

## 空域-小波域联合滤波的红外复杂背景抑制

刘刚<sup>1,2,3</sup>, 周珩<sup>2</sup>, 王忠勇<sup>3</sup>, 张喜涛<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学信息工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;

3. 郑州大学信息工程学院, 郑州 450001)

**摘要:** 针对远距离红外小目标检测中复杂背景的抑制问题, 提出了一种空域-小波域联合滤波的方法。该方法在空域通过自适应结构元素的灰度形态学顶帽变换抑制大部分红外背景。在此基础上, 将处理空间变换到小波域, 通过分析残留背景、目标和噪声系数在高频子带的差异, 定义基于邻域均值的子带系数表达形式, 构造高频子带系数的中心向量, 对小波高频图像进行综合形成距离像, 得到红外复杂背景的最终抑制结果。仿真实验结果表明, 相对于经典算法, 该方法不但可以实现对红外复杂背景的有效抑制, 而且能够增强目标信号的强度。

**关键词:** 红外小目标; 背景抑制; 顶帽变换; 小波变换; 距离像

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0037-04

## Infrared Complex Background Suppression Based on Spatial Filtering and Wavelet Filtering

LIU Gang<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Heng<sup>2</sup>, WANG Zhong-yong<sup>3</sup>, ZHANG Xi-tao<sup>2</sup>

(1. College of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. China Airborne Missile Academic, Luoyang 471009, China;

3. College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** To the complex background suppression problem in infrared small target detection over long distance, a method combining spatial filtering with wavelet filtering was presented. By using the gray-scale morphologic top-hat transform of adaptive structure element in the spatial domain, most infrared background was suppressed. On this basis, the processing space was transformed to the wavelet domain. By analyzing the difference of residual background, target and noise coefficients in high-frequency sub-band, the expression of sub-band coefficient based on neighbor average was defined, a center vector of high-frequency sub-band coefficient was constructed, and the wavelet high-frequency image was integrated to form a distance image, obtaining the final suppression result of infrared complex background. The experimental results show that: Compared with the classic algorithm, the method given here can not only effectively suppress the infrared complex background, but also strengthen the target signal intensity.

**Key words:** infrared small target; background suppression; top-hat transform; wavelet transform; distance image

### 0 引言

在基于红外成像制导的远距离探测中, 目标在检

测器件上的成像面积很小, 且目标遭受杂波和背景影响的可能性很大, 因而实现目标有效检测非常困难。战场环境一般包括海洋、天空和地面, 由于烟雾, 云层, 地表的山脉、纹理, 大型建筑群以及海空地的交界面均会使背景复杂化, 这些复杂的背景都会对目标的检测产生极大的干扰。如何抑制复杂背景, 是远距离红外成像制导环境中准确识别弱小目标的前提。

目前, 国内外对于红外复杂背景抑制的研究主要集中在频域方法<sup>[1-3]</sup>、形态学方法<sup>[4-5]</sup>、空域高通滤波

收稿日期: 2014-06-13

修回日期: 2015-01-12

基金项目: 航空科学基金(20130142004); 河南科技大学博士科研启动基金(Op001631); 河南科技大学校青年基金(13000945); 中航工业空空导弹研究院创新基金(201306s10)

作者简介: 刘刚(1974—), 男, 湖南临武人, 博士后, 副教授, 研究方向为图形图像处理、测控技术和嵌入式开发。

法<sup>[6]</sup>、Robison Guard 法<sup>[7-8]</sup>和背景预测法<sup>[9]</sup>等。为了进一步提高背景抑制算法的适用性和抗干扰能力,本文提出了一种空域和小波域联合滤波的红外复杂背景抑制方法,该方法在空域通过自适应结构元素的灰度形态学顶帽变换抑制大部分红外背景。在此基础上,将处理空间变换到小波频域,通过分析残留背景、目标和噪声系数在高频子带的差异,基于邻域重新计算子带系数,对小波高频图像进行综合形成距离像,进一步提高图像的信噪比并得到背景抑制的最终结果。

## 1 空域红外复杂背景初抑制

### 1.1 灰度形态学背景抑制理论

红外实时成像应用时目标通常包含在复杂背景中,一般可利用背景估计技术估计图像的背景,然后从原图中剔除背景后可以得到增强后的目标图像,降低候选目标区域提取的难度,并减少参与图像匹配过程的候选目标数量。

数学形态学在图像分析中得到了广泛的应用。红外图像中的目标区域通常为亮区域,在选用比目标区域尺寸大的结构元素情况下,灰度形态学开运算可使亮的目标区域被看作噪声而滤除,从而可估计可能目标区域外的图像背景而不破坏目标区域特征。原图像与估计出的图像背景做差即可得到包含候选目标且抑制大量背景的增强图像。该过程在灰度形态学中称为顶帽变换。

### 1.2 结构元素尺寸的自适应确定

结构元素的选择是决定背景估计效果好坏的关键因素,如何选择结构元素是形态学中一个研究热点和难点。形态学分析的结构元素选取还没有针对具体应用背景的选择原则,从而,对于何种结构元素比较适合处理何种具体的问题,需要一次次试探和证明。以往关于利用形态学上的顶帽算子对红外弱小目标进行检测的研究中,结构元素均为事先确定。因此,这些滤波器仅仅在所对应的某类图像模型中具有较好的性能。然而,红外图像背景复杂且处于不断变化之中,这就要求选用的结构元素应具有自适应功能,以实现最优化处理。在红外图像中,真实目标区域的灰度值较大且灰度分布较均匀,即方差值较小。根据目标区域的这个灰度分布特征,本文通过 3 个步骤进行候选目标区域的初始判定:1) 将图像按一定大小分成子图像;2) 计算每一子图像区域内的灰度均值和方差,并计算均值与方差之比  $m$ ;3) 如果  $m$  大于指定的阈值则该子区域可能为候选目标区域,并标记该区域。

在候选目标区域中统计目标的八连通区域,计算其矩形包围盒,以矩形的最大边长作为灰度形态学顶

帽变换的结构元素大小。

## 2 小波域红外复杂背景抑制

小波变换具有低熵性、多分辨率性、去相关性和选基灵活性等诸多优良特性,使得原始图像的结构信息和细节信息很容易得到提取。小波变换的成功之处在于其能很好地表示一维分段光滑函数,有效地检测图像的过边缘特性,表达奇异点的位置和特性。本文在空域滤波的基础上,利用小波变换进一步抑制红外复杂背景。

由于平稳小波变换具有平移不变性,因此图像变换后,原始图像中的像素对应着变换域中相同位置的系数。灰度形态学顶帽变换抑制背景的图像经小波变换后,对应的系数可分为目标系数、残余背景系数和噪声系数三类。小目标不具备方向性,在高频各个方向上对应着较大的系数;残余背景则具有一定的方向性,在某些方向上对应较大系数,而在相同尺度的其他方向上则可能是小系数;弱噪声信号在所有的方向上都对应小系数。三者高频方向系数上的差异,是实现小波域背景抑制的基础。对于强的、孤立的噪声信号点,其小波变换各个高频方向对应的系数幅值接近于真实目标,需要结合帧间相关性来实现抑制。

定义  $M_k$  为以  $k$  点为中心的邻域的系数均值,即

$$M_k = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^{n \times n} |w_i| \quad (1)$$

式中: $n$  为邻域边长; $w_i$  为邻域系数。

对平稳小波变换后的各个高频方向计算各点的  $M$ , 对于其中任意点  $k$  有由系数均值表达的特征向量,即

$$F_k = \{M_k^j\} \quad j=1,2,3 \quad (2)$$

式中, $j$  代表小波变换后水平、垂直和对角 3 个方向。

定义中心向量为

$$F_c = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m F_k \quad (3)$$

式中, $m$  为图像的大小。

各个点的系数均值向量与中心向量的距离为

$$d(F_k, F_c) = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (F_k^j - F_c^j)^2} \quad (4)$$

以邻域均值来重新表征高频系数可以削弱残留背景和噪声系数的强度。由于目标像素在图像中占据很小比重,其特征向量对中心向量的值影响较小。因此,背景像素的特征向量与中心向量较接近,而目标像素的特征向量与中心向量差异较大。计算特征向量与中心向量之间的距离,可以形成一个小波高频综合像。该综合像拉大了小目标区域系数与背景及噪声的系数值差异,进一步提高了图像的信噪比。由于残留背景在某方向上可能会有大系数呈现,故本文算法在某位

置高频系数特征向量各个分量的均值大于某一阈值时才计算其与中心向量的距离,否则按照系数特征向量各分量的小值估计距离。

红外图像经过灰度形态学顶帽变换、平稳小波变换的低频系数抑制,滤除了大部分的背景干扰。接下来,利用小波变换系数中小目标、残余背景和噪声的不同特性,通过构造高频综合距离像,进一步剔除了残留背景边缘和噪声点,提高了图像的信噪比,实现红外复杂背景的最终抑制。

### 3 算法流程

空域-小波域联合滤波的红外复杂背景抑制算法流程如图1所示。

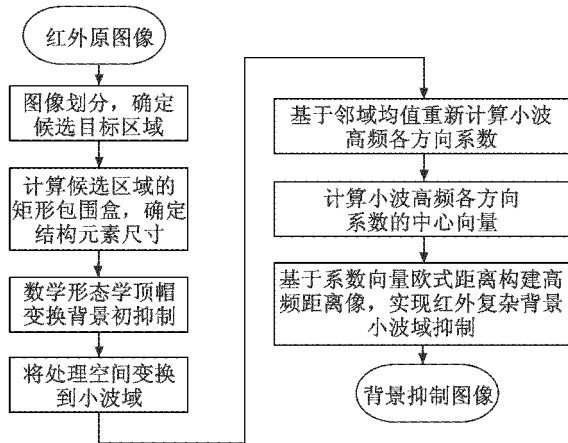


图1 空域-小波域联合的背景抑制算法流程图

Fig. 1 Flow chart of background suppression

### 4 实验与分析

实验硬件平台为方正台式机, CPU主频3.4 GHz, 内存4 GB, 软件平台为 Matlab 2008a。小波变换基为“Haar”, 采用二维平稳小波变换函数 swt2 进行变换, 分解尺度为1。

本文通过局部信噪比增益 (Local Signal-to-Noise Ratio Gain, SNRG) 和背景抑制系数 (Background Suppression Factor, BSF) 两个指标定量衡量背景抑制效果, 即

$$G_{SNRG} = \frac{(R_{S,N})_{out}}{(R_{S,N})_{in}} \quad (5)$$

$$K_{BSF} = \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}} \quad (6)$$

式中:  $R_{S,N} = \frac{s-u}{\sigma}$ ,  $s$  代表目标信号的幅度,  $u$  为区域均值;  $\sigma_{in}, \sigma_{out}$  代表输入、输出图像的标准差;  $G_{SNRG}$  衡量算法对目标信号的保留程度;  $K_{BSF}$  代表算法对背景的抑制程度; 区域大小取 50 像素 × 50 像素。

实验数据集选用空中、海面 and 地面 3 组图像序列, 每个序列包含图像 100 帧。利用形态学顶帽变换进行空域背景抑制时, 考虑小目标的实际大小范围, 将原图像按照 7 像素 × 7 像素邻域进行划分, 当邻域均值和方差比值大于全局值时, 认为其为候选目标区域, 对所有候选区域计算最大矩形包围盒边长作为结构元素的尺寸。如果设置的初始图像划分尺寸如 7 像素 × 7 像素找不到候选目标区域, 则减少划分尺寸继续在图像中遍历。初始图像的划分尺寸设置上限和下限 (本文尺寸 3 像素 × 3 像素), 如在划分尺寸下限仍没有找到候选目标区域, 则以该下限值作为结构元素尺寸。通过顶帽变换, 可以保留所有尺寸小于结构元素的疑似目标。在小波高频距离像生成时, 某位置大系数至少在两个方向出现, 才可以计算均值向量与中心向量的距离, 以消除残留背景的影响。

本文方法与空域高通滤波、巴特沃斯高通滤波、Robison Guard 滤波对 3 组图像序列中 3 帧的处理结果对比如图 2 ~ 图 4 所示。

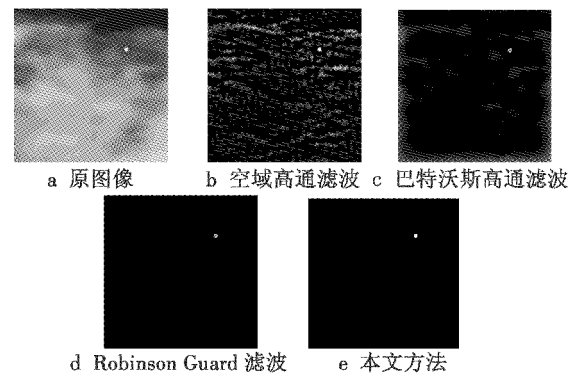


图2 空中背景抑制

Fig. 2 Background suppression of sky

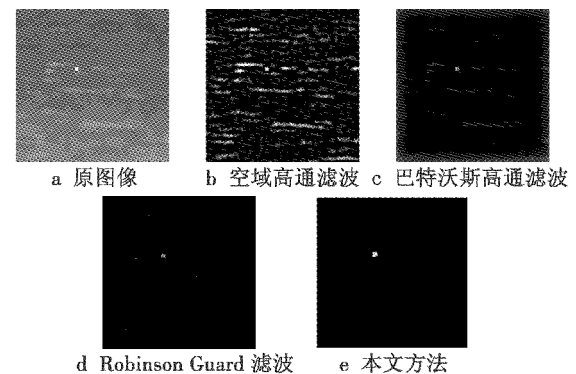
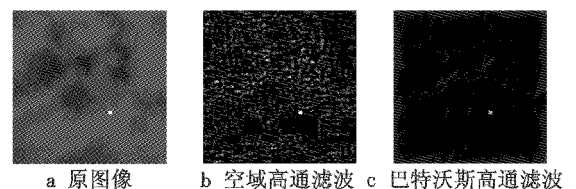


图3 海面背景抑制

Fig. 3 Background suppression of sea



a 原图像 b 空域高通滤波 c 巴特沃斯高通滤波

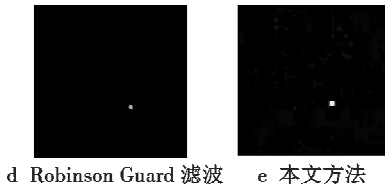


图4 地面背景抑制

Fig.4 Background suppression of land

巴特沃斯高通滤波截止频率为12.8,高通滤波器为

$$H = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & 4 & 4 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

从式(7)中可以看出,本文算法和Robison Guard滤波算法对于复杂背景,特别是边缘的抑制效果明显优于其他算法,背景起伏越大,优势越明显。相比Robison Guard滤波,本文算法在保留目标的同时增强了其信号强度。针对空中背景,原图像和本文方法抑制图像的三维灰度如图5所示。由图5b可看出,尖峰对应于目标区域,而大部分背景得到抑制。

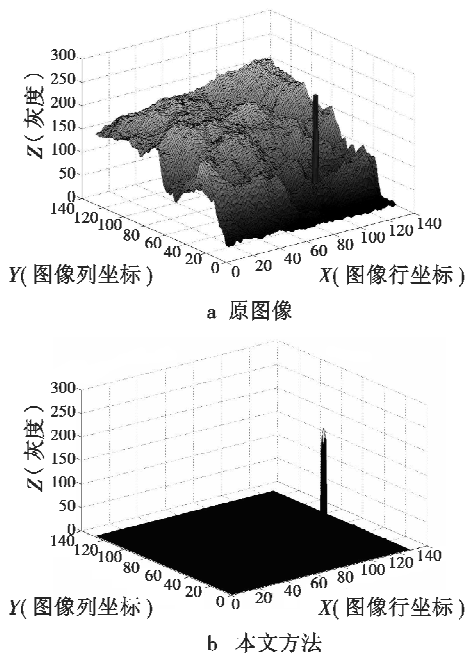


图5 空中背景抑制三维灰度图

Fig.5 3D gray level diagram of sky background suppression

对3组图像序列计算局部信噪比增益和背景抑制系数,统计平均值如表1、表2所示。本文算法的SNRG和BSF均达到最大,进一步说明其是一种有效的背景抑制方法。

表1 各个算法的局部信噪比增益  
Table 1 SNRG of different algorithms

SNRG	空域高通滤波	巴特沃斯高通滤波	Robison Guard滤波	本文方法
空中	1.24	2.96	3.4	3.77
海面	0.42	1.23	1.29	1.46
地面	0.72	1.14	1.39	1.48

表2 各个算法的背景抑制比  
Table 2 BSF of different algorithms

BSF	空域高通滤波	巴特沃斯高通滤波	Robison Guard滤波	本文方法
空中	1.87	2.53	9.34	12.86
海面	0.38	1.85	2.99	4.16
地面	0.49	1.37	2.82	3.68

### 5 结语

针对远距离红外弱小目标检测的复杂背景抑制问题,本文提出了一种空间域和小波域相结合的方法。该方法在空间域自适应结构元素灰度形态学顶帽变换对红外复杂背景进行初步抑制的基础上,将处理空间变换到小波域,构造高频方向系数的中心向量,计算各高频方向系数均值向量与中心向量的距离,形成高频综合像并实现红外复杂背景的最终抑制结果。针对典型红外复杂背景的实验结果表明,相对于经典算法,本文方法在目标信号增强和背景抑制效果方面均具有明显的优势。在此基础上,可考虑将处理空间变换到更具系数稀疏表达能力的轮廓波域,进一步提升算法对于红外复杂背景的抑制能力,为后续的目标检测打下良好基础。

### 参考文献

[1] 杨杰,杨磊. 基于红外背景复杂程度描述的小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 382-386. (YANG J, YANG L. Small target detection algorithm based on infrared background complex degree description[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 382-386.)

[2] 张翔,张建奇,秦翰林,等. 基于对偶树复小波变换的红外弱小目标背景抑制[J]. 光子学报, 2010, 39(9): 1672-1677. (ZHANG X, ZHANG J Q, QIN H L, et al. Dual-tree complex wavelet transform for infrared dim target background suppression[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(9): 1672-1677.)

[3] WEI Y, SHI Z L, YU H B. Wavelet analysis based detec-

(下转第45页)

2) 当采用多测距融合确定目标位置时,权系数矩阵的选择非常关键。在已知测量设备误差特性时,利用该特性来确定权系数矩阵可以获得较高的融合精度,并且算法实时性也略有提高。

3) 增加组网雷达的数量,无论新增雷达站测量精度是否比原有雷达站精度高,都可以有效提高融合后的精度。但在增加雷达数量的过程中,融合精度的提高并非线性的,即随着雷达站数量的增加,融合精度提高越来越慢,同时算法的实时性会有所下降。因此,在综合考虑精度和实时性要求时,组网雷达的数量并非越多越好,需要在精度和组网数量之间确定一个平衡。

利用本文提出的算法进行多侦察雷达组网数据融合时,由于只需要距离测元是可靠的,对方位角测元没有要求,因此,该算法在保证精度的同时有效降低了对组网设备的要求。该原理同样可以推广到利用光电经纬仪组网时的数据融合,由于光电经纬仪测元只有角度数据,因而无法采用传统加权平均的数据融合方法,而本文所提方法只需部分测元即可,因此,可有效解决光电经纬仪组网时的数据融合问题。如今,部分侦察雷达不仅测距精度非常高,测角的精度也比较高,还有部分侦察雷达在测距、测角之外同时测定目标运动的径向速度,那么,在融合过程中能否引入角度测元,甚至是速度测元呢?引入这些测元后,融合是否能够提高呢?提高的幅度有多大呢?对融合的实时性有没有影响呢?这些问题还有待进一步深入研究。

## 参考文献

- (上接第40页)
- tion algorithm for infrared image small target in background of sea and sky[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, 2003, 1:23-28.
- [4] VICTOR T T, PELI T, LEUNG M, et al. Morphology-based algorithm for point target detection in infrared backgrounds [C]//Proceedings of SPIE, Signal and Data Processing of Small Targets, 1993:2-11.
- [5] 臧传吉,李桂祥,王宇翔. 基于形态学方法的红外小目标检测[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(2):94-97. (ZANG C J, LI G X, WANG Y X. Infrared dim target detection using morphology-based method[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012, 26(2):94-97.)
- [6] 彭嘉雄,周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测[J]. 电子学报, 1999, 27(12):47-51. (PENG J X, ZHOU W L. Infrared background suppression for segmenting and detecting small target[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(12):47-51.)
- [7] 莫金花,郝润平,张艳宁,等. 全局-局部联合滤波的红外小目标背景抑制方法[J]. 中国电视学与图像分析, 2011, 16(3):223-231. (MO J H, XI R P, ZHANG Y N, et al. Global filter combined with local filter for infrared small target background suppression[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2011, 16(3):223-231.)
- [8] 陈炳文,王文伟,秦前清. aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(10):1252-1260. (CHEN B W, WANG W W, QIN Q Q. Infrared dim target detection in single image based on background suppression by aiNet [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(10):1252-1260.)
- [9] 吕雁,苏新主. 一种基于背景预测的红外杂波抑制新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(8):1271-1274. (LÜ Y, SU X Z. Novel method for IR image clutter suppression based on background prediction[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(8):1271-1274.)
- [1] 孙鹏,唐宏. 电子战武器装备发展现状与展望[J]. 电讯技术, 2008, 48(3):7-11. (SUN P, TANG H. Development status and prospect of EW weapons[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(3):7-11.)
- [2] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜. 多源信息融合[M]. 北京:清华大学出版社, 2006. (HAN C Z, ZHU H Y, DUAN Z S. Information fusion based on multisource[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2006.)
- [3] 秦源. 基于雷达和红外传感器的低空情报网中的信息融合[D]. 南京:南京理工大学, 2005. (QIN Y. Information fusion in low altitude information net based on radar and IR[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.)
- [4] 郭徽东,章新华. 用于多传感器最优融合的优化节点样条数据平滑方法[J]. 兵工学报, 2003, 24(3):385-388. (GUO H D, ZHANG X H. An optimal knots spline measurement smoothing method used in the optimal fusion of multi-sensor data [J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(3):385-388.)
- [5] 王炯琦,周海银,吴翊. 基于最优估计的数据融合理论[J]. 应用数学, 2007, 20(2):392-399. (WANG J Q, ZHOU H Y, WU Y. The theory of data fusion based on state optimal estimation[J]. Mathematica Applicata, 2007, 20(2):392-399.)