

文章编号: 1672-8785(2017)01-0001-05

天基微弱运动点目标检测研究综述

吕凭乐^{1,2} 赵丹新^{1,3} 孙胜利¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;

2. 中国科学院大学, 北京 100049 ;

3. 上海科学技术大学, 上海 200120)

摘 要: 近几十年来, 针对复杂背景下红外图像序列的天基微弱运动点目标探测问题备受关注。该问题对于空间监视系统、预警系统以及导弹跟踪系统等而言十分重要。受各方面的影响, 天基微弱点目标检测、跟踪和识别研究仍然面临着很多挑战。仪器抖动和平台运动均会造成目标定位偏差。受制于观测距离和天基成像环境, 目标往往会淹没在背景杂波或噪声之中。因此, 如何在低信杂噪比的情况下快速、准确地探测和识别运动点目标, 并满足检测率和虚警率指标, 是相关领域亟待解决的问题。对近年来国内外相关领域的研究进行了分类和总结, 以期在此基础上寻求新的探索 and 发现。

关键词: 红外图像; 运动点目标; 目标检测; 轨迹提取; 预处理; 多帧处理

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.01.001

Overview of Space Weak Moving Point Target Detection

LV Ping-yue^{1,2}, ZHAO Dan-xin^{1,3}, SUN Sheng-li¹

(1. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *ShanghaiTech University, Shanghai 200120, China)*

Abstract: In recent years, research on detection of space weak moving point targets in infrared image sequences under complex background has attracted much attention. This is of most significance to space surveillance systems, early warning systems and missile tracking systems. For various reasons, the detection, tracking and recognition of space-based dim point targets still face many challenges. Both instrument jitter and platform motion may cause the target positioning to deviate. Because of observation distance and space-based imaging environment, targets may be often submerged in background noise or other kinds of noise. Therefore, how to detect and identify moving targets quickly and accurately in low SNR environment and meet the indexes of detection rate and false alarm rate is the problem to be solved urgently in related fields. The research in related fields at home and abroad in recent years is classified and summarized so as to seek for new exploration and discovery on this basis.

Key words: infrared image; moving point target; target detection; trajectory extraction; preprocessing; multi-frame detection

收稿日期: 2016-10-31

作者简介: 吕凭乐 (1993-), 女, 吉林公主岭人, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理以及天基微弱信号与信息处理。E-mail: lvpingyue2010@163.com

0 引言

天基微弱运动点目标探测一直是空天领域研究中的热点问题之一。由于成像距离较远,点目标在图像中往往呈现微弱点状,没有轮廓、纹理和形状等特征;同时,由于天基成像环境较为恶劣,背景杂波影响较大,外加可能会受到云层、波浪等起伏的影响,捕获到的图像中的目标极其微弱,因此对天基运动点目标的探测难度很大。近年来也涌现出了很多关于这方面的研究工作。本文对近二十年来国内外的研究成果进行汇总和综述,旨在为本领域的研究人员提供参考。首先,建立复杂背景下的弱点目标模型;然后对天基弱点动目标研究现状进行简单阐述,并介绍经典的预处理方法;接着对性能优良的检测与跟踪算法进行说明;最后对全文进行总结,并预测此领域的未来发展方向。

1 复杂背景下的弱点目标模型及假设

为了保证后面阐述的有效性,这里对天基弱点目标作一个简要说明并建立相关模型。为避免混淆,本文中的天基目标是指由星载红外探测器所感知到的空天飞行目标。对于含有点目标的红外图像,一般建立模型为

$$f(i, j) = f_T(i, j) + f_B(i, j) + n(i, j) \quad (1)$$

式中, $f(i, j)$ 为成像系统像面上某一像元的总信号强度; $f_T(i, j)$ 为真实目标的信号强度; $f_B(i, j)$ 为杂波背景强度,杂波包括由起伏的云层以及探测器工作的不均匀性所带来的干扰; $n(i, j)$ 为噪声信号,可以是图像采集过程中所引入的各种噪声,包括由电路本身工作引起的噪声、外部的干扰信号、由于成像平台移动造成的抖动噪声以及几种噪声的叠加。

2 研究现状概述

当前关于天基红外图像序列中弱点目标检测关键技术的研究方法主要集中在图像预处理、目标判定与轨迹提取两方面。基于单帧的图像预处理方法以滤波、取阈值等算法为主导,

主要包括基于时间空间域的滤波、基于频率域的滤波(如小波分解、线性与非线性滤波相结合等众多滤波处理方法以及形态学操作)、基于灰度级的特性操作等背景抑制方法。后者则是基于多帧关联,利用序列中点目标的运动特性并结合灰度特性、辐射特性等综合因素,针对目标运动的规律性作目标能量积累,同时将帧间不存在运动特性关联的空间碎片、恒星以及设备不稳定性所带来的盲元噪声滤除,从而大幅降低虚警率。虽然处理速度较慢,但这是提取运动点目标的必要环节。该方法大致可以分为跟踪前检测(Detect Before Track, DBT)和检测前跟踪(Track Before Detect, TBD)两类。

3 红外图像的预处理

当前预处理一般还是沿用比较经典的算法。时间滤波器算法利用的是连续帧观测图像之间的强相关性。然而这些算法执行性能所依赖的前提是静止的图像背景,或者是在积分周期内,背景的运动和变化相对于整个观察视野的变化较小。这些算法中最简单的实例就是取图像的帧差。1996年, Silverman J 等人提出了一种在云层干扰下基于时间滤波器跟踪微弱缓慢运动点目标轨迹的方法^[1]。在实际应用中,通过按顺序组合自适应离散滤波和线性滤波,可以有效滤除近似静止的背景。由于实际的星载观测很少有背景近似静止的情况,所以简单的时间滤波器算法的适用范围较小。

基于频率域的滤波算法主要是将灰度空间的图像转换到频率域,然后再根据不同的截止频率对信号进行滤波处理。然而一旦截止频率确定之后,传统的理想高通滤波器、高斯高通滤波器和 Butterworth 高通滤波器等转换函数便不能改变,进而不具有自适应性。因此现在的研究大多集中于自适应阈值选取策略及其优化。例如, Yang L 等人提出了一种自适应 Butterworth 高通滤波器^[2]; 彭嘉雄等人提出了一种利用基于直方图峰值的自适应门限背景抑制的实时目标检测方法^[3]; Hilliard C I 利用低通 IIR 滤波器

对杂波进行了预测^[4], 这适用于多目标情况; Reed I 等人利用频域空间中的最优三维线性匹配滤波技术, 在已知速度并添加背景杂波和噪声的图像序列中检测了运动点目标^[5]; Porat B 等人提出了一种在频域进行弱目标多帧检测和估计的方法^[6]。

与频域操作对图像某些频率域的成分进行抑制不同, 基于空域的红外图像滤波处理是对图像的直接操作, 或者是对直方图的操作。该方法直接从观测图像中或者从不包含目标的相关图像中评估背景杂波信号。最基本的是采用模板与原图像卷积或相关的方式。常用的空间滤波算法主要包括均值滤波、中值滤波和极大极小值滤波等算法, 或者是依据选取的模板进行细化。由于运动点目标相较于其他图像中目标的特殊性, 以往的空间滤波算法常常无法满足检测要求^[7-8], 因此相关研究提出了大量改进算法以适应抑制背景或者去除噪声的特殊要求。例如, Arce G 提出了一种加权中值滤波方法^[7]; 林长青等人提出了一种基于空域非线性模板滤波的自适应门限背景抑制方法^[9]; Wang X 提出了一种自适应多阶段中值滤波方法^[10]。由于运动目标在空间上的状态是具有关联性的, 所以也有一部分滤波算法是时间和空间滤波操作的结合体。例如, Pei J H 等人提出了一种基于空间-时间双向滤波的红外点目标检测方法^[11]; Yang Q 提出了一种基于快速混合中值滤波器的点目标增强方法^[12]。

除了传统的基于时频空域的操作之外, 人们还提出了小波变换、三维时空滤波、四维时空滤波以及多光谱滤波等, 而且还有一些其他滤波器及其相应的混合滤波操作, 包括用于背景抑制的如形态学操作, 用于状态估计的位置预测的如贝叶斯滤波、卡尔曼滤波以及粒子滤波等。Che H 等人提出了一种能够对面阵红外图像中的点目标进行检测的方法, 即由一种圆形形态学滤波器和模糊融合构成^[13]; Sun Y Q 等人提出了一种基于小波变换的背景抑制方法^[14]; Zhao F 等人利用基于核相似度的两种滤波器的结合算法对背景进行了预测^[15]; Mazzu A

等人利用混合滤波处理对红外视频序列中的微弱点目标进行了检测和追踪^[16]。

4 目标检测和轨迹提取

目前, 国内主要有国防科学技术大学 ATR 实验室等一批国家重点实验室参与到这一关键技术的研究之中; 国外则主要是一些军工企业, 比如美国波音公司和雷神公司均投入巨资开展了相关研究并将其装配到了现代化设备中。Reed I 等人将三维匹配滤波器融入了二维空间滤波器和一维速度滤波器^[5]; Singer P F 在文献^[17]中也提及了三维匹配滤波技术, 并在较低的信杂比条件下实现了 ROC 性能的最大化; Sworder D D 等人提出了一种图像累积估计方法^[18]; 粒子滤波则较多用于状态估计方面^[19]。

基于多帧的处理方法主要分为 DBT 算法和 TBD 算法两种。其中, DBT 算法先是预搜索图像帧序列, 预判并选择可能的目标点集, 然后以目标运动轨迹的连续性和一致性作为依据对其进行判定, 保留符合预设条件的目标轨迹, 而排除不满足条件的轨迹, 最终进行目标识别。该算法具有运行时间短、复杂度低以及便于实时处理等特点, 较为适用于信杂噪比较高的情况。TBD 算法则假设目标的运动是连续的, 并根据目标现有的轨迹信息预测下一帧的位置。由于连续运动会产生平滑轨迹, 所以沿着预测轨迹对每一个候选点目标进行能量积累, 然后按照一定的判决条件对能量积累后的轨迹进行判定, 以实现目标识别。该算法的运行性能较好, 也较适用于信杂噪比较低的情况。但是由于图像帧序列中的点目标可能不止一个, 或者由于噪声较大、盲元较多, 可能轨迹的搜索复杂度会成几何级增加, 从而难以扩展到实时系统中。

4.1 DBT 算法

DBT 算法的策略是遵循单帧检测和多帧确认的原则。在信噪比较高的环境中, 该算法的检测性能优良。与目标的时间特征相比, DBT 算法更加注重目标的空间特性。图 1 为 DBT 算法的流程图。

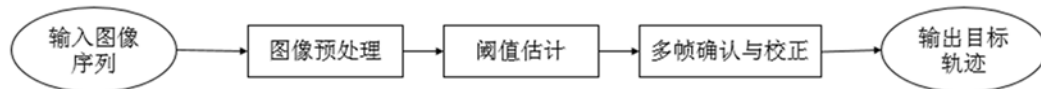


图 1 DBT 算法的流程图

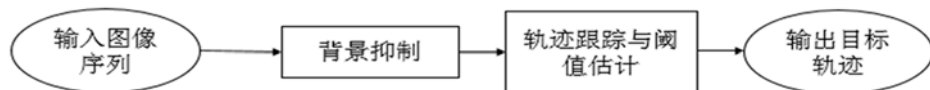


图 2 TBD 算法的流程图

正如前文所述, DBT 算法一般适用于信噪比较高的情况。一旦信噪比低于检测的极限阈值, 虚警率便会增大, 从而妨碍进一步的轨迹跟踪或者影响目标识别的性能。不过 DBT 算法的高效性使其能够达到实时处理的要求。因此, 在红外图像序列的成像效果较为理想、质量较高、背景比较清晰并且没有过多杂波干扰的情况下, DBT 算法还是很适用的。

用 DBT 算法可以获得一系列观测结果, 其中大部分都是虚假的检测结果。通过将其与已有轨迹进行比较或者以一定概率创建新的轨迹, 便能够筛选出被确认为目标轨迹的有效数据^[20]。根据这种算法进行建模, 若要通过相关操作排除掉所有潜在的错误信息是十分困难的。因此, 为了简化问题, 大多数研究都是将确认出真实目标所用的时间作为主要的性能指标。

Liang S 等人提出了一种基于差异权重信息熵和局部二值模式的目标检测方法^[21]; 杨擎宇等人提出了一种基于图像差分和聚类的运动目标检测与跟踪算法^[22]; 李正周等人利用基于数学形态学的高通滤波器对序列图像中的运动点目标进行了快速检测与跟踪^[23]。除了以上方法之外, 还有较多在低信噪比条件下对运动点目标先检测再跟踪的算法, 比如 Otsu 聚类准则分割^[24]、自适应全局阈值方法^[25]和局部阈值方法^[26]等均属于 DBT 范畴。

4.2 TBD 算法

TBD 算法在处理过程中不仅要用到空间相关信息, 而且由于其基于多帧处理的特性, 必然也会用到时间相关信息。在目标检测阶段, 该算法会持续追踪一个以上的候选轨迹, 并且为每一个候选目标轨迹估计一个后验概率; 在处理末

尾会将其与一个特定阈值进行对比。如果超过这个预定阈值, 那么就将其判定为目标轨迹。TBD 算法的复杂性决定了其需要更多的计算和存储空间。但是在低信噪比和低信杂比的情况下, 该算法的检测性能十分出色。图 2 为 TBD 算法的流程图。

Zhang F 等人提出了一种基于连续虚警概率的轨迹跟踪方法^[27]。该方法对背景或噪声的变化不敏感, 很适合在速度失配的情况下对目标进行实时检测和跟踪。由 He L S 等人提出的 TBD 算法^[28]一方面基于动态规划进行能量积累, 另一方面基于多阶段假设检验进行阈值调整。Zhang H Y 等人提出了一种基于迭代密度聚类 and SURF 描述子的多种微弱小目标检测算法^[29]。该算法对目标轨迹的提取被转换成了一个寻找密度峰值的聚类过程。Ye Y Z 等人提出了一种基于空域的自适应降噪算法以及一种基于活跃程度估计的小目标检测方法^[30]。Pan H B 等人基于多帧积累和背景抑制, 提出了一种简便高效的适用于信噪比小于 3 的情况下的小目标检测方法^[31]。Wang J P 等人提出了一种将能量积累和形态学顶帽操作相结合的方法^[32]。除此之外, 还有许多研究人员提出了很多性能良好、检测效果优异的 TBD 算法。例如, Wu B 等人提出了一种基于三次累积的点目标检测算法^[33]; Zuo Z G 等人提出了一种基于马尔科夫随机场的方法^[34]; Zhang Y 等人提出了一种基于灰度级融合以及关联成分分析的方法^[35]; Hamdulla A 等人提出了一种将模糊聚类与粒子滤波相结合的方法^[36]。

纵观当下, 基于 TBD 的处理算法大多是在时间分辨率与处理性能之间寻求折中, 而且其

处理效果往往都是相对而言的。在大部分情况下, 针对特定的红外图像, 这些算法的处理性能较佳, 但往往不具有普适性。因此在现有的基础上, 基于 TBD 的天基弱小目标检测与识别算法研究还是具有很大的发展空间的。

5 总结与展望

本文对天基微弱运动点目标的相关研究以及国内外发展现状进行了梳理, 并从预处理和目标检测轨迹提取两方面对红外图像序列弱点目标探测算法进行了介绍和说明。对于经典处理方法以及性能优良的新兴处理方法, 本文均给出了核心思想和相关阐述, 并且已在参考文献中一一列明, 以便于读者研究和引用。天基微弱运动点目标研究不仅在空间对抗、导弹跟踪和预警卫星等军事领域具有重大意义, 而且在计算机视觉、智能控制、人机交互、视觉导航等民用领域也有着很大的发展空间, 并大有普及之势。当前或者在未来相当长的一段时间里, 该领域的算法研究均会集中在以下几个方面: (1) 检测准确程度和实时检测水平等性能指标的提升; (2) 模拟人脑的智能算法在点目标识别中的应用; (3) 基于多谱段、多传感器融合等的多特征融合检测技术; (4) 星上实时探测技术。

参考文献

- [1] Silverman J, Mooney M J, Caefer E C. Temporal Filters for Tracking Weak Slow Point Targets in Evolving Cloud Clutter [J]. *Infrared Physics and Technology*, 1996, **37**(6): 695-710.
- [2] Yang L, Yang J, Yang K. Adaptive Detection for Infrared Small Target under Sea-sky Complex Background [J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(17): 1083-1085.
- [3] 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.
- [4] Hilliard C I. Selection of a Clutter Rejection Algorithm for Real-time Target Detection from an Airborne Platform [C]. *SPIE*, 2000, **4048**: 74-84.
- [5] Reed I, Gagliardi R, Stotts L. Optical Moving Target Detection with 3-D Matched Filtering [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, **24**(4): 327-336.
- [6] Porat B, Friedlander B. A Frequency Domain Approach to Multi-frame Detection and Estimation of Dim Targets [C]. Dallas: IEEE International Conference on ICASSP, 1987.
- [7] Arce G. A General Weighted Median Filters Structure Admitting Negative Weights [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, **46**(12): 3195-3205.
- [8] Hoyos S, Li Y, Bacca J, et al. Weighted Median Filters Admitting Complex-valued Weights and Their Optimization [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, **52**(10): 2776-2787.
- [9] 林长青, 孙胜利, 陈桂林. 复杂背景下含点目标单帧红外图像的预处理 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(9): 900-903.
- [10] Wang X. Adaptive Multistage Median Filter [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1992, **40**(10): 543-545.
- [11] Pei J H, Lu Z Q, Xie W X. A Method for IR Point Target Detection Based on Spatial-temporal Bilateral Filter [J]. *International Conference on Pattern Recognition*, 2006, **3**(3): 846-849.
- [12] Yang Q. A Hybrid Median Filter for Enhancing Dim Small Point Target and Its Fast Implementation [C]. Uttar Pradesh: IEEE International Conference on Multimedia and Signal Processing, 2011.
- [13] Che H, Sun L H. A Novel Method for Plane Array Infrared Image to Detect Point Target [C]. Xi'an: International Conference on Information Assurance and Security, 2009.
- [14] Sun Y Q, Tian J W, Liu J. Background Suppression Based on Wavelet Transformation to Detect Infrared Target [C]. Guangzhou: Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetic, 2005.
- [15] Zhang F, Zhang Z Y, Lu H Z. Dim Point Target Detection Based on Novel Complex Background Suppression [C]. Xiamen: IEEE International Conference on Computer Vision in Remote Sensing, 2012.
- [16] Mazzu A, Chiappino S, Marcenaro L, et al. A Switching Fusion Filter for Dim Point Target Tracking in Infra-red Video Sequences [C]. Salamanca: IEEE International Conference on Information Fusion, 2014.
- [17] Singer P F. Analysis and Optimization of a Class of Nonlinear Detection Filters [C]. *SPIE*, 2001, **4473**: 86-95.
- [18] Sworder D D, Singer P F, Doria D, et al. Image-enhanced Estimation Methods [J]. *Proceedings of IEEE*, 1993, **81**(6): 797-814.
- [19] Tursun D, Xiang G Y, Hamdulla A. A Particle Filter Based Algorithm for State Estimation of Dim Moving Point Target in IR Image Sequence [J]. *Journal of Multimedia*, 2009, **4**(6): 371-378.

(下转第11页)