

目标跨像元展宽“分裂”退化模型与检测研究

何青叶^{1,2}, 林长青^{1*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用大规模红外探测器的遥感仪器对以恒星为主的点目标成像时, 受点目标跨像元效应、探测器读出带宽不足等影响, 目标信号展宽, 在多抽头间隔采样下出现“分裂点”现象, 空间红外遥感仪器定位精度、目标辨识能力下降。针对此问题, 本文构建了点目标“分裂”退化模型, 并根据分裂点之间的强相关性, 设计了预检测-能量维度迭代-模型更新-后检测的目标检测流程, 通过形态学滤波与多假设关联跟踪对“分裂点”目标各观测进行独立跟踪, 获取“分裂点”统计信息。然后利用已知恒星成像的质心校正退化模型并映射到检测图像, 修正目标质心。测试结果表明, 该方法能有效区分多目标和“分裂点”造成的假目标, 平均定位精度由 0.5 像元以上提升到 0.15 像元内。

关键词: “分裂点”目标; 退化模型; 多假设关联跟踪; 质心校正

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

Research on target cross-pixel broadening 'splitting' degradation model and target detection

HE Qing-Ye^{1,2}, LIN Chang-Qing^{1*}

(1. Key Laboratory of Intelligent Perception, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The target signal is broadened due to the cross-pixel effect of the point target and the insufficient readout bandwidth of the detector when using the remote sensing instrument with large-scale infrared detectors to image the point target dominated by stars. After the equal interval sampling and data arrangement, the target image presents a "splitting point" state, which reduces the positioning accuracy and target recognition ability of spatial infrared remote sensing instruments. Aiming at this problem, a "splitting point" targets degradation model is constructed in this paper. According to the strong correlation between splitting points, a target detection process of pre-detection - energy dimension iteration - model updating - post-detection is designed. Through morphological filtering and the multiple hypotheses tracking technique, track the observations of the 'split point' target independently and obtain the statistical information of "split point". Then correct the constructed model with known star centroid and map it into the current detection image to correct the target centroid. The test results show that the method can effectively distinguish the false target caused by 'split point' and multi-target, and the positioning accuracy is improved from more than 0.5 pixels to less than 0.15 pixels.

Key words: "split point" target, degradation model, multiple hypotheses tracking, centroid correction

引言

在机载红外探测、卫星遥感等领域, 探测器往

往采用多抽头交替间隔读出方式数倍提升成像帧频, 以满足高时间分辨率的探测需求。但由于读出电路带宽不足, 光学系统点扩散以及受点目标跨像

收稿日期: 2022-10-14, 修回日期: 2022-11-17

Received date: 2022-10-14, revised date: 2022-11-17

基金项目: 上海市人才发展资金(2019043); 中国科学院青年创新促进会(2014214)。

Foundation items: Supported by Shanghai Talent Development Fund (2019043) and Chinese Academy of Sciences Youth Innovation Promotion Association (2014214)

作者简介 (Biography): 何青叶 (1998—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事红外弱小目标检测方面研究。E-mail: qingyeh2021@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xmuleq@126.com

元效应的影响,在对以恒星为主的点目标成像时,目标信号展宽,多抽头间隔读出以及固定像元排列下,目标呈现“分裂点”现象。APD以其高增益、快响应的优势,在微弱信号探测与高帧频探测器中发挥重要作用^[1],但APD探测器高增益响应与高频读取出下,“分裂点”现象更加突出,使得红外遥感仪器定位精度、目标辨识能力下降。

传统红外弱小目标检测的思路主要分为两大类:基于单帧图像的检测与基于序列图像进行检测。单帧处理目标检测方法主要包括各类空域滤波算法,如二维最小均方(Two-Dimensional Least Mean Square, TDLMS)算法^[2]、双边滤波^[3]、形态学滤波^[4-5]等,通过背景估计与差分来突出目标;各类频域滤波算法,如巴特沃斯高通滤波器^[6]、小波变换^[7]等将灰度图像转换到频率域,设计相应的滤波器滤除低频背景来分离目标;滤波类算法可以较好地去除平滑背景,但当背景复杂,包含较多结构性背景边缘时,滤波效果较差,虚警率较高。基于视觉显著性算法是近年来鲁棒性评价较好的一类弱小目标检测算法,利用目标类高斯分布特性以及背景一致性特征,引入特定的局部对比度测度来构造显著性映射^[8-11],检测效果较优,可以满足大部分检测系统的需求。但针对APD探测器中多抽头读出方式导致的“分裂点”目标形态,其不再满足类高斯灰度分布,计算显著性图谱所用窗口失效,容易漏检分裂的“尾巴”,从而影响目标定位精度。除此之外,仅依托单帧获取的空域信息,无法兼顾“分裂点”目标高检测概率、低虚警率的要求,往往需要进一步结合时域信息,通过序列图像数据关联,依据轨迹运动先验信息,以实现“分裂点”目标的有效跟踪检测。

“分裂点”目标在单帧扫描中产生多个观测,通过帧间数据关联,可实现“分裂点”目标各组分的独立跟踪。常用的数据关联多目标跟踪技术有全局

最近邻关联(Global Nearest Neighbor, GNN)^[12]、联合概率数据关联(Probability Data Association, PDA)^[13]与多假设跟踪算法(Multiple Hypothesis Tracking, MHT)^[14-15]。其中,全局最近邻算法采用贪婪算法的思维,仅保留使总关联代价最小的唯一最优关联,忽略最优外的其他关联组合,当多个较优关联组合概率相差不大时,关联正确率较低。联合概率数据关联算法综合考虑关联门内的多个量测,采用量测—轨迹集合的联合概率加权来更新轨迹状态,一定程度上避免虚警杂波或观测误差造成的轨迹偏移,但加权融合的方式,带来关联结果的不准确。以上两种算法均为单次扫描型方法,当前帧的轨迹关联只取决于上一帧的关联决策与当前帧的观测数据,在各关联目标间邻近时,容易发生轨迹误跟踪的情况^[16]。多假设跟踪联合多次扫描的观测数据,延迟判决多轨迹的数据关联,可以有效减少邻近轨迹交错现象。

本文通过单帧形态学滤波处理与序列图像多假设跟踪,将“分裂点”目标各组分视作独立目标,进行轨迹关联跟踪,利用目标的运动特性,初步筛选目标轨迹,进一步根据“分裂点”之间的强相关性,实现“分裂点”目标与多目标的判别。针对目标拖尾分裂导致的质心偏移,构建了点目标“分裂”退化模型,预设模型参数,并利用已知恒星成像信息,进行模型修正,并将修正好的模型应用于检测图像,测试结果表明定位精度提升到亚像元。

1 “分裂点”目标形成原因

红外相机由光学和支撑结构、摆扫机构、红外探测器组件、信息获取电子学组件等构成,红外探测器采用2 000元长线条红外探测器,由四个512×8的子模块构成,每个子模块设置四个抽头进行像元读出,信息流图如图1所示:

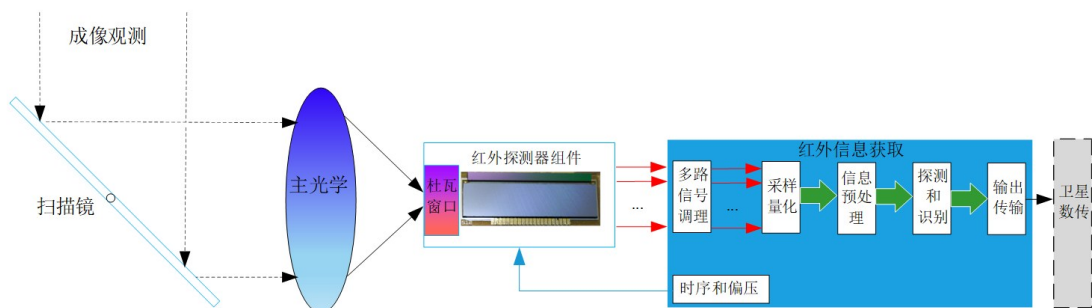


图1 红外相机信号流图

Fig. 1 Infrared camera signal flow diagram

探测器光敏元在物理空间上连续排列,当光敏元阵列上接收到光信号后,光电转化效应产生电信号,并由A/B/C/D四个抽头交替间隔读出,后经信息获取电路放大、滤波、采样、A/D模数转换,得到四组数据,分别对应A/B/C/D四个抽头,每组数据内部不连续,组内相邻两个数据在物理空间上间隔四个像元,其读出逻辑如图2所示。

假定此时有一个目标信号跨像元,落在“1”和“2”像元间,理想的响应为“1”和“2”像元上输出两个矩形脉冲,其余像元响应为零。如图3所示,但由于读出电路带宽、驱动能力、信息获取电子学带宽的原因,输出信号经过A/B/C/D抽头后,无法输出理想矩形脉冲,而是有一定“拖尾”的信号。此时,“1”像元的信号时间宽度已经超过了像元的读出时间,经过等间隔A/D采样后,A路的采样数据里,有两个亮信号,第一个信号对应探测器“1”像元的响应,而第二个信号在物理空间上对应的是探测器“5”像元的响应。原本响应为零的“5”像元,由于“1”像元信号拖尾能量采样与数据重排,出现亮信号。整个图像呈现“分裂”点现象。

2 “分裂点”目标检测

在读出带宽不足,跨像元效应等因素影响下,目标呈现“分裂点”状态,如图4所示,像元读出方向自右向左,S1、S2所在位置信号响应几乎为零,但在M处的高亮信号经展宽、采样、数据等间隔排列后,

S1、S2呈现较亮灰度。

“分裂点”目标在单帧图像目标检测中产生多个观测,且各观测之间间隔较小,传统单帧扫描型算法容易发生轨迹关联交错情况,而MHT综合了多扫描时刻关联假设进行概率比较,延迟判决N时刻前的轨迹关联,准确率较高。其实现主要包括以下几个过程:

(1)轨迹树构建与更新。在每次扫描接收到新的观测时,考虑观测数据源于新生目标或已有航迹。对落入已有假设轨迹门控内的观测执行轨迹关联,以当前假设轨迹最后一个点作为共同观测根节点进行轨迹树延伸;对不落入任何轨迹门控内的观测,执行轨迹起始。同时,在每次关联生成一个虚拟分支,考虑目标漏检可能,当轨迹假设连续多帧漏检时,删除当前轨迹假设分支。

(2)计算轨迹得分。MHT为每一个假设轨迹,赋予一个评分,其描述了当前假设轨迹为真实轨迹的可信度。对于起始轨迹,其轨迹得分初始化为:

$$S(T_i^1) = \ln\left(\frac{\lambda_{new}}{\lambda_F}\right) \quad (1)$$

λ_{new} 和 λ_F 分别表示新杂波密度和虚警杂波密度。

轨迹 T_i^k 在第k时刻的轨迹得分可通过下式递推求得:

$$S(T_i^k) = S(T_i^{k-1}) + \Delta S(T_i^k) \quad (2)$$

得分增量 $\Delta S(T_i^k)$ 定义为:

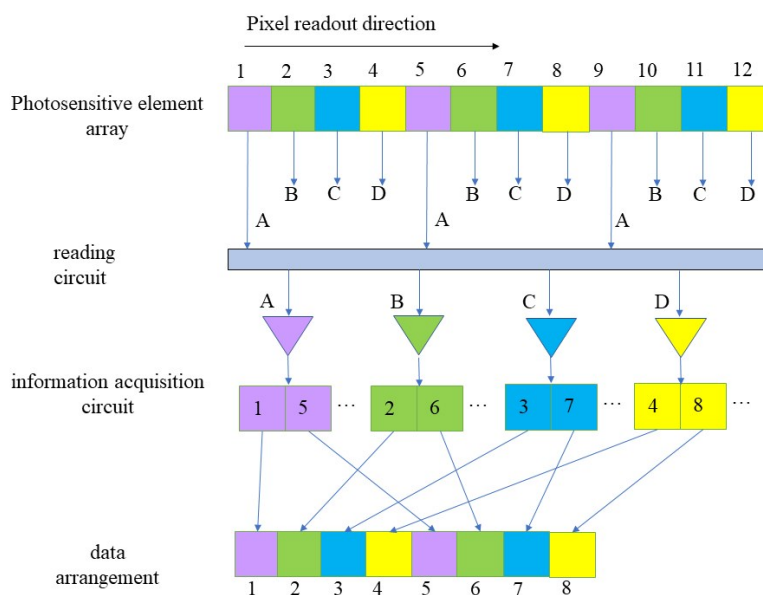


图2 多抽头读出逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of multi-tap readout

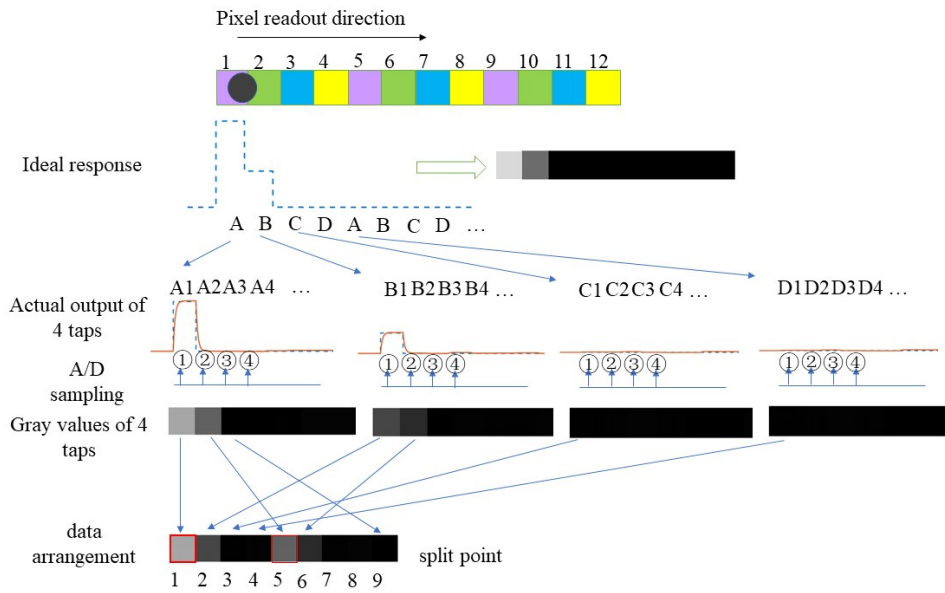


图3 “分裂点”目标形成过程
Fig. 3 “Split point” target formation process

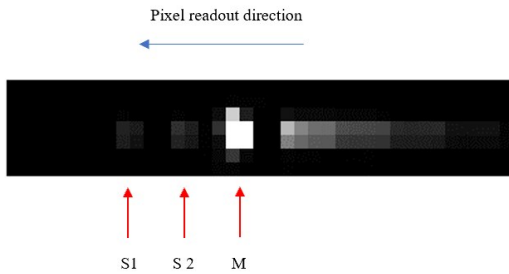


图4 “分裂点”目标
Fig. 4 “Split point” target

$$\Delta S(T_i^k) = \begin{cases} \ln \frac{P_D f(z_i^k | T_i^{k-1})}{\lambda_F}, & i_k \neq 0 \\ \ln(1 - P_D), & i_k = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $f(z_i^k | T_i^{k-1})$ 表示观测 z_i^k 在 k 时刻源于轨迹 T_i^{k-1} 的似然密度函数, $\ln \frac{P_D f(z_i^k | T_i^{k-1})}{\lambda_F}$ 为轨迹 T_i^{k-1} 关联观测 z_i^k 对轨迹的得分贡献, $\ln(1 - P_D)$ 表示轨迹 T_i^{k-1} 在 k 时刻不关联任何观测的得分贡献, P_D 为目标检测概率。

(3)生成全局假设。在给定所有轨迹假设树与轨迹得分的前提下,可进一步生成多轨迹的全局最优假设,其对应一组兼容的轨迹集合。通过构造加权无向图,以轨迹得分作顶点权重,将两条不相容轨迹,即直接或间接共享观测的两个轨迹相连,进而寻找最优全局假设问题转化为最大加权独立集

求解问题,如图5所示,图中蓝色实心圈为最大加权独立集求解生成最优全局假设的一个示例。

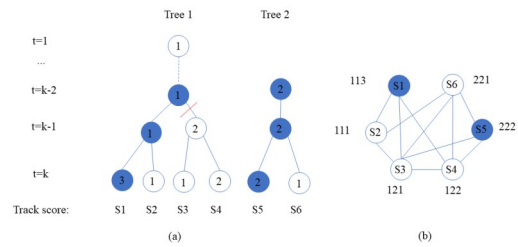


图5 轨迹树生成加权无向图 (a) 多假设轨迹树与N-回溯剪枝, (b) 加权无向图
Fig. 5 Track tree generating weighted undirected graph, (a) multi-hypothesis track tree and N-scan backtracking pruning, (b) weighted undirected graph

(4)轨迹剪枝。轨迹假设数量随扫描次数的增加呈指数增长,因此需要对轨迹树进行修剪,一般采用N扫描回溯剪枝,从当前扫描时刻k最优全局假设对应的假设分支,回溯到第k-N时刻的节点,修剪偏离当前最优假设轨迹的分支,确认k-N+1时刻的关联决策,如上图所示为N=2时的回溯剪枝示意图。一般来说,N越大,关联的准确率越高,但也会使运算时间变长。

MHT在每一扫描时刻建立多个候选假设,通过N扫描回溯剪枝技术,延迟判决目标轨迹,关联正确率较高,有利于实现“分裂点”目标各观测独立跟

踪。进一步依据各观测间的强相关性,从而实现“分裂点”目标与多个目标的有效区分。

3 “分裂点”退化模型与质心修正

拖尾“分裂”导致目标质心发生偏移,本节从“分裂”原因出发,构建“分裂”退化模型。通过多假设数据关联,可实现“分裂点”目标多个观测的独立跟踪,依据“分裂点”间强相关性,进一步可获取分裂点的统计信息。以像元方向探测到两个分裂点为例,构建“分裂点”目标的退化模型,如图6所示。带宽不足等原因导致的信号展宽用低通滤波器来表示,设滤波带宽为 w ,采样偏差为 k ,对幅度为1的理想脉冲信号进行滤波采样。

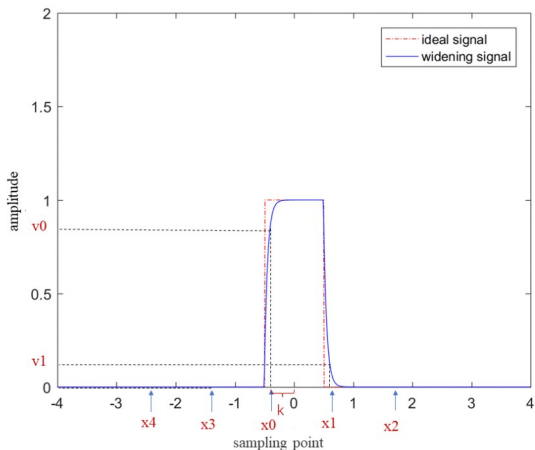


图6 “分裂点”退化模型

Fig. 6 “Split point” degradation model

在此参数模型下,可计算理想质心偏差有:

$$\Delta x = \frac{\sum x_i v_i}{\sum v_i} - 1 \quad (4)$$

通过设置一定权重比例将分裂点能量累加到高亮目标中心,还原目标由于带宽不足以及多抽头拆分输出的能量分布,获取目标理想质心。然后将标准矫正后退化模型映射到当前检测图像,计算模型应用下的质心,并与理想质心比较偏差 d 。通过设定偏差阈值 d_{th} 验证模型是否合理,当偏差超过阈值 d_{th} 时,进行能量维度的迭代,更新模型参数。通过模型矫正-模型应用-模型修正-模型应用的循环过程,实现“分裂点”目标质心修正。其实现流程如图7所示。

4 仿真结果与实验分析

4.1 多假设关联目标跟踪

实验采用4抽头探测器成像“分裂点”目标,设

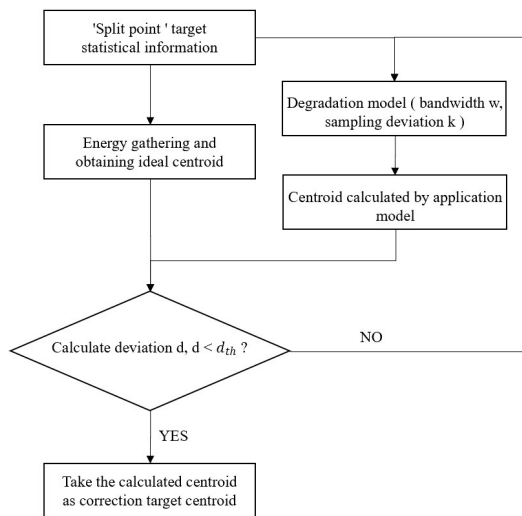


图7 能量维度模型迭代修正流程图

Fig. 7 Flow chart of iterative model correction in energy dimension

扫描周期 $T=1$ s,目标匀速运动,速度为 300 m/s,新杂波密度 $\lambda_{new} = 10^{-9} \text{ m}^{-2}$,虚警杂波密度 $\lambda_F = 3 \times 10^{-8} \text{ m}^{-2}$,检测概率 $P_D = 0.97$,对水平与垂直两个典型方向运动目标仿真场景,进行了MHT算法的验证,实验结果如图8所示。其中,垂直方向运动目标的跟踪结果图,直观地展示了MHT算法对“分裂点”目标产生的多个观测可以较好地实现独立跟踪。

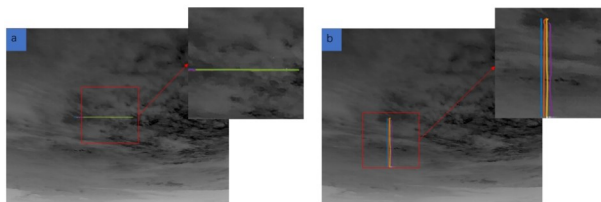


图8 MHT跟踪“分裂点”目标实验结果,(a)水平向运动目标场景跟踪轨迹,(b)竖直向运动目标场景跟踪轨迹

Fig. 8 MHT tracking “split point” target results, (a) tracking results for horizontal motion scene, (b) tracking results for vertical motion scene

为了进一步验证MHT算法针对“分裂点”目标的跟踪性能的优越性,本文选取传统多目标跟踪算法GNN、JPDA与MHT算法进行对比实验,各算法跟踪效果比较如图9所示,并对轨迹交叉次数与各轨迹和对应观测航迹真值的位置均方根误差RMSE进行统计,统计结果如表1所示。分析实验结果可知,本文算法相比于GNN、JPDA算法可以更准确、更独立地跟踪“分裂点”目标多观测产生轨迹,减少轨迹

的交叉,这对于准确获取分裂点统计信息、构建“分裂”退化模型与模型映射质心修正具有重要意义。

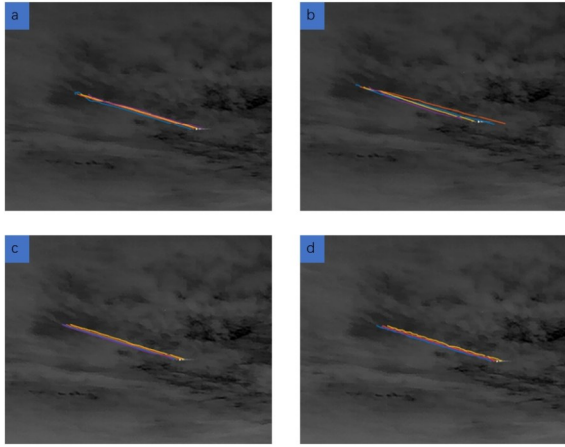


图9 各算法跟踪效果比较,(a) GNN跟踪结果,(b) JPDA跟踪结果,(c)MHT跟踪结果,(d)“分裂点”各观测轨迹真值
Fig. 9 Comparison of tracking results of three algorithms, (a) GNN tracking results, (b) JPDA tracking results, (c) MHT tracking results, (d) the true trajectory of each observation of 'splitting point'

表1 各算法跟踪性能比较

Table 1 Comparison of tracking performance of three algorithms

指标	GNN	JPDA	MHT
轨迹交叉次数	7	5	0
RMSE	5.336 6	10.878 5	0.813 2

4.2 “分裂点”目标质心修正

利用已知恒星质心信息对退化模型矫正之后

表2 模型应用前后质心定位精度比较

Table 2 Comparison of positioning accuracy before and after model application

	horizontal		vertical	
	before correction	after correction	before correction	after correction
positioning accuracy	0.211 5	0.169 3	0.257 3	0.183 82
	0.921 0	0.051 8	0.868 7	0.044 7
	0.588 1	0.191 9	0.431 0	0.194 6
	0.392 4	0.172 4	0.146 3	0.171 7
	1.295 0	0.113 3	0.933 1	0.086 5
	0.705 8	0.130 5	0.307 6	0.153 2
	0.549 6	0.118 9	0.246 1	0.161 1
	1.201 7	0.039 9	0.797 8	0.031 0
	1.023 6	0.180 1	0.537 4	0.160 6
	0.665 0	0.161 9	0.299 3	0.189 0
Standard deviation	0.331 4	0.050 2	0.249 07	0.057 5
mean	0.755 3	0.133 0	0.512 4	0.137 6

的模型参数为等效带宽 $w=30$ MHz,采样偏差 $k=-0.42$,将模型应用于序列检测图像,修正的质心结果如图10所示。在水平与竖直两个运动方向下,修正的质心定位误差均控制在0.3像元内。

表2展示了10帧检测结果应用修正模型前后的定位精度比较,由表格数据分析可知,修正前定位精度一般在0.5像元以上,甚至达到1像元以上,修正后定位精度基本控制在0.2像元以内,平均定位精度由0.5像元以上提升到0.15像元以内。

5 总结与展望

本文将“分裂点”目标形成各观测视作独立目标,利用MHT技术,进行轨迹关联跟踪,并与传统多目标跟踪算法GNN、JPDA进行对比实验,实验结果表明MHT可以较优地实现各观测的独立跟踪,有效避免轨迹交叉;针对目标拖尾分裂导致的质心偏移,构建了点目标“分裂”退化模型,根据已知恒星成像信息修正模型参数,并映射到检测图像,在水平与竖直两个典型运动仿真场景下进行测试,结果表明平均定位精度由0.5像元以上提升到0.15像元以内。

本文利用多假设跟踪算法对分裂点目标进行跟踪关联,一定程度上减少各观测轨迹交叉,提升关联正确率,为后续流程中构建目标“分裂”退化模型与模型映射质心修正提供必要分裂点统计信息。但这种算法时间复杂度较高,关联轨迹树规模随关联时间推移成指数增长,实时性较差,将来可以从“分裂点”目标形态特性出发在剪枝策略与关联深度自适应等内容上进行改进,提升计算资源利用

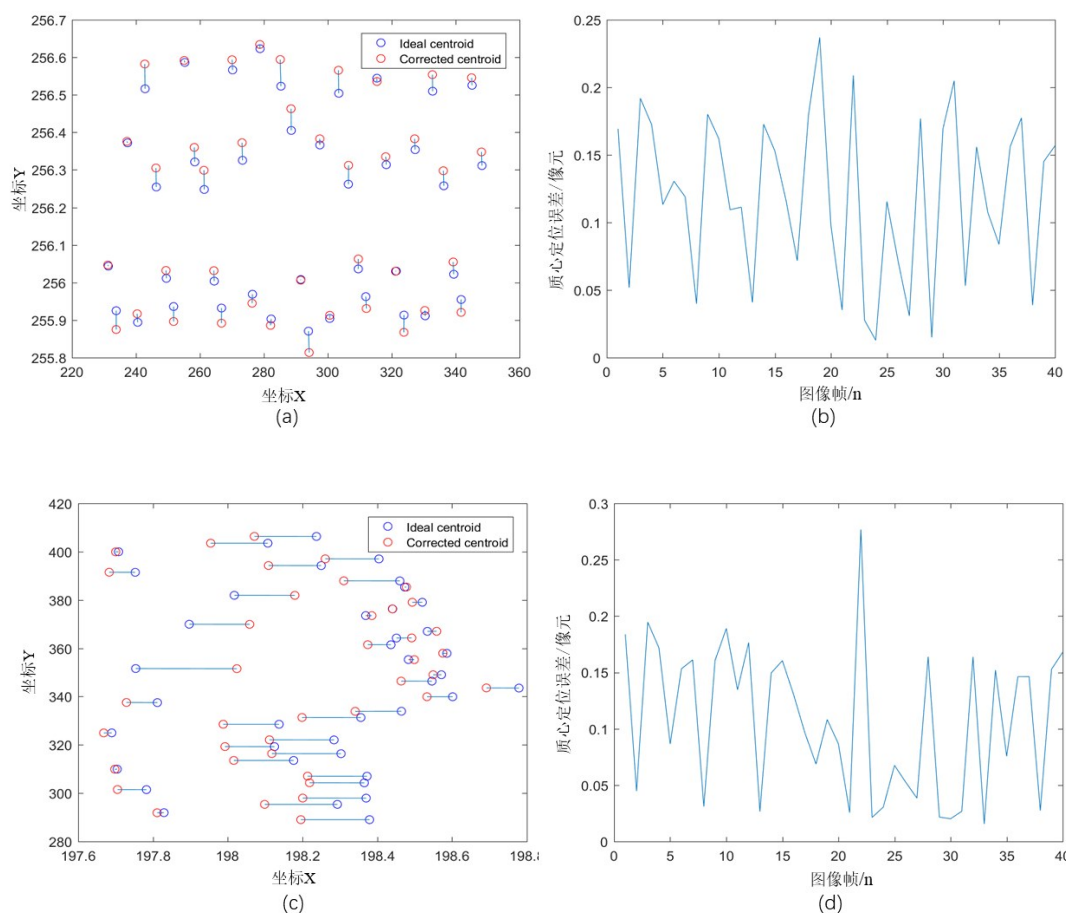


图 10 “分裂点”目标质心修正结果,(a) 水平向运动目标理想质心与修正质心,(b) 水平向运动目标修正质心误差,(c) 竖直向运动目标理想质心与修正质心,(d) 竖直向运动目标修正质心误差

Fig. 10 Centroid correction results of “split point” target, (a) ideal centroid and corrected centroid of horizontal moving target, (b) correction centroid error of horizontal moving target, (c) ideal centroid and corrected centroid of vertical moving target, (d) correction centroid error of vertical moving target

率。除此之外,本文采用简单的形态学滤波对“分裂点”目标进行单帧的检测,在目标信号较弱与结构场景复杂情形下,检测虚警率较高,从“分裂点”特殊形态出发可以设计新的滤波模板,通过能量叠加操作突出目标强度来降低检测虚警。

References

- [1] YE Z H, LI H H, WANG J D, *et al.* Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2022, **41**(1): 15–39. (叶振华, 李辉豪, 王进东, 等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势[J]. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(1): 15–39.
- [2] HADHOUD M M, THOMAS D W. The two-Dimensional adaptive LMS (TDLMS) algorithm [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, **35**(5): 485–494.
- [3] BAE T W, SOHNG K I. Small target detection using bilateral filter based on edge component [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2010, **31**(6): 735–743.
- [4] BAI X, ZHOU F, XUE B. Image enhancement using multi scale image features extracted by top-hat transform [J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, **44**(2): 328–336.
- [5] WANG C, WANG L. Multidirectional ring Top-Hat transformation for infrared small target detection [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, **14**: 8077–8088.
- [6] COMANICIU D. An algorithm for data-driven bandwidth selection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(2): 281–288.
- [7] WANG H, XIN Y H. Infrared small target detection based on DT-CWT [J]. *Laser and Infrared*, 2020, **50**(9): 1145–1152. (王鹤, 辛云宏. 基于双树复小波变换的红外小目标检测算法[J]. *激光与红外*), 2020, **50**(9): 1145–1152.
- [8] CHEN C L P, LI H, WEI Y, *et al.* A Local Contrast method for small infrared target detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(1):

- 574–581.
- [9] Zhang L H, Miao H Q, Chen J, *et al.* Research on infrared dim and small target detection algorithm based on frequency domain difference [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2022, **43**(8): 2942–2964.
- [10] Hsieh T H, Chou C L, Lan Y P, *et al.* Fast and robust infrared image small target detection based on the convolution of layered gradient kernel [J]. *IEEE Access*, 2021, **9**: 94889–94900.
- [11] Han J H, JIANG Y W, ZHANG X J, *et al.* Infrared small target detection using tri-layer window local contrast [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, **50**(2): 20200146. (韩金辉, 蒋亚伟, 张小件, 等. 采用三层窗口局部对比度的红外小目标检测[J]. *红外与激光工程*), 2021, **50**(2): 20200146.
- [12] SINHA A, DING Z, KIRUBARAJAN T, *et al.* Track quality based multitarget tracking approach for global nearest-neighbor association [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, **48**(2): 1179–1191.
- [13] CHEN X, LI Y A, Li Y X, *et al.* Tracking algorithm of maneuvering target based on probability data association based on distance weighting [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2018, **52**(4): 474–479. (陈晓, 李亚安, 李余兴, 等. 基于距离加权的概率数据关联机动目标跟踪算法 [J]. *上海交通大学学报*), 2018, **52**(4): 474–479.
- [14] Cao L, Zheng D Y, Zhao Z M, *et al.* Convex variational inference for multi-hypothesis fractional belief propagation based data association in multiple target tracking systems [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**(17): 19121–19133.
- [15] Liu J F. Measurement-oriented m-optimal hypothesis N-scan multi-hypothesis tracking algorithm [J]. *Application Research of Computers*, 2021, **38**(1): 282–286, 292. (刘建锋. 面向量测的 m-最优 N 扫描多假设跟踪方法 [J]. *计算机应用研究*), 2021, **38**(1): 282–286, 292.
- [16] CHEN H, ZANG B Y, CHEN Y. Multi-hypothesis tracking with adaptive association depth [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, **38**(9): 2000–2007. (陈杭, 张伯彦, 陈映. 关联深度自适应的多假设跟踪研究 [J]. *系统工程与电子技术*), 2016, **38**(9): 2000–2007.