

## 自适应双极性红外舰船目标分割算法

赵菲\* 卢焕章 张志勇

(国防科技大学 ATR 国防科技重点实验室 长沙 410073)

**摘要:** 红外舰船目标分割是红外海面场景中舰船目标自动识别的关键技术之一,通过阈值方法分割舰船因具有诸多优点而被广泛应用。已有阈值算法假设已知舰船和目标的能量强度关系(一般假设舰船亮度高于背景),但实际上中波红外探测器所采集的图像易受环境影响,导致成像后舰船目标呈现双极性,使得已有的阈值方法难以自适应的分割舰船目标。为解决双极性舰船目标的自适应分割问题,该文提出一种新的最大化2维熵分割算法。算法首先利用图像的多尺度局部方差-熵变化量和梯度方向方差两个指标构建2维直方图,然后使用粒子群优化算法寻找最大化2维熵的最优阈值来对图像进行粗分割,随后在粗分割的基础上进行迭代精分割获得准确的目标分割结果。实验结果表明,该文算法能够在舰船目标呈现双极性的情况下均获得较好的分割结果。

**关键词:** 目标检测; 红外舰船分割; 双极性目标; 多尺度局部方差-熵变化量; 梯度方向方差

中图分类号: TN911.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)10-2432-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00460

## Adaptive Bilateral Polarity Ship Segmentation in Infrared Images

Zhao Fei Lu Huan-zhang Zhang Zhi-yong

(National Key Laboratory of Automatic Target Recognition (ATR),

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Infrared ship segmentation is very important for automatic infrared ship recognition in the sea. The thresholding based algorithms are widely applied to segmentation due to the intrinsic merits. The threshold is set based on the assumption that the intensity relation between target and background is known, but the assumption is incorrect in the medium wave infrared images. Because of the sensitivity to the environment, the target in the medium wave infrared images may be bilateral polarity, so the adaptive thresholding can not be realized. Considering the adaptive thresholding ability for segmentation of bilateral polarity ship target, a new maximum two dimensions entropy segmentation algorithm is proposed. The multi-scale local variance-entropy variety and variance of gradient direction are used to build the two dimensions histogram, the optimized threshold vector are obtained by maximizing two dimensions entropy using the particle swarm optimization algorithm. Then the fine segmentation is performed by iterative thresholding on the coarse segmentation results to get the accurate segmentation result. Experimental results indicate that the proposed algorithm can get good performance in bilateral polarity target segmentation.

**Key words:** Target detection; Infrared ship segmentation; Bilateral polarity target; Multi-scale local variance-entropy variety; Variance of gradient direction

### 1 引言

红外场景中的舰船目标的分割一直是国内外极为关注的热点问题,因为它是红外制导武器在海面背景下可靠捕获、识别舰船目标的重要基础和前提。为了实现红外海面背景条件下的红外舰船目标自动检测,多年来众多学者都进行了相关的研究,并提出了许多方法<sup>[1-9]</sup>;其中基于全局阈值进行分割的

方法因其实现简单(不需要输入参数,不需要监督)、计算量小和性能较稳定等优点被广泛实际应用<sup>[1-4]</sup>。Otsu<sup>[10]</sup>方法是阈值分割中的经典方法,但因其未考虑目标局部的灰度分布情况,因而在复杂场景中无法得到满意的结果。文献[1]和文献[2]采用2维直方图并分别以最大2维熵和最大2维类间方差为准则进行红外舰船的分割。文献[3]采用Otsu方法对海面红外图像进行迭代分割,通过预先设定的门限结束分割过程并得到最终的分割结果。文献[4]通过迭代扩大预分割区域并使用Otsu方法进行舰船的分割。

2012-04-20 收到, 2012-07-11 改回

国家 863 计划项目(2009AA8100701)资助课题

\*通信作者: 赵菲 f\_z2010@126.com

这些基于阈值的算法中均假设舰船目标的能量高于背景能量(即已知目标和背景能量强度关系)情况下通过设定相应的阈值提取高灰度的舰船。实际中波红外探测器获取图像的过程中易受环境的影响,在不同的光照条件下,舰船在中波红外波段成像后的灰度既有可能高于背景,也有可能低于背景,即目标呈现双极性的特点,因此基于已知目标和背景能量强度关系这一假设的方法将无法正确地提取出舰船目标。

通过对实际红外图像的分析可知,虽然目标灰度是否高于背景无法预先确定,但舰船目标总会在局部范围内具有一定的显著性,即舰船内部的变化较小,同时舰船与局部区域的背景之间存在一定差异。基于这一成像特点,为保证在舰船目标呈现“双极性”的情况下能够正确地提取出舰船目标,本文提出了一种新的红外舰船阈值分割方法。算法的基本思想是首先对原始红外图像进行合适的变换,从而突出图像中舰船目标区域,摆脱已有的基于阈值的分割方法对于“已知目标和背景能量强度关系”的这一假设条件;随后对变换后的图像采用阈值分割的方法提取出潜在的目标区域,然后在潜在的目标区域内进行迭代分割直至分隔出完整的目标。

本文结构安排如下:第2节详细叙述了基于多尺度局部方差-熵变化量增强舰船目标的算法;第3节详细叙述了2维直方图的构建和基于最大化2维熵准则的2维直方图分割;第4节将提出的算法应用于实测中波红外图像,在分析算法效果的基础上,引出了对舰船目标区域的精分割算法,并给出了最终的分割结果,最后给出了结论。

## 2 基于多尺度局部方差-熵变化量的舰船区域增强

一幅典型的舰船目标灰度低于背景灰度的红外图像如图 1 所示。从图中可以看出,除烟囱排气口处由于热量很高表现出较高的灰度值,舰船目标主体部分灰度明显低于天空背景和海面背景。对于此类图像,基于“目标灰度高于背景”这一假设的算法无法正确提取舰船目标。观察图像可知,舰船目标能量虽然较低,但在局部背景中具有较强的显著性,即舰船在局部范围内与背景有较大差异。正是基于这一特点,本文采用基于多尺度局部方差-熵变化量对整幅图像进行描述,从而在描述图像中突出舰船主体部分。

图像局部熵和局部方差作为图像纹理描述的手段可以有效地表征图像局部窗口内灰度分布的复杂情况,但是其作用效果与所选择的尺度有关,当尺



图 1 典型目标灰度低于背景灰度的红外舰船图像

度较小或较大时都可能无法正确地反映局部区域内灰度分布的变化情况,而且单尺度的局部熵会造成目标区域的扩散<sup>[1]</sup>,这种扩散随尺度的增大将越发明显,进而会导致错误的结果。局部熵的计算如式(1)所示,式中  $H(x, R)$  代表以  $x$  为中心的局部区域  $R$  内的熵,  $p(g, x, R)$  代表以  $x$  为中心的局部区域  $R$  内灰度  $g$  出现的概率。

$$H(x, R) = - \sum_{g \in \{1, \dots, r\}} p(g, x, R) \lg p(g, x, R) \quad (1)$$

局部方差的计算如式(2)所示,式中  $D(x, R)$  代表以  $x$  为中心的局部区域  $R$  内的方差,  $i, j$  代表区域  $R$  内像素的坐标,  $g(i, j)$  代表像素  $(i, j)$  的灰度值,  $S_R$  代表区域  $R$  内的像素总数。

$$D(x, R) = \sum_{(i, j) \in R} \left( g(i, j) - \frac{1}{S_R} \sum_{(i, j) \in R} g(i, j) \right)^2 \quad (2)$$

当局部区域  $R$  大小发生变化时,相对平坦的背景而言,其熵和标准差随尺度的变化较小,而显著性的区域(如舰船目标等)在尺度变大时会逐渐将区域外的数据包含进局部区域  $R$  内,因此其局部熵和局部方差都会有明显变化。以图 1 中的舰船尾部和天空背景为例,图 2(a)和图 2(b)分别展示了舰船尾部和天空背景的局部图像( $21 \times 21$ ),图 2(c)表现了图 2(a)和图 2(b)随尺度变化局部熵的变化情况;图 2(d)表现了图 2(a)和图 2(b)随尺度变化局部方差的变化情况;图 2(e)表现了图 2(a)和图 2(b)随尺度变化局部方差与熵乘积的变化情况。从图中可以看出,作为舰船区域,其局部熵和方差随尺度变化所产生的变化量要明显大于平缓的天空背景。正是基于多尺度局部熵和方差的这一特点,本文提出使用多尺度方差熵的变化量来突出红外场景中的舰船区域,即使用多尺度下的方差与熵乘积的最大与最小值之差来表征图像中的所有像素,进而达到增强舰船区域的目的。基于多尺度局部方差-熵的红外图像变换如式(3)所示。

$$\text{Dif} = \max\{R \in (R_1, \dots, R_n) \mid H(x, R) \cdot D(x, R)\} - \min\{R \in (R_1, \dots, R_n) \mid H(x, R) \cdot D(x, R)\} \quad (3)$$

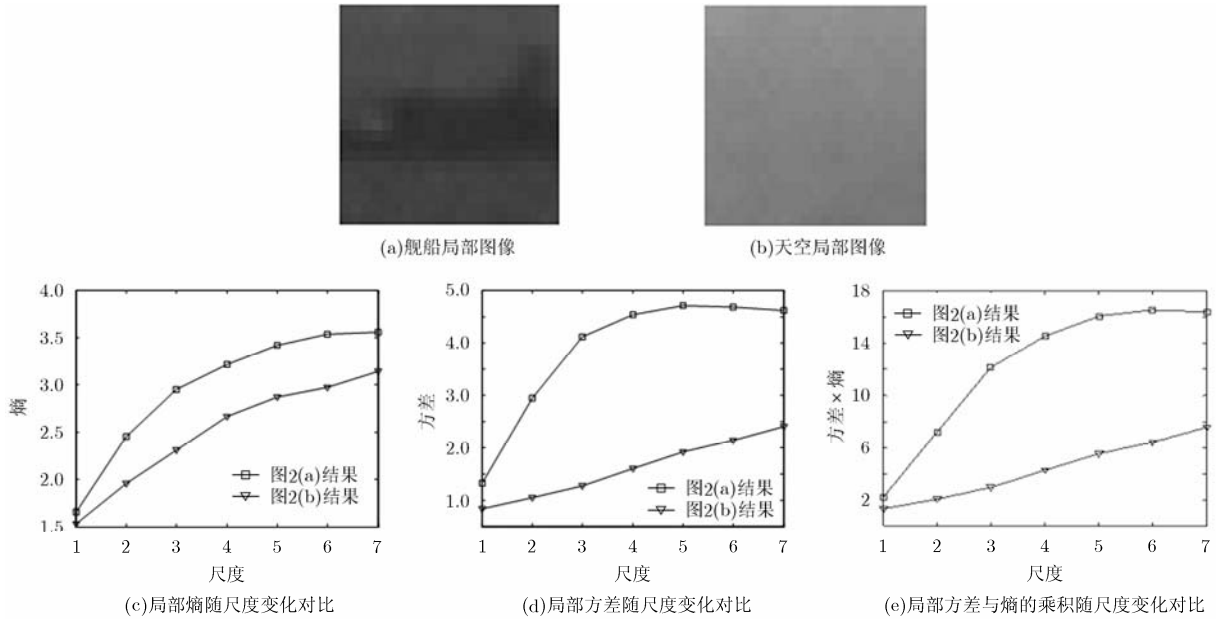


图 2 局部方差、局部熵和局部方差与熵的乘积随尺度的变化关系

多尺度的设置需要根据舰船目标的大小进行选择。考虑本文中涉及的舰船目标的尺寸以及计算量，通过多组实验表明，以 5 个尺度(即  $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9, 11 \times 11$ )对图像进行分析可以得到较好的结果。选取上述的 5 个尺寸对图 1 进行多尺度局部方差-熵变化量的计算后，其结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出，在原图中灰度低于背景的舰船区域的灰度经变化后已经明显高于背景区域，通过这样的变换可以摆脱阈值分割算法对于“目标与背景强度关系已知”的依赖，这为后续采用统一的阈值方法对舰船目标进行分割提供了基础。

### 3 一种新的最大 2 维熵分割算法

从图 3 可以看出，经过多尺度局部方差-熵变化量的变换后，图像中的舰船得到了有效的增强，但图像中的其它区域如海天过渡区域等也得到了增强，这部分内容的增强对于阈值分割是不利的，尤其当舰船区域与海天过渡区域很近时，经阈值分割

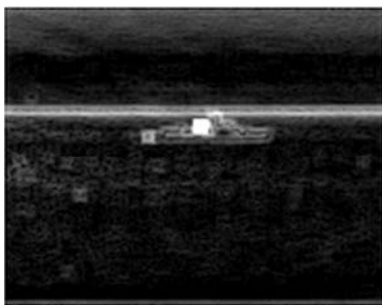


图 3 图 1 的多尺度局部方差-熵变化量变换结果

后可能会连接为一体。图 4 展示了使用 Otsu 方法<sup>[10]</sup>和最大 2 维熵<sup>[2]</sup>方法对图 3 进行分割的结果。

经典最大 2 维熵的分割算法基于图像原始灰度和局部灰度均值为统计指标构建了 2 维直方图，在考虑邻域分布的基础上，以最大化 2 维熵为准则对图像进行分割可以得到比 1 维直方图更好的分割结果。文献[12]提出一种改进的红外图像 2 维 Otsu 分割算法用来分割图像，但其依然是假设目标灰度高于背景。根据海面红外舰船图像的特点，本文提出一种新的基于多尺度局部方差-熵变化量和梯度方向方差的 2 维直方图，并以最大化 2 维熵为准则确定相应的 2 维分割门限完成阈值分割。

梯度方向的定义为

$$A(i, j) = \arctan\left(\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (4)$$

式中  $g_y$  和  $g_x$  分别代表  $y$  方向和  $x$  方向的梯度。由于热辐射从天空过渡到海面的过程中海天过渡区域的灰度变化趋势基本相同，因此在该区域内的梯度方向基本上一致；舰船目标区域内部较为平缓，梯度方向较为一致；而在舰船边缘处会存在较强的灰度变化，存在梯度方向的剧烈变化。图 1 的梯度方向图如图 5 所示，图中用白色方框标识出了舰船区域对应的梯度方向，从图中可以看到，过渡区域的梯度方向较为平缓，而舰船区域附近的梯度变化较大，相对过渡区域将会拥有较大的梯度方向方差。以梯度方向方差为指标将能够有效的区分舰船区域和过渡区域。

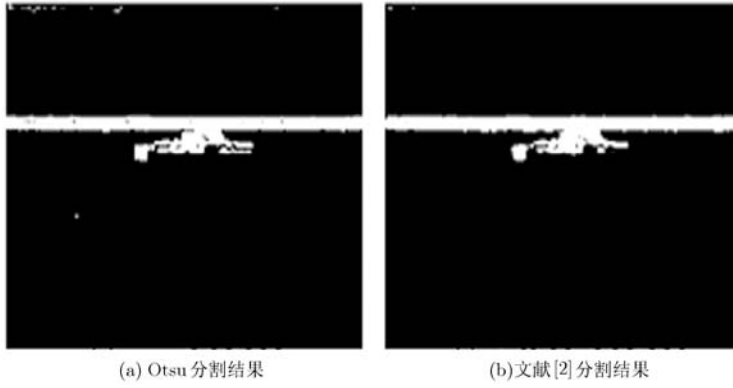


图 4 图 3 的分割结果

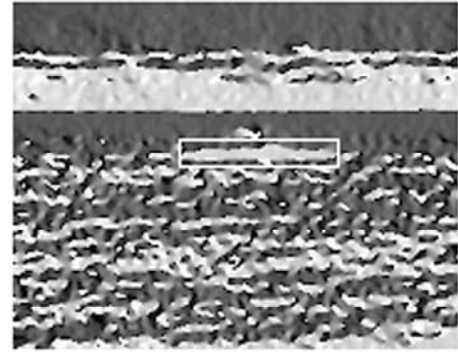


图 5 图 1 的梯度方向图

以此为出发点，本文以多尺度局部方差-熵变化量和梯度方向方差为衡量指标，构建一种新的 2 维直方图，并以最大 2 维熵法确定最佳门限。基于 2 维最大熵法选定的多尺度局部方差-熵变化量的门限  $s$  和梯度方向方差的门限  $t$ ，将 2 维直方图分为 4 个区域，如图 6 所示。图中区域 1 和区域 3 分别代表了图像中的背景和噪声，区域 2 和区域 4 分别代表着过渡区域和目标区域。

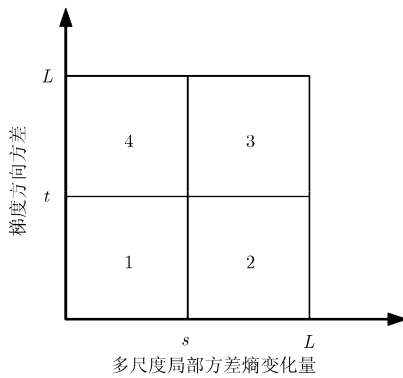


图 6 2 维直方平面图

假设图像 2 维直方图为  $p_{ij} = c_{ij}/C$ ，其中  $c_{ij}$  代表多尺度局部方差-熵变化量为  $i$  且梯度方向方差为  $j$  的像素个数， $C$  代表总像素个数。假设确定的门限如图 6 中所示的  $s$  和  $t$ ，那么像素属于第 1 和第 3 区域的概率为

$$P_1 = \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} p_{ij}, \quad P_3 = \sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=s}^{L-1} p_{ij} \quad (5)$$

定义第 1 区域的 2 维熵为

$$\begin{aligned} H_1 &= -\sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} \frac{p_{ij}}{P_1} \lg \frac{p_{ij}}{P_1} \\ &= -\frac{1}{P_1} \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} (p_{ij} \lg p_{ij} - p_{ij} \lg P_1) \\ &= \frac{1}{P_1} \lg P_1 \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} p_{ij} - \frac{1}{P_1} \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} p_{ij} \lg p_{ij} \\ &= \lg P_1 - \frac{1}{P_1} \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} p_{ij} \lg p_{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

同理，第 3 区域的 2 维熵为

$$H_3 = \lg P_3 - \frac{1}{P_3} \sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} p_{ij} \lg p_{ij} \quad (7)$$

那么图像中背景和目标的 2 维熵之和为  $s$  和  $t$  的函数，其表示为

$$\phi(s, t) = H_1 + H_3 \quad (8)$$

根据最大化 2 维熵的准则， $s$  和  $t$  的最佳值  $(s^*, t^*)$  应该是使式 (8) 达到最大时所确定的门限值。为求解  $(s^*, t^*)$ ，往往需要穷举所有的  $s$  和  $t$  的组合找到最佳的  $(s^*, t^*)$ ，计算量十分巨大。为减少计算量，本文采用粒子群优化算法<sup>[1,2]</sup>寻找最佳的  $(s^*, t^*)$ ，并使用  $(s^*, t^*)$  对多尺度局部方差-熵变化量与梯度方向方差构成的 2 维直方图进行分割。分割后的图像区域中可能存在孔洞，故采取形态学方法<sup>[13]</sup>对区域中的孔洞进行填充。图 1 经过以上处理后的的分割结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出，红外舰船区域已可靠地分割出来，但同时还包括各种噪声、海面杂波和海天线的影响。这些影响因素可通过对各个区域的识别 (如利用面积、长宽比、形状等信息) 加以剔除并最终获得预期的舰船区域。

#### 4 实验结果与分析改进

为验证算法的有效性，本文选取了实际中波红外探测器在不同环境下采集的红外舰船图像序列进

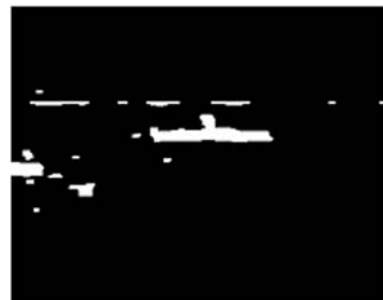


图 7 图 1 的分割结果

进行了实验。本实验中分别选取了舰船灰度低于背景和舰船灰度高于背景的图像进行讨论,实验图像如图8所示。从图中可以看出,由于拍摄环境的不同,图8(a)和图8(b)中的舰船区域灰度明显低于背景,图8(c)中的舰船区域灰度高于背景,而图8(d)中的舰船区域灰度略高于背景。本文算法对4种不同的中波红外图像分割结果如图9中9(a1)–9(d1)所示。实验中本文选取了Otsu<sup>[10]</sup>和最大2维熵方法<sup>[2]</sup>进行了结果对比,由于Otsu和最大2维熵方法都必须在已知目标和背景能量强度关系的前提下进行分割,因此在对图8(a)和图8(b)进行分割时假设已知图像中目标灰度低于背景,Otsu方法和最大2维熵方法均设定阈值分割小于背景灰度的像素;对于图8(c)和图8(d)则设定阈值分割灰度大于背景的像素。图9(a2)–9(d2)是Otsu分割结果,9(a3)–9(d3)是最大2

维熵的分割结果。

从实验结果中可以看出,本文算法在未知图像中舰船目标与背景灰度关系的情况下,均能大致分割出舰船区域;而Otsu方法仅对图8(a)能够较完整地分割出目标,最大2维熵方法仅对图8(c)能够较好的分割出目标,对于其它类型的图像,这两种方法即使在已知目标和背景灰度关系的情况下也无法获得较好的分割结果。这是由于这两种方法对于目标区域的灰度与背景灰度的对比度较强的情况下才能获得较好的效果,当目标的灰度的分布范围嵌入背景灰度的分布范围内时,两种方法的分割效果无法达到预期效果。本文算法通过多尺度局部方差-熵变化量的变换增强了图像中的目标区域,使目标区域在变化后能够相对背景拥有较高的能量,因此可以在不同的实验图像中获得相对较好的结果。

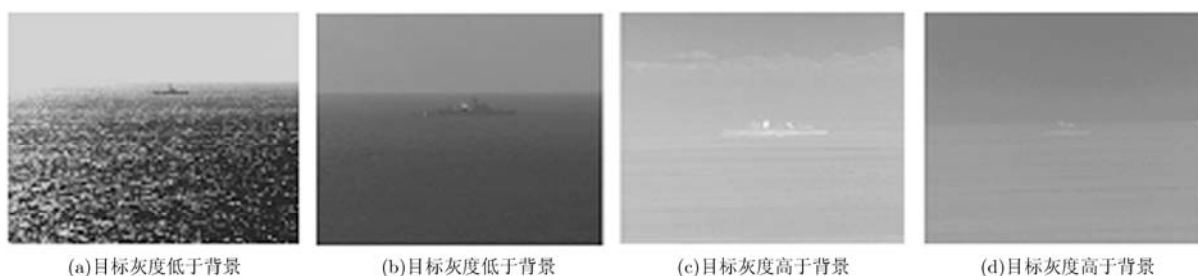


图8 实验图像

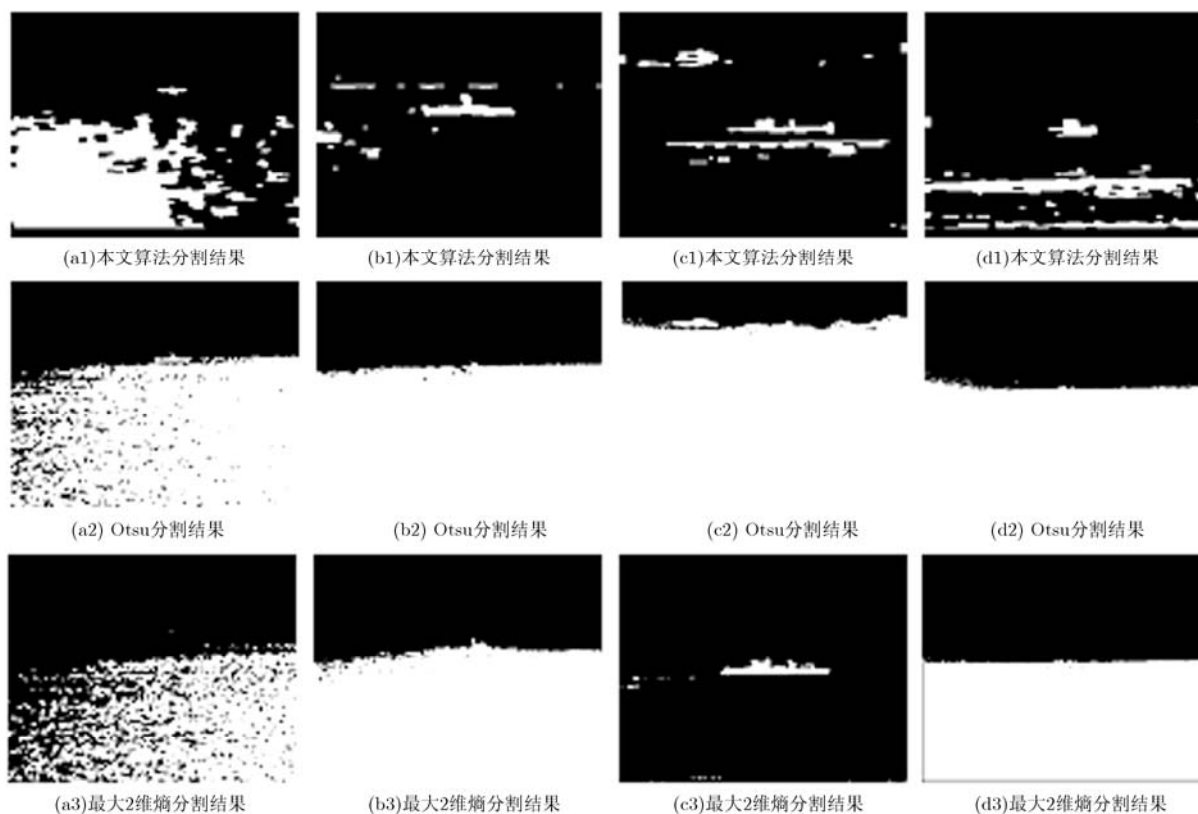


图9 分割结果对比

由于局部方差和熵运算本身会带来一定的扩散效应, 因此本文算法的分割结果并不能和原始图像准确地匹配, 这一点从图 9 的分割结果中也可以看出。为了获得更准确的分割结果, 将上述的分割方法作为一种“粗分割”, 通过“粗分割”获得的区域作为粗分割区域来初步定位目标区域, 然后在目标区域内进行“精分割”, 进而得到准确的分割结果。本文以粗分割区域的包围框向 4 个方向各外扩 10 个像素, 然后选取外扩窗口内的原始数据进行再次分割。再次分割时, 首先对比粗分割区域包含的原始图像数据的均值  $m_R$  和外扩窗口内原始图像数据的均值  $m_W$  的关系, 如果  $m_R < m_W$  则说明目标的灰度低于背景灰度, 反之则说明目标的灰度高于背景灰度; 随后采取迭代 Otsu 分割的方式直至分割后的图像面积小于粗分割区域面积或是和粗分割区域面积

接近。采用上述方法对目标区域进行“精分割”的最终结果如图 10 所示。从图中可以看出, 通过进一步的迭代分割, 可以准确的获得图像中的舰船目标, 得到了满意的分割结果。

## 5 结论

针对不同环境下中波红外图像中舰船目标呈现“双极性”的问题, 本文提出了一种全新的基于最大化 2 维熵的舰船目标分割算法。算法使用多尺度局部熵方差熵变化量和梯度方向方差构建 2 维直方图, 然后采用粒子群优化算法寻找最大化 2 维熵的最优阈值, 最终获得舰船目标的大致区域; 为获得准确的目标分割结果, 算法对目标的局部区域进行迭代分割, 最终获得准确的分割结果。实验结果表明, 本文算法能够自适应地分割红外背景中的“双极性”目标, 并获得较好的分割结果。

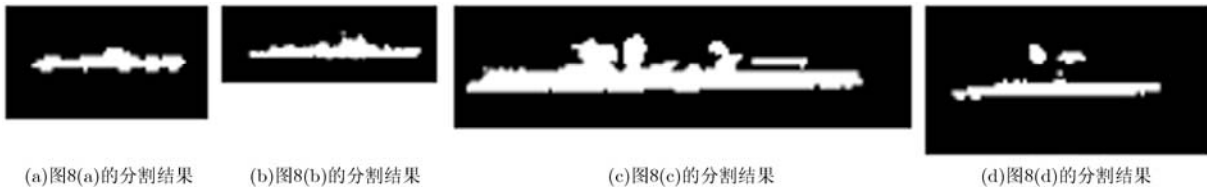


图 10 舰船目标的局部迭代分割结果

## 参 考 文 献

- [1] 张天序, 赵广州, 王飞, 等. 一种快速递归红外舰船图像分割新算法[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(4): 295-300.  
Zhang Tian-xu, Zhao Guang-zhou, Wang Fei, et al. Fast recursive algorithm for infrared ship image segmentation[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, 25(4): 295-300.
- [2] 杜峰, 施文康, 邓勇, 等. 一种快速红外图像分割方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(3): 370-373.  
Du Feng, Shi Wen-kang, Deng Yong, et al. Fast infrared image segmentation method[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(3): 370-373.
- [3] 何友金, 李凯永, 任建广. 一种改进的基于递归门限分析的红外舰船目标图像分割方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(增刊): 267-270.  
He You-jin, Li Kai-yong, and Ren Jian-guang. Improved method of infrared ship target segmentation based on recursive threshold analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(Suppl.): 267-270.
- [4] 王鹏, 吕高杰, 龚俊斌, 等. 一种复杂海天背景下的红外舰船目标自动检测方法[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2011, 36(12): 1438-1441.  
Wang Peng, Lü Gao-jie, Gong Jun-bin, et al. An automatic target detection method for infrared ship in complex sea-sky background[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(12): 1438-1441.
- [5] 徐海祥, 曹万华, 陈炜, 等. 无人机红外舰船目标分割[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(8): 224-225.  
Xu Hai-xiang, Cao Wan-hua, Chen Wei, et al. Segmentation of unmanned aerial vehicle infrared ship target[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(8): 224-225.
- [6] 严发宝, 邹常文, 王璐, 等. 基于SUSAN算法和行列均值分割的海面舰船检测[J]. 激光与红外, 2011, 41(3): 324-327.  
Yan Fa-bao, Zou Chang-wen, Wang Lu, et al. Infrared warship target detection based on SUSAN algorithm and segmentation algorithm using the mean of image rows and columns[J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(3): 324-327.
- [7] 邹常文, 冯力天, 刘先志, 等. 基于多尺度局部方差的海面红外舰船检测[J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 697-699.  
Zou Chang-wen, Feng Li-tian, Liu Xian-zhi, et al. Infrared warship target detection based on multi-scale variance[J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(6): 697-699.
- [8] 陶文兵, 金海. 基于均值漂移滤波及谱分类的海面舰船红外目标分割[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(1): 61-64.  
Tao Wen-bing and Jin Hai. Ship infrared object segmentation based on meanshift filtering and graph spectral clustering[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(1): 61-64.

- 61-64.
- [9] 高鸿启, 沈学举, 邵珺, 等. 基于小波变换方法的海上舰船目标边缘提取[J]. 兵工自动化, 2009, 28(10): 12-14.  
Gao Hong-qi, Shen Xue-ju, Shao Jun, *et al.*. Warship image's edge abstraction based on wavelet transform[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2009, 28(10): 12-14.
- [10] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [11] Deng He, Liu Jian-guo, and Chen Zhong. Infrared small target detection based on modified local entropy and EMD[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(1): 24-28.
- [12] 顾鹏, 张玉. 改进的红外图像2维Otsu分割算法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(8): 1424-1428.
- Gu Peng and Zhang Yu. Improved 2D Otsu segmentation algorithm for infrared image[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(8): 1424-1428.
- [13] Gonzalez R C, Woods R E, and Eddins S L. Digital Image Processing Using MATLAB[M]. London: Prentice Hall, 2005: 274-276.
- 赵菲: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为自动目标识别技术及实时系统设计.
- 卢焕章: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为自动目标识别技术及实时系统设计.
- 张志勇: 男, 1976年生, 讲师, 研究方向为自动目标识别技术及实时系统设计.