

文章编号 1004-924X(2007)01-0138-07

数学形态学和小波变换的红外图像处理方法

同武勤¹, 凌永顺¹, 黄超超¹, 杨 华¹, 樊 祥²

(1. 解放军电子工程学院 安徽省红外与低温等离子体重点
实验室, 安徽 合肥 230037; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为了从红外热图像中识别和跟踪目标, 提出了一种采用数学形态学和小波变换相结合的红外图像处理新方法。该方法首先利用形态开、闭滤波器组对原始图像进行平滑处理; 然后采用一种改进的数学形态学的分水岭算法对红外图像进行分割, 同时利用考虑了图像纹理信息的小波阈值对分割的图像进行滤波处理; 最后针对过分割问题提出了一种利用区域灰度中值对分割区域进行融合处理的算法。实验结果及算法性能评估结果表明, 该方法能够较好地解决红外目标的识别问题, 具有较好的实用性。

关键词: 分水岭算法; 小波阈值滤波; 红外目标检测; 红外图像处理

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Processing method of IR image based on mathematical morphology and wavelet transform

TONG Wu-qin¹, LING Yong-shun¹, HUANG Chao-chao¹, YANG Hua¹, FAN Xiang²

(1. *Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, PLA Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;*
2. *University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China*)

Abstract: In the purpose of recognizing and tracking targets from infrared thermal images, an infrared image processing algorithm based on mathematical morphology and wavelet transform was presented. A original image was smoothed with the open and close filters of mathematical morphology, then the infrared image was segmented with improved watershed, simultaneously, the segmented image was processed with the wavelet threshold with picture texture information. For the problem of over-segmentation regions, an effective region merging method was settled to fuse the segmentation region using the region gray median. The experiment results and algorithm performance evaluation show that the method performs well in infrared target recognition and has a good practicability.

Key words: watershed algorithm; wavelet threshold filter; infrared target detection; infrared image processing

1 引言

近年来,红外热成像技术被广泛地应用于军事领域,现代防御武器系统越来越重视通过目标所产生的红外辐射来探测、识别和攻击目标。为了尽可能早地发现目标,使防御武器有足够的反应时间,要求目标必须在很远处就被检测到。由于成像距离远,背景及噪声干扰等因素使系统获取的图像信噪比较低,在各种背景杂波和噪声中,很难区分目标,通常采用空时域滤波的方法提高信噪比^[1]。中值滤波、均值滤波和常规的频域滤波都不能很好地剔除背景及杂波干扰,单一的形态学滤波也存在过分割、方向敏感性等问题^[2-3]。数学形态学和小波滤波相结合的处理方法是数字图像处理 and 模式识别领域的新方法。本文提出的方法如下:首先利用形态开、闭滤波器组对原始图像进行平滑处理;然后采用一种改进的数学形态学的分水岭算法对红外图像进行分割,同时利用了图像纹理信息的小波阈值对分割的图像进行滤波处理;最后针对过分割问题提出了一种利用区域灰度中值对分割区域进行融合处理的算法,通过各种算法比较及性能评估,证明了本文的这种方法能够处理红外图像,从而检测识别出真实目标。

2 数学形态学的基本运算及分割算法

2.1 数学形态学基本运算

数学形态学是一种非线性滤波方法,它首先被用来处理二值图像,后来引用到灰度图像处理。它的基本思想是用一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状,去除不相干的结构,以达到图像分析和识别的目的。形态学的应用可以简化图像数据,易于用并行处理方法和硬件实现^[4]。它的基本运算有四个:膨胀、腐蚀、开运算和闭运算。基于这些基本运算可以推导和组合各种形态学实用算法。设 $f(x, y)$ 为输入图像, $b(x, y)$ 为结构元素,其中 (x, y) 为图像平面控件的坐标点, f 为 (x, y) 点的图像灰度值, b 为 (x, y) 点的结构函数, D_f 和 D_b 分别为函数 f 和 b 的定义域^[5]。

2.1.1 膨胀和腐蚀

对于灰度图像而言,膨胀和腐蚀是以像素邻

域的最大值和最小值来定义的。使用结构元素 b 对 f 的灰度膨胀记为 $f \oplus b$, 定义为:

$$(f \oplus b)(x, y) = \max\{f(x-x', y-y') + b(x', y') \mid (x', y') \in D_b\}, \quad (1)$$

腐蚀是膨胀的逆运算,记为 $f \ominus b$, 定义为:

$$(f \ominus b)(x, y) = \max\{f(x+x', y+y') - b(x', y') \mid (x', y') \in D_b\}, \quad (2)$$

腐蚀运算可以消除小于结构元素的明亮区域,从而有效地去除孤立噪声点和边界上不平滑的凸出部分,膨胀是将与目标物体接触的所有背景点合并到物体中的过程,可填补空洞和形成连通域以及填平图像边界上不平滑的凹陷部分。

2.1.2 开运算和闭运算

灰度图像的开、闭运算可以用腐蚀和膨胀运算的级联来表示, f 和 b 的开运算记为 $f \circ b$,

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b, \quad (3)$$

f 和 b 的闭运算记为 $f \cdot b$,

$$f \cdot b = (f \oplus b) \ominus b, \quad (4)$$

开运算是先对图像进行腐蚀运算再进行膨胀运算,能去掉图像中的孤立区域和毛刺,利用它可以消除形状小于结构元素的正峰值,根据目标和噪声的特点选择适当的结构元,就能剔除目标和噪声而将背景保留下来。闭运算是先对图像进行膨胀运算再进行腐蚀运算,可以填充物体内的细小空洞,连接邻近物体和平滑物体边界。

2.2 改进的控制标记符的形态分水岭分割算法

图像分割是把目标从图像背景中分离出来的过程。形态学方法在图像分割中的应用主要是分水岭变换,它是一种非常适用于图像分割的形态算子,然而基于分水岭变换的图像分割方法的性能在很大程度上依赖于计算待分割图像梯度的算法。传统的梯度算子存在严重的缺陷,会受噪声和量化误差的影响,在均匀一致的区域内部会产生过多的局部最小值。而一般的分水岭变换后得到的图像区域数目与梯度图像的区域最小值数目相同,这是形成过分割的根本原因^[5]。因此本文提出控制标记符的分水岭分割算法,解决了上述问题。

标记符是将像素按照一定的顺序排列标记的符号,它是一幅图像的连接分量。对于图像,人们希望有一个内部标记符(处在每一个感兴趣对象的内部)和一个外部标记符集合(包含在背景中)。无论是对于内部标记还是外部标记,若待标记的

像素与多个不同集水盆地的像素相邻,则该像素的标记可能出现多种可能;若灰度级相同的两个像素互为邻域关系且两者测地距相同,则其中一像素的标记不能影响另一像素标记的确定^[6]。

针对上述问题本文提出控制标记符的分割算法,首先,对一个像素标记的确定应同时根据其邻域像素标记属性并行判断。若某像素只与一个集水盆地的像素相连,则赋值该像素集水盆的标记;若一个像素同时与两个或以上集水盆地相邻,则标记为分水岭像素;若像素同时与一集水盆地与分水岭相连,则赋值该像素集水盆地标记;若像素只与分水岭像素相连,则赋值该像素分水岭标记。其次,为避免出现标记错误的情况,当一像素的标记确定以后,将其测距下降一次,从而可以将该像素作为邻域像素对其它像素的标记进行判断。

3 小波变换及小波阈值滤波算法原理

3.1 小波变换理论

近年来提出的小波分析(或多分辨率分析)是 20 世纪 50 年代末提出的傅里叶分析发展史上里程碑式的进展。小波变换的概念是 1984 年法国物理学家 J. Morlet 提出的,其后物理学家 A. Grossman 采用平移和伸缩不变性建立了小波变换的理论体系,1989 年 S. Mallat 提出了多分辨率分析概念,统一了小波构造的方法,尤其是二进小波变换的快速算法,使得小波变换走向实用性^[6-8]。小波变换是把某一被称为基本小波(也叫母小波 mother wavelet)的函数 $\psi(t)$ 做位移 τ 后,再在不同尺度 a 下与待分析的信号 $x(t)$ 做内积:

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt, \quad a > 0, \quad (5)$$

尺度和位移离散化后,可以得到离散小波变换的定义为

$$WT_f(a_0^j, k\tau_0) = \int f(t) \psi_{a_0^j, k\tau_0}^*(t) dt, \quad j=0, 1, 2, \dots, k \in Z, \quad (6)$$

3.2 改进的小波阈值滤波算法

用小波阈值对含噪图像进行滤波处理是近年来研究的热点,各种阈值的选取方法也层出不穷,1992 年 Donoho 和 Johnstone 提出了小波阈值萎缩法,给出了 $\delta = \sigma \sqrt{2 \log(N)}$ 的阈值,对图像而

言, N 为图像的像素点数, σ 为噪声标准方差,此阈值很粗糙,因为 σ 是一个定值,阈值很大程度上依赖于像素个数 N ,一旦图像给定,整个过程 δ 也是一个固定值,这不利于图像滤波。随后 Bruce 和 Gao 又提出了软阈值和硬阈值方法,对图像处理而言,软阈值滤波能够有效去除噪声,但边缘保持能力较差;硬阈值滤波能够有效保持边缘,但去噪效果不理想^[9]。本文针对形态学滤波和分割后得到的梯度图像特征及图像纹理信息,提出了一种兼顾了图像纹理信息的软阈值和硬阈值相结合的多尺度小波阈值算子 $T(j)$:

$$T(j) = F_i \sigma(j) \sqrt{2 \log(N_i)}, \quad (7)$$

式中, N_i 为图像的像素个数,经小波变换后,滤波过程作为一个子程序只对小波域的某一个子频带进行处理,所以 N_i 就是子频带的像素数; $\sigma(j)$ 是噪声在尺度 j 上的标准方差,文献[10]给出了基于区域相关算法来估计噪声方差的方法:

$$F_i = KL / \sigma_i, \quad (8)$$

式中, F_i 是相应频带的纹理参数。 L 为相应子频带图像在小波分解塔形结构中所处的级数; σ_i 为相应子频带的标准方差,用来衡量噪声水平; K 为补偿因子,对于给定的图像是一个常数。根据图像的纹理特征调整不同小波子带的参数 F_i 可以达到自适应滤波的目的^[11]。

为了进一步改善图像的主观质量,在对分割后的梯度图像阈值滤波前,先对图像小波变换的高频系数和低频系数进行适当的放大,其放大系数分别为 $k_1 = 2^{(j-1)/2}$ 和 $k_2 = 2^{j/2}$ 其中 j 为分解尺度^[12]。小波阈值滤波后再对图像的高频系数和低频系数进行适当的缩小,其缩小系数分别为 $k_1 = 2^{-(j-1)/2}$ 和 $k_2 = 2^{-j/2}$ 。

4 区域融合算法

经过改进的小波阈值滤波后的分割图像还需要进行区域融合才能得到理想的图像处理结果。区域融合是在整幅图像划分为若干个集水盆地区域的基础上进行的,在分水岭变换中,除了不同集水盆地的标记外,还存在分水岭点。因此,为了对图像进行区域划分,必须将这些分水岭点分配到相邻的集水盆地中,寻找与其灰度最为接近的像素,且此像素不是分水岭点,然后将分水岭的标记设置为此像素的标记。

假设图像由目标和背景两部分组成。分水岭变换生成的过分割区域要么是属于背景,要么是属于目标,可以通过反差校正等方法改变目标和背景的对比度,使它们存在较大的灰度差。针对前面提出的控制标记符算法中对像素已经排序标记的先验知识,采用每个标记区域的灰度中值作为描述该区域的属性^[13-15]。设经分水岭变换的集水盆区域数为 n ,集水盆区域的灰度中值记为 $GM_l (l=1, \dots, n)$,则由 n 个集水盆区域组成的图像有 L 级灰度 $G = \{g_0, g_1, \dots, g_{L-1}\}$, $g_0 = \min\{GM_1, GM_2, \dots, GM_n\}$, $g_{L-1} = \max\{GM_1, GM_2, \dots, GM_n\}$, $L \leq n$ 。设直方图为 h_k , $h_k = n_k/n$, $k=0, 1, \dots, L-1$ 。这里 n_k 为灰度 g_k 出现的频数。根据文献[13]中提出的基于最大熵原理的灰度直方图阈值选取算法,可以确定一个最优化阈值 T 。对集水盆地 l 而言,若 $GM_l \geq T$,则集水盆地被判定为目标区域,否则被判定为背景区域,对于多目标及背景组成的图像,可以根据该算法的延拓形式进行区域融合。

5 实验分析及算法性能评估

5.1 红外图像分析

对于一幅红外图像,采用所提出的红外图像处理流程(如图 1),按照本文给出的相应算法进行处理。用马路上的红外小汽车目标图像来进行实验^[13-15],如图 2 所示。其中(a)为原始图像;(b)为形态学开、闭运算平滑处理后图像,其中结构元素为圆盘型,半径为 3;(c)为经过阈值处理后的形态学 Top-hat 变换图像,同样是圆盘型结构元素,半径为 10;(d)为分水岭变换后过分割结果,可以看到部分由大量局部最小区域导致的过分割问题十分严重;(e)为红外图像的内部标记,原则上是标记出目标对象;(f)为红外图像的外部标记,原则上是标记出背景图像;(g)为经改进分水岭分割算法处理后的结果,改进分水岭算法是通过控制标记符来抑制过分割问题,标记符可以为分割问题带来先验知识,以此先验知识完成后期的工作。本文包括分割问题,目标检测识别,以及区域融合中中值的选择;(h)为图(g)经改进的小波阈值算法处理后的结果,经改进的小波阈值不仅考虑了图像的噪声及杂波干扰,而且很好地考虑了图像的纹理信息,并且从主客观两方面分析

了图像,本文中纹理参数 F_i 的补偿因子取 0.5;(i)为图(h)经小波阈值滤波后用区域融合算法处理的结果,其中标记区域的灰度中值 GM_l 的选择问题正好应用了控制标记符分割算法中的图像灰度的排序知识。

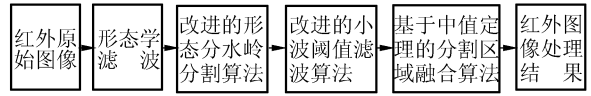


图 1 提出的红外图像处理流程图

Fig. 1 Infrared image processing flow chart



(a)原始图像

(a)Original image



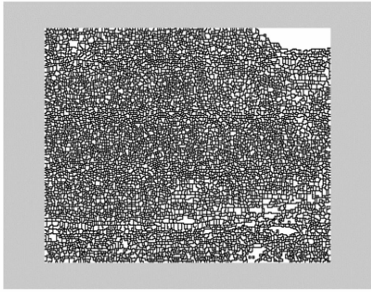
(b)形态学平滑处理

(b)Morphology smooth processing



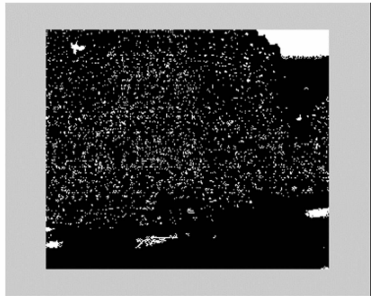
(c)经过阈值处理后的形态学 Top-hat 变换图像

(c) Morphology Top-hat transform image after threshold processing



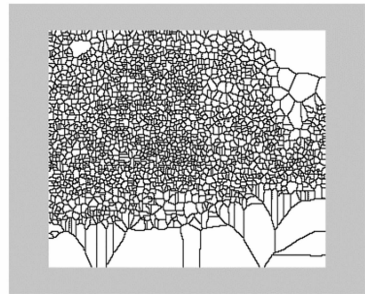
(d)分水岭变换后过分割结果

(d)Over-segmentation image after watershed transform



(e)红外图像的内部标记

(e)Inside sign of infrared image



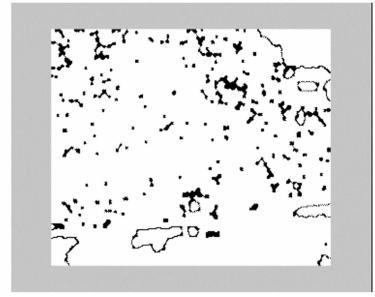
(f)红外图像的外部标记

(f)Outside sign of infrared image



(g)经改进分水岭分割算法后图像处理结果

(g)Image processing result after improved watershed algorithm



(h)图(g)经改进的小波阈值算法处理的结果

(h)Image (g) processing result after wavelet threshold algorithm



(i)图(h)经小波阈值滤波后的区域融合算法处理结果

(i)Image (h) processing result after region fusion algorithm

图 2 红外小汽车图像处理

Fig. 2 Infrared car image processing

5.2 算法性能评估

同样的一幅红外小汽车图像处理,采用框图 3 所示的流程进行处理,得到图 4 所示的红外图像区域分割目标识别的处理结果,具体内容参见文献[5,8]。

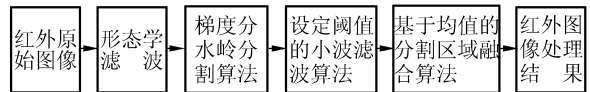


图 3 未改进的红外图像处理流程图

Fig. 3 Non-improved infrared image processing flow chart

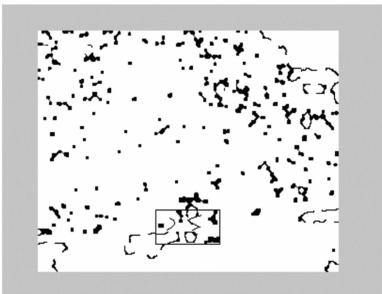
比较图 2(i)和图 4(c),发现未改进的方法对于红外图像中目标的识别和跟踪存在很大的误差^[14-15]。其主要原因是:如果使用图 3 中提出的基于梯度的分水岭算法,往往会由于噪声和梯度



(a) 原始图像
(a) Original image



(b) 形态学平滑处理
(b) Morphology smooth processing



(c) 按照图 3 流程进行目标识别的分割处理图像
(c) Target recognition segmentation image by Fig. 3

图 4 红外小汽车图像处理

Fig. 4 Infrared car image processing

图 1 中提出的改进的控制标记符的形态分水岭分割算法能够解决这一问题;如果使用图 3 中提出的设定阈值的小波滤波算法,往往存在阈值的大小选择的矛盾,而本文在图 1 中提出的自适应阈值选取的小波滤波算法,可以根据图像区域的对比度值来选择阈值,解决了原始方法中阈值选择的矛盾;采用图 3 中的基于均值的分割区域融合算法经常导致图像的模糊和不可分辨,采用本文提出的区域中值的融合算法可以提高图像的对比度,使目标突出于背景。通过比较说明本文提出的算法较以往的单一的或者没有改进的融合算法有很好的优越性。

6 结 论

本文提出了一种采用数学形态学和小波变换相结合的红外图像处理新方法。在对图像进行形态学平滑后,根据本文提出的控制标记符分水岭算法对经过 Top-hat 变换后的梯度图像进行分割处理,同时采用改进的小波阈值滤波算法对分割图像进行阈值处理,最后利用区域灰度中值对分割区域进行融合处理。实验结果及各种算法比较结果表明,本文提出的新方法能够很好地解决红外目标识别中的主要问题,有很好的实用性。但是由于结构元素的形状和尺寸、小波阈值的选取、区域融合中的中值灰度提取等因素,在不同程度上对算法的准确性都有一定的影响,以后的研究学习中会权衡解决这一问题。

同时本文提出的算法较未改进的算法复杂,整个算法一个流程需要运行大约 18 s,而未改进的算法运行时间约为 12 s,比较而言,本文算法实时性有所欠缺,但是随着计算机硬件水平的提高和算法程序的优化设计,这一复杂度问题可以得到很好的解决。

的其它局部不规则性导致过分割问题,而本文在

参考文献:

- [1] 苏新主,姬红兵,高新波.一种基于数学形态学的红外弱小目标检测方法[J].红外与激光工程,2004,6(3):307-310.
SU X ZH, JI H B, GAO X B. Detection method for dim small IR targets based on mathematical morphology[J]. *Infrared & Laser Eng.*, 2004,6(3):307-310. (in Chinese)
- [2] 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,2003,2(1):28-31.
WANG Y, ZHENG Q B, ZHANG J P. Real-time detection of small target in IR grey image based on mathematical morphology[J]. *Infrared & Laser Eng.*, 2003,2(1):28-31. (in Chinese)
- [3] 王树文,阎成新,张天序.数学形态学在图像处理中的应用[J].计算机工程与应用,2004,32:89-92.
WANG S W, YAN C X, ZHANG T X. Application of mathematical morphology in image processing[J]. *Comput.*

- Eng. Appl.*, 2004, 32:89-92. (in Chinese)
- [4] 温佩芝, 史泽林, 于海斌. 基于小波和形态学的自然地面背景红外目标检测方法[J]. 信息与控制, 2004, 2(1):107-111.
WEN P ZH, SHI Z L, YU H B. A method for detecting IR target in natural background based on wavelet transform and morphology[J]. *Inform. Cont.*, 2004, 2(1):107-111. (in Chinese)
- [5] 冈萨雷斯 著. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
GONZALEZ R C. *Digital image processing*[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [6] 曹兰英, 张昆辉, 夏良正. 基于多尺度小波变换的高斯混合模型 SAR 图像去噪[J]. 数据采集与处理, 2005, 3(1):44-47.
CAO L Y, ZHANG K H, XIA L ZH. SAR speckle reduction based on multi-scale wavelets and Gauss mixture model[J]. *J. Data Acquis. & Proc.*, 2005, 3(1):44-47. (in Chinese)
- [7] XIE H, PIERCE L E, U LABY F T. SAR speckle reduction using wavelet denoising and Markov random field modeling[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2002, 40(10):2196-2212.
- [8] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7.0 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
The Research Center of Fei Si Science and Technology. Wavelet analysis theory and MATLAB7.0 achievement [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [9] 林晓梅, 李琳娜, 牛刚, 等. 基于小波边缘检测的图像去噪方法[J]. 光学 精密工程, 2004, 1(1):90-92.
LIN X M, LI L N, NIU G, *et al.*. Image de-noising based on wavelet edge detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 1(1):90-92. (in Chinese)
- [10] 孙伟, 夏良正. 一种基于形态学的红外目标分割方法[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 6(3):233-236.
SUN W, XIA L ZH. Infrared target segmentation algorithm based on morphological method[J]. *J. Infrared Milim. Wave*, 2004, 6(3):233-236. (in Chinese)
- [11] 桑会勇, 郭华东, 韩春明. 一种基于梯度信息的小波 SAR 图像滤波方法[J]. 测绘通报, 2005, 2:17-21.
SANG H Y, GUO H D, HAN CH M. A filtering algorithm for SAR images based on wavelet transform[J]. *Topogr. Aviso*, 2005, 2:17-21. (in Chinese)
- [12] 陈洪波, 王强, 张孝飞, 等. 基于小波系数邻域特征的图像融合[J]. 光学 精密工程, 2003, 10(5):516-518.
CHEN H B, WANG Q, ZHANG X F, *et al.*. Image fusion based on neighborhood features of wavelet coefficients [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 10(5):516-518. (in Chinese)
- [13] 金立左, 夏良正. 模糊划分熵的新定义及其在图像分割中的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2000, 6(3):220-221.
JIN L Z, XIA L ZH. A new definition of fuzzy partition entropy and its application to image segmentation[J]. *J. Infrared Milim. Wave*, 2000, 6(3):220-221. (in Chinese)
- [14] OLIVER C, QUEGAN S. *Understanding synthetic aperture radar images*[M]. Boston. MA: A Tech House, 1998.
- [15] CHIPMAN H, KOLACZYK W, MCCULLOCH R. Adaptive Bayesian wavelet shrinkage[J]. *J Amer Statist Assoc*, 1997, 92:1413-1421.

作者简介: 同武勤(1980—), 男, 陕西韩城人. 博士研究生, 研究方向为毫米波电子对抗, 红外/雷达目标跟踪、识别及图像处理; E-mail: tongwuqin@sogou.com

凌永顺(1937—), 男, 安徽定远人, 教授, 中国工程院院士, 研究方向为电子工程。