

文章编号: 1672-8785(2014)02-0037-07

基于局部特性实现单帧图像 小目标检测的研究

吕建明 牛燕雄 刘海霞 杨 露 许 冰

张 颖 牛海莎 刘雯文 李继扬

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 以目标成像点的扩散理论为基础, 建立小目标在空域上的灰度特性模型, 分析目标、背景和噪声的基本特性。由形态学开闭运算得到各像素位置的灰度变化值, 再根据此值确定潜在目标区域。研究了各潜在目标区域的多方向多级梯度特征, 实现了单帧图像的小目标检测。研究结果表明, 该方法能够有效抑制不均匀背景杂波, 增强目标信号, 提高单帧亮暗点目标的检测能力。对于信噪比为 0.89 的图像, 可获得 34.74 的信噪比增益。

关键词: 小目标检测; 背景杂波抑制; 多方向多级梯度

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.02.007

Study of Small Target Detection in Single Frame Image Based on Local Characteristics

LV Jian-ming, NIU Yan-xiong, LIU Hai-xia, YANG Lu, XU Bing,

ZHANG Ying, NIU Hai-sha, LIU Wen-wen, LI Ji-yang

(Department of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang
University, Beijing 100191, China)

Abstract: A grey level model of small targets in the spatial domain is established on the basis of the point spread theory in target imaging. The basic characteristics of the target, background and noise are analyzed. After the open and close morphologic operation is implemented, the grey level variation in each pixel position is derived. Thus, the potential target areas are determined. The multi-orientation and multi-degree gradient of each potential area are studied. The detection of small targets is implemented in a single frame. The result shows that this method can effectively suppress uneven background clutter, enhance target signals and improve the detection of bright and dark small targets in a single frame. For an image with a signal-to-noise ratio (SNR) of 0.89, a SNR gain of 34.74 can be obtained.

Key words: small target detection; background clutter suppression; multi-orientation gradient and multi-degree

收稿日期: 2013-12-20

作者简介: 吕建明 (1990-), 男, 内蒙古人, 硕士, 主要从事光电对抗、目标探测与识别方面的研究。

E-mail: houston110@163.com

0 引言

小目标检测是搜索与跟踪、精确制导及光电预警等系统中的一项关键技术。为给防御系统留有足够的反应时间,探测系统需尽早地发现敌方的飞机和导弹等军事目标。对于远距离目标,由于它在成像平面上仅占几个像素大小,无形状与结构特征。另外目标常处于强杂波和噪声干扰下,图像中某些背景及噪声的强度有时会大于目标信号的强度。由于目标和背景的双重复杂性^[1],目标的探测难度很大。

美国在 20 世纪 50 年代开始进行搜索跟踪技术的研究,随后法国、德国和俄罗斯等国相继开展了该研究。目前,美国已把它列为“国家安全防御体系”的一个重要课题。国内的杨磊等^[2]采用自适应巴特沃斯高通滤波器对背景进行抑制,其算法的关键是选取滤波器的截止频率;由于不同的图像需要不同的分段线性函数,适应性较差。白相志等^[3]采用轮廓结构元素形态学 Top-hat 算法进行背景杂波抑制和目标增强,该算法性能与多个参数有关;不同图像没有相应的选取方法。目前大部分算法都假定目标在图像中表现为亮区域,无法对暗小目标实现检测。

本文定性分析了图像中小目标的亮暗特性,研究了小目标与局部背景杂波区域的灰度特性差异。根据小目标的灰度特性以及开闭运算对亮暗区域的消除原理,得出开闭运算后小目标在其周边邻域内灰度变化最大的结论。利用灰度变化阈值进行背景预测,将原图像与背景预测图像作差,提取潜在目标区域;运用多方向多级梯度算法分析各潜在目标区域的灰度特性,实现单帧图像亮、暗小目标的检测,最后利用 Matlab 软件对算法进行了验证。

1 目标与背景特性

目标在像平面上的大小由目标尺寸、探测成像系统的视场角以及目标与系统的距离等因素决定。在目标尺寸、系统视场角一定的条件下,当目标距离系统足够远时,目标在成像平面上的像仅为一个点或斑点^[4]。在大气环境和探测成

像系统的增益一定的条件下,由于太阳、目标、系统三者之间的相对位置以及目标表面材料等因素的影响,目标在图像中会表现出不同的亮度特性。亮小目标由于灰度均值高于附近背景的灰度均值,在图像中表现为孤立的亮区域。暗小目标具有与亮小目标相反的灰度特性。根据目标成像点扩散原理,用高斯灰度函数对小目标在空域上的灰度特性进行建模^[5]:

$$f_T(x, y) = I_{max} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-x_m)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_m)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \quad (1)$$

式中, $f_T(x, y)$ 为目标灰度, I_{max} 为目标灰度幅值, σ_x 为目标水平方向的扩展参数, σ_y 为目标垂直方向的扩展参数, (x_m, y_m) 为小目标区域的中心点。理想情况下,亮、暗小目标的二维及三维灰度模型如图 1 所示。

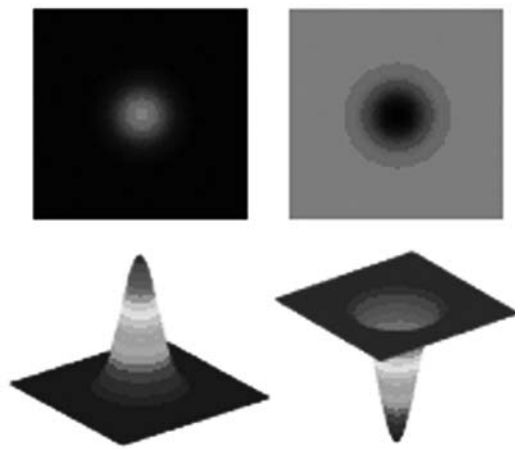


图 1 亮、暗小目标的二维及三维灰度图

含有小目标的图像 $f(x, y)$ 主要由目标、背景和噪声构成,通常可用下面的模型描述^[6]:

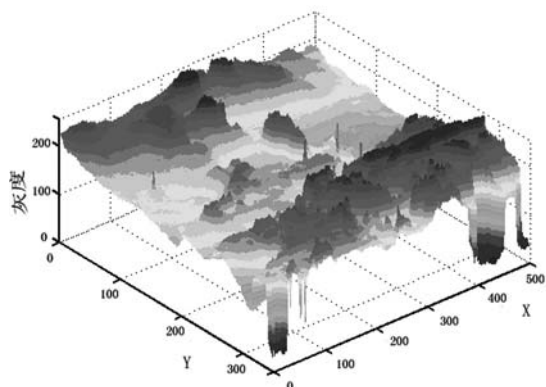
$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_B(x, y) + f_N(x, y) \quad (2)$$

式中, (x, y) 为像素点的位置, $f_T(x, y)$ 为目标的灰度, $f_B(x, y)$ 为背景的灰度, $f_N(x, y)$ 为噪声的灰度。 f_B 为背景,对于天空云层背景下的小目标检测,复杂背景主要是大面积的云层。云团内部像素的灰度变化较均匀,边缘像素的灰度变化较剧烈,会对目标检测造成一定的干扰。 f_N 为噪声,其所用的成像系统的内部参数和背

景杂波的辐射亮度有关。亮、暗弱小目标的原始图和三维灰度图如图 2 所示。图 2 中的圆圈处为目标。从图 2 可以看出, 背景杂波起伏很大, 部分背景杂波区域的灰度值超出了目标区域。目标与背景不相关, 在局部区域表现为灰度值较高或较低的孤立点。



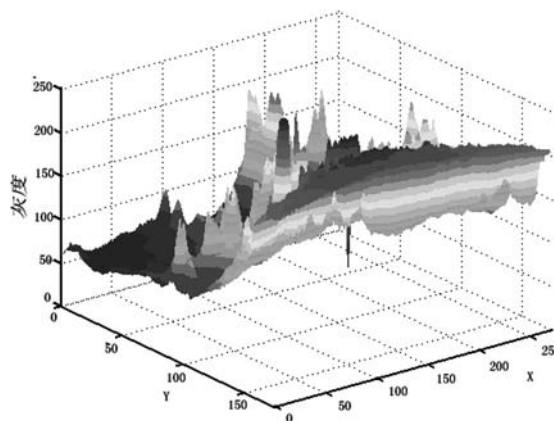
(a) 亮小目标原始图



(b) 亮小目标的三维灰度图



(c) 暗小目标原始图



(d)

图 2 亮、暗小目标原始图及三维灰度图

2 基于改进形态学算法的背景杂波抑制

设 f 为输入图像, b 为结构元素, D_f 和 D_b 分别是 f 和 b 的定义域, 灰度形态学的四种基本算法表达式为

(1) 膨胀:

$$(f \oplus b)(s, t) = \max\{f(s - x, t - y) + b(x, y)\} \quad (3)$$

式中, $[(s - x, t - y)] \in D_f$; $(x, y) \in D_b$ 。

(2) 腐蚀:

$$(f \ominus b)(s, t) = \min\{f(s + x, t + y) - b(x, y)\} \quad (4)$$

式中, $[(s + x, t + y)] \in D_f$; $(x, y) \in D_b$ 。

(3) 开运算:

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b \quad (5)$$

(4) 闭运算:

$$f \cdot b = (f \oplus b) \ominus b \quad (6)$$

形态学变换中的结构元素相当于信号处理中的“滤波窗口”, 其大小和形状对处理结果的质量影响很大。而且随着其尺寸的增大和形状复杂度的增加, 系统的运算量急剧增加。对于点或斑点状的小目标, 结构元素取为圆盘状, 大小一般小于 10。

根据开闭运算消除小于结构元素亮暗区域的原理^[7]以及小目标在局部邻域内的灰度奇异

性, 开闭运算后小目标在局部邻域内的灰度变化最大。因此, 只有在进行开闭运算后, 灰度变化值大于阈值的像素点才是潜在目标区域的像素点。上述分析表明, 运用形态学算法进行小目标检测具有合理性。

2.1 灰度变化阈值确定

为了合理简单地得到开闭运算后每个像素位置的灰度变化, 选择尺寸大小为 $L \times L$ 的窗口。当窗口中心位于像素位置 (x, y) 时, 该位置的灰度变化为^[8]

$$GVC(x, y) = \max\{f(x - L/2 + i, y - L/2 + j)\} - \min\{f(x - L/2 + i, y - L/2 + j)\} \quad (7)$$

式中, $i \in [0, L - 1]$, $j \in [0, L - 1]$, 窗口尺寸 L 小于目标尺寸, L 的大小为

$$L = (0.4 - 0.6) * \text{size}(b) \quad (8)$$

式中, $\text{size}(b)$ 为结构元素的尺寸。利用灰度变化矩阵 GVC 的均值 m 和方差 σ 计算灰度变化的阈值 t :

$$t = m + k * \sigma \quad (9)$$

式中, k 为阈值系数, 其值通常在区间 $[0, 6]$ 内选取。

2.2 背景预测

比较开闭运算后各像素点的灰度变化值与灰度变化阈值, 并进行背景预测。对于包含亮小目标的图像, 背景预测图像为

$$f_b(x, y) = \begin{cases} f(x, y), f(x, y) - f \circ b(x, y) < t \\ f \circ b(x, y) - t, f(x, y) - f \circ b(x, y) \geq t \end{cases} \quad (10)$$

对于包含暗小目标的图像, 背景预测图像为

$$f_b(x, y) = \begin{cases} f(x, y), f \cdot b(x, y) - f(x, y) < t \\ f \cdot b(x, y) + t, f \cdot b(x, y) - f(x, y) \geq t \end{cases} \quad (11)$$

为了避免结果图像中目标信号的强度太弱, 在背景预测时进行加、减 t 操作, 以增大背景预测图像与实际图像中潜在目标区域的灰度差异; 将原图像与背景图像作差, 实现背景杂波抑制, 有效提高待检测目标的强度。

3 虚假目标剔除

由于开闭运算后杂波边缘等干扰区域也具有灰度变化较大的特点, 利用上述方法不能有效消除这类干扰, 需要对通过背景杂波抑制初步检测出来的潜在目标区域进行分析, 以剔除大部分虚假目标。

3.1 潜在目标区域形心位置确定

利用灰度重心公式计算各潜在目标区域的形心:

$$x_k = \frac{\sum_{i,j \in \Omega_k} iI(i, j)}{\sum_{i,j \in \Omega_k} I(i, j)} \quad (12)$$

$$y_k = \frac{\sum_{i,j \in \Omega_k} jI(i, j)}{\sum_{i,j \in \Omega_k} I(i, j)} \quad (13)$$

式中, Ω_k 表示背景抑制后图像中的各潜在目标区域, $I(i, j)$ 为像素点 (i, j) 处的灰度值。对计算出的 (x_k, y_k) 进行归整, 在得到的整数坐标点的 8 领域内搜索灰度极大值, 将其作为潜在目标区域的形心 (x_m, y_m) 。

3.2 多方向多级梯度剔除虚假目标

弱小目标区域与杂波边缘在梯度上的差别在于前者在所有方向上均具有高梯度且大于一定阈值, 而后者仅在某些方向上具有高梯度^[9]。设 k 为梯度级, 潜在目标中心点在水平及垂直正负方向上的梯度分别为

$$Tx_+ = G(x_m, y_m) - G(x_m, y_m + k) \quad (14)$$

$$Tx_- = G(x_m, y_m) - G(x_m, y_m - k) \quad (15)$$

$$Ty_+ = G(x_m, y_m) - G(x_m + k, y_m) \quad (16)$$

$$Ty_- = G(x_m, y_m) - G(x_m - k, y_m) \quad (17)$$

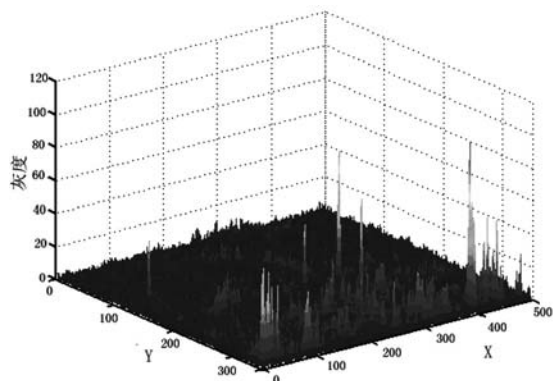
式中, T 表示梯度, G 表示原图像的灰度。

根据以上公式, 分别求出 k 为 1、3、5 时四个方向的梯度值。再根据以下规则来判断是否为目标区域: 对同一梯度级的四个方向梯度, 若四个方向中有三个以上梯度的绝对值大于阈值, 则继续比较大于阈值梯度的正负号; 若有三个以上同号, 则可能为目标的记录数加 1; 三个

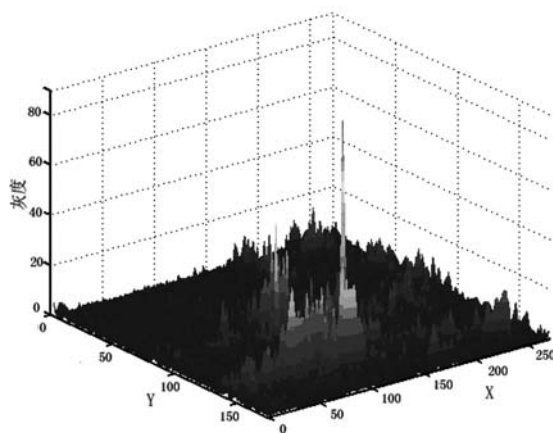
梯度统计完成后, 如果记录数大于等于 2 且随着梯度级数的增加各方向梯度的绝对值呈增大趋势, 则判定该区域为目标区域。

4 目标检测与分析

对图 2 中的两幅亮暗小目标图的原始图做灰度形态学顶(底)帽变换, 结果如图 3 所示。



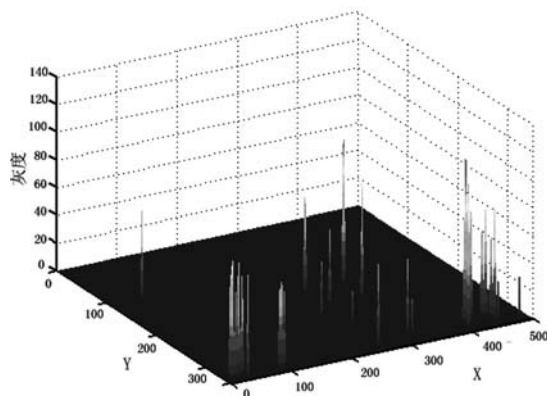
(a) 亮小目标原始图经顶帽变换后的三维灰度图



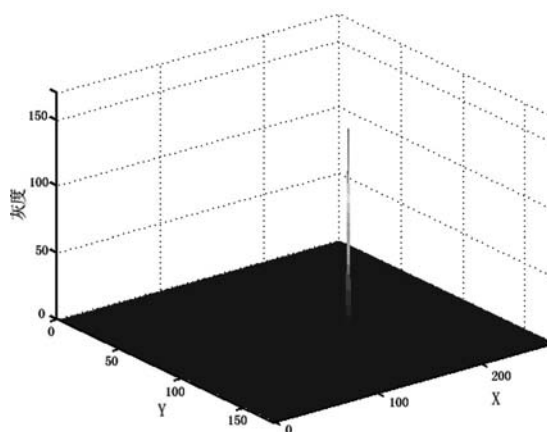
(b) 暗小目标原始图经底帽变换后的三维灰度图

图 3 原始图经形态学顶(底)帽变换后的三维灰度图

图 3 中, 除了目标区域外还存在很多非零区域。由此可知, 单独运用形态学方法不能很好地抑制背景杂波。而且, 图 3(a) 中部分区域的灰度超出了目标区域的灰度, 对目标的检测造成了极大的干扰。因此, 以灰度变化阈值作背景预测, 对原图像与背景预测图像作差, 进行背景杂波抑制, 结果如图 4 所示。



(a) 亮小目标原始图经背景杂波抑制后的三维灰度图



(b) 暗小目标原始图经背景杂波抑制后的三维灰度图

图 4 原始图经背景杂波抑制后的三维灰度图

与图 3 相比, 图 4 中的背景杂波得到了很好的抑制。对于暗小目标, 如图 4(b) 所示, 由于整个空域上的小目标灰度特性表现明显, 仅利用背景杂波抑制方法就可以将目标检测出来。然而对于亮小目标, 如图 4(a) 所示, 利用背景杂波抑制方法不能消除灰度变化较大的区域。于是再计算图 4(a) 中各潜在目标区域的形心位置, 在原始灰度图中对潜在目标区域的灰度特性进行分析, 以进一步剔除大部分的虚假目标, 结果如图 5 所示。图 5 中还存在少数虚假目标, 这些区域与所建小目标灰度模型具有相似的灰度特征。因此, 仅利用单帧图像无法将其排除, 只能根据序列图像中目标的灰度和轨迹等特征将其排除。

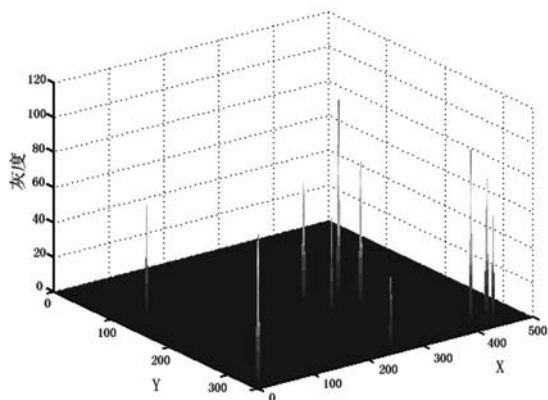


图 5 亮小目标结果图像的三维灰度图

为进一步说明该算法的性能,采用背景抑制因子 BSF 和信噪比增益 $ISNR$ 进行量化分析比较,其定义如下:

$$BSF = \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}} \quad (18)$$

$$ISNR = \frac{SNR_{out}}{SNR_{in}} \quad (19)$$

式中, σ_{in} 和 σ_{out} 分别为处理前后图像的标准差, SNR_{in} 和 SNR_{out} 分别为处理前后图像的

信噪比。图像的信噪比定义为

$$SNR = |f_t - \mu| / \sigma \quad (20)$$

式中, f_t 为目标区域的灰度均值, μ 和 σ 分别为图像的灰度均值和标准差。 BSF 和 $ISNR$ 越大,说明算法滤除背景杂波和保留目标的能力越强^[10],具体结果见表 1。

从表 1 的定量分析可以看出,传统形态学与文献 [11] 的算法对背景杂波的适应性不强,对目标和背景的区分不够准确。当背景变化剧烈、图像信噪比较低时,结果图像中会残留较多的背景杂波区域。在输入信噪比约为 0.89 的情况下,传统形态学算法的 $ISNR$ 仅为 14.38,文献 [11] 算法的 $ISNR$ 为 19.83,然而,本文算法可以获得 34.74 的 $ISNR$,有效抑制了背景杂波。由此可见,本文算法抑制背景杂波和增强目标信号的能力明显优于传统形态学算法与文献 [11] 中的算法,且具有较低的虚警率。

表 1 算法性能比较

图像	σ_{in}	SNR_{in}	传统形态学算法			文献 [11] 中的算法			本文算法		
			BSF	SNR_{out}	$ISNR$	BSF	SNR_{out}	$ISNR$	BSF	SNR_{out}	$ISNR$
亮小目标原始图	32.70	0.89	13.37	12.80	14.38	18.58	17.65	19.83	24.92	30.92	34.74
暗小目标原始图	51.57	0.71	18.37	15.58	21.94	25.35	23.46	33.04	47.54	41.78	58.85

5 结论

针对图像中可能出现亮、暗小目标的情况,建立了小目标在空域上的灰度特性模型,分析了小目标和背景杂波的基本特性。利用小目标与局部背景之间的差异,根据形态学开闭运算后各像素位置灰度变化值的大小,确定了潜在的目标区域,研究了各潜在目标区域的多方向多级梯度特征,实现了单帧图像亮、暗小目标的检测。仿真实验的图像效果和性能参数表明,该算法对强起伏的背景杂波具有良好的抑制效果,能有效增强亮、暗小目标的信号,增大图像的信

噪比。该算法的单帧检测率高,性能明显优于传统形态学算法和文献 [11] 中的算法,能为序列图像小目标检测提供有力的技术支持。本文算法在自适应性方面还有待于进一步提高。

参考文献

- [1] 汪国有, 陈振学, 李乔亮. 复杂背景下红外弱小目标检测的算法研究综述 [J]. 红外技术, 2006, 28(5): 287-292.
- [2] Yang L, Yang J, Yang K. Adaptive Detection for Infrared Small Target Under Sea-sky Complex Background[J]. Electronics Letters, 2004, 40(17): 1083-1085.

- [3] Bai X Z,Zhou F G,Xie Y C. Modified Top-hat Transformation Based on Contour Structuring Element to Detect Infrared Small Target[C].*IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2008:575–579.
- [4] 张蓉, 陈兴无, 卓红艳, 等. 空中红外运动点目标检测算法 [J].*红外与激光工程*, 2003, **3**(5): 472–475.
- [5] Anderson K L, Iltis R A. A Tracking Algorithm for Infrared Images Based on Reduced Sufficient Statistics [J].*IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, **33**(2): 464–472.
- [6] 胡谋法, 董文娟, 王书宏, 等. 奇异值分解带通滤波背景抑制和去噪 [J].*电子学报*, 2008, **36**(1): 111–116.
- [7] 汪洋, 郑亲波, 张钧屏. 基于数学形态学的红外图像小目标检测 [J].*红外与激光工程*, 2003, **32**(1): 28–31.
- [8] Bai X Z,Zhou F G,Xie Y C, et al. Enhancement of Dim Small Target through Modified Top-hat Transformation under the Condition of Heavy Clutter[J].*Signal Process*, 2010, **90**(5): 1643–1654.
- [9] 陈皓, 马彩文, 陈岳承, 等. 基于多特征融合的复杂背景下弱小多目标检测和跟踪算法 [J].*光子学报*, 2009, **38**(9): 2444–2448.
- [10] Tartakovsky A, Blazek R. Effective Adaptive Spatial-temporal Technique for Clutter Rejection inIRST[C].*SPIE*, 2000, **4048**: 85–95.
- [11] 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.

(上接第 16 页)

- [10] 徐参军, 赵劲松, 蔡毅, 等. 红外偏振成像机理概述 [J]. *红外技术*, 2007, **29**(7): 381–385.
- [11] 都安平. 成像偏振探测的若干关键技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [12] Wolff L B, Mancini T A. Liquid Crystal Polarization Camera [C]. *Proceeding of IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, 1992: 120–127.
- [13] Sheng-kui G, Gruev V. Image Interpolation Methods Evaluation for Division of Focal Plane Polarimeters [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 1–12.
- [14] 李双, 裴桢炜, 杨长久. 同时偏振成像探测技术初探 [J]. *大气与环境光学学报*, 2010, **5**(3): 198–202.
- [15] 张励, 田叉, 李奇. 动态红外场景投影器的研究现状与展望 [J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(6): 1423–1431.
- [16] 程正喜, 马斌, 刘强, 等. 薄膜转移工艺制备的 128×128 规模高架桥式电阻阵 [J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(3): 559–562.
- [17] 马斌, 程正喜, 翟厚明, 等. 国产电阻阵列技术的发展趋势 [J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(12): 2314–2322.
- [18] 肖云鹏, 马斌, 梁平治. 国产电阻阵列动态红外景象投射器研制进展 [J]. *红外技术*, 2006, **28**(5): 266–270.
- [19] 张二磊, 祁鸣. 基于 DMD 的动态红外场景生成系统 [J]. *电子科技*, 2011, **24**(7): 140–143.
- [20] 蔡建荣, 严高师, 刘昌松, 等. 基于 DMD 的红外动态图像生成技术 [J]. *激光与红外*, 2008, **38**(4): 338–341.
- [21] 康为民, 李延彬, 高伟志. 数字微镜阵列红外动态景象模拟器的研制 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 753–756.
- [22] 李卓, 李平. 动态红外图像生成技术综述 [J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 283–294.
- [23] 白玉栋. 基于红外偏振成像的目标检测技术 [J]. *红外*, 2013, **34**(3): 1–6.
- [24] 赵永强, 张洪才, 潘全. 基于偏振特征的目标检测 [J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(6): 685–688.
- [25] 徐参军, 苏兰, 杨根远, 等. 中波红外偏振成像图像处理及评价 [J]. *红外技术*, 2009, **31**(6): 362–366.
- [26] 康果果, 谭峴峰, 陈伟力, 等. 亚波长金属线栅的设计、制备及偏振成像实验研究 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(1): 014218.
- [27] 郑春红, 朱化凤, 宋连科. 红外波段复合消色差 $1/4$ 波片的优化设计 [J]. *应用光学*, 2011, **32**(6): 1222–1226.