

海空复杂背景下红外弱点目标的检测算法*

叶增军

(华中理工大学光电工程系, 湖北, 武汉, 430074)

王江安

(海军工程学院兵器系, 湖北, 武汉, 430033)

阮玉

(华中理工大学光电工程系, 湖北, 武汉, 430074)

邹勇华

(华中光电技术研究所, 湖北, 武汉, 430074)

TN/215

摘要 为解决海空复杂背景下红外弱点目标的检测,提出了基于小波变换模极大的检测算法。该算法通过计算小波变换模极大值求出图像中的所有奇异点,去除由复杂背景形成的模极大值链,消除云层、海浪及水天线等复杂背景,提高了单帧点目标检测能力。结果表明,该算法可检测信杂比为 2 的点目标。

关键词 红外图像处理, 点目标检测, 小波变换。

海空复杂背景

DETECTION ALGORITHM OF WEAK INFRARED POINT TARGETS UNDER COMPLICATED BACKGROUND OF SEA AND SKY*

YE Zeng-Jun

(Department of Electro-optic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

WANG Jiang-An

(Naval Academy of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

RUAN Yu

(Department of Electro-optic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

ZOU Yong-Hua

(Huazhong Research Institute of Electro-optics, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The new algorithm based on wavelet transform modulus maxima was presented to resolve the problem of weak infrared point targets detection under the complicated background of sea and sky. All the singularity points were got through the wavelet transform modulus maxima. The algorithm eliminates the complicated background of clouds, offing and sea antenna, enhances the ability of point target detection in single frame. Experimental results show that the algorithm can detect the point targets with SCR of 2.

Key words infrared image processing, point target detection, wavelet transform.

引言

舰用红外警戒系统所探测的目标为低空飞机和掠海导弹,远距离时,这些目标在焦面上仅占一个像元,呈现为点状,无形状与结构特征,且强度较弱,并处于

水天线附近由云和浪组成的复杂海空背景下,因此被称为复杂环境下的弱点目标。

目前的红外弱点目标识别算法,在检测阶段,基本采用阈值分割的方法,然后利用高帧率连续图像对弱点目标进行识别。当目标处于海空复杂背景下,会由于

* 国防科技重点预研基金(编号 43.7.2.2.②)资助项目
稿件收到日期 1999-05-04,修改稿收到日期 1999-09-06

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of Science and Technology of National Defence (No. 43.7.2.2.②)
Received 1999-05-04, revised 1999-09-06

各帧中检测的点目标过多(阈值低),造成连续帧目标提取算法数据饱和;或由于阈值过高造成点目标漏检。例如,在太阳光照射下,云层边界呈现的红外辐射强度高于弱点目标的强度,这时就易产生漏检。而在低帧率工作方式的舰用红外警戒系统中,必须提高其单帧弱点目标的检测能力。

由于弱点目标本身没有几何形状或纹理特征,因此,研究单帧红外弱点目标的检测算法,必须从新的角度进行研究。我们认为,图像中弱点目标的检测,从数学角度看,是有关奇异函数的分析,而从图像分析的观点看是判断图像中的孤立奇异点。小波分析具有良好的时频局域性,小波变换的模极大值可以检测图像中的所有奇异点^[1],而红外弱点目标呈现的奇异性与图像边缘构成的奇异性的差别,在于后者构成的奇异性具有空间相干性。上述新观点用于弱点目标检测,其实质是分离背景与目标的不同奇异性特征。由此本文提出了基于小波变换模极大的检测算法,该算法通过去除由复杂背景形成的模极大值链,消除云层、海面及水天线等复杂背景,提高了单帧点目标的检测能力。

1 理论分析

1.1 信号奇异性与小波变换模极大

信号的局部规律性是以奇异指数来度量的。

定义1: 设 $f(x) \in L^2(R)$, $\forall x \in \delta x_0$ 由 $|f(x) - f(x_0)| = K|x - x_0|^\alpha$, 式中 K 为常数, $f(x)$ 在 x_0 处的奇异指数为 α 。

函数越光滑, 奇异指数越大。而冲激函数具有负的奇异指数。下面的定理1证明了小波变换可以确定信号奇异点的位置和奇异性指数。函数 $f(x)$ 的小波变换记为 $Wf(s, x)$, s 为尺度。

定理1^[1]: 设 n 为正整数, $\alpha \leq n$, $f(x) \in L^2(R)$, 若 $f(x)$ 在 x_0 的奇异指数为 α , 则存在一个常数 A , 对所有 x_0 的邻近点 x , 有

$$|Wf(s, x)| \leq A(s^\alpha + |x - x_0|^\alpha), \quad (1)$$

定理1表明小波变换特别适用于估计信号的局部奇异性, 但在数值计算中, 很难直接应用它来检测信号的奇异点和刻画奇异点的奇异指数, 因为定理1要求计算尺度空间 (s, x) 中, x_0 所有二维邻近点 $Wf(s, x)$ 的值, 计算量太大。下面的定理2给出了小波变换模极大与奇异点的联系, 从而给出了用于检测信号奇异点与其奇异性数值计算方法。

定义2: 在尺度 s 下, $\forall x \in \delta x_0$, 若 $|Wf(s, x)| \leq |Wf(s, x_0)|$, 则 x_0 称为模极大值点。

定义3: 小波函数 $\Psi(x)$ 有 n 阶消失矩, 仅当对所有正整数 $k < n$, 它满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^k \Psi(x) dx = 0. \quad (2)$$

定理2^[1]: 设 n 为正整数, $\Psi(x)$ 是具有 n 阶消失矩, 且 n 次连续可微分的紧支撑小波, $f(x) \in L^1[a, b]$, 则:

(1) 若存在尺度 $s_0 > 0$, $\forall s < s_0$ 及 $x \in (a, b)$, $|Wf(s, x)|$ 无模极大值, 则 $\forall \epsilon > 0$ 和 $a < n$, $f(x)$ 在 $(a + \epsilon, b - \epsilon)$ 具有均匀一致的奇异指数 α 。

(2) 若 $\Psi(x)$ 是某一光滑函数的 n 阶导数, 则 $f(x)$ 在 $(a + \epsilon, b - \epsilon)$ 上均匀一致的奇异指数为 n 。

定理2表明, 信号的小波变换在某点的邻域内精细尺度上无模极大时, 则该点为非奇异点, 信号的奇异性分析与所选的小波函数的消失矩有关。具有较高阶消失矩的小波函数可以检测较高精细的奇异性。

1.2 图像小波变换与奇异性

二维图像中奇异性的分析具有与上述一维相似的结论。图像中不同结构的边缘是特征识别的重要依据, 在图像边缘处, 其梯度具有局域模极大值。由于这些边缘是不连续点或峰值点, 具有小于1的奇异性指数, 因而可以采用具有一阶消失矩的小波函数进行分析。

设 $\theta(x, y)$ 是一平滑函数, 定义两个小波函数:

$$\Psi^1(s, x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x}, \Psi^2(s, x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} W^1(s, x, y) \\ W^2(s, x, y) \end{bmatrix} &= s \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f * \theta)(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f * \theta)(x, y) \end{bmatrix} \\ &= s \nabla (f * \theta)(x, y), \end{aligned} \quad (4)$$

因此, 图像两个部分的小波变换正比于 $f(x, y)$ 经 $\theta(x, y)$ 平滑后的梯度矢量, 定义梯度矢量的模值为

$$Mf(s, x, y) = \sqrt{|W^1 f(s, x, y)|^2 + |W^2 f(s, x, y)|^2}, \quad (5)$$

幅角为

$$Af(s, x, y) = \arg \tan \left\{ \frac{W^1(s, x, y)}{W^2(s, x, y)} \right\}, \quad (6)$$

若 $f(s, x, y)$ 的小波变换的极大值点为 (x'_0, y'_0) , 则在该点上, 模 $Mf(s, x'_0, y'_0)$ 沿 $Af(s, x, y)$ 给定的梯度方向上为局部最大。

2 基于小波变换模极大值的红外弱点目标识别算法

上述分析表明,通过小波变换的模极大值可以检测图像中的所有奇异点.图像中有结构特征或纹理特征的云层、水天线、海浪等边缘形成曲线,它们在一个方向上是奇异的,而在其垂直方向上是平滑的.沿这些边缘构成的小波变换模极大值链,模极值平滑地变化,而弱点目标构成的孤立奇异点,其模极值和相位与其有较大的差别,因而可以将红外弱点目标从复杂背景中分离出来.检测算法流程如图1所示.

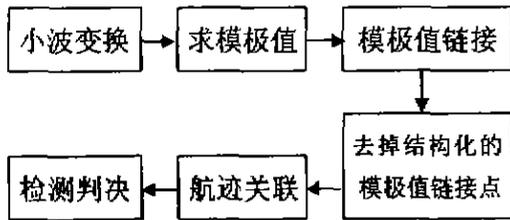


图1 红外弱点目标识别算法流程
Fig. 1 Recognition algorithm flow of weak infrared point targets

2.1 小波变换

采用具有紧支集的二次样条函数作为小波函数, $\hat{\Psi}(\omega) = i\omega \left[\frac{\sin(\omega/2)}{\omega/2} \right]^4$, 它是三次样条函数 $\hat{\theta}(\omega) = \left[\frac{\sin(\omega/4)}{\omega/4} \right]$ 的导数, 尺度函数为 $\hat{\varphi}(\omega) = \left[\frac{\sin(\omega/2)}{\omega/2} \right]^4$. 对应的高通滤波器 G 和低滤波器 H 如表1所示.

表1 滤波器系数
Table 1 Coefficient of filter

| n | H | G |
|----|-------|----|
| -1 | 0.125 | |
| 0 | 0.375 | -2 |
| 1 | 0.375 | 2 |
| 2 | 0.125 | |

由于图像只有 $M \times N$ 个值,进行离散二进小波变换时必须考虑边界问题,可以采用对称周期化的技术防止

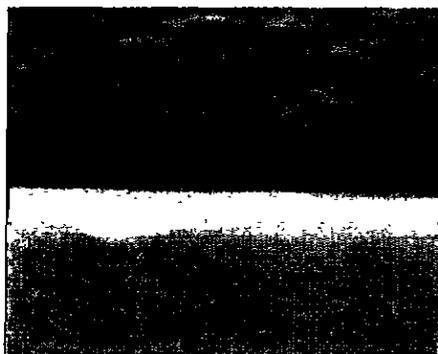


图2 红外图像
Fig. 2 Infrared image

边界的不连续:

$$f(m, n) = \begin{cases} f(m, n), 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N; \\ f(2M+1-m, n), M-1 \leq m \leq 2M, 1 \leq n \leq N; \\ f(n, 2N-1-n), 1 \leq m \leq M, N+1 \leq n \leq 2N; \\ f(2M+1-m, 2N+1-n), M+1 \leq m \leq 2M, N+1 \leq n \leq 2N, \end{cases} \quad (7)$$

2.2 模极值链搜索与类点目标提取

求出模值 $Mf(s, x, y)$ 及位相 $Af(s, x, y)$, 沿位相方向求模极值点,并在位相的切线方向将相邻的模极值点形成模极值链,在模极值链上的模极值点具有相近的位相和模值.图像背景中的云层、水天线、海浪等不同结构的边缘构成的模极值链,显示其不同的结构特征.而点目标属于孤立奇异点,它的小波变换模极值将不在这些模极值链上.因此,去掉模极值链后,就得到由复杂背景中奇异杂波和点目标构成的类点目标候选点.

2.3 航迹关联与目标检测

舰用红外警戒系统主要针对来自迎头攻击的目标,远距离时,当目标速度小于1Mach,由于传感器采用具有二次稳定的高精度稳定平台,相邻两帧的点目标在像面上的误差在1个像素之内.采用最近邻关联的方法,对候选目标点建航,即前一帧的类点目标只有在后一帧的相邻像素上出现,才被认为是可能的候选目标,否则作为噪声剔除.同时,由于迎头攻击目标的辐射强度是逐帧增大的,因而,辐射强度逐帧不变或减弱的点作为背景杂波也被剔除.根据多帧滤波进行判别,筛选出目标.

3 实验结果

图2为水天线附近的红外图像,背景中有云层及海浪,在其右上角处有一点目标(模型飞机),由远而近迎头飞来.图3是红外图像的小波变换模极值点,代表



图3 小波变换模极值
Fig. 3 Wavelet transform modulus maximum

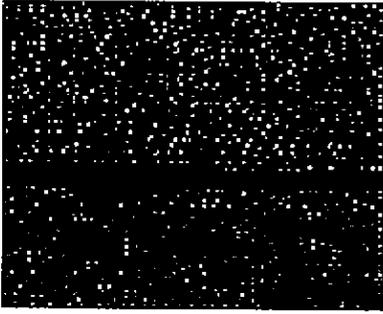


图4 孤立奇异点
Fig. 4 Isolated singularity points

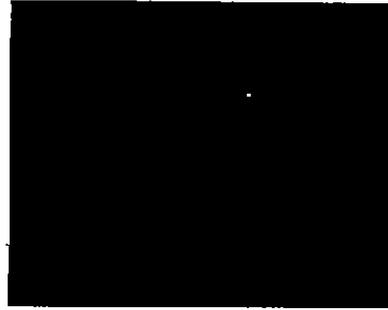


图5 4帧后的识别结果
Fig. 5 Recognition results after 4 frames

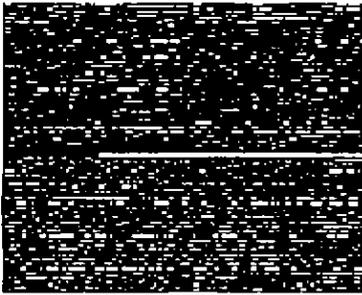


图6 阈值法(3×3窗口)
Fig. 6 Threshold method (window by 3×3)

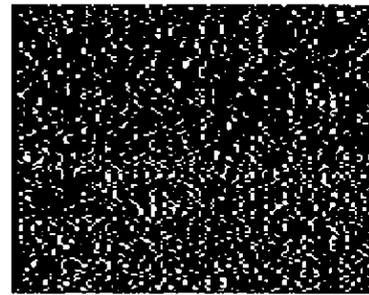


图7 阈值法(1×5窗口)
Fig. 7 Threshold method (window by 1×5)

图像中的所有奇异点,水天线、云层及海浪构成的奇异点具有明显的空间相干性,是区别于点目标的特征。图4为去除背景模极大值链后的含有弱点目标的孤立奇异点,图5为连续4帧对目标进行最近邻空间数据关联,与灰度数据关联后的判断结果。

在强杂波环境下的目标识别中,信号与杂波比(SCR)是更能体现算法优劣的指标,其定义为:

$$SCR = 10 \log \frac{\gamma^2}{\sigma^2}, \quad (8)$$

式(8)中, γ^2 为目标的辐射强度, σ^2 为背景的均方值。根据式(8)计算的结果表明,上述算法可检测信杂比为2的点目标。

图6与图7是采用阈值法(阈值=均值+ λ 方差, λ 为经验参数)的结果,为提取信噪比为2的点目标, λ 值取2。采用3×3窗口的阈值法处理结果中,水天线等杂波作为可能目标点被保留下来,而采用1×5窗口的阈值法也保留了比图4更多的杂波点。因此,本文提出的新方法具有较强的单帧弱点目标检测能力。

4 结语

本文提出了基于小波变换模极大的红外弱点目标检测算法,并对连续帧采用最近邻数据关联与灰度数据关联的方法,识别点目标。用不同的复杂红外背景图像对算法进行了检验。实验结果表明该算法能有效地检测出海空复杂背景下信杂比为2的点目标,与阈值法相比较,具有较强的单帧弱点目标检测能力。该算法提供了一种具有自适应背景特征与点目标特征分离的目标识别方法。

REFERENCES

- [1] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets, *IEEE Trans. on Information Theory*, 1992, 38(2): 617-643
- [2] Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multi-scale edges, *IEEE Trans. on PAMI July*, 1992, 14(7): 710-732
- [3] Ye Z J, Wang J A, Ruan Y, et al. Wavelet treatment used in recognition of objects in IRST systems, *SPIE*, 1998, 3561: 202-206