

基于多模型判决的红外运动小目标检测算法

范鹏程, 刘国栋, 高健健, 王世林, 庞 澜

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对空中红外运动小目标检测虚警率较高的问题, 提出了利用多种模型联合判决来实现红外运动小目标的检测方法。首先依据红外小目标的成像模型特点, 采用背景预测算法逐像素判断是否为疑似目标点; 然后依据目标知识模型, 用支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 分类器对疑似目标点进行二次判决, 进一步滤除虚假目标点; 最后依据运动模型来判断目标点在相邻帧之间的相对运动, 筛选掉相对静止的虚假目标点, 最终检测结果即为红外运动小目标。实验表明, 该方法能有效降低对空红外运动小目标检测的虚警率, 可用于强杂波环境下的红外运动小目标检测。

关键词: 多模型; 红外小目标; 目标检测

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2019)05-0462-07

Infrared Detection Algorithm for Small Moving Targets Based on Multimodel Decision

FAN Pengcheng, LIU Guodong, GAO Jianjian, WANG Shilin, PANG Lan

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, china)

Abstract: Considering the problem of a higher false alarm rate in the detection of a small moving target by infrared motion detectors, a method for detecting these small targets by performing a combined analysis using multiple models is proposed. Initially, according to the characteristics of the imaging model of infrared small target imaging, the background prediction algorithm is used to determine whether it is a suspected target point, pixel by pixel. Then, according to the target knowledge model, the support vector machine classifier is used to make a second decision on the suspected target point to further filter out the false target points. Finally, according to the motion model, the relative motion of the target point between adjacent frames is analyzed, and the relatively stationary target points are eliminated. The final detection result is the infrared motion small target. Experiments demonstrate that this method can effectively reduce the false alarm rate in the detection of small moving targets using infrared motion detectors and can be used for small target detection using infrared motion sensors in strong clutter environments.

Key words: multiple models, infrared small targets, target detection

0 引言

红外小目标检测一直是国内外红外图像处理领域的一个热点。特别是在红外搜索与跟踪系统 (Infrared Search and Track,IRST) 中, 红外小目标检测作为其核心关键技术, 直接影响到系统性能。红外小目标成像面积小、对比度低、边缘模糊、尺寸及形状变化不定, 而且没有稳定的结构和纹理特征, 这使得红外小目标的检测非常困难。为了提高小目标的检测概率, 往往会提高检测灵敏度, 与此同时检测虚警

率也会随之升高, 特别是在强杂波环境下 (如云层、山地背景)。但过高的虚警率会影响到IRST系统的正常使用, 因此如何在确保检测概率的前提下降低虚警率, 是目前亟需解决的问题。

在国外, 对红外弱小目标的研究起步较早, 主要研究机构有美国的海军实验室、空军实验室、NASA、英国国防研究局、荷兰Tales公司、韩国国防科学研究所等, 部分技术已应用于美国SIRST红外搜索与跟踪系统、法国“旺皮尔”系统、荷兰“天狼星”系统等。在国内, 相关院校和研究机构在红外弱小目标检测方面进行了大量投入, 在算法研究方面取得了进

收稿日期: 2018-08-25; 修订日期: 2019-01-01.

作者简介: 范鹏程 (1980-), 男, 湖北宜昌人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事图像处理算法研究。E-mail: asdf340@163.com。

展,但尚未工程化应用,仍与国外先进技术存在较大差距。

从研究方法上看,目前红外弱小目标检测算法主要分为两类。一类是基于经典图像处理技术的检测算法,如:基于多尺度特征融合的红外图像小目标检测^[1]、采用图像块对比度特性的红外弱小目标检测^[2]、基于形态学算法的红外图像小目标检测方法研究^[3]、红外弱小目标的单帧捕获^[4]、一种云天背景下单帧红外弱小目标检测新方法^[5]、一种基于区域背景预测的红外弱小目标检测方法^[6]等;另一类是基于机器学习及深度学习技术的检测算法,如:Fuzzy-ART背景抑制的单帧红外弱小目标检测^[7]、一种智能化的红外弱小目标检测方法^[8]等。这类算法在传统目标检测算法的基础上加入了目标特征自动提取和判决,鲁棒性更好,智能化程度更高,也是近年来的研究热点。

借鉴上述各种目标检测算法,本文提出了一种多模型判决算法。该算法分为3个步骤,分别运用成像模型、知识模型、运动模型对目标进行描述,利用各个模型依次剔除虚假目标,在确保目标检测概率的前提下尽可能降低虚警率。实验结果表明算法能够有效克服背景干扰,实现红外运动小目标检测。下面对各模型及处理流程分别进行介绍分析。

1 成像模型

1.1 红外小目标成像特性

红外图像是由目标、背景和噪声叠加组成的。包含小目标的红外图像 $f(x, y)$ 可以描述为:

$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_B(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

式中: $f_T(x, y)$ 为目标像素值; $f_B(x, y)$ 为背景图像; $n(x, y)$ 为噪声图像。

红外图像 $f(x, y)$ 由传感器获得,噪声图像 $n(x, y)$ 可以通过中值滤波来滤除,红外小目标 $f_T(x, y)$ 由于成像面积小,对比度低,亮度值不稳定(表现为闪烁特性),难以直接求得。因此若能求出背景图像 $f_B(x, y)$,则可由公式(1)解出目标信号 $f_T(x, y)$ 。

1.2 背景预测

采用背景预测算法可求得背景图像 $f_B(x, y)$ 。其基本思想是:图像中的任何一个像素点,如果属于背景,那么它一定可以用周围区域的背景点来预测,即它跟周围的某些点是属于同一背景的。实际上,任何一点灰度的背景预测值,都是用它周围区域的一些点的灰度值经过线性或非线性的组合产生的。将所有像素点的实际灰度值与预测值相减得到残差图,对残差图像进行阈值分割就可以获得小目标。文献[2]、文献[3]、文献[5]和文献[6]均属此类方法,背景预测算法的广泛

应用也说明了它的有效性。

文献[9]对比了4种背景预测算法:空域高通滤波、单一结构形态学滤波、最大中值滤波、多结构元素形态学滤波算法,其中多结构元素形态学算法性能最好。文献[10]中所提出的柔性数学形态学即为多结构元素形态学的一种具体实现,效果显著,但计算较为复杂。为满足工程化应用,本文借鉴了文献[2]中提出的算法,采用了更为简便的背景预测方法:

将目标点 P 周围区分为四象限区域,每个区域的大小为 5×5 ,相邻区域间隔3个像素,如图1所示。

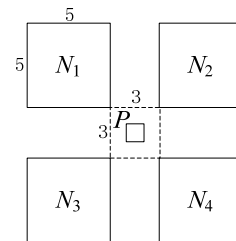


图1 四象限背景预测示意图

Fig.1 Four-quadrant background prediction diagram

对每个区域 N_i 计算灰度均值,作为四象限预测值 Y_i ,再从 Y_i 中求出最大值,作为当前背景预测值 Y 。即:

$$Y_1 = \frac{1}{25} \sum N_1(i, j), \quad Y_2 = \frac{1}{25} \sum N_2(i, j),$$

$$Y_3 = \frac{1}{25} \sum N_3(i, j), \quad Y_4 = \frac{1}{25} \sum N_4(i, j)$$

$$Y = \text{MAX}(Y_1, Y_2, Y_3, Y_4) \quad (2)$$

利用该预测方法可以确保对起伏较大的云层背景边缘部分进行平滑,大大降低亮暗背景交界处检测的虚警率。最终逐像素求残差 R :

$$R(i, j) = P(i, j) - Y(i, j) \quad (3)$$

当 R 大于预设阈值,即可认为该点是目标点。图2为成像模型目标检测流程效果示意图。

2 知识模型

通过成像模型检测出的目标点通常还存在较多虚警。传统算法的解决办法是对特定场景作特殊处理,或者动态调整阈值来实现降低虚警,但往往难以兼顾所有场景。而文献[7]和文献[8]则利用了目标的先验知识,采用了具有人工智能的BP神经网络算法来实现对目标的分类检测,但其所使用的目标特征仍然是由人工预设的,具有一定的局限性。

近年来随着人工智能算法的迅猛发展,基于知识模型的检测识别算法也日趋完善。知识模型是在已有知识库的基础上,通过人工智能算法将知识进行形式化和结构化的抽象,形成具有专家级判决能力的处理

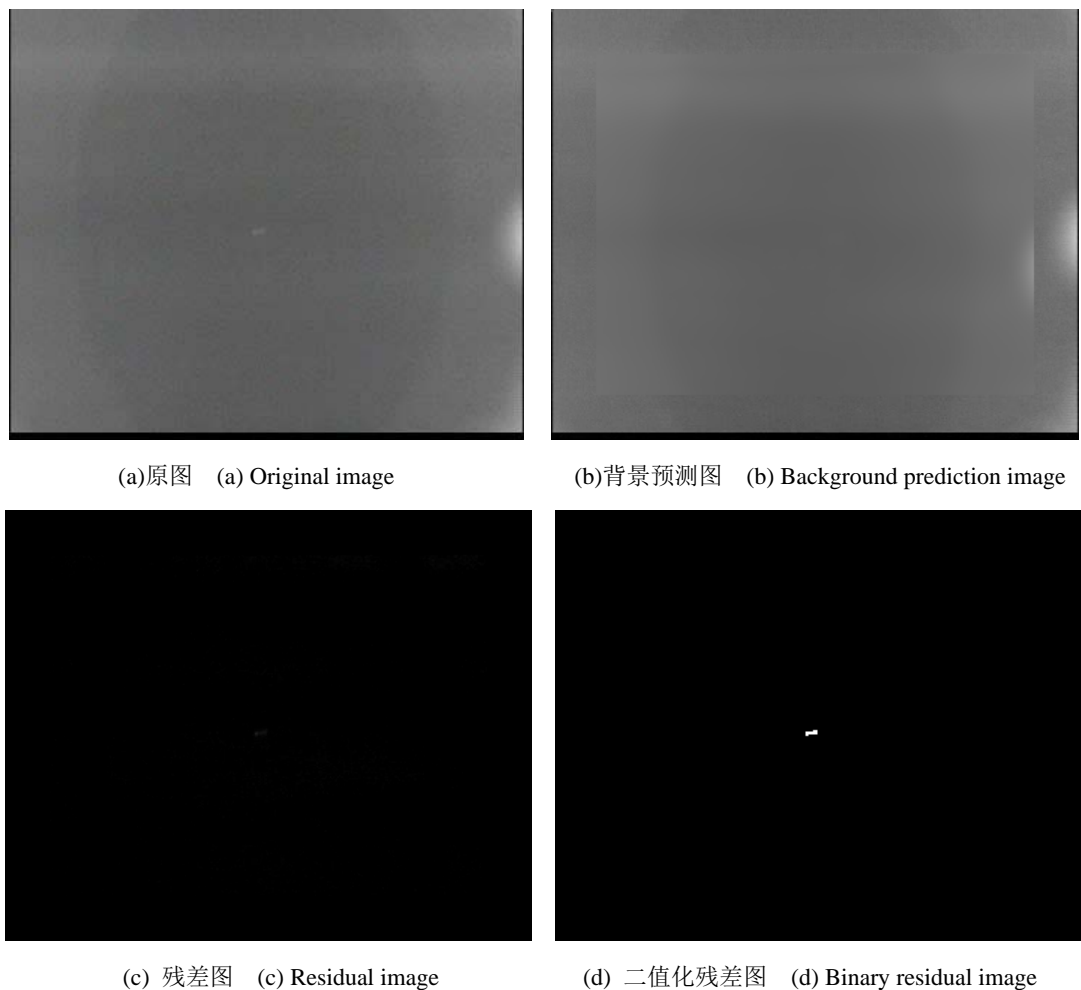


图 2 成像模型检测目标 Fig.2 Imaging model detection target

模型。在目标检测方面，知识库就是各类已标注样本，知识模型就是基于人工智能学习算法建立起的 Faster R-CNN 模型和 YOLO 模型等，实践证明这些模型具有对各种类别目标强大的检测识别能力。

本文考虑到小目标的特殊性和实时性处理的需求，拟采用具有人工智能的机器学习算法来建立知识模型。典型的机器学习算法有支持向量机（SVM）、AdaBoost 提升算法、贝叶斯分类法等。经权衡，本文采用 SVM 算法来构建知识模型。SVM 算法的一大特点是无需人工设定目标特征，由算法自行选择出最优目标特征；能够达到最大实时分类效率，效率最优。

SVM 算法对目标样本和背景样本进行特征筛选，将筛选出的特征形成特征分类器，该分类器即为目标知识模型。SVM 算法使得目标检测具有了自动化、智能化的分析能力；细分目标样本数据集，将其区分为山地-天空场景目标样本数据集、海洋-天空场景目标样本数据集等，还可以生成针对不同应用场景的特征分类器，更进一步提高了知识模型的准确性，满足各种复杂背景条件下的目标检测需求。SVM 算法流程如图 3 所示。

3 运动模型

经过知识模型筛选后的目标，仍然存在部分虚假目标。这些虚假目标的灰度分布与真实目标十分相似，很难再用目标特性来辨别。此时所遗留的虚假目标，一种为天空云层、地面景物等相对静止的虚假目标，另一种为噪声突起、阳光闪烁等临时出现的虚假目标。为此本文引入了运动模型，通过判断多帧间的运动量来决策是否为真实目标。

常见的运动模型往往是针对目标与平台之间的相对运动来建立的，需要获取精确的平台信息。为减小对平台信息精度的依赖，本文的运动模型主要由目标之间的相对运动来建立。当多个相距较远的目标点之间相对运动完全一致时，则可认为它们都是背景干扰点，而相对运动不一致的点才有可能真实目标。这一判据与真实场景中的情况一致：云层中的干扰点之间的相对运动为零，只有真实目标才会与其他点产生显著的相对运动。运动模型示意如图 4 所示。

计算运动模型主要依赖于两个步骤：相邻帧目标匹配和背景运动估计。

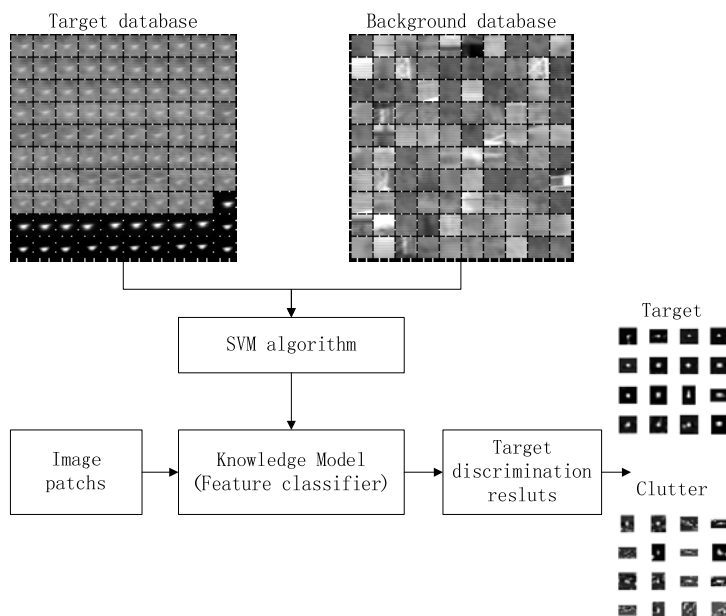


图3 基于SVM算法分类流程 Fig.3 Classification process based on SVM algorithm

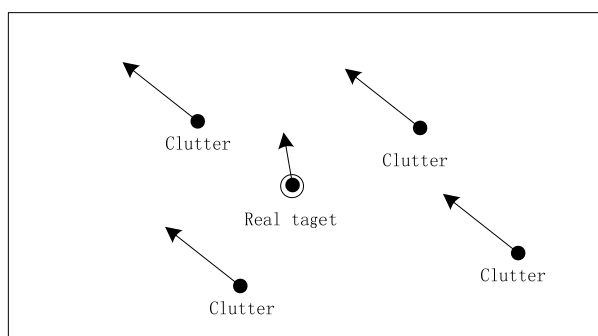


图4 运动模型示意图 Fig.4 Motion model diagram

3.1 相邻帧目标匹配

相邻帧目标匹配利用了成像模型筛选出的所有目标点。对这些目标点取 8×8 邻域形成图片, 进行相邻帧匹配, 得到相邻帧目标点对关系。目标点匹配的搜索范围由平台运动参数决定, 一般取 ± 16 像素即可。由于相邻帧图像只存在平移和轻微旋转, 因此直接采用了经典的归一化互相关算法来计算相邻帧目标匹配系数。当系数大于某一阈值时即认为匹配成功。归一化互相关系数匹配计算公式为:

$$R(u, v) = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (f_{j+u, k+v} - \bar{f})(g_{j, k} - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (f_{j+u, k+v} - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (g_{j, k} - \bar{g})^2}} \quad (4)$$

式中: $\bar{f} = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N f_{j, k}$, $\bar{g} = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N g_{j, k}$; M, N

分别为目标图片的宽和高; $R(u, v)$ 为互相关系数; \bar{f} 为

f 以点 (u, v) 为待匹配图片的均值; \bar{g} 为目标图片的均值。对于未匹配上的目标点, 则认为是噪声突起、阳光闪烁, 或者是不稳定的目标点, 予以舍弃。

3.2 背景运动估计

获得相邻帧目标匹配点对关系后, 即可对背景运动进行估计。为确保精度, 本文采用了仿射变换公式来估计背景运动量。仿射变换矩阵表达式如公式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & t_x \\ h_{10} & h_{11} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

一个平面上的仿射变换有 6 个自由度, 对应 6 个矩阵元素 (4 个对应矩阵 H 的元素, 2 个对应矢量 t 的元素)。计算仿射变换参数采用了最小二乘法估计, 以尽量减小误差。若在纯透空背景下, 背景干扰点过少, 成像模型无法提供足够的虚假目标, 那么可以从平台运动参数直接估算出背景运动参数。

获得变换参数后, 对前一帧目标点进行重投影, 得到当前帧目标点预测位置, 将实际目标点位置与预测点位置对比, 超过阈值门限即为真实目标点。运动模型判断流程如图 5 所示。

图 6 演示了基于运动模型的目标检测。在第 $T-1$ 帧和第 T 帧会重复检测出一些目标点, 依据这些目标点建立起点对关系, 估算出整个背景的运动量, 就能判断出哪些目标点的运动存在异常, 这些目标点即为真实目标。

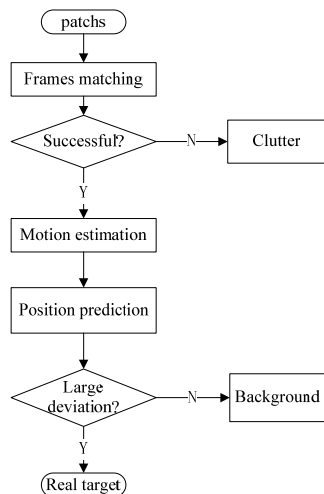


图 5 运动模型判断流程图 Fig.5 Motion model flow chart

综上所述，本文算法通过成像模型、知识模型、运动模型对目标进行层层筛选，最终能够从复杂背景中提取出正确目标。算法流程图如图 7 所示。

4 仿真及实验结果

仿真试验选取了存在强杂波干扰的山地背景图像进行测试，仿真结果如图 8 所示。

在复杂背景下，直接采用基于传统算法的目标检测会产生大量虚警，如图 8(a)；经过人工智能算法筛选后，可以滤除掉大部分虚警，但仍然存在从特征上难以区分的虚假目标，如图 8(b)；最终采用运动模型估计来剔除掉相对静止的背景干扰物，准确检测出真实目标，如图 8(c)。

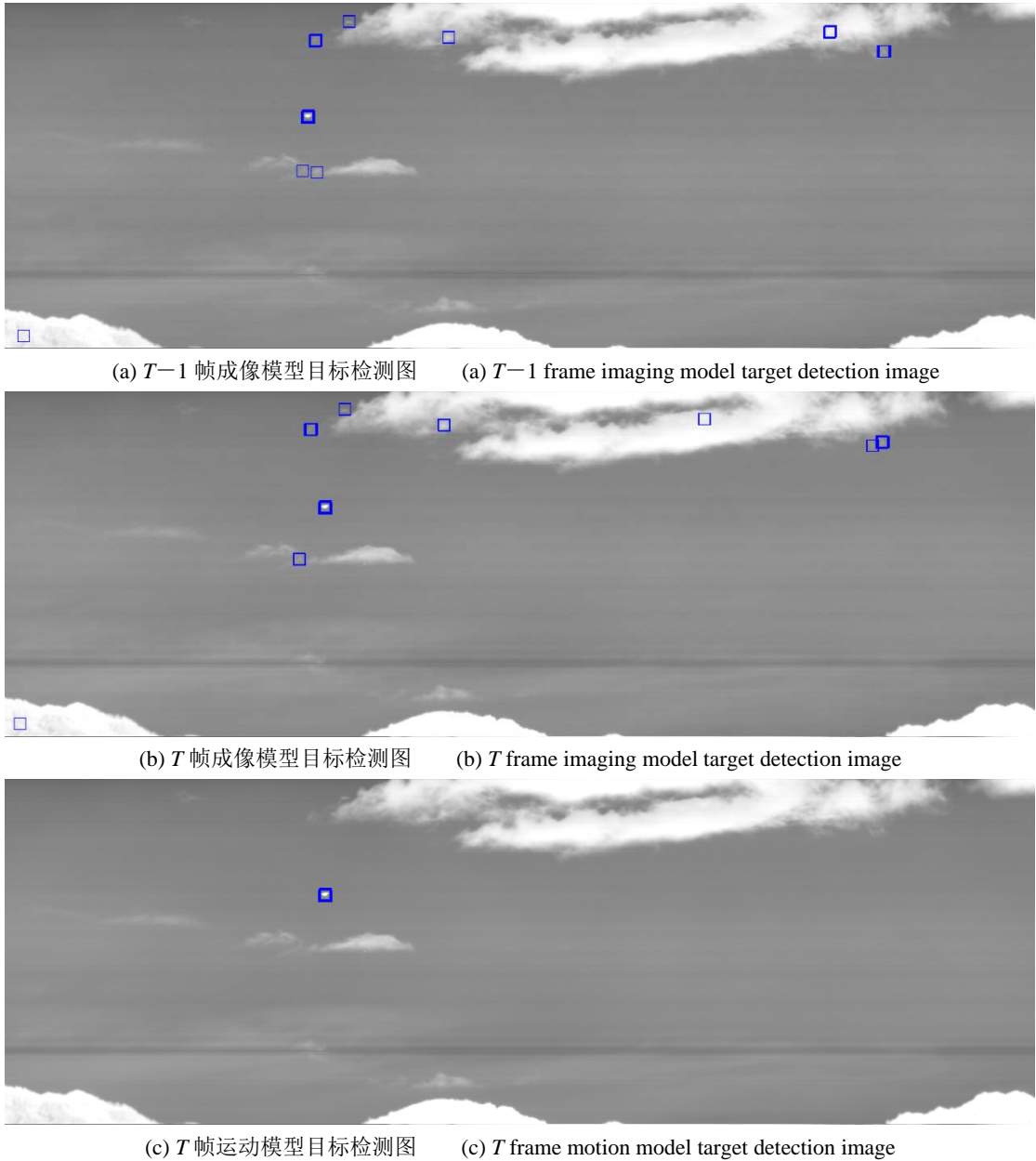


图 6 运动模型目标检测 Fig.6 Motion model target detection

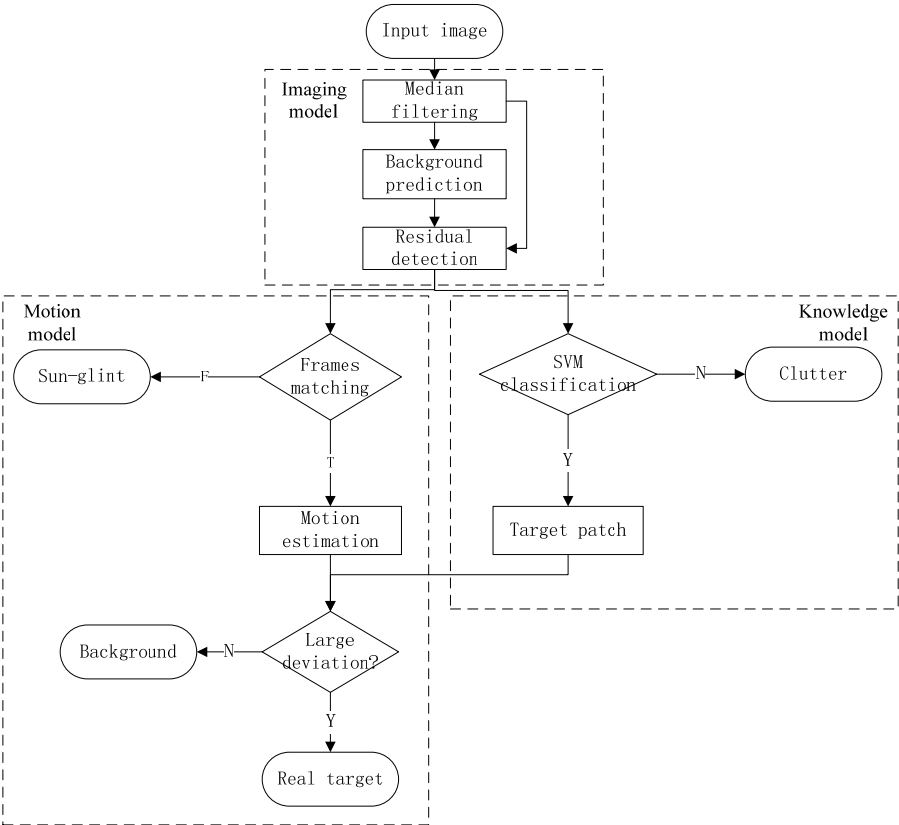
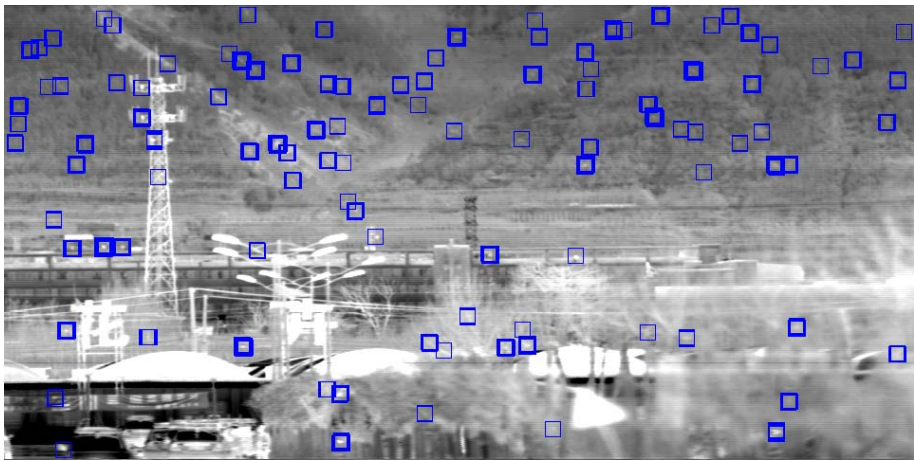
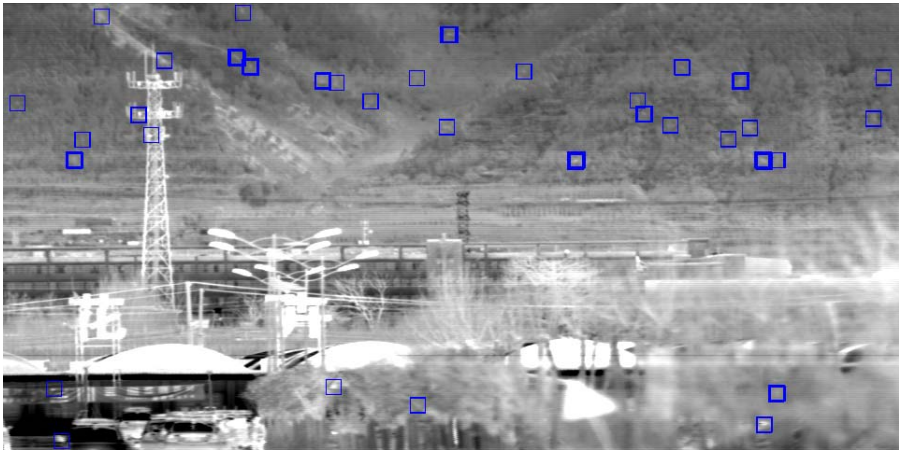


图 7 多模型判决算法流程图 Fig.7 Multi-model decision algorithm flow chart



(a) 成像模型检测出的目标 (a) Imaging model result image



(b) 知识模型检测出的目标 (b) Knowledge model result image



(c) 运动模型检测出的目标

(c) Motion model result image

图8 多模型目标检测效果图 Fig.8 Multi-model target detection effect

为了验证本文算法的有效性,对图8场景,选取经典 Top-Hat 算法和图像块对比度算法作对比实验。经典 Top-Hat 算法选用的结构算子为 3×3 正方形结构算子;图像块对比度算法区域范围为 5×5 ;本文算法则以知识模型输出结果来比对。经典 Top-Hat 算法检测出 126 个目标,图像块对比度算法检测出 78 个目标,而本文算法知识模型检测出 35 个目标。从检测虚警数量上看,本文算法相对于经典目标检测算法,其虚警率下降了一半以上;从最终输出结果上看,本文通过运动模型能够准确检测出唯一的真实目标,已经能够满足工程应用需求。

5 结语

由于点状目标的可用特性较少,降低红外目标检测中强杂波引起的虚警非常具有挑战性。本文利用了目标的灰度特性、分类特性以及运动特性,建立了基于多模型判决的目标检测流程。每个模型所采用的算法均为已有的典型算法,将其串联在一起可以有效降低虚警率。若对每个模型的算法继续优化改进,则有望实现工程化应用。

另外,本文也存在目标静止时检测失效、各模型算法对参数依赖性较强的问题,在后续工作中还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 李秋华,李吉成,沈振康.基于多尺度特征融合的红外图像小目标检测[J].系统工程与电子技术,2005,27(9):1557-1560.
LI Qiuhua, LI Jicheng, SHEN Zhenkang. IR image small target detection based on multi-scale feature fusion[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(9): 1557-1560.
- [2] 王刚,陈永光,杨锁昌,等.采用图像块对比特性的红外弱小目标检测[J].光学精密工程,2015,23(5):1424-1433.
WANG Gang, CHEN Yongguang, YANG Suochang, et al. Detection of

- infrared dim small target based on image patch contrast[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1424-1433.
- [3] 康令州,陈福深,王德胜,等.基于形态学算法的红外图像小目标检测方法研究[J].光电工程,2010,37(11):26-31.
KANG Lingzhou, CHEN Fushen, WANG Desheng, et al. Detection Method for Infrared Small Target Based on Mathematical Morphology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(11): 26-31.
- [4] 王雪梅,黄自力,王德胜.红外弱小目标的单帧捕获[J].红外与激光工程,2006,35(s1):99-104.
WANG Xuemei, HUANG Zili, WANG Desheng. Infrared small and weak targets detection in single frame[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(s1): 99-104.
- [5] 张彦峰,何佩琨,张辉.一种云天背景下单帧红外弱小目标检测新方法[J].光学技术,2012,38(6):745-750.
ZHANG Yanfeng, HE Peikun, ZHANG Hui. New method of infrared small target detection of single frame under cloudy sky background[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(6): 745-750.
- [6] 尹超,向健勇,韩建栋.一种基于区域背景预测的红外弱小目标检测方法[J].红外技术,2004,26(6):62-65.
YIN Chao, XIANG Jianyong, HAN Jian-dong. Small Target Detection Based on Mean Background Model in IR Images[J]. *Infrared Technology*, 2004, 26(6): 62-65.
- [7] 陈炳文,王文伟,秦前清. Fuzzy-ART 背景抑制的单帧红外弱小目标检测[J].计算机辅助设计与图形学学报,2012,24(6):775-779.
CHEN Bingwen, WANG Wenwei, QIN Qianqing. Infrared Dim Target Detection in Single Image Based on Background Suppression by Fuzzy-ART[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(6): 775-779.
- [8] 刘刚,周珩,吴催生,等.一种智能化的红外弱小目标检测方法[J].火力与指挥控制,2015,40(10):147-151.
LIU Gang, ZHOU Heng, WU Cuisheng, et al. An Intelligent Detecting Method for Infrared Small Target[J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(10): 147-151.
- [9] 余小英,李凡生,邵晓鹏.基于背景抑制的4种红外弱小目标检测算法比较[J].红外技术,2009,31(5):287-294.
YU Xiaoying, LI Fansheng, SHAO Xiaopeng. The Comparison of Four Detection Performances for Small Targets in Infrared Images Based on Background Rejection[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(5): 287-294.
- [10] 郭晗.复杂云背景中小目标检测的背景抑制方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
GUO Han. Background Suppression Algorithms of Target Detection in Complex Cloud[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.