

基于时空域融合滤波的小目标检测算法

韦道知¹, 黄树彩¹, 夏训辉², 李炯¹

(1.空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051; 2.中国人民解放军驻3531厂军事代表室, 贵州 贵阳 550009)

摘要: 针对目前小目标检测存在的难点, 提出了一种基于时空域融合的小目标检测方法。该方法首先运用形态学 Top-hat 进行空域滤波, 将原图像中的大部分背景及杂波抑制, 时域上采用三帧差分方法增强目标。融合后对图像进行自适应阈值分割, 得到潜在目标点, 最后根据目标运动的连续性与规则性采用邻域判决法滤除虚警点, 检测出目标的运动轨迹。仿真结果显示该方法能较好检测出复杂背景下低信噪比运动小目标。

关键词: 时空域融合; 自适应阈值分割; Top-hat; 小目标检测

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)11-0905-04

Temporal-spatial Fusion Filtering Algorithm for Small Infrared Target Detection

WEI Dao-zhi¹, HUANG Shu-cai¹, XIA Xun-hui², LI Jiong¹

(1. school of air and missile defense of Air Force Engineering University, xi'an 710051, China;

2. The Chinese PLA Military Representative Office in No.3531 Factory, Guiyang 550009, China)

Abstract: For the problem in small target detection, a temporal-spatial fusion algorithm is proposed. This algorithm first suppresses background by morphologic top-hat transform filtering in spatial domain, then uses three sequential frames to enhance target. It uses adaptive threshold to segment the frame and gain the potential targets, finally detects the target and excludes the false alarm points based on the continuity and regularity of target's movement. The experimental results show that small target with low SNR can be detected in complex background with this algorithm.

Key words: temporal-spatial fusion, adaptive threshold segmenting, top-hat, small target detection

0 引言

红外精确制导武器与红外预警系统在现代战争中发挥着重大作用, 它们针对的通常是红外弱小目标。由于在成像时目标与背景是同时进入红外传感器的而且背景占据了绝大部分, 加上杂波噪声的干扰使得目标通常淹没在背景中。因此, 快速准确检测出弱小目标就尤为重要了。自20世纪60、70年代以来国内外众多学者就开展了有关红外弱小目标方面的研究至今已提出了许多具有实际意义的检测算法, 如胡柳^[1]提出了一种用三帧差分代替两帧差分的基于像素分析的目标检测方法, 可得到运动目标的精确位置。朱金标^[2]提出将基于学习的图像识别算法在进行学习和分类前对其进行降维, 可以达到较好的检测效果。迟健男等^[3]改进了传统小波算法的一些不足, 将反对

称双正交小波, 小波提升框架用于小目标检测问题中, 提高了检测的性能。徐韶华等^[4]也对传统的小波算法进行了改造, 提出了基于小波提升框架及小波能量的检测方法, 提高了目标检测的性能。H. E. Rauch等人^[5]提出通过一组时间上的高阶差分消除背景干扰, 得到目标的运动轨迹。虽然算法众多, 但是在红外弱小目标检测中仍然存在难点, 主要有目标成像面积小, 在探测器上只占一个或几个像素, 较难利用目标形状等信息进行模式识别。其次, 红外成像为热源成像, 目标及边界模糊不清, 且目标所处的背景是时刻变化的, 获取的红外图像目标信号弱, 信噪比低, 单纯利用单帧检测的技术很难获得目标位置。针对这些问题本文提出了一种基于时空域融合的目标检测方法。首先, 在空域上针对图像中的杂波背景较多的实际情况, 运用了形态学的滤波方法消除背景。其次,

收稿日期: 2014-04-02; 修订日期: 2014-06-06。

作者简介: 韦道知(1977-), 男, 河南淮阳人, 硕士研究生, 主要从事空间目标协同探测与信息智能处理方向的研究。

基金项目: 航空科学基金, 编号: 20130196004。

针对目标信噪比低信号弱的缺点，在时域上采用连续的三帧差分法进行目标的增强，将二者结合起来，从而提高了算法的性能。

1 空域滤波算法

1.1 红外图像模型

我们所获得的含有目标的红外图像 $f(x,y,k)$ 可以表述为：

$$f(x,y,k) = f_t(x,y,k) + f_b(x,y,k) + n(x,y,k)$$

式中： $f(x,y,k)$ 为第 k 帧像素点 (x,y) 处的像素值； $f_t(x,y,k)$ 为目标的像素值； $f_b(x,y,k)$ 为背景像素值； $n(x,y,k)$ 为噪声像素值。

通常背景图像是缓慢变化的，并且具有较强的相关性，它占据了图像中的低频部分。目标像素值一般较高，属于图像中的高频部分，噪声图像包括了传感器及电路产生的噪声总和，它与背景像素之间没有相关性，在图像中的分布也是随机的，且帧间噪声也不存在相关性。

1.2 形态学滤波

数学形态学滤波^[6-11] 图像处理的基本思想是用具有一定形态的结构元素去量度和提取图像中的对应形状以分析图像、了解图像的特征。

形态学中腐蚀和膨胀是最基本的操作。膨胀处理是在图像中为边界添加像素点，而腐蚀与膨胀为相逆的过程。添加的像素点数则与选取的结构元素大小和形式有关。开运算和闭运算则是基于膨胀和腐蚀建立起来的概念。开运算是指先对图像进行腐蚀再进行膨胀得到的结果。闭运算是先进行膨胀运算再进行腐蚀。如用 B 对 A 进行形态学开运算可定义为：

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$$

同理用 B 对 A 进行形态学闭运算可定义为：

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$$

在上面两式中。 \circ 、 \bullet 分别代表开运算与闭运算， \ominus 代表腐蚀运算， \oplus 代表膨胀运算。基于形态学的 Top-hat 变换滤波算子则为：

$$\text{Hat}(f) = f - (f \circ b)$$

式中： f 为红外图像； b 为选取的结构元素。

开运算后即可估计出背景被原始红外图像减去后即得到了目标信息，其中包含有噪声，其能在后续时域滤波的邻域判决中滤除。结构元素的选取对滤波结果影响较大必须根据先验信息合理选取。其次，结构元素必须不小于目标面积。在本文中选取 4×4 的方形模板对原图像进行变换处理。模板如下：

$$b = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

2 自适应分块二值分割

原始红外图像经 Top-hat 变换后背景得到较大的抑制，得到的图像信息较原始图少了很多，为了后续时域处理方便，在这里对变换后的图像采用自适应的分块阈值分割并二值化。首先将获得的原始红外图像分块，再在各小块图像内进行阈值分割得到二值化的图像。文中给出的原始红外图像信噪比在 2.5 左右，经统计经 Top-hat 变换后图像信噪比至少可提高到 4 以上，因此，在对各小块图像分割检测时，选取阈值 T 作为分割门限，并定义为：

$$T = u(f) + \alpha \cdot \text{sigm}(f)$$

式中： u 为图像均值； sigm 为图像方差； α 取值为 4。

3 时域差分滤波

本文研究的动目标运动速度为 0~2 个像素点，而目标的实际大小超过 2 个像素，因此采用一种图像差分的方法来检测目标提高检测概率。现在用的较多的是三帧差分方法^[10]，三帧差分方法如图 1 所示。

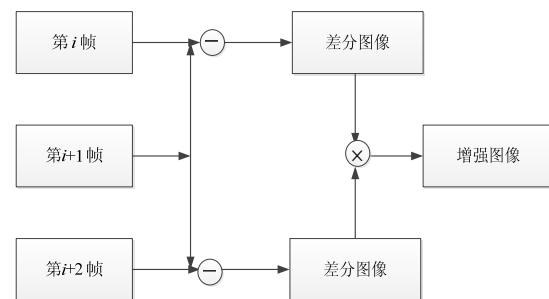


图 1 三帧差分法过程图

Fig.1 The course of three sequential frames

它的数学表达式即为：

$$d_i(x,y) = |f_i(x,y) - f_{i+1}(x,y)| \times |f_{i+1}(x,y) - f_{i+2}(x,y)|$$

式中： $d_i(x,y)$ 为第 i 帧差分图； $f_i(x,y)$ 为第 i 帧差分图。

在得到差分后的图像序列后与 Top-hat 空域滤波的对应图像序列融合即可在增强目标能量，提高信噪比，增大检测概率。融合法则为：

$$f_R(x,y) = \text{Hat}(f) \times d(x,y)$$

式中： $f_R(x,y)$ 为融合后的图像； $\text{Hat}(f)$ 为 Top-hat 变换后的图像； $d(x,y)$ 为时域差分滤波后的图像。

4 邻域判决法

目标在空间上运动时具有连续性同时因为一些限制因素它的运动还具有一定的规则性。对于二值化后的图像序列,由于相应的潜在目标点数有限,采用邻域判决法则是一种很好的检测运动目标的方法。邻域判决法即是对于潜在的目标点,采用 n 帧连续检测的方法若是在其相应的邻域内出现次数至少达到 m 次,则判定该潜在目标点是真实的目标点。邻域判决法^[12]的具体步骤如下:

①输入连续 n 帧红外图像,以第 1 帧作为当前帧并找出潜在目标点 T_i 并记录其位置。

②在紧接着的下帧图像中搜索,在潜在目标点 T_i 的一个邻域内寻找若有,则将其设为当前位置,若没有则跳过该帧,在后续帧继续搜索。

③当 n 帧搜索完毕时,如果潜在目标点 T_i 的邻域判决次数超过 $m(m < n)$ 次,则判定 T_i 为真实目标,否则舍弃。

④转入下一潜在目标点,重复上述步骤②与步骤③,直到所有潜在点搜索完毕。

⑤若在某帧中出现新的潜在目标点 T_i ,则以其首次出现的那帧为当前帧进行搜索。

⑥在所有潜在目标点搜索完毕时,构建被判决为目标点的运动轨迹,程序结束。

5 实验结果及分析

本文实验时采用连续的 8 帧带目标的红外图像,红外图像大小为 256×256 ,在图像中云层干扰非常强烈,小目标尺寸小于 3×3 ,目标运动轨迹近似为直线,目标的运动速度近似为每帧 $0 \sim 2$ 个像素,图像信噪

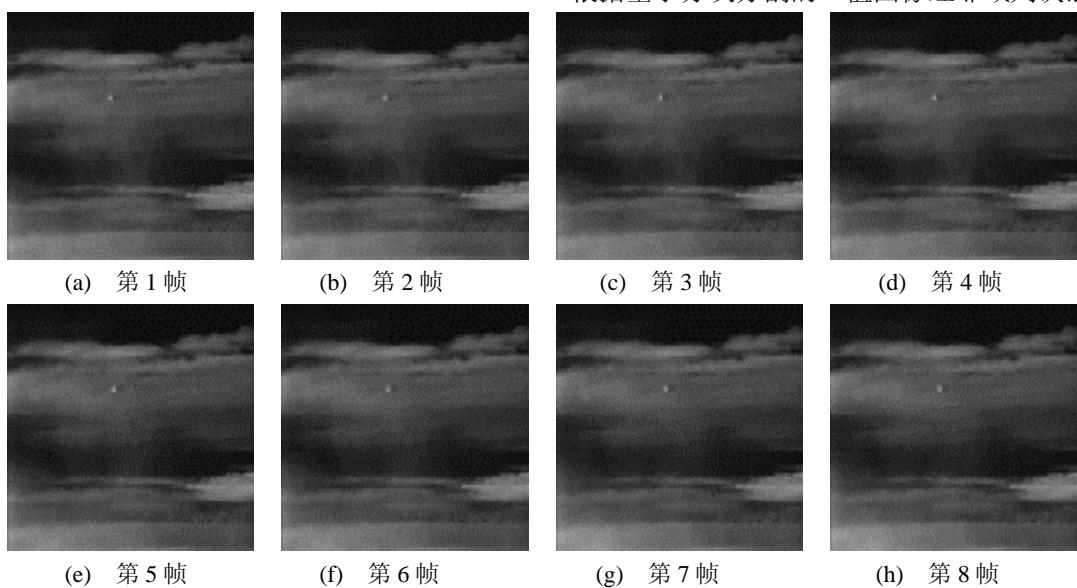


图 2 原始红外图像序列

比约为 2.5,在进行图像分块自适应阈值分割时将图像划分为 64 块大小为 32×32 的小图像块,为了视觉效果在处理后的图像中用白框将目标轨迹圈出。基于中值滤波的目标检测方法是对原始图像序列先采用中值滤波滤除背景及杂波噪声,再对滤波后的图像进行阈值分割,检测出目标。基于高通滤波的目标检测方法是结合原始图像的 bufferworth 高通滤波与 bufferworth 低通滤波结果进行的目标检测。原始 8 帧红外图像如图 2 所示。目标检测结果如图 3 所示。

图 3(a)图为第 2 帧红外图像经 Top-hat 变换消除背景后的滤波结果,此时的图像对比度降低了,目标灰度值也降低了,但是原始图像中的背景绝大部分都被抑制了,但是还存在一些背景,此时再与时域差分图融合即可再次消除背景。图 3(b)是前 3 帧图像的差分图。最后对融合图像进行阈值分割。本文采用了 2 种阈值分割法即分块自适应阈值分割与基于全局阈值分割法。图 3(c)为分块阈值分割处理结果图,图 3(d)为采用全局阈值分割处理的结果。从实验结果可以看出基于全局阈值分割的方法较分块分割方法处理后图像中虚警点更少,目标也检测出来了,但是相对于分块分割方法它检测出的目标出现缺失,只是检测出了很少一部分的目标甚至检测不出目标出现漏检,而分块分割方法则提高了检测概率很好的将目标检测出了。这说明基于图像分块的阈值分割方法能更好地检测出低信噪比下的运动目标。

图 4(a)、图 4(b)是对原始图像第 1 帧进行 bufferworth 低通滤波与高通滤波的融合检测结果图及对应的二值图,图 4(c)、图 4(d)是对原始第 1 帧图像进行中值滤波后的图像及其对应的二值图。图 5 是根据基于分块分割的二值图像经邻域判决法检测出的

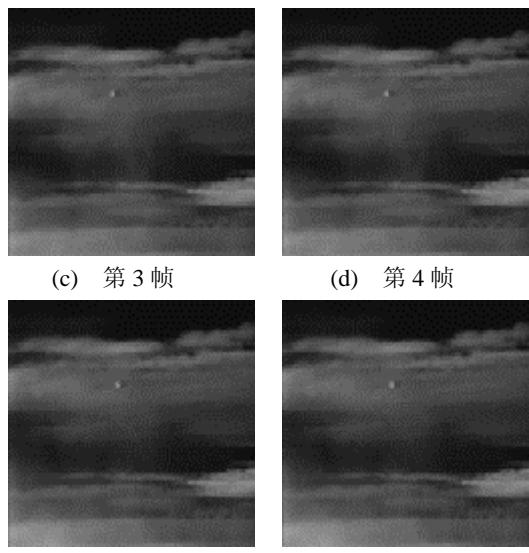
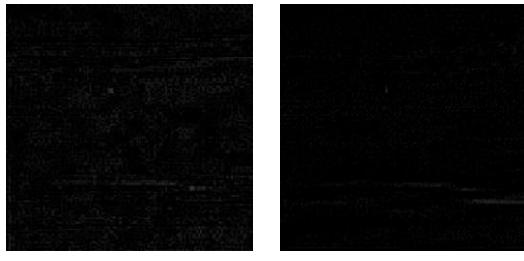
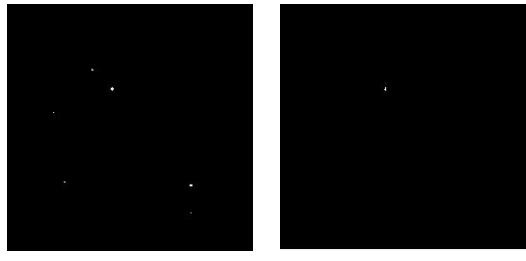


Fig.2 Primitive infrared figure array

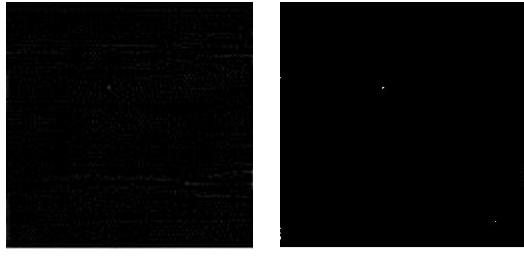


(a) Top-hat 滤波图 (b) 时域差分图
图3 目标检测结果



(c) 融合图分块分割 (d) 融合图全局分割

Fig.3 The result of target detection



(a) 高通滤波结果 (b) 高通滤波二值图
图4 原始图像第一帧处理检测图

目标轨迹图,从图中可以看出经邻域判决检测后,虚警点都被排除了,准确检测出了目标轨迹,同时将本文提出的算法与以往的两种典型目标检测算法进行了对比,结果如表1所示,证明了算法的有效性。

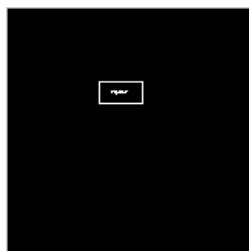


图5 目标轨迹图 Fig.5 The target's movement figure

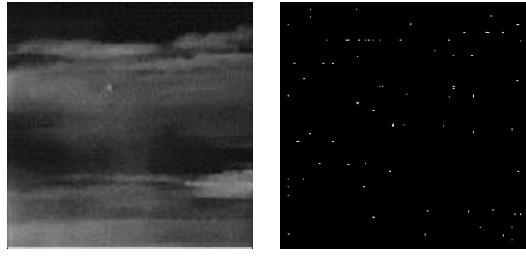
表1 本文检测方法与以往算法单帧处理效果对比

Table 1 The difference result of this article detection method and the former one

| 检测方法 | 检测概率 | 虚警概率 | 处理效率/s |
|-----------|------|-------|--------|
| 中值滤波的检测方法 | 100% | 0.85% | 0.32 |
| 高通滤波的检测方法 | 100% | 0.6% | 0.56 |
| 本文方法 | 100% | 0.2% | 0.19 |

6 结束语

本文提出的基于时空域融合的小目标检测算法充分考虑了目标的运动特性,相较于单从空域方面及单从时域方面进行目标检测提高了检测概率。文中还运用了分块阈值分割的方法,虽然分块阈值分割方法会分割出较多的虚警点,但是它进一步避免了目标的漏检,特别是针对复杂背景下的弱小目标检测,一些强背景及杂波的灰度值比目标灰度值更高,这时运用分块分割方法则能检测出目标。最后采用了邻域判决法,对分割后的二值图像序列进行目标的判别,滤除



(c) 中值滤波结果 (d) 中值滤波二值图

Fig.4 The primitive first-frame detection figure

了虚警点,形成了真实目标的运动轨迹。说明算法的有效性。

参考文献:

- [1] 胡柳. 红外图像序列中运动目标的检测与跟踪方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006: 2-3.
- [2] 朱金标. 低信噪比红外图像弱小目标检测研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [3] 迟健男, 张朝晖, 王东署, 等. 反对称双正交小波在红外-图像小目标检测中的应用[J]. 宇航学报, 2007, **28**(5): 1253-1257.
- [4] 徐韶华, 李红. 基于小波提升框架及小波能量的红外弱小目标检测方法[J]. 红外技术, 2006, **28**(11): 669-672.
- [5] Rauch H E, Fliterman W I, Kemmer D B. Background suppression and tracking with a staring mosaic sensor[J]. *Modern Utilization of Infrared Technology*, 1979: 19-29.
- [6] 潘鸣, 裴云天, 吴贵臣. 强杂波背景下高空红外运动点目标检测[J]. 电波科学学报, 2004, **19**(6): 757-760.
- [7] 汪清波, 张兴周, 项学智. 基于时空域融合的红外弱小目标检测新方法[J]. 弹箭与制导学报. 2008, **28**(1): 234-240.
- [8] 孙瑾秋, 张艳宁, 姜磊, 等. 基于时空域融合滤波的弱小运动目标检测算法[J]. 机械科学与技术. 2009, **28**(1): 20-24.
- [9] 胡涛涛, 樊祥, 马东辉, 等. 基于时空域融合的红外弱小目标检测算法[J]. 弹箭与制导学报. 2011, **31**(2): 225-227.
- [10] 王卫华, 牛照东, 陈曾平. 基于时空域融合滤波的红外运动小目标检测算法[J]. 红外与激光工程. 2005, **34**(6): 714-718.
- [11] 罗有敢, 杨德贵, 庄钊文. 时空域滤波方法在红外弱小目标检测系统中的应用[J]. 红外与激光工程. 2010, **39**(3): 571-575.
- [12] 王莹莹. 复杂背景条件下红外目标检测算法研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2011.