

## 起伏背景下红外目标检测算法研究

王莹莹, 何苹, 贺波, 张磊  
(空军工程大学, 西安 710051)

**摘要:** 为了准确实现起伏背景下的目标分割,提出了一种结合信息熵和区域生长的红外小目标图像检测方法。在分析红外图像特性的基础上,对原始图像进行自适应平滑滤波,使得图像在保持目标强边缘的前提下抑制高斯白噪声;利用目标边缘在其邻域内起伏大的特点,使用基于灰度级-邻域灰度级绝对差 G-G 直方图的最大熵进行图像分割;利用最大熵求解的阈值选取种子点,将种子点在已分割的图像上进行区域生长。实验结果表明,所提方法在背景起伏较大的情况下具有较好的目标检测性能。

**关键词:** 目标检测; 自适应平滑滤波; 最大熵算法; 区域生长

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)01-0025-04

## IR Target Detecting Algorithm Under Background of Fluctuation

WANG Ying-ying, HE Ping, HE Bo, ZHANG Lei  
(Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** An algorithm combining the information entropy and region growing method is put forward for the accurate segmentation of the IR small target image in background of fluctuation. First, the IR original image is filtered using the adaptive smooth filter after analyzing the image features, thus the Gaussian noise is restrained without destroying the strong edge of the target. Then, the image segmentation is implemented using the maximum entropy algorithm based on the Gray level-Gray absolute difference (G-G) histogram, by using the feature that the target edge is high in gray level and changes rapidly in its surrounding region. After the image segmentation, the seed points are selected according to the threshold obtained in the maximum entropy algorithm. And the region growing method is realized in the segmented images. Experiment results show the effectiveness of the methods given here in target-detection under background of fluctuation.

**Key words:** target detecting; adaptive smooth filter; maximum entropy algorithm; region grow

### 0 引言

远距离拍摄的红外图像,目标所占像素较少,几何形状和纹理结构不是很清晰,可供利用的信息比较少。在单帧图像上提取完整的目标信息,将目标与背景分离,可以为后续的目标识别提供依据。

图像分割的方法有很多,主要有基于边缘的分割方法<sup>[1]</sup>和基于区域的分割方法<sup>[2]</sup>。本文所涉及的红外图像背景为云层,旨在复杂云层和随机噪声的干扰下,检测出低信噪比的小目标。由于强起伏背景的灰度分

布范围广、变化大,同时,目标自身温度分布不均匀,使得部分背景的温度与目标相似,目标和大量背景在灰度级上交叉重叠,人为确定一个阈值会把大量背景错划成目标。

针对以上问题,本文在对原始图像进行自适应平滑滤波、抑制高斯白噪声的基础上,通过基于信息熵的分割算法进行初步图像分割,得到分割阈值,并根据此阈值获取原始种子点,然后在初步分割图像的基础上进行区域生长,最后对实拍的起伏背景下的红外目标图像进行目标检测,验证了本文算法的有效性。

### 1 红外图像特性分析

天空背景下的红外小目标图像由目标、天空背景和噪声组成。在不同的拍摄场景下,目标与背景灰度

收稿日期:2014-06-24

修回日期:2015-10-26

基金项目:中国博士后基金(2014T71008)

作者简介:王莹莹(1988—),女,安徽涡阳人,硕士,讲师,研究方向为红外探测与跟踪技术。

差异大小不一。实拍的3幅红外小目标(飞机)图像如图1所示。

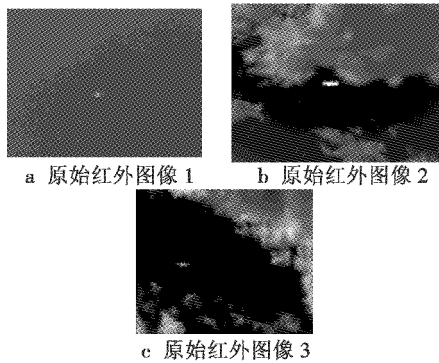


图1 原始红外图像

Fig.1 Original IR images

可以看出:图1a虽然整体灰度值较小,但背景比较均匀,飞机的一部分有较高的亮度,但机翼、机尾和头部亮度较低,和背景难以区分;图1b虽然整体较亮,目标亮度高、灰度值大且分布均匀,但同时云层亮度值也较高,灰度分布不均匀,起伏大;图1c中目标灰度分布不均匀,目标的一部分有较高的亮度,云层背景起伏很大。

总的来说,红外小目标图像共同的特征是:1)一般目标亮度比背景高,但在图像中所占比例较小;2)目标边缘灰度值高且变化大,属于强边缘,目标在其邻域内被灰度值较低的点组成的联通环包围;3)云层背景在图像中占很大的比例,有时候云层有较高的亮度和较大的起伏,但边缘往往是渐变的,大多属于弱边缘;4)原始图像中包含各种噪声干扰。

由于红外小目标图像的多样性,设计一种在各种背景下分割效果好、适应性高的目标检测算法具有一定的挑战性和必要性。

## 2 自适应平滑滤波

影响红外图像的各种噪声中,高斯白噪声占很大一部分,为了消除高斯白噪声的干扰,必须选择合适的方法对其进行滤除。与一般的去噪方法相比,自适应平滑滤波<sup>[3]</sup>在平滑噪声的同时,较好地保留边缘信息和细节。

对输入图像 $f_0(i, j)$ 进行自适应平滑滤波是将滤波函数与原始图像进行卷积,得到一个平滑图像 $f_1(i, j)$ ,即

$$f_1(i, j) = f_0(i, j) * \omega_{ij} = \sum_{m, n=-p}^p \omega_{ij}(m, n) f_0(i+m, j+n) \quad (1)$$

式中: $p$ 确定了滤波区域是以点 $(i, j)$ 为中心的 $(2p+1) \times (2p+1)$ 窗口; $\omega_{ij}(m, n)$ 是为窗口内的像素点

$f_0(i+m, j+n)$ 设计的加权系数。

本文设计的滤波器要满足以下几点:对于目标和背景内部或弱边缘,主要使用邻域点对其进行平滑滤波;对于目标强边缘,则要予以保留,而不要将其归于邻近区域进行处理。这样,需要对灰度值差异较大的点取较小的权重,对差异较小的点取较大的权重。通过上面分析, $\omega_{ij}(m, n)$ 要具备的特质为

$$\omega_{ij}(m, n) = \Phi(|f(i, j) - f(i+m, j+n)|) \quad (2)$$

式中, $\Phi$ 为单调减函数,可采用 Butterworth 函数、梯形函数或指数函数来构造。本文使用指数函数形式,即

$$\Phi(x) = \exp\left(-\frac{1}{2} \left|\frac{x}{\sigma}\right|^n\right) \quad (3)$$

当 $n=2$ 时,指数函数简化为高斯函数,即

$$\Phi(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

本文采用高斯函数来计算加权系数,即

$$\omega_{ij}(m, n) = \exp\left(-\frac{|f'(i, j)|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中: $\sigma$ 调节指数衰减速度,它确定了在平滑过程中可以保留下的边缘幅度; $f'(i, j)$ 表示灰度梯度,有

$$f'(i, j) = \left(\frac{\partial f(i, j)}{\partial i}, \frac{\partial f(i, j)}{\partial j}\right) = (G_i, G_j) \quad (6)$$

$$|f'(i, j)|^2 = G_i^2 + G_j^2 \quad (7)$$

令滤波窗口尺寸大小为 $3 \times 3$ ,那么

$$G_i(i, j) = \frac{1}{2}[f(i+1, j) - f(i-1, j)] \quad (8)$$

$$G_j(i, j) = \frac{1}{2}[f(i, j+1) - f(i, j-1)] \quad (9)$$

则权系数可以表示为

$$\omega_{ij} = \exp\left(-\frac{G_i^2(i, j) + G_j^2(i, j)}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

在实际计算中,还要对权重 $\omega_{ij}$ 做归一化处理,保证平滑后的 $f_1(i, j)$ 不会超出图像的灰度范围。也可根据需要反复迭代上述过程,以获得更好的噪声抑制效果。

综上所述,自适应平滑滤波的计算步骤是:

- 1) 设置参数 $\sigma$ 的值;
- 2) 根据式(8)和式(9)计算梯度 $G_i(i, j)$ 和 $G_j(i, j)$ ;
- 3) 根据式(10)计算滤波器权系数 $\omega_{ij}$ 并进行归一化处理;
- 4) 根据式(1)对 $f_0(i, j)$ 进行加权平均,得到输出结果 $f_1(i, j)$ 。

## 3 信息熵提取目标

传统的二维最大熵是在灰度级-邻域平均灰度级(Gray Level-Average Gray Level, G-A)直方图的基础上得到的,它既能反映各点的像素信息又能体现其空域

的相关信息,因此在区分目标和背景方面效果较好。

图 2a 和图 2b 所示为传统的直方图,阈值( $s, t$ )把图像分为 4 个部分,其中,  $A$  和  $B$  分别代表目标和背景,  $C$  和  $D$  分别表示噪声和边缘附近点的分布。这种二维 G-A 直方图的  $A$  和  $B$  区域可能存在较多的边缘点和噪声点,而导致分割结果不准确。

针对 G-A 直方图存在的不足,本文使用的直方图是灰度级 - 邻域灰度级绝对差 (Gray Level-Gray Absolute Difference, G-G) 直方图<sup>[4-5]</sup>, 定义为  $\{h(s, t), s, t = 0, 1, 2, \dots, L-1\}$ , 其中,  $h(s, t)$  表示某像素点的灰度值  $f(i, j)$  为  $s$  且  $g(i, j)$  为  $t$  的点的个数,  $g(i, j)$  表示中心像素点的灰度值与其 8 邻域像素点灰度均值之差, 其表达式为

$$g(i, j) = \left| f(i, j) - \frac{\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 f(i+m, j+n) - f(i, j)}{8} \right| \quad (11)$$

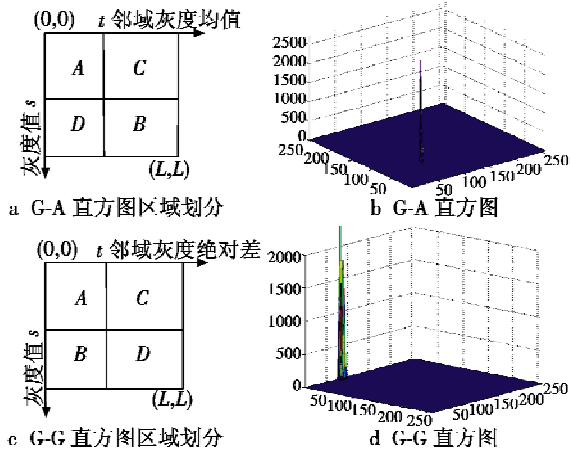


图 2 红外目标图像的两直方图及其区域划分方法  
Fig. 2 Two types of histogram and its region distribution

图中:  $s, t, L$  为灰度级大小;  $(L, L)$  为  $(s, t)$  的最大范围。G-G 直方图区域划分如图 2c 所示。区域  $A$  的像素点灰度值、其邻域灰度绝对差都较小,与背景对应; 区域  $B$  的像素点灰度值较大,其邻域灰度绝对差相对较小,与目标对应; 区域  $C$  和  $D$  中像素点邻域灰度绝对差较大,表示目标和背景的边缘和噪声。这种构造方法可以使区域  $A$  和  $B$  尽可能包含了目标和背景,避免了传统 G-A 直方图的不足。

基于二维 G-G 直方图的最大熵的原理如下所述。

设红外图像  $f$  大小为  $m \times n$ , 二维 G-G 直方图中点对  $(i, j)$  的概率为

$$P_{ij} = h(i, j) / mn \quad (12)$$

区域  $A$  和  $B$  的概率分别为

$$P_A = \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t P_{ij} \quad (13)$$

$$P_B = \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=0}^t P_{ij} \quad (14)$$

区域  $A$  和  $B$  的熵分别为

$$H_A = - \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t P_{ij} / P_A \ln(P_{ij} / P_A) \quad (15)$$

$$H_B = - \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=0}^t P_{ij} / P_B \ln(P_{ij} / P_B) \quad (16)$$

图像的熵函数定义为

$$\phi(s, t) = H_A + H_B \quad (17)$$

经推导,可得

$$\phi(s, t) = \ln[P_A(1 - P_A)] + \frac{H_A}{P_A} + \frac{H - H_A}{1 - P_A} \quad (18)$$

式中:  $H = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij} \ln P_{ij}$ ;  $H_A = - \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t P_{ij} \cdot \ln P_{ij}$ 。

使二维熵  $\phi(s, t)$  取最大值的  $(s, t)$  即为最佳阈值。用基于二维 G-G 直方图的最大熵对实拍红外小目标图像进行分割,结果如图 3 所示。

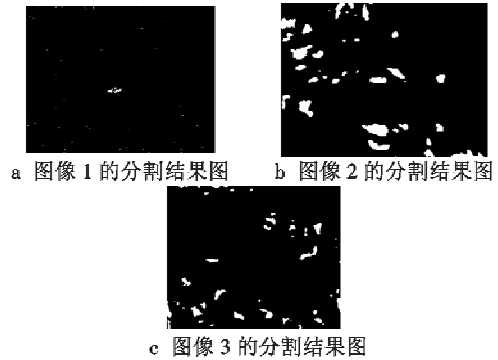


图 3 对原始红外图像的分割结果

Fig. 3 Segmentation result to the original IR images

从图 3 中可以看出,虽然二维 G-G 直方图最大熵算法对图 1a 的检测效果较好,但在背景起伏较大的图 1b 和图 1c 上分割的效果并不理想。

## 4 自适应区域生长算法

区域生长的基本思想是将所有相似性质的像素集合起来构成区域,即先对每个需要分割的区域找一个种子像素作为生长的起点,然后将种子点邻域与种子像素具有相同或相似性质的像素合并到种子像素所在的区域,反复进行直到再没有满足条件的像素存在为止。应用区域生长算法时一般要考虑选择种子像素和确定相似性准则的问题。

### 4.1 种子点选取的规则

在对红外图像特性分析中可以看出,红外图像中的小目标表现出灰度值高、变化大的特点,其边缘属于强边缘;云层有时会出现较高的亮度和较大的起伏,但边缘往往是渐变的,大多属于弱边缘。同时,小目标在其邻域内被灰度值较低的点组成的联通环包围,而云层背景边缘往往不存在这个特点。在这里采用灰度值高且变化大作为种子像素选取的规则。因此种子点选

取原则可以表示为

$$f_{\text{seed}}(i,j) = \begin{cases} f_1(i,j) & f_1(i,j) \geq th1 \text{ and } r(i,j) \geq th2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $f_{\text{seed}}(i,j)$  为种子点;  $f_1(i,j)$  为自适应平滑滤波后的灰度值;  $r(i,j)$  为灰度值的变化量; 假定  $th1$  是灰度的门限值,  $th2$  是灰度变化量的门限值。

由上述可知, 使用基于 G-G 直方图的最大熵算法对自适应平滑滤波后的图像  $f_1$  进行分割, 可以得到一组分割阈值  $(s, t)$ , 由图 2c 可以看出, 区域  $B$  中满足  $f_1 > s, g < t$  的点为目标点, 区域  $A$  中满足  $f_1 < s, g < t$  的点为背景点, 区域  $C$  中满足  $f_1 > s, g > t$  的点一般表示强边缘部分。

当背景亮度高、起伏大, 同时目标灰度分布不均匀时,  $A, B$  区域中目标和背景有交叉重叠, 但在  $C$  区域中表示的强边缘一般属于目标, 因此可令式 (19) 中的  $r = g, (th1, th2) = (s, t)$ , 可以变为

$$f_{\text{seed}}(i,j) = \begin{cases} f_1(i,j) & f_1(i,j) \geq s \text{ and } g(i,j) \geq t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

式中, 灰度值变化用  $t$  值表示,  $t$  是某像素点的灰度值与其 8 邻域像素点灰度均值之差, 但红外图像具有噪声大、边缘模糊的特点, 因此可以对边缘的范围稍微扩大一些, 使用  $m \times m (m > 3)$  邻域代替  $3 \times 3$  邻域求解灰度的变化值  $t$ 。

## 4.2 相似性判决的方法

种子点和候选点的相似性判决条件一般有灰度相似性判决法和均方判决法<sup>[6]</sup>。多数情况下使用这两种方法可以较准确地提取目标区域, 其缺点是: 对每一个候选像素点, 需要利用已判定为目标的像素点计算平均灰度和方差, 因此当候选像素很多时, 计算量也很大。因此, 在信息熵进行图像分割结果的基础上, 提出一种候选像素快速判决法。

假设原始的图像为  $f_0$ , 自适应平滑滤波进行噪声抑制后的图像为  $f_1$ 。平滑滤波后, 使用基于 G-G 直方图的最大熵分割的结果图为  $f_{\text{seg}}$ , 种子点图像为  $f_{\text{seed}}$ 。由于在最大熵的分割结果图  $f_{\text{seg}}$  中, 候选目标像素值不为零, 其他区域灰度值已被抑制为零, 同时种子点在  $f_{\text{seg}}$  的邻域, 所以, 判决准则简化为: 1) 候选像素在分割图  $f_{\text{seg}}$  中; 2) 候选像素处于种子点的邻域。当原始图像中的候选像素点同时满足这两点时, 判决为目标像素, 其邻域的像素亦成为候选像素并进行下一次生长。

## 5 仿真结果及分析

为了验证本文提出的起伏背景下目标检测算法的有效性, 对图 1b、图 1c 进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。首先, 对图 1b、图 1c 进行自适应平滑滤波; 接着,

使用基于 G-G 直方图的最大熵算法分别对图 1b 和图 1c 的自适应平滑滤波结果进行分割, 得到分割阈值; 然后使用此分割阈值选取种子点。图 4a 和图 4c 分别为用上述方法得到的图 1b 和图 1c 的种子点。图 4b 和图 4d 分别为在图 4a 和图 4c 的种子点基础上进行区域生长的结果。

对比图 3 和图 4 可以看出, 区域生长比二维 G-G 直方图最大熵算法的分割结果有很大的改善, 小目标被完整地检测出来, 分割图像中含有较少的背景干扰, 表明了本文提出的方法在背景灰度值较高、起伏较大的情况下具有较好的分割性能。

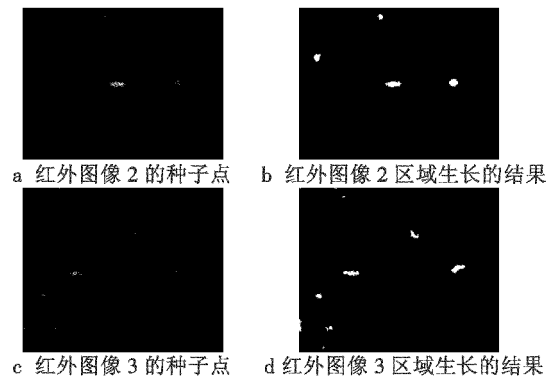


图 4 区域生长算法目标检测结果

Fig. 4 The target-detecting result using region growth method

## 6 结论

依据红外图像目标、背景的灰度特性在均值、变化率上的差异, 提出了结合信息熵和区域生长算法的目标检测方法。用基于 G-G 直方图的最大熵进行图像分割, 得到初始的目标点; 以强边缘为原则选取种子点; 区域生长准则结合了初始目标点和种子点特性, 方法思想简单、运算量小。本文对进行目标分割和种子点选取的阈值没有人为设定, 表明了本文提出的方法有一定的普适性, 能够运用于天空背景的红外小目标检测中。

## 参考文献

- [1] 崔玉平, 刘永才. 新的红外图像小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 587-591. (CUI Y P, LIU Y C. Novel method of small target detection in infrared images[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(5): 587-591.)
- [2] 夏晶, 孙继银. 基于区域生长的前视红外图像分割方法[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 107-111. (XIA J, SUN J Y. Forward-looking infrared image segmentation based on region growing[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(1): 107-111.)

(下转第 43 页)

## 4 结束语

本文从分析传统的二位置自对准方案出发,设计了带漂移补偿的HRG平台四位置自对准方案,对HRG随机漂移建立ARMA(2,1)模型,并进行滤波处理。实验结果表明,该方案的对准时间与忽略随机漂移的四位置自对准方案相当,而对准精度明显优于传统的二位置及四位置自对准方案,由此可见,该自对准方法的对准精度相对传统的二位置和四位置方案有较大提高,具有很好的工程价值和应用前景。

### 参考文献

- [1] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets[J]. *Spaceflight Mechanics*, 2009, 134:1157-1178.
- [2] 任顺清,赵洪波. 半球谐振子密度分布不均匀对输出精度的影响[J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(3):364-368. (REN S Q, ZHAO H B. Influence of density error of hemispherical resonator on output accuracy of gyro[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(3):364-368.)
- [3] 曹渊,张士峰,杨华波,等. 一种新的惯性平台快速连续旋转自对准方法[J]. *兵工学报*, 2011, 32(12):1469-1473. (CAO Y, ZHANG S F, YANG H B, et al. Fast self-alignment method for inertial platform through continuous rotation[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(12):1469-1473.)
- [4] 王荣颖,许江宁,卞鸿巍. 基于可观性分析的方位旋转式惯导初始对准仿真研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2009, 17(1):15-19. (WANG R Y, XU J N, BIAN H W. Initial alignment of azimuth rotating GINS based on observability analysis[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, 17(1):15-19.)
- [5] 宫海涛. 惯性导航系统的初始对准方法及实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012. (GONG H T. Initial alignment methods of inertial navigation system and experiment[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [6] 蒋庆仙,马小辉,陈晓璧,等. 光纤陀螺寻北仪的二位置寻北方案[J]. *中国惯性技术学报*, 2006, 14(3):1-5. (JIANG Q X, MA X H, CHEN X B, et al. North determining scheme by two-position for a FOG north seeker[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, 14(3):1-5.)
- [7] EDUARDO S R, VLADIMIR A N. Comparison between two basic schemes in function of the true earth's north detection [C]//Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2006:315-318.
- [8] 郝燕玲,张义,孙枫,等. 单轴旋转式捷联惯导方位对准研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 32(2):309-315. (HAO Y L, ZHANG Y, SUN F, et al. Analysis of single-axial rotation SINS azimuth alignment[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 32(2):309-315.)
- [9] ULRICH M. Estimation of useful and disturbing signals in inertial systems alignment [C]//Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany, 2000:205-228.
- [10] 汪立新. 半球谐振陀螺惯性系统[M]. 西安:西北工业大学出版社,2012. (WANG L X. The inertial system of HRG [M]. Xi'an:Northwestern Polytechnic University Press, 2012.)
- [11] 曲从善,夏克寒,许化龙,等. 导弹快速自瞄准方法及仿真研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(4):467-470. (QU C S, XIA K H, XU H L, et al. Research on auto-collimation method and simulation for ballistic missile[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(4):467-470.)
- (上接第18页)
- [11] 孟艳,汪晋宽,宋昕,等. 基于子空间跟踪和卡尔曼滤波的半盲多用户检测[J]. *信号处理*, 2008, 24(3):464-466. (MENG Y, WANG J K, SONG X, et al. Semi-blind multiuser detection based on subspace tracking and Kalman filter[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(3):464-466.)
- (上接第28页)
- [3] 于海南,赵保军. 低信噪比红外图像小目标的检测[J]. *激光与红外*, 2004, 34(1):40-42. (YU H N, ZHAO B J. Detection of small targets of low SNR infrared images[J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(1):40-42.)
- [4] 徐建军,高山,毕笃彦,等. 一种新的图像分割算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2011, 38(1):8-15. (XU J J, GAO S, BI D Y, et al. Novel image segmentation algorithm [J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38(1):8-15.)
- [5] 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):370-372. (DU F, SHI W K, DENG Y, et al. Fast infrared image segmentation method [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(3):370-372.)
- [6] 王润生. 图像理解[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1995. (WANG R S. Image understanding[M]. Changsha: Publishing House of National University of Defense Technology, 1995.)