

# 一种基于多尺度距离像的红外小目标检测方法

盛文<sup>1</sup>, 邓斌<sup>1</sup>, 柳健<sup>2</sup>

(1. 空军雷达学院雷达系统工程系, 湖北武汉 430019;

2. 华中科技大学图像所, 图像信息处理与智能控制教育部开放实验室, 湖北武汉, 430074)

**摘要:** 本文提出了一种基于背景纹理分析和多尺度距离像分析的目标检测方法. 通过小波多尺度分解来提取不同分辨率下背景纹理的能量特征, 并计算这些特征向量与中心向量的距离, 从而得到相关的距离像, 目标检测在所得的距离像上完成. 在检测过程中利用红外小目标的特性, 根据分析距离像统计直方图来实现检测门限的自适应选取. 实验证明该方法取得了较好的效果.

**关键词:** 多尺度分析; 纹理分析; 目标检测

**中图分类号:** TN21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2002) 01-0042-04

## Multi-Resolution Distance Map Based Small Target Detection in Infrared Image

SHENG Wen<sup>1</sup>, DENG Bin<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>

(1. Dept. of Radar System Engineering, Air Force Radar Academy, Wuhan, 430019, China;

2. Key Laboratory for Image Analysis and Intelligent Control of the Education Department

Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, HUST, Wuhan, 430074, China)

**Abstract:** This paper presents a new small target detection approach, which is based on multi-resolution distance map and background texture analysis. Through multi-scale wavelet decomposition of background textures and local energy calculation, feature vectors of each point are obtained. According to these feature vectors, a distance map corresponding to these features can be derived, and target detection is performed on this distance map. The histogram of distance map is employed for the automatic selection of threshold value. Experiments show that this approach can achieve quite satisfactory results.

**Key words:** multi-resolution analysis; texture analysis; target detection

### 1 引言

红外图像目标检测是精确制导武器的关键技术之一. 对于红外小目标而言, 由于目标的具体形状已变得模糊不清甚至消失, 且对比度较低, 边缘模糊, 如果采用传统的方法, 从对目标本身特性, 如灰度统计特性、空/频特性和几何及运动特性等的分析出发来进行目标检测, 则很难取得较好的效果. 然而, 对于红外小目标图像而言, 成像目标较小意味着传感器距离较远, 因而背景细节也在一定程度上弱化, 使背景呈现出一定的纹理特征. 如果对目标背景进行纹理分析, 利用背景与目标的差异来实现目标检测则有可能取得较好效果. 本文中, 小目标像素点数一般不超过 10 个, 目标面积在图像中所占比例非常小, 它们对背景影响非常微弱, 因此对整个图像进行纹理分析反映的是图像背景特征, 这个特征与目标所在局部区域的特征有较大差别, 利用这种差别即可实现红外图像中小目标的检测.

小波多尺度分析是近年来兴起的一种新的信号分析方

法, 它在空间域和频率域同时具有良好的局部化性质. 通过小波变换, 可将信号分解到不同频段, 从而可在不同尺度下对信号进行分析和处理.

本文从目标背景纹理分析这一思想出发, 首先利用能量法提取经小波分解后各尺度下各通道图像的局部纹理特征, 然后计算各点特征向量与中心向量间的距离, 从而得到一个相关的多尺度距离像. 根据距离像进行直方图统计, 并利用已知的红外目标特性来自适应选取检测门限, 实现目标自动检测. 实验表明本方法取得了较好的效果.

### 2 小波多尺度纹理分析

对于  $L^2(-\infty, +\infty)$  中的一列子空间  $\{V_m\}$ ,  $m \in \mathbb{Z}$  及一个函数  $f(x)$ , 如果它们满足:

$$(1) V_m \subseteq V_{m+1}, \forall m \in \mathbb{Z}$$

$$(2) f(x) \in V_m \Leftrightarrow f(2x) \in V_{m+1}$$

$$(3) \bigcap_m V_m = \{0\}$$

(4)  $V_m$  在  $L^2(-\infty, +\infty)$  中稠密, 即  $V_m = L^2(-\infty, +\infty)$

(5) 存在一个函数  $\phi(x)$  使  $\{\phi(x-n)\}_n$  是  $V_0$  的 Riesz 基.

即称它们为  $L^2(-\infty, +\infty)$  上的一个多尺度分析<sup>[1]</sup>,  $\phi(x)$  为此多尺度分析的尺度函数. 若  $\{\phi(x-n)\}_n$  是空间  $V_0$  的一组标准正交基, 则  $\{\phi(2^j x - n)\}_n$  是空间  $V_j$  的一组标准正交基. 如果我们选定一个多尺度分析的生成元  $\phi$ , 则信号  $f(x)$  在这些空间上的投影就可以看作它在尺度  $j$  上的信号描述, 当尺度  $j$  越大时, 信号描述的细节越丰富, 越逼近原信号.

从信号处理的角度来看, 小波函数是一种带通滤波器, Mallat 引入的多尺度分析理论可以看作是一个将信号分解到不同频段的连续逼近过程, 而信号由于被具有不同频段的带通滤波器滤波, 使其在不同频段的特性能够充分表现出来.

根据这一原理, Mallat 提出了小波分析中著名的 Mallat 塔式算法<sup>[2]</sup>, 对于一维信号, 这一算法可用下图表示:

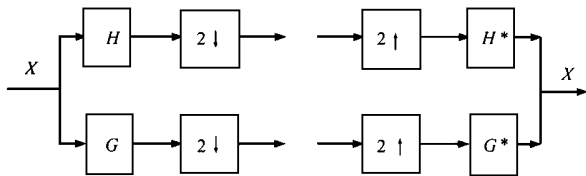


图 1 Mallat 算法分解合成图

对于一幅纹理图像, 由于纹理的组织结构不同, 因此在不同尺度和不同频率通道中有不同的表现. 利用小波多尺度分析理论, 可在不同尺度上将不同纹理具有的特征区分开.

设  $W_k$  为图像经小波分解后某个频率通道中点  $k$  的值, 定义

$$E_k = \left\{ \sum_{i=1}^{n \times n} |W_i|^2 \right\} / n^2 \quad (1)$$

为该点处的局部能量. 式中  $n$  为以点  $k$  为中心的窗口大小.

对于小波分解的各个通道求各点局部能量, 对其中某一点  $k$  有特征向量:

$$F_k = \{ E_k^i \}, i = 1, 2, \dots, 4l \quad (2)$$

式中  $i$  为图像进行小波分解后的频率通道号,  $l$  为分解的尺度数.

对于一幅  $N \times N$  的图像, 按照 Mallat 算法, 每分解一次所得图像大小减半, 作  $l$  次小波分解后, 其各个频率通道的图像大小均变为  $(N/2^l) \times (N/2^l)$ , 由于各个通道图像大小不同, 因此无法用 (1) 式计算原始图像中各点的多分辨率能量特征, 为解决这一问题, 在应用 Mallat 算法时不进行“隔 2 去 1”抽样, 即分解后的各个通道图像是“过抽样”(over-sampling) 的, 这就保证了各个通道图像大小的一致性.

根据式 (1), 我们可得到图像各个点的特征向量, 即一个特征图像:

$$F = \{ F(x, y) \}_{(x, y) \in (N, N)} \quad (3)$$

式中  $N$  为图像的大小.

特征图像反映了图像的整体特性, 它与目标所在的局部区域特征应存在差异, 这种差异就是实现目标检测的基础.

图 2 给出了利用式 (1) 求出的特征图像幅值图, 其中 (a), (b), (c) 为原红外目标图像, (d), (e), (f) 为相应的幅值特征图像. 从这些特征幅值图中可以看到, 目标所在区域与周围有较大不同, 利用这种特征可以较好地进行目标检测.

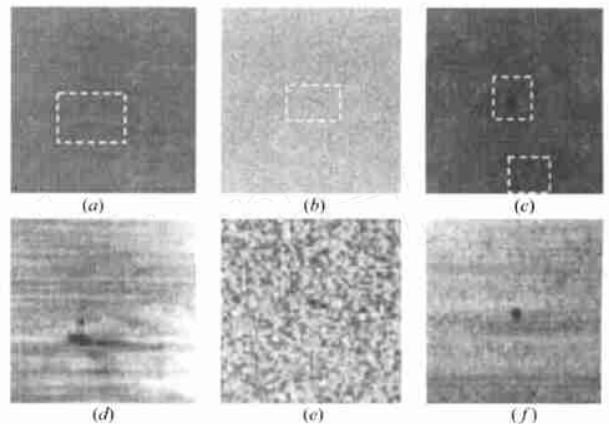


图 2 特征图像幅值图. (a), (b), (c) 为原图, (d), (e), (f) 为对应的幅值特征图像.

### 3 目标检测算法

利用前面给出的特征向量可以方便地对图像像素点分类. 显然, 由于目标与背景存在差异, 其特征向量是与背景不同的, 对于背景而言, 其像点间彼此的特征向量差异不大, 而目标和背景像点间特征向量则应存在较大差异. 根据这个差异, 即可将目标检测出来.

令  $F = \{ f_k, k = 1, 2, \dots, 4l \}$  为特征向量, 定义两个特征向量  $F^i, F^j$  的距离为:

$$d(F^i, F^j) = \sqrt{\sum_{k=1}^{4l} (f_k^i - f_k^j)^2} \quad (4)$$

定义  $F_c = \{ f_j^c, j = 1, \dots, 4l \}$  为中心向量, 其中

$$f_j^c = \frac{1}{N \times N} \sum_k f_j^k, \quad j = 1, \dots, 4l \quad (5)$$

则目标检测可采用下面的算法来完成. 首先对图像按  $l$  个尺度分解, 假定图像大小为  $N \times N$ , 按式 (1) 计算各尺度下每点的局部能量, 求出相应的特征向量  $F^k(k = \{(i, j), 1 \leq i, j \leq N\})$ . 由于目标像元只占整个图像的很小一部分, 其特征向量对求得的中心向量影响较小, 因此背景像元的特征向量与中心向量比较接近, 而目标像元的特征向量与中心向量的差异很大. 根据式 (4) 计算所有点特征向量与中心向量的距离, 从而形成一个距离像  $D$ , 它与实际图像上的点一一对应, 目标检测过程实际上在距离像上完成, 在距离像上检测出的位置就是目标在原图像上的位置.

根据红外目标已有的知识, 可假定目标具有的灰度值较小, 并且具有这种灰度值的像素很少. 这是因为红外目标温度一般明显高于周围环境温度, 因而在灰度图像上表现为较背景为深的颜色, 并且由于目标面积小, 因而像素点也很少. 基于红外图像的这两个特点, 通过距离像统计直方图来实现门限的自适应选取, 从而在距离像上将目标检测出来. 这一方法具体可分为以下几个步骤:

(1) 对图像进行多尺度小波分解, 并采用拉普拉斯-高斯滤波器 ( $\nabla^2 G$ ) 对低频图像进行平滑;

(2) 按式(1)计算各分辨率下图像相应点的能量, 从而得到各点的特征向量;

(3) 根据式(5)计算图像的中心向量, 然后由(4)式计算各点对应的特征向量与中心向量间的距离, 将距离值取整, 得到图像的距离像  $D$ ;

(4) 对距离像  $D$  进行直方图统计, 目标点应分布在频数小但距离较大的区域. 假定目标像点数不超过  $Q$  个, 令

$$d_{\max} = \max(D) \quad (6)$$

$$d_{\min} = \min(D) \quad (7)$$

从  $(d_{\max} - d_{\min})/2$  处开始正向搜索, 寻找直方图中第一个频数小于  $Q$  的位置, 记该位置为  $T$ ;

(5) 以  $T$  为门限对距离像  $D$  作二值化处理, 即:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & D(x, y) < T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

高于门限的即为目标像素点,  $f(x, y)$  即为最终的检测结果.

值得注意的是, 由于本文方法的特点, 它不仅可应用于单目标检测, 还可以用于多目标检测中, 在两种情况下均能较好地检测出目标位置.

## 4 实验与总结

本文采用上述方法对多幅红外图像作了实验, 其中三幅如前面图 2(a)、(b)、(c) 所示. 三幅图像的大小均为  $128 \times 128$ , 目标用白色虚线框标注, 并且图(b)人为添加了均匀噪声, 图(c)中有两个目标. 采用 Daubechies 小波基<sup>[3]</sup>对图像作两次小波分解, 利用式(1)计算出图像各点对应的特征向量, 根据这些特征向量求得距离像三维图相应见图 3(a)、(c)、(e), 由图中可看出, 目标点的距离明显存在峰值. 图 3(b)、(d)、(f) 是图 3(a)、(c)、(e) 距离像相应的直方图, 其横坐标为距离值, 纵坐标为像点在对应距离分布频数的对数, 直方图中峰值偏向距离较小的区间, 而在距离较大区间出现震荡, 这和图像本身特点及本文的假设相符. 它表明绝大多数背景像元的特征向量与中心向量距离较小, 而目标点分布在距离较大但频数较小、远离峰值点的区域. 根据距离像直方图, 按上述步骤自动选取门限, 提取的目标位置相应见图 3(g)、(h)、(i), 其中图 3(i) 包含两个目标.

由实验可以看出, 采用本文提出的基于背景纹理多尺度分析的目标检测方法, 对红外弱小目标的检测具有较好的稳健性, 在有噪声干扰的情况下, 仍能准确检测出多个不同目标的位置, 且检测门限的选取无需人工干预, 实现简单、检测速度快, 有利于硬件实现, 因而是一种有效的目标检测方法.

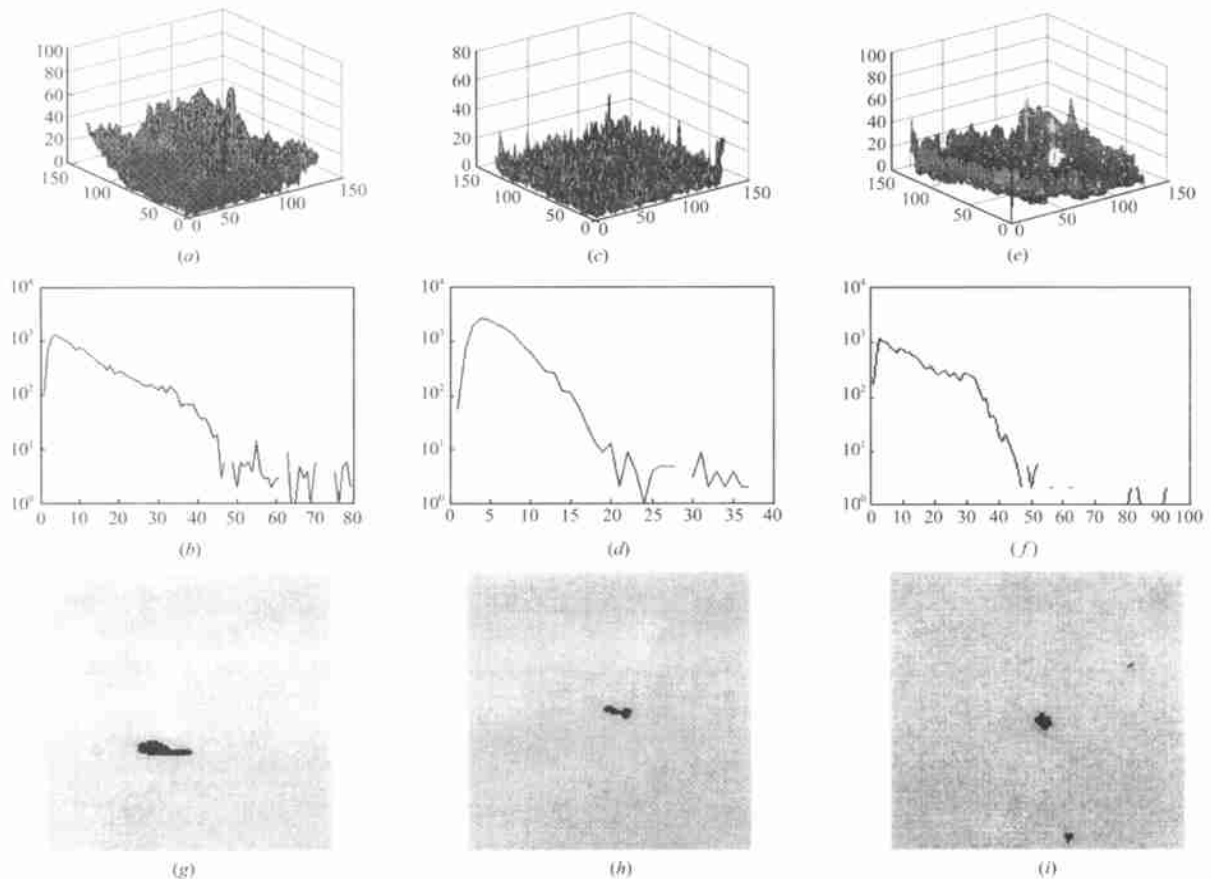


图3 多尺度背景纹理分析目标检测实验结果. (a)、(c)、(e)为对应于图2原图的距离像三维图, (b)、(d)、(f)为对应于距离像的直方图, (g)、(h)、(i)为最终检测结果.

## 《电子学报》投稿须知

一、《电子学报》系中国电子学会主办的高级综合性学术月刊,每月 25 日出版.刊登电子与信息及相关领域代表我国研究水平的最新科研成果和技术进展.本刊设有学术论文、综述评论和科研通信等栏目.

### 二、稿件要求

1. 文稿内容应突出作者本人的创新部分.前人的工作,尤其是国内同行的工作,应在正文及参考文献中准确反映.文中主要的创新思想最好附函简要说明,以便于评审.

2. 作者应保证拥有合法的著作权.合作的论文,署名须征得合作者的同意.若因著作权而引起争议,本刊不承担责任.

3. 来稿书写格式可参考已出版的《电子学报》.文中的量和单位请使用 SI 单位;参考文献应是已公开出版的,以便审者、编者和读者查证.

4. 为了加快审稿速度,来稿请寄三份副本,原件请作者自留.由于文稿评审程序原因,本刊目前不接受 e-mail 投稿.

### 三、注意事项

1. 为了适应我国信息化建设需要,扩大作者学术交流渠道,本刊已加入“Chinainfo 电子期刊”、《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”.作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付.若作者不同意将文章编入上述数据库,请在来稿时声明.

2. 在学术会议上宣读交流过的文稿,不属于一稿多投,但请予以说明.

3. 来稿请注明作者姓名、职务、工作单位、通信地址与联系电话.本刊对每篇来稿收取 80 元评审费.

4. 编辑部退返作者修改稿件的时间一般为 4 个月,逾期将按自动撤稿处理.特殊情况不能按时返回的稿件请事先与编辑部取得联系.

5. 编辑部收到来稿后 6 个月内就刊用意见答复作者,未采用的稿件也在 6 个月内通知作者,逾期作者可自行处理.

6. 来稿录用发排后将向作者收取版面费.出刊后将作者每人一份赠刊及稿酬均寄往第一作者处.

敬请遵守以上事项,若有不同意见或建议,欢迎随时提出.

编辑部地址:北京海淀区玉渊潭南路普惠南里 13 号楼,中国电子学会

通信地址:北京 165 信箱,《电子学报》编辑部,邮政编码:100036

电 话:(010)68179116;68285082, Fax:(010)68173796

Homepage:<http://www.elecjournal.org> e-mail:[cje@elecjournal.org](mailto:cje@elecjournal.org)

### 参考文献:

- [1] 李世雄.小波变换及其应用[M].高等教育出版社,1997:261.
- [2] S Mallat. Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models [J]. IEEE Trans., 1989, ASSP-37:2091 - 2110.
- [3] I Daubchies. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis [J]. IEEE Trans., 1990, IT-36(5):961 - 1004.

### 作者简介:



盛文男,1966年10月生于湖北武汉,1991年于华中理工大学无线电系获通信与电子系统专业硕士学位,1999年于同校获模式识别与智能系统专业博士学位,现为空军雷达学院雷达系统工程系教授.目前研究的主要内容包括图像处理与目标检测技术、人工智能在自动测试系统中的应用、虚拟仪器等.