mathematical morphology: From tool to uncertainty model [J]. Information Sciences, 2011, 181(10): 1971 – 1988.
- [15] Sungho Kim, Joohyoung Lee. Scal invariant small target detection by optimizing signal-to-clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track [J]. Pattern Recognition, 2012, 45: 393 – 406.
- [16] 陈炳文, 王文伟, 琴前清. aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(10): 1252 – 1260.
Chen Bing-wen, Wang Wen-wei, Qian-qing. Infrared dim target detection in single image based on background suppression by aiNet [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(10): 1252 – 1260. (in Chinese)

作者简介



方义强 男, 1986 年生于湖南益阳. 合肥电子工程学院博士研究生. 研究方向为空中目标红外探测.

E-mail: 490982172@qq.com



程正东 男, 1972 年生于安徽舒城. 博士, 研究方向为信号与信息处理.

E-mail: czd106@mails.tsinghua.edu.cn