

基于小波域扩散滤波的弱小目标检测

刘伟宁

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:分析了基于小波变换进行弱小目标检测的基本思想,利用小波变换的多尺度多分辨率特性,结合小波变换系数的方向特性和扩散滤波扩散方向的可选择性,提出了基于小波域扩散滤波的弱小目标检测算法。采用该算法对不同尺度、不同方向的小波系数分别进行扩散滤波,取得了较好的效果。仿真试验结果表明:该算法能在 Gaussian 噪声背景和不均匀背景下实现对对比度为 2% 的微弱目标的检测。

关键词:弱小目标检测;小波变换;小波域扩散

中图分类号:TP391 文献标识码:A

Dim target detection based on wavelet field diffusion filter

LIU Wei-ning

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Basic principles of dim target detection based on the wavelet transform is analyzed. According to the multi-scale and multi-direction in the wavelet coefficients and combining with the selectable diffusion direction characters, a new method is designed to denoise and detect small targets by the diffusion filter in different directions and different scales of wavelet coefficients, respectively. Combined a anisotropic filter, the algorithm is used to a diffusion filtering experiment for wavelet coefficients. Results show that the algorithm can detect the dim target with a contrast of 2%, and has better performance in the detection of dim target, robustness to Gaussian noise and uneven backgrounds.

Key words: dim target detection; wavelet transform; wavelet field diffusion

1 引言

人们希望在小目标阶段,即目标与传感器距离较远时就能对弱小目标进行有效的检测和识别,因此,弱小目标的实时检测与跟踪已成为光学图像处理领域研究的重点,并广泛应用于工业、军事等领域。

弱小目标的特点是在图像中目标与周围背景灰度值相差较小,并且目标几何尺寸较小,在实际应用中,往往针对较远距离的目标,其所形成的图像上目标强度一般较弱,相对尺寸也较小。因此,研究低信噪比图像中小目标的实时检测及跟踪算法很有意义。

对复杂背景中弱小目标测量的最大困难是目标检测,只有检测并识别出目标,才能进一步跟踪目标,而图像中的背景噪声对于目标检测干扰很大,因此如何把弱信号从背景噪声中提取出来,是迫切需要解决的难题。传统的目标检测方法有很多,如利用 Sobel、Prewitt 等目标检测方法可以将对比度较强的目标从背景中提取出来,但是当目标弱到一定程度并且背景噪声比较严重时,则无法实现目标的稳定提取,或者产生较高的虚警率,使系统无法正常工作。尤其是在远距离成像中,目标与背景的对比度较低,边缘模糊,而且目标在成像平面上所占的像素较少,致使跟踪检测更加困难。

目前,根据弱小目标固有的特点,各种检测、识别和跟踪算法不断涌现^[1-3],其中小波变换方法亦应用于弱小目标检测中,并取得了较好的效果。

本文通过分析特定环境背景及远距离弱小目标的特点,提出了基于小波域扩散滤波的弱小目标检测法,对不同尺度、不同方向的小波系数分别进行扩散滤波,取得了较好的效果,实现了对弱小目标的跟踪检测。

2 基于小波变换的弱小目标检测

小波变换具有良好的时频分辨能力和算法鲁棒性,是分析非平稳信号的有力工具,在小目标检

测领域得到了广泛的应用。应用小波分析进行小目标检测的方法主要是利用小波变换进行多尺度分解,得到不同分辨率下的分解图像,然后利用目标与背景及噪声之间的不同特性进行目标检测,因为不同分辨率下的小波系数能够反映出图像的不同结构特征,因此在处理突变信号方面具有很大的潜力。文献[4-6]提出了基于小波高频系数能量的弱小目标检测方法,文献[7-8]提出了基于信号奇异性的模极大值检测算法。

小波是小波变换的基本要素。小波及小波变换的定义是:如果函数 $\psi(x) \in L^2(R)$ 满足容许条件

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty, \text{ 且满足规范条件 } \|\psi\| = 1, \text{ 则称 } \psi(x) \text{ 为基本小波。}$$

奇异性信号是指信号本身或它的某阶导数在某一时刻存在突变的信号,奇异性检测就是要将信号的奇异点识别出来,并判断奇异点发生的时刻或位置。图像中的小目标可以看作是图像信号中的奇异点(灰度突变点)。信号的奇异性或非正则结构通常包含了信号的本质特征。小波变换具有空间局部化性质,即信号在某点处的小波变换在小尺度下完全由该点附近的局部信息所确定,因此小波变换应该能够更好地分析信号奇异点的位置及奇异性的强弱。这一点已得到理论上的证实,由 Lipschitz 指数的定义可知,信号奇异性的强弱可以由其小波变换模极大值随尺度参数的变化来表示,信号和噪声的小波变换模极大值在各尺度上具有不同的传播特性,信号奇异点的 Lipschitz 指数大于 0,小波变换模极大值随尺度增大而增大;而高斯白噪声具有负的 Lipschitz 指数,其平均稠密度反比于尺度 2^j ,即尺度越大,平均稠密度越稀疏。

根据图像中背景、目标和噪声在小波变换中小波系数分布在不同尺度的频带范围内,或者具有不同幅度变化特性的特点,利用小波变换模极大值点同信号奇异点之间的对应关系,结合信号奇异性与模极大在多尺度上的变化规律,当信号与某尺度某平移参数的小波最接近时,小波变换的幅值在该尺度上最大,因此可以通过选取合适的分解级数,使得在最大分解尺度下目标的模极

大点个数占优; 通过选择合理的阈值 检测到局部模极大值 并跟踪小波变换在不同尺度下的局部模极大值 达到抑制噪声和提取弱小目标的目的。

基于模极大值的小目标检测算法主要由低频背景去除, 小波系数极大值确定, 目标极大值跟踪和噪声极大值滤除组成。最大尺度的低频分量包含绝大多数的背景信息, 可通过低频系数置零法去除背景信息; 小波系数极大值确定是利用阈值法求出各尺度上小波系数的极大值; 极大值跟踪是由粗到细跟踪不同尺度上的小波系数模极大值位置, 区分其信噪属性; 噪声极大值滤除则是去除无尺度传递性的小波系数极大值。但是该算法也存在不足之处: 当目标像素极少时, 或者目标对比度低于噪声对比度时, 图像的多层小波分解过程必然导致目标信号的模糊或者丢失, 因此很难实现有效的检测。

3 弱小目标检测

小波与各向异性扩散滤波结合进行图像去噪的效果较好。小波变换具有多尺度多方向特性, 小波变换后, 小波系数具有良好的方向特性, 即分别代表高频水平细节、垂直细节和倾斜细节分量; 结合各向异性扩散在平滑噪声的同时能够保持边缘的优点, 通过在各尺度各方向子带内对小波系数进行非线性扩散滤波, 能够克服阈值法去噪过程中所存在的一些问题, 同时解决了各向异性扩散滤波过程中扩散方向选择的难题。

对于低对比度的弱小目标, 在含有较大噪声的情况下, 虽然利用小波变换的多尺度多分辨率特性能够使背景从图像中去除, 但是由于目标和

噪声同属高频信息, 所对应的小波系数相差较小, 直接利用小波变换模极大值算法有时候不能很好地突出弱小目标。图像在经过小波变换后, 低频部分相当于原始图像的近似, 包含大部分的背景信息, 通过直接去掉低频来抑制背景; 部分噪声和弱小目标特征信息主要集中在高频细节分量中, 可以通过在各尺度各方向高频系数中进行增强型各向异性扩散滤波来抑制噪声所对应的小波系数, 同时增强弱小目标所对应的小波系数。由于椒盐噪声对弱小目标的检测影响较大, 为了避免椒盐噪声的影响, 在小波变换前, 引入 Gauss 平滑, 相当于 P-M 模型与 Catte Gauss 模型的一种折衷, 其算法流程如下:

(1) 对图像 $I(x, y)$ 进行高斯平滑预处理

$$I(x, y) = G_{\sigma} \cdot I(x, y), \quad (1)$$

其中, G_{σ} 是均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯函数。

(2) 选择合适的小波基与分解层数 J , 对预处理后的图像做周期延拓, 利用 Mallat 算法进行小波变换, 得到低频系数 d^j 及各级小波系数 $d^{j,1}, d^{j,2}, d^{j,3}$ 。

(3) 选定合适的增强型扩散函数 $c(s) = (1 + w) \cdot (1 / (1 + (s/K)^2)) - w$, 对 $d^{j,1}, d^{j,2}, d^{j,3}$ 分别进行各向异性扩散滤波, 抑制噪声, 增强目标。

(4) 利用滤波后的各层高频小波系数重构检测弱小目标。

由于弱小目标的边缘没有明显的方向特性, 增强型偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE) 弱小目标检测算法与去噪算法相比, 更侧重于弱小目标的增强, 而不是边缘的保持, 因此其离散域数值计算方法可以简化为:

$$D_{i,j}^{n+1} = D_{i,j}^n + \frac{1}{4} [c(N_{i,j}) N_{i,j} + c(S_{i,j}) S_{i,j} + c(E_{i,j}) E_{i,j} + c(W_{i,j}) W_{i,j}] =$$

$$D_{i,j}^n + \frac{1}{4} \{ [(1+w)(1/(1+(N_{i,j}/K)^2)) - w] N_{i,j} + [(1+w)(1/(1+(S_{i,j}/K)^2)) - w] S_{i,j} + [(1+w)(1/(1+(E_{i,j}/K)^2)) - w] E_{i,j} + [(1+w)(1/(1+(W_{i,j}/K)^2)) - w] W_{i,j} \}, \quad (2)$$

其中:

$$\begin{aligned} N_{i,j} &= D_{i-1,j}^n - D_{i,j}^n, \\ S_{i,j} &= D_{i+1,j}^n - D_{i,j}^n, \\ E_{i,j} &= D_{i,j+1}^n - D_{i,j}^n, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{i,j} &= D_{i,j-1}^n - D_{i,j}^n, \\ K &= p \cdot \text{mean} \left[\sum \frac{1}{4} (D_{i-1,j}^n + D_{i+1,j}^n + D_{i,j-1}^n + D_{i,j+1}^n - 4D_{i,j}^n) \right], \quad (3) \end{aligned}$$

式中: n 为迭代次数; D 为各尺度各方向小波系数

d^1, d^2, d^3 ; N, S, E, W 代表 4 个方向, K 表示各尺度各方向细节上所选取的扩散门限参数, ρ 为自适应选取门限参数的系数因子, 一般为 0.8 ~ 2.0, μ 为增强因子, 一般为 0 ~ 0.2。

4 仿真试验结果及分析

利用上述小波域 PDE 法对实际拍摄的多组图片进行实验, 图片特性分别为不均匀背景下弱小目标、噪声背景下弱小目标和超低对比度的弱小目标, 并与经典的基于边缘检测的 Sobel 算子法和模极大值法的小目标检测方法进行比较。实验结果显示: 小波域 PDE 法具有较好的提取效果。

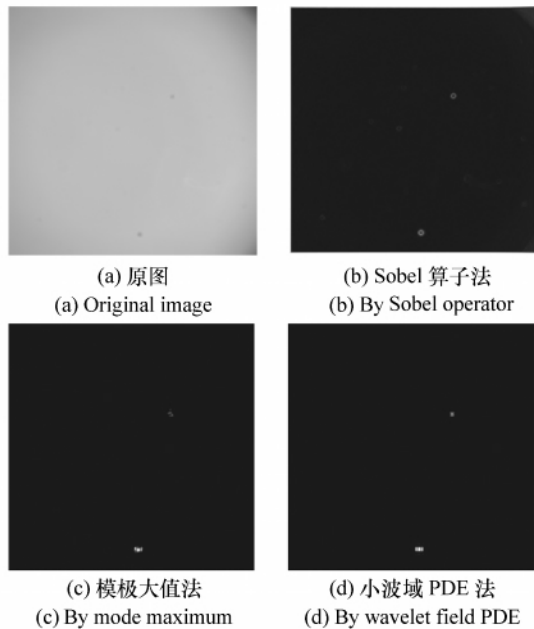


图 1 不均匀背景下弱小目标检测结果

Fig. 1 Detecting results of weak target under uneven background

图 1 (a) 为不均匀背景下的弱小目标, 图像大小为 256 pixel × 256 pixel, 目标对比度 $C = 7%$, 背景标准差 $\sigma = 1.52$, 目标大小 $N = 10 \sim 15$ pixel。分别采用 Sobel 算子法, 小波模极大值法, 小波域 PDE 法进行检测, 实验结果如图 1 (b)、(c)、(d) 所示。

从图 1 实验结果可以看到, 对于背景较平滑, 目标对比度不是很低的弱小目标图像, 经典的 So-

bel 算子法就能检测出弱小目标, 只不过模极大值法和小波域 PDE 法通过多尺度的思想, 能够更好地抑制背景, 增强目标的对比度, 提高弱小目标检测准确性, 减少漏报和误报。小波域 PDE 法与小波模极大值法相比, 能够检测到更弱的小目标, 从图 (c)、(d) 中可以看到, 对于对比度更低的小目标, 小波域 PDE 法能够更好地增强弱小目标。

图 2 (a) 为噪声背景下的弱小目标, 图像大小为 256 pixel × 256 pixel, 目标对比度 $C = 11%$, 背景标准差 $\sigma = 6.15$, 目标大小 $N = 8$ pixel。分别采用 Sobel 算子法、小波模极大值法、小波域 PDE 法进行检测, 实验结果如图 2 (b)、(c)、(d) 所示。

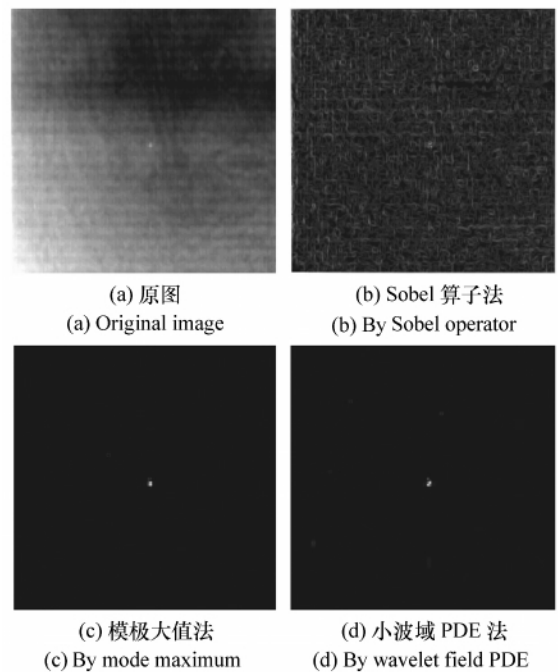


图 2 噪声背景下的弱小目标检测结果

Fig. 2 Detecting results of weak target under noise background

从图 2 的实验结果可以看到, 对于噪声背景下的弱小目标, Sobel 算子法无法有效地抑制背景噪声的干扰, 使得检测结果图像中含有大量的背景噪声干扰点, 无法准确地从背景噪声中提取小目标。由于图像中目标的对比度较强, 模极大值法和小波域 PDE 方法都能够很好地检测出小目标。

为了验证算法的性能, 对噪声背景下不同对比度 C 、不同大小 N 的弱小目标图像进行大量实验, 结果表明: 在背景标准差 $\sigma = 6.15$, 较大噪声

干扰背景条件下, $C = 10\%$ 时, 传统 Sobel 算子法不能准确检测出小目标; 当 $C = 7\%$ 时, 小波模极大值法和小波域 PDE 法都能检测到弱小目标; 当 $C = 4\%$ 时, 小波模极大值法仍能检测到弱小目标, 但是存在一定的虚警点, 小波域 PDE 法仍能很好地检测出弱小目标。

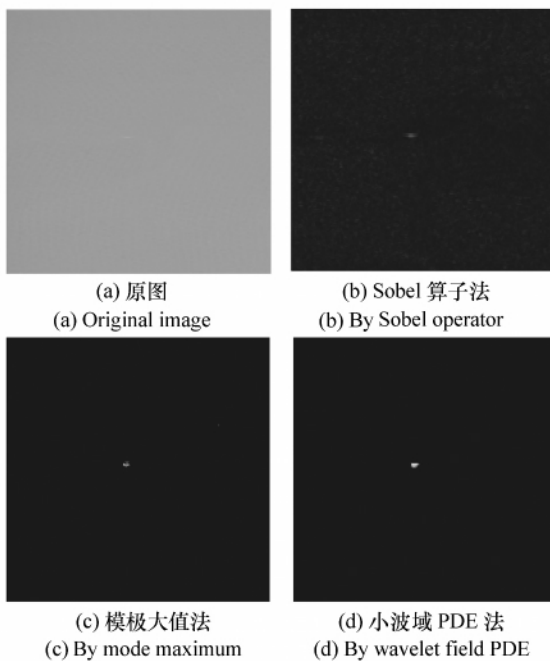


图3 超低对比度条件下的小目标检测结果

Fig. 3 Detecting results of weak target under ultralow contrast

图3(a)为超低对比度的弱小目标, 图像大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 目标对比度 $C = 4\%$, 背景

标准差 $\sigma = 1.47$, 目标大小 $N = 11 \text{ pixel}$ 。分别采用 Sobel 算子法、小波模极大值法、小波域 PDE 法进行检测, 实验结果如图3(b)、(c)、(d)所示。

从实验结果可知, 对于极低对比度条件下的弱小目标, 由于对比度太低, 一般的检测算法不能提取出图像中这种微弱的变化; 在 $\sigma = 1.47$ 背景比较光滑的条件下, 模极大值法能够检测到 $C = 3\%$, $N = 2 \times 3 \text{ pixel}$ 的弱小目标; 小波域 PDE 法能够检测到 $C = 2\%$, $N = 2 \times 2 \text{ pixel}$ 的弱小目标。

5 结 论

小波变换具有良好的时频局部化分析能力及多尺度多分辨率特性, 在信号奇异性检测中具有巨大的潜力。在弱小目标检测方面, 通过对不同尺度细节分量分别进行各向异性扩散滤波, 可解决扩散滤波过程中扩散方向的选择问题, 同时抑制噪声, 增强弱小目标所对应的小波系数, 提高弱小目标检测性能。

弱小目标的自动捕获意义重大, 同时难点也较多。本文对弱小目标检测算法进行了研究, 通过分析特定环境背景及远距离弱小目标特点, 结合实际工程项目需要, 提出了基于小波变换模极大值的小目标检测算法, 并与各向异性扩散滤波相结合, 通过对各尺度各方向小波系数进行扩散滤波来检测弱小目标。实验结果表明: 两种算法都具有较好的检测效果, 小波域扩散滤波法能够检测到对比度更低的弱小目标。

参考文献:

- [1] 周冰, 王永仲. 弱小目标检测技术浅析[J]. 红外技术, 2007, 1(29): 30-34.
ZHOU B, WANG Y ZH. Summary on weak target detect technology [J]. *Infrared Technol.* 2007, 1(29): 30-34. (in Chinese)
- [2] 张文超, 王岩飞, 陈贺新. 基于 Tophat 变换的复杂背景下运动点目标识别算法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(5): 871-874.
ZHANG W CH, WANG Y F, CHEN H X. Complex background moving point target detect algorithm based on tophat transform [J]. *J. Image and Graphics* 2007, 12(5): 871-874. (in Chinese)
- [3] 尹超, 向健勇, 韩建栋. 一种基于区域背景预测的红外弱小目标检测方法[J]. 红外技术, 2004, 26(6): 62-66.
YIN CH, XIANG J Y, HAN J D. A infrared weak target detect method based on area background forecast [J]. *Infrared Technol.* 2004, 26(6): 62-66. (in Chinese)
- [4] SU X ZH, JU H B, GAO X B. A detection method for dim small IR targets based on wavelet and higher-order cumulant [J]. *SPIE* 2003, 5286: 911-915.

- [5] WEI Y ,SHI Z L ,YU H B. An automatic target detection algorithm based on wavelet analysis for infrared image small target in background of sea and sky [J]. *SPIE* 2003 5082: 123-131.
- [6] DAVIESY D ,PALMERY P ,MIRMEHDI M. Detection and tracking of very small low contrast objects [C]. *Proc. of the 9th British Machine Vision Conference* ,University of Southampton ,UK ,14-17 Sept ,1998: 599-608.
- [7] 袁华 ,张卫宁 ,路峻 ,等. 一种改进的小波去噪中模极大值处理的方法 [J]. *系统仿真学报* 2005 ,17(4): 838-841.
YUAN H ,ZHANG W N ,LU J *et al.* . A improved wavelet de-noise mode maximum method [J]. *J. System Emulation* , 2005 ,17(4): 838-841. (in Chinese)
- [8] TZANNES A P ,BROOKS D H. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing [J]. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.* 2002 38(2): 570-585.
- [9] PANAGOPOULOS S ,SORAGHAN J J. Small target detection in sea clutter [J]. *IEEE T. Geosci. Remote* 2004 42(7): 1355-1361.
- [10] 李世飞 ,董福安 ,伍友利. 各向异性扩散滤波器的迭代停止准则 [J]. *空军工程大学学报* 2005 6(5): 70-72.
LI SH F ,DONG F A ,WU Y L. Iteration termination rule of diffuse filter [J]. *J. Air Force Eng.* 2005 6(5): 70-72. (in Chinese)
- [11] STRICJLAND R N ,HAHN H I. Wavelet transform methods for object detection and recovery [J]. *IEEE T. Image Process.* ,1997 6(5): 724-735.

作者简介:刘伟宁(1963—)男,吉林长春人,硕士,研究员,主要从事数字实时图像处理、机器视觉等方面的研究。

E-mail: Liu. weining@ yahoo. com. cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国最早创办的液晶学科专业期刊之一
- 中国液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊,中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新能力,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价40.00元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。

地 址:长春市东南湖大路3888号

国内统一刊号:CN 22-1259/04

《液晶与显示》编辑部

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

邮 编:130033

电 话:(0431) 6176059

E-mail: yjxs@ ciomp. ac. cn

网 址: www. yjxs. com