

基于小波分析的双色红外弱小目标检测算法

史晓刚¹, 白晓东², 李丽娟¹, 徐振亚¹, 韩宇萌¹, 刘佳鑫²

(1.中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2.中国人民解放军第5715工厂, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对单波段红外弱小目标检测难度大、信息量少的问题, 提出一种基于小波分析的双色红外弱小目标检测算法。首先运用小波滤波器对双色图像进行一级分解, 然后提出一种软、硬阈值折衷法对高频小波系数进行处理, 低于阈值的系数将被直接归零以抑制背景; 通过采用一定的策略对双波段高频图像进行融合并将低频系数归零后, 运用小波反变换得到滤波图像, 最终采用多帧累积检测完成弱小目标的检测。实验证明本文算法能有效提升目标信噪比, 具有良好的弱小目标检测能力和实时性。

关键词: 小波分析; 双色; 弱小目标检测; 信噪比

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)08-0688-05

A Dual-Band Infrared Dim Target Detection Algorithm Based on Wavelet Analysis

SHI Xiaogang¹, BAI Xiaodong², LI Lijuan¹, XU Zhenya¹, HAN Yumeng¹, LIU Jiaxin²

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. The NO.5715 factory of the Chinese People's Liberation Army, Luoyang 471009, China)

Abstract: It is very difficult to detect infrared dim target in single-band because the comparative lack of message. Aimed at this problem, an algorithm of infrared dim target detection in dual-band based on wavelet analysis is introduced. The dual-band images are decomposed by wavelet filter firstly, and a compromise model which is between hard-threshold and soft-threshold models is introduced to dispose the high frequency wavelet coefficients, and the coefficients which are lower than the threshold will be changed to zero in order to restrain the background. The dual-band high frequency images will be fused by use of certain strategies and the low frequency images will be changed to zero, so the filtering image will be obtained by wavelet inverse transform, and the dim target will be detected by several frames accumulative detection finally. The experiments show that this algorithm can improve the target's signal-noise ratio effectively, and it has favorable abilities in infrared dim target detection and real-time.

Key words: wavelet analysis, dual-band, dim target detection, signal-noise ratio

0 引言

复杂背景下红外弱小目标的检测和跟踪是实现红外成像制导的关键技术, 但随着光电对抗技术的发展、探测器噪声、红外背景、以及目标具有远距离、低信噪比等特点给弱小目标检测带来很大的困难。现有的研究大多都是基于单波段图像上来对弱小目标进行检测, 但面对日益复杂的战场环境, 单波段探测器由于直接获得的信息相对较少已经影响到系统检测的准确度, 因此国内外已经开始采用双色或多波段

信息融合技术对弱小目标进行检测, 且取得了较好的效果^[1-3]; 所谓的弱小目标的检测实质就是判断图像中的孤立奇异点, 而小波变换可以很好地区别位于高频部分的目标(奇异点)和位于低频部分的背景, 因此运用小波分析的方法对双波段信息进行融合以实现红外弱小目标检测已经成为人们研究的热点^[2-4]。

提出一种基于小波分析的双色红外弱小目标检测算法: 利用小波滤波器对双色图像分别进行一级分解, 提出一种软、硬阈值折衷法对高频的小波系数进行处理, 低于该阈值的系数将被直接归零以抑制背景, 然

收稿日期: 2015-09-15; 修订日期: 2015-11-17.

作者简介: 史晓刚(1982-), 男, 河南舞阳人, 博士研究生, 主要从事红外成像制导方向的研究工作。

基金项目: 航空科学基金项目(20110112007)

后对双波段高频图像通过一定的策略进行融合实现对背景的进一步抑制, 将低频系数归零后通过小波反变换得到的滤波图像, 最终运用多帧累积检测完成弱小目标的检测。实验证明本文算法能有效地提升目标信噪比, 具有良好的弱小目标检测能力和实时性。

1 红外图像的小波分析

小波变换是一种时频局部分析方法, 小波在信号的高频和低频部分都可以取得较好的时间分辨率和频率分辨率, 从而能有效地从信号中提取信息。连续小波变换的定义为:

$$T_{wx}(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\theta}^{\theta} x(\tau) \phi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中: a 为尺度因子; τ 为时移因子; $\phi(t)$ 为基本小波函数。由于连续小波变换的数据量过大, 计算非常复杂, 其无法很方便地应用于图像分析; Mallat 小波快速算法大大提高了小波变换的计算速度, 它将小波分解离散化, 大大减小了计算量, 而图像质量却没有很大的变化, 很好地平衡了计算量和信息量丢失的问题, 非常易于硬件实现^[5]。

红外图像经小波分解后由低频部分和 3 个高频部分构成, 低频部分主要反映了红外背景的特征, 而目标特征则主要包含在 3 个高频部分中。图 1(a)、(b) 分别给出了含有弱小目标的波段 1、波段 2 红外图像及其一级分解的高频图像(垂直、水平、对角), 图像大小为 128×128 , 很明显高频图像已经滤除大范围连续的背景信息, 得到了背景边缘信息和奇异点集, 而弱小目标就包含在奇异点集中。

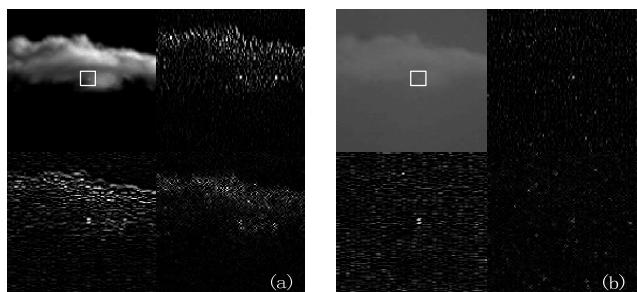


图 1 一级小波分解图像

Fig.1 First-level images decomposed by wavelet

2 双色弱小目标检测算法

红外图像经过小波分解后其系数可分为 2 类: 第一类小波系数由红外背景和噪声变换后获得, 它们的特点是数目众多但幅值小; 第二类小波系数由目标及个别背景信号变换后获得, 其特点是数目较少但幅值大, 因此只要对小波系数设置合理的阈值, 即大于这个阈值的系数属于第二类系数, 可以保留, 小于这个

阈值的系数属于第一类系数, 可以去除。这必然有利于红外背景的抑制, 因此提出一种合理有效的小波阈值确定方法对弱小目标检测来说也是很重要的。前人在运用小波阈值进行滤波时大多都是采用软阈值或硬阈值 2 种方法, 但两者分别存在着不连续和有偏差的缺点, 软、硬阈值折衷法是对上述两种方法的改进, 该方法能够取得较好的信噪比提升, 其定义为^[6]:

$$\hat{w} = \begin{cases} \text{sign}(w) * (|w| - a\lambda) & |w| \geq \lambda \\ 0 & |w| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中: w 为小波系数; \hat{w} 为滤波后的小波系数; a 取 $0 \sim 1$; λ 为 Donoho 提出的阈值表达式, 其表达式为^[7]:

$$\lambda_1 = \sigma \sqrt{2 \ln N} \quad (3)$$

式中: σ 为高频图像的标准方差; N 为像素总数。

图 2(a1)~(a3)、(b1)~(b3) 分别给出了波段 1 和波段 2 三个高频方向经过式(2)阈值化处理的滤波图像。

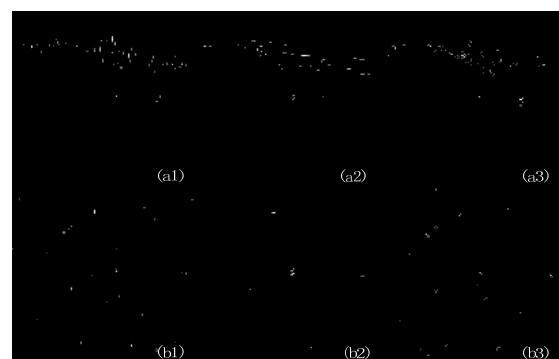


图 2 高频滤波图像

Fig.2 The high frequency filtering images

将双色引入制导系统的目的就是利用同一场景的 2 个波段的图像特征差异来获取更多信息以提高目标检测率。如图 1 所示, 就本文采集的双色红外图像来说, 经过处理后其信号分布差异还是比较明显的: 波段 1 图像的云层灰度变化较为剧烈但天空灰度分布很平缓, 而波段 2 图像云层灰度不太剧烈但局部区域灰度不太平缓, 因此经过小波分解之后波段 1 高频图像遗留的信号较多且几乎都来源于云层背景, 而波段 2 高频图像遗留的信号相对较少但分布相对均匀。经过阈值化处理之后, 如图 2 所示, 随着大部分背景信号被进一步地抑制, 前面所述的信号分布差异变得更加明显。因此将利用这种分布差异, 即对阈值化后的双波段高频图像进行运算融合, 使得遗留杂波中的绝大部分都将会被抑制掉; 同时考虑到低频图像由背景构成的, 因此将其直接归零进行抑制; 经过上述操作之后, 图像中绝大部分的杂波无疑都会被过滤掉, 然后通过小波反变换得到最终的滤波图像。本文算法

的具体流程如下：

步骤1：选择一组3次样条小波滤波器对双色红外图像进行一级分解，得到1组LL低频图像和3组LH、HL、HH高频图像，其中原始红外图像和高频图像如图1所示。

步骤2：利用式(2)提出的软、硬阈值折衷法分别对波段1和波段2的高频图像进行阈值化处理，如图2所示。

步骤3： $C_1^k(m,n)$ 和 $C_2^k(m,n)$ 分别表示图2(a1)~(a3)和图2(b1)~(b3)的高频阈值化图像， $C_F^k(m,n)$ 表示融合图像，其中 $k=1,2,3$ 。双色高频阈值化图像按照以下规则进行融合：

若 $C_1^k(m,n)=0$ 或 $C_2^k(m,n)=0$ ，则认为至少存在1个波段已经将该像素点确认为背景，因此对它们进行或运算，即 $C_F^k(m,n)=0$ ；

若 $C_1^k(m,n)$ 和 $C_2^k(m,n)$ 都不等于0，则认为该像素点可能包含目标信号，其融合规则为：

$$C_F^k(m,n) = \frac{V_1^k}{V_1^k + V_2^k} C_1^k(m,n) + \frac{V_2^k}{V_1^k + V_2^k} C_2^k(m,n) \quad (4)$$

式中： V_1^k 、 V_2^k 分别表示为波段1、2高频阈值化图像的局部标准差：

$$V_t^k = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{j=\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} (C_t^k(M-i, N-j) - \mu_t^k)^2} \quad (5)$$

式中： μ_t^k 表示局部灰度均值； M 和 N 都取5， $t=1,2$ 。

步骤4：将低频图像 $D_F^k(m,n)$ 直接归零，然后与 $C_F^1(m,n)$ 、 $C_F^2(m,n)$ 、 $C_F^3(m,n)$ 进行反变换得到滤波图像。

步骤5：先引入自适应阈值 $T^{[8]}$ ：

$$T = E + \lambda S \quad (6)$$

式中： E 表示灰度均值； S 为标准方差； λ 取4，将其作为初始阈值，比 T 大的保持不变，反之为零，构成新图像之后重复上述方法，直到新阈值与前一步阈值相等时停止，取该阈值对图像分割完成单帧检测。

步骤6：复杂背景下弱小目标信噪比较低，单帧检测很有可能会检测出虚假目标，因此将利用目标运动的连续性，利用多帧累积检测的方法最终确定目标。

为验证本算法的有效性，将其分别与双色高通融合算法、基于小波变换的双色红外弱小目标检测算法进行比较。双色高通融合算法是先对双波段图像进行高通滤波，然后引用式(6)提出的自适应阈值对双色图像进行分割，最后通过或运算完成单帧检测，简称算法1；基于小波变换的双色红外弱小目标检测算法是运用一定的策略进行图像融合后与低频图像做差以

抑制背景，然后同样运用步骤5提出的分割算法完成单帧检测，简称算法2^[9]。

3 实验结果及评价

以图1给出的双色图像为例，首先考察3种算法的背景抑制能力，其滤波结果如图3所示。图3(a)给出了信噪比较高的波段2图像经过算法1滤波后的图像，如图所示图像中依然存在着较多的杂波，对云层边缘的抑制能力明显较差；如图3(b)所示，算法2处理后的图像存在的杂波有所减少，云层边缘得到较好地抑制；如图3(c)所示，本文算法处理后的图像几乎不存在杂波，云层背景也得到彻底抑制，目标非常突出。将引用信噪比来定量评价3种算法的背景抑制能力，其定义为：

$$\text{SNR} = \frac{f - u}{\sigma} \quad (7)$$

式中： f 表示目标的灰度； u 表示整个图像的灰度均值； σ 表示图像的标准差，信噪比越高表示弱小目标更加凸显，即更容易被检测到，评价结果如表1所示。

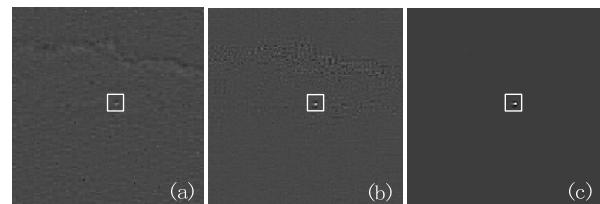


图3 3种算法滤波图像

Fig.3 The filtering images disposed by three algorithms

表1 信噪比评价 Table 1 Evaluation of the SNR

	SNR			
	Dual image	High pass filtering	Literature 9	Our method
(a)	1.8115/3.0074	17.0004	30.7778	101.5531
(b)	1.0999/2.2018	14.3336	22.3080	115.2632
(c)	1.6080/2.7318	16.5896	27.8881	117.0161

如表1所示，相对于前两种算法，本文算法处理后图像其信噪比获得很大程度的提高，即具有更强的背景抑制能力，这必然会为图像分割时完成目标的准确检测打下更好的基础。本文还给出了图3(a)~(c)经过分割后的单帧检测图像，如图4所示。

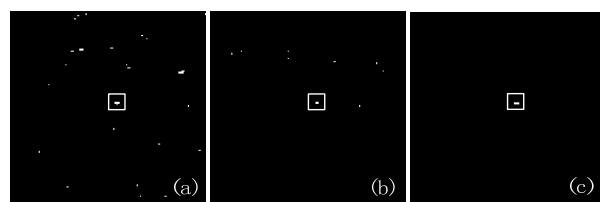


图4 图3经分割后的单帧检测图像

Fig.4 The single frame detection of image 3 segmented

如图 4(a)~(c)所示, 就本帧图像来说, 算法 1 检测后的图像明显存在较多的虚警点, 系统不能有效检测出目标; 算法 2 检测后的图像虚警点尽管有所减少, 但系统同样无法有效检测出目标; 本文算法由于良好的背景抑制能力, 使得检测图像中并没有存在虚警点。

由于虚警点的存在, 使得单帧检测往往都无法准确定位目标, 因此系统大多依据连续帧检测时目标运动轨迹呈连续性、而虚警点呈随机出现的原则, 通过多帧累积检测来确认目标。因此选取了 3 段强杂波背景条件下连续帧序列图像进行弱小目标检测以验证 3 种算法的多帧累积检测能力。在图 5 中, 目标是以坐标(76,56)为起点向左上方做直线运动穿过云层; 如图 6 所示, 目标以坐标(60,54)为起点向左做直线运动穿过云层; 在图 7 中, 目标以坐标(40,30)为起点向左下方做直线运动穿过云层。

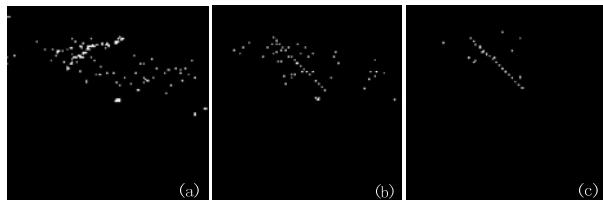


图 5 序列 1 图像检测结果

Fig.5 The detection result of sequence 1 images

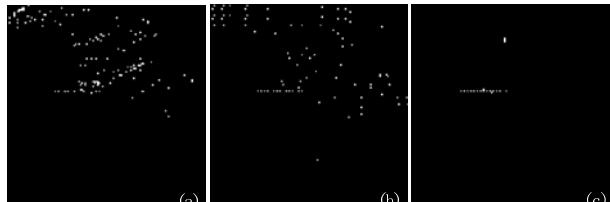


图 6 序列 2 图像检测结果

Fig.6 The detection result of sequence 2 images

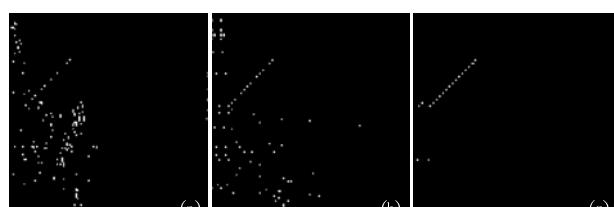


图 7 序列 3 图像检测结果

Fig.7 The detection result of sequence 3 images

如图 5(a)、6(a)、7(a)所示, 算法 1 处理后的目标运动轨迹明显存在多处断线部分, 即系统出现了漏检, 这就意味着系统必须需要更多的帧数才能确认目标, 此外由于该算法在单帧检测过程中存在较多的虚警点, 使得连续帧检测时部分虚警点也呈现出连续

性, 这极易导致系统丢失真实目标。如图 5(b)、6(b)、7(b)所示, 算法 2 处理后的目标运动轨迹具有较好连续性, 但依然存在漏检情况, 该算法也同样存在个别虚警点呈连续性的问题。如图 5(c)、6(c)、7(c)所示, 本文算法处理后的目标运动轨迹具有清晰的连续性, 不存在漏检情况, 尽管遗留少许的虚警点但几乎不会影响到系统对目标的确认, 因此无论是单帧检测还是多帧累积检测, 本文算法的性能都明显要优于算法 1 和算 2。

为更好验证 3 种算法的检测性能, 本文还将分别从检测率、虚警率、实时性等 3 个方面进行评价。首先对随机抽取的 200 帧复杂背景下含有弱小目标的双色红外图像进行了检测, 采用算法 1 得到的检测率为 86%, 虚警率为 20%, 采用算法 2 得到的检测率为 91%, 虚警率为 12%, 采用本文算法得到的检测率为 98%, 虚警率为 2%, 可以看出本文算法在获得较好检测率的同时还明显降低了虚警率。本文还从单帧运行时间、检测所需帧数、检测合计时间等 3 方面对算法的实时性进行评价, 如表 2 所示。

表 2 实时性评价

Table 2 Evaluation of real-time

		s	
	Algorithm 1	Algorithm 2	Algorithm 3
Images 1	1.1305	0.2953	0.1606
Images 2	0.1313	0.2996	0.1608
Images 3	0.1317	0.2982	0.1619
Average time	0.1312	0.2977	0.1611
Quantity of frames to confirm	>8	3	3
Total time to confirm	>1.050	0.8931	0.4833

就本文选取的序列图像来说, 目标判决依据为: 若待检目标的运动轨迹具有一定的连续性, 且其灰度与面积稳定时, 它将被确认为目标。如表 2 所示, 尽管算法 1 单帧运行的平均时间是最短的, 但由于其运动轨迹反复出现中断, 至少需要 8 帧以上才能完成目标判决, 因此其检测合计时间是最长的; 算法 2 和本文算法进行累积检测时连续性较好, 一般 3 帧就能完成目标判决, 但就单帧运行时间来看本文算法所耗时间明显短于算法 2, 这主要得益于图像融合时本文算法已经将大多数像素的灰度值进行归零, 因此进行阈值选取时明显会节省一些计算时间, 因此其检测合计时间明显降低。综合对比, 本文算法的检测合计时

间明显是3个算法中最短的，即实时性更好。

4 结论

提出一种基于小波分析的双色红外弱小目标检测算法，用小波滤波器对双色图像分别进行一级分解，运用软、硬阈值折衷法对高频的小波系数进行处理，低于该阈值的系数将被直接归零以抑制背景，然后对双波段高频图像通过一定的策略进行融合实现对背景的进一步抑制，将低频系数直接归零后通过反变换得到滤波图像，最终通过多帧累积检测的方法完成弱小目标的检测，实验证明本文算法能有效地提升目标信噪比，具有良好的弱小目标检测能力和实时性。

参考文献：

- [1] 白晓东, 刘代军. 关于精确制导武器制导技术演示验证的思考. 航空兵器, 2004, 5(6): 40-42.
BAI Xiaodong, LIU Daijun. The deliberate of demonstration confirmation about the precision guidance weapon technology[J]. *Aerial Weapon*, 2004, 5(6): 40-42.
- [2] 史晓华, 张同贺. 红外双色多元导引头抗干扰技术研究[J]. 红外技术, 2009, 31(6): 311-314.
SHI Xiaohua, ZHANG Tonghe. The counter-countermeasures technology for dual-band multi-element IR seeker[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(6): 311-314.
- [3] 宗思光, 王江安, 马治国. 强杂波中双波段目标检测新算法[J]. 红外技术, 2005, 27(1): 57-61.
ZONG Siguang, WANG Jiangan, MA Zhiguo. New detection algorithm of weak targets on double bands under strong clutter[J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(1): 57-61.
- [4] 李秋华, 杜鵑. 基于多特征整合的双色红外小扩展目标精确分割算法[J]. 红外技术, 2009, 31(2): 112-118.
LI Qiuhsa, DU Yi. The algorithm of two color IR small extended target precision segmentation based on multiple features integration[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(2): 112-118.
- [5] MALLAT S. Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models[J]. *IEEE Trans ASSP*, 1989, 37: 2091-2110.
- [6] 赵瑞珍, 宋国乡, 王红. 小波系数阈值估计的改进模型[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19(4): 625-628.
ZHAO Ruizhen, SONG Guoxiang, WANG Hong. Better threshold estimation of wavelet coefficients for improving denoising[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2001, 19(4): 625-628.
- [7] Donoho D L. Denoising by soft-thresholding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(3): 613-627.
- [8] 韦道知, 黄树彩, 夏训辉, 等. 基于时空域融合滤波的小目标检测算法[J]. 红外技术, 2014, 36(11): 905-908.
WEI Daozhi, HUANG Shucai, XIA Xunhui, et al. Temporal-spatial fusion filtering algorithm for small infrared target detection[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(11): 905-908.
- [9] 孙玉秋, 田金文, 柳健. 基于小波变换的双色红外图像融合检测方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 240-243.
SUN YuQiu, TIAN Jinwen, LIU Jian. Dual band infrared image fusion detection based on wavelet transform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 240-243.