

低信噪比下的红外弱小目标检测算法研究综述

杨 旸,徐长彬,马玉莹,黄成章
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘 要: 低信噪比条件下的红外弱小目标检测问题一直是近些年来国内外学者研究的一个热门课题。针对复杂背景下红外图像弱小目标检测困难、信噪比低的问题,越来越多的新方法不断被提出。更好的实时性、更高的检测概率、更低的虚警率成为了研究者们追求的目标,实时、鲁棒、通用成为了红外弱小目标检测信号处理算法的核心要求。本文梳理了红外弱小目标检测的常用方法以及其技术发展,在介绍一些传统算法发展的基础上,重点介绍了红外弱小目标检测的几类典型算法的原理、发展及其优化算法,为后续红外弱小目标检测的研究提供了便利。

关键词: 弱小目标检测; 低信噪比; 背景抑制; 目标增强

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.06.001

A review of infrared dim small target detection algorithms with low SNR

YANG Yi, XU Chang-bin, MA Yu-ying, HUANG Cheng-zhang
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 10015, China)

Abstract: The detection of infrared dim small targets with low SNR has been a hot topic in recent years. Lots of new methods have been proposed to solve the problem of dim small targets detection and low signal-to-noise ratio in infrared images under complex background. Better real-time performance, higher detection probability and lower virtual scene rate have become the targets pursued by researchers, and real-time, robust and general have become the core requirements of infrared dim small targets detection algorithm. In this paper, the common methods of infrared dim small targets detection and its technical development are summarized. Based on the introduction of some traditional algorithm development, the development and optimization algorithm of several types of typical algorithms for infrared dim small targets detection are mainly introduced, which provides convenience for the subsequent research on infrared dim small targets detection.

Key words: dim small target detection; low SNR; background suppression; target enhancement

1 引言

作为一种电磁隐身设备,红外搜索系统由于具备可以探测到雷达盲区—低空区域的特点,它已成为国防和相关安全监测领域的研究热点和关键内容。红外目标检测系统以其体积小、辐射小、重量轻、机动性强、隐蔽性强、配置方便且可在夜间工作

的特点,可应用在预警卫星和无人机等诸多场景。红外搜索系统比雷达系统生成的图像细节更加丰富,分辨率更高,因此,作为红外搜索系统的核心技术,低信噪比弱小红外目标检测技术的研究成为了倍受关注的议题,得到了国内外的广泛关注。

在现代红外目标检测实际运用中,低信噪比弱

作者简介: 杨 旸(1968—),男,高级工程师,主要研究方向为红外技术与应用。E-mail: yy68012002@aliyun.com
收稿日期: 2019-02-25; 修订日期: 2019-03-19

小红外目标实时检测的难度可以从以下几个方面来考虑: 由于作用距离远, 在监测预警系统中, 目标一般表现为点目标, 大多数情况下, 点目标只显示为一个或几个像素, 经过大气衰减, 云层遮挡等原因导致提取到的目标的信号强度非常弱, 对比度非常低 ($<15\%$), 给检测带来很大的困难。背景信息复杂, 大气云层对空中红外目标的干扰极大, 可提供给处理算法的信息量很少, 给目标检测带来了很大的困难。复杂背景还包括了浓云、雾、雨、雪等特殊天气导致的背景灰度空间分布不平稳, 从而背景灰度的统计均值和方差等特性不具备空移不变性。上述因素给检测带来了很大的挑战, 国内外的学者们纷纷针对各类应用场景提出了不同的检测算法。简单说来, 如何充分地利用目标和背景固有的特性, 从而更好地抑制背景和增强目标是提高目标检测性能的关键。

2 检测算法的研究现状

目标检测是依靠对目标和背景在红外图像中的灰度、特征差异、运动特性等因素来实现对目标的分割与检测。时域滤波和空域滤波单纯的利用时域或空域的信息, 不足以达到最佳的效果, 现今流行的方法多采用综合利用时空信息的方法。

以所需的图像帧数为标准, 可将检测算法的分为单帧检测算法和多帧检测算法两类。针对的运动目标的检测现今应用较多的是多帧检测算法。现有的算法多采用依靠对目标和背景在红外图像中的灰度、运动特性、特征差异等因素来实现对目标的分割与检测。由于点目标的信噪比低, 背景复杂, 目标与噪声很难区分, 单帧处理时很难可靠的检测目标。在多帧检测算法中, 从弱小目标的检测与跟踪过程的前后关系作为切入点, 可将红外弱小目标的检测算法分为跟踪前检测方法 (DBT, Detect-Before-Track) 和检测前跟踪方法 (TBD, Track-Before-Detect)。

跟踪前检测方法 (DBT, Detect-Before-Track, 算法流程如图1所示): DBT算法采用先单帧检测再

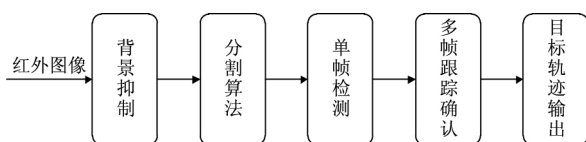


图1 DBT算法流程

Fig. 1 DBT algorithm flow

多帧确认的策略^[1], 为了提高单帧图像的检测性能, 需要先对输入图像进行背景抑制; 然后判断图像中的每一个像素是否为潜在目标点; 再根据目标的运动特性具有帧间相关的特点, 包括对运动规律的先验知识和灰度分布对单帧检测的结果进行判决, 通过二次决策达到剔除虚警点, 保留最终确认的目标的目的。目标确认后即可输出图像中心坐标与视场中心的角偏差, 从而实现跟踪功能。此算法优点在于逻辑清晰, 实现简单, 易于硬件的模块化实现, 但存在的问题是抗干扰能力较差, 当目标的信噪比低到一定程度时, 经过分割后的疑似目标具有不包含真实目标点的可能性, 导致算法失效。

检测前跟踪方法 (TBD, Track-Before-Detect, 算法流程如图2所示) 相较于 DBT 算法, TBD 算法考虑到时间信息与空间信息的相关性, 将扫描后的结果进行数字化存储, 然后处理假设轨迹中所包含的点。经过多帧积累后, 能够得到检测结果与目标轨迹^[2]。在实际应用中, 应根据系统抖动、结构元件尺寸和目标运动速度等因素来考虑累积帧数。若系统抖动较大, 结构元件尺寸较小, 目标运动速度较快时, 帧数累计不宜太高。随着累积帧数的增加, 检测概率会明显提升, 但也因此计算量要远远要大于 DBT 算法^[3]。

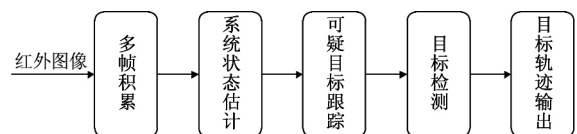


图2 TBD算法流程

Fig. 2 TBD algorithm flow

DBT 算法和 TBD 算法都能够在几帧内大致确定目标; 但是在低信噪比情况下, TBD 算法能通过帧数增加得到更好的检测性能。TBD 算法本质上是以图像帧数的累加换取目标的轨迹信息, 从而获得更好的检测和跟踪性能, 算法的计算量和存储量较大, 在当前技术水平下具有较差的实时性, 硬件实现方面受到很大的限制; 总的来说, 在现今的实际系统应用领域, DBT 算法发挥着重要的作用, 但随着新的理论和方法不断被提出, TBD 算法有着更好的发展前景, 随着芯片工艺和硬件结构的不断改善, 从算法的实时性能得到解决的角度看, 但其决定因素取决于芯片硬件发展等多种因素。

3 关键技术及其发展趋势

目标检测算法按照背景预测和目标增强两个角度进行优化从而提高检测概率。背景预测的本质在于充分利用背景固有的规律和变化特性,以使变换后的背景特性更加稳定,并提高背景预测的精度。而目标增强的本质是充分利用目标所固有的规律性的特征,从而有效增强变换后的目标特性,使目标特性更加显著。

3.1 侧重背景特性的典型目标检测算法

侧重背景特性的目标检测算法前提在于目标是慢运动或系统的帧频较高,目标非高速运动时,帧间背景变化不会太大,对于该类背景的变化较平稳的情况,通常采用滤波器进行背景预处理。典型的有最大均值滤波、中值滤波器、高通滤波器和二维匹配滤波器以及组合形式的滤波器^[4]。当背景的复杂背景程度较高且信噪比较低时,中值滤波器的作用显得非常有限。目前应用较多且效果较好的基于背景特性的目标检测代表算法主要有基于形态学 Top-hat 的检测方法^[5-10],基于小波变换的检测方法^[11-14],基于匹配滤波的检测方法^[15-16],基于 TDLMS 的检测方法^[17-18]等。

(1) 基于形态学 Top-hat 的检测方法

形态学是一种非线性滤波方式。形态学滤波器实现背景抑制的原理在于形态学开运算可以去除比结构元素小的相对较亮的突起结构,同时保持图像原始灰度值和大面积的背景区域不变。结构元素是决定形态学运算性质的关键参数,也是提高 Top-hat 变换检测能力的关键,选择不同的结构元会导致运算对不同几何结构信息的分析和处理。

随着研究的逐步深入,由单一的结构元素不能满足检测的需求,多尺度形态学边缘检测的方法逐渐被研究者们尝试。随着神经网络技术的兴起,文献[7]中提出了一种三层前馈神经网络模型,用来训练形态学滤波器的开运算和闭运算的结构元素,从而对形态学滤波的结果进行了优化。文献[8]通过研究膨胀和腐蚀运算的神经网络结构,提出了一种利用神经网络实现优化形态滤波器参数的方法。利用神经网络优化参数确实能够从一定程度上提高算法的检测性能,但该类算法对硬件要求过高,难以满足工程应用的实时需求。

(2) 基于小波变换的检测方法

小波变换是一种重要的图像处理方法,1998年,Boccignone 等人^[11]提出将小波变换应用于弱小目标检测。后来基于多尺度的小波变换,方向小波变换的运动弱小目标检测方法相继被提出。2014年,文献[13]提出了一种基于上下文空间自适应 Bayes Shrink 阈值模型的小波图像去噪方法。该方法通过上下文建模来计算小波系数的局部相关性,并在不同尺度和方向上优化小波系数的阈值,相比于 Bayes Shrink 阈值更准确。文献[14]提出了一种基于小波变换的自适应多模红外弱小目标检测算法,缺点是计算复杂、耗时。

该类方法在理论上取得了不错的成果,但在实际系统工程应用中由于其运算的复杂性使其仍然具有局限性。

(3) 基于匹配滤波的检测方法

匹配滤波是要设计一个和图像感兴趣的感兴趣信息或目标对象相关的滤波器。滤波器的设计一般要遵循最大信噪比的设计准则,对于强起伏背景具有较好的抑制制作用,进而可以改善目标检测的性能。好的滤波模板的设计能保证与兴趣目标的良好匹配度,从而能有效地提告目标的信噪比。针对复杂背景红外图像的统计特性,文献[15]等提出了一种基于组合式空间匹配滤波器的运动弱小目标检测方法,具有较好的实时性。文献[16]提出基于小目标梯度特性的二维匹配滤波器背景抑制算法对提高小目标信噪比、信噪比增益和相对对比度指标有着明显的作用。

(4) 基于 TDLMS 的检测方法

TDLMS(three dimensional least mean square)方法于1988年由 Hadhoud,Mohiy M 等人^[17]首次提出,将 LMS 方法应用于图像处理。TDLMS 方法为迭代算法,在进行弱小目标检测时,根据输入图像自动计算模板参数,在每一次迭代过程中将预测图像与期望图像求差异来求得误差函数。当误差函数小于某一阈值时,停止迭代并输出预测的背景图像。TDLMS 方法的优点在于具有自适应性,鲁棒性好,可以准确估计出背景图像。该方法的改进主要集中在不同特征区域的选取和模板更新步长参数的自适应选取这两个因素^[18]。TDLMS 方法获得最优模板是需要通过迭代的,所以导致计算量很大,实时性很难满足工程需要。

3.2 侧重目标特性的典型目标检测算法

目标本身固有的规律性特征和运动目标的几何动力学特征给弱小目标的检测提供了可能。对运动目标进行有效地检测,可以利用多帧图像的运动信息,将目标的运动特征和运动轨迹的连续性、一致性结合起来考虑。侧重目标特性的方法直接从目标出发,建立目标的特性模型,然后计算图像中对每一点与该模型的相似度。相似度越高,则对应的点越可能是目标。

(1) 基于管道滤波的检测方法

管道滤波算法是一种经典的时空滤波算法。它是以目标为中心建立在序列图像空间位置上的空间管道。设置合理的管径是采用时域和空间域的管道滤波方法时必须考虑的因素,因此需了解目标的最大移动速度。若目标移动过快,则需要粗选管道滤波器的管径,但此时算法的复杂度也会随之增加。赵晓明^[19]等人提出了一种移动管道滤波方法,该方法适用于在检测过程中目标在图像上移动很长的距离的情况。刘靳^[20]等人在利用管道滤波检测目标的同时加入了自适应学习的思想,管道中心的坐标位移能够根据目标位置进行实时加权修改,有效地抑制了边缘噪声对目标检测结果的干扰。

(2) 基于粒子滤波方法

粒子滤波(Particle Filter, PF)又称序列重要采样法,最先于1993年由英国学者Cordon, Salmond等研究者提出^[21]。由于粒子滤波技术具有适用于非线性、非高斯应用场景下的递归处理特性,是实现检测前跟踪技术的一种高效方法,研究者们相继将其应用于目标跟踪^[22-23]。粒子滤波通过蒙特卡罗积分模拟来实现对贝叶斯滤波递推,得到状态的后验概率密度函数,估计出目标的航迹。粒子滤波算法容易对复杂模型的状态序列估计,可直接在并行计算机上实现,很好地解决了传统扩展卡尔曼滤波器的非线性误差积累问题,比基于高斯假设的扩展卡尔曼滤波(EKF)更具代表性,但大量粒子模拟概率分布容易致使运算量很大,因此改善运算速度是今后研究者们优化粒子滤波算法的重要研究方向。

(3) 光流法

光流法的原理是利用图像序列中像素强度数据的相关性和时间变化来判断每个像素位置^[24]。为了有效地检测运动中的目标,可采用多帧图像的运动信息,将目标的运动轨迹的连续性与运动特征结合起来。

光流是指观测成像面上运动物体的瞬时速度。光流法是一种通过确定像素位置随光流变化而变化来检测目标的方法。光流法的计算方法可分为四类:梯度法、能量法、区域法和相位法。

Horn^[24]提出的光流计算方法是基于梯度的光流计算方法的典型代表。Markandey V^[25]给出了光流运动约束方程,为以后所有光流法的研究奠定了基础;Shan Fu等^[26]提出了两种计算光流场的新方法。光流法由于其运算量大且稳定差的问题限制了其在运动目标检测领域的应用和发展,工程上难以实现。

(4) 多级假设检验方法

1988年,Steven D. Blostein和Thomas S. Huang^[27]首次提出多级假设检验方法(Multistage Hypothesis Testing, MSHT),所谓多级假设检验就是通过假设目标的运动形式为局部匀速或匀加速直线运动,首先按照目标限定的速度及方向,对这些可能的目标轨迹以“树”型结构排列起来,然后将“树”形结构的每一层分别通过假设检验来修正,然后沿着轨迹上的像素灰度累加值与两个门限进行比较,通过删除不符合检验条件的树来减少计算量和存储量。MSHT是一种计算量小,存储量少,能够检测多目标的算法。但在低信噪比情况下,疑似目标起始候选目标轨迹较多会导致后面的“树叉”急剧增多,庞大的计算量导致算法实时性明显变差。针对运算复杂的问题,Blostein等人^[28]还提出一种多重假设检验的方法(MMSHT),通过利用截断序贯算法,对目标是否存在做出硬判决,这样可以滤除更多的虚假轨迹,克服检测帧数大于假设检验算法检测帧数的问题。

(5) 基于人类视觉系统的检测方法

近年来,人类视觉系统(HVS)被引入红外弱小目标检测中,该方法是目前最有研究前景的红外弱小目标检测方法之一。根据人眼的视觉特性,目标可能存在的一个显著区域往往能快速地从复杂的背景杂波中吸引人眼的注意力,而HVS的对比度机制、多分辨率表示、尺寸自适应和弹窗现象等鲁棒特性,提高了目标检测的效率和鲁棒性^[29-33]。研究者在HVS原理的基础上,提出了一系列的改进方法。Kim等人^[29]基于HVS特性,在拉普拉斯尺度空间中通过调整和最大化SCR来实现目标信号增强和

背景杂波抑制。Wang 等人^[30]引入高斯滤波器的差分来获取显著区域,并根据视觉注意力选择真实目标,检测精度和效率较高。Qi 等人^[31]提出了一种结合视觉注意理论的基于方向显著性的新方法,并取得了良好的效果。

为了对红外目标检测具有鲁棒性,一种新的对比度测量方法—局部对比度测量(local contrast measure, LCM)^[34-36]被提出用来增强目标,显著提高图像的可控性。在检测阶段,文献^[35]通过利用局部自相似作为权值,结合局部对比度,得到局部显著性映射(local saliency map, LSM),再通过阈值运算提取出目标可以去除对比度小的区域。这些方法比传统的检测方法更有效。然而,对于噪声和杂波较大的图像,有些算法并不能得到满意的结果。此外,一些方法的计算复杂度和时间成本也不容忽视。Chen 等人^[36]提出了一种利用目标区域与周围相应区域的差值进行局部对比度测量(local contrast measure, LCM)的方法。但其抑制背景杂波的能力有限。随后,Han 等人^[37]引入了一种改进的 LCM(ILCM),旨在提高检测速度。但会降低检测性能,因为它将移动步长设置为窗口边长的 1/2。此外,Wei 等人^[38]提出了一种基于生物视觉机制的红外小目标检测方法,该方法被称为多尺度斑块对比度测量(multiscale patch-based contrast measure, MPCM),能够同时检测红外图像中的亮目标和暗目标。

此外,针对目标特性的目标检测算法,如高阶累积量法^[39]、Hough 变换法和神经网络等,都有一定的作用,只是在计算量和计算复杂度方面,仍有待提高。

4 未来展望

随着军事和民用领域的红外搜索系统应用需求的飞速发展,红外检测系统往往需要具备在多种复杂环境下 ze 常工作的能力,全天候和远距离的目标探测成为了研究的重点问题。因此,人们正在不断探索新的材料来制作高性能的焦平面器件,复合和双波段探测技术以及更先进的信号处理算法也成为了主流的发展方向。在实际应用中,目标和背景的复杂性远远超出了人们的想象,近年来随着红外弱小目标检测技术不断发展,近年来针对特定复杂背景的检测方法也不断被提出,例如天地背景^[40-41],

海空背景^[42]等,通过对特定区域展开不同的算法以达到检测感兴趣目标的目的。随着新型红外探测器的不断研发,高效的信号处理算法仍是当前研究的重要课题,在今后的研究中仍均有很高的研究价值。

参考文献:

- [1] WU Tao, HE Wenzhong, CHEN Xiaolu. Detection algorithm of single frame infrared small target based on local-features[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(3): 368-371. (in Chinese)
吴涛, 何文忠, 陈晓露. 基于局部特征的单帧红外小目标检测算法[J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 368-371.
- [2] Salmond D J, Birch H. A particle filter for track-before-detect[C]//IEEE Proceedings of the American Control Conference. Washington 2001: 3755-3760.
- [3] BIAN Xu, LI Jiangyong. Research on TBD algorithm based on particle filter[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(1): 109-112. (in Chinese)
边旭, 李江勇. 基于粒子滤波的 TBD 算法研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(1): 109-112.
- [4] Suyog D, Deshpande, Meng H, Er, Ronda Venkateswarlu, et al. Max-mean and max-median filters for detection of small targets[J]. Proc. of SPIE, 1999, 3809(1): 74-83.
- [5] BAI Xiangzhi, ZHOU Fugen. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(6): 2145-2156.
- [6] GUO Runqiu, ZHANG Ying, LIN Xiaochun. Detection method of small infrared targets based on morphological filtering[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(6): 451-453. (in Chinese)
过润秋, 张颖, 林晓春. 基于形态滤波的红外小目标检测方法[J]. 激光与红外, 2005, 35(6): 451-453.
- [7] Won Y G, Gader P G, Coffield P D. Morphological shared-weight networks with applications to automatic target recognition[J]. Transactions on Neural Networks, 1997, 8(5): 1195-1203.
- [8] Ritter G X, Sussner P, Diza-de-Leon J L. Morphological associative memories[J]. Transactions on Neural Networks, 1998, 9(2): 281-293.
- [9] Grana M, Raducanu B. Some applications of morphological neural networks[J]. Neural Networks Proceedings IJCNN'01 International Joint Conference, 2001, 4(15): 2518-2523.
- [10] P T Jackway. Improved morphological top-hat[J]. Elec-

- tronics Letters 2000 36(14):1194–1195.
- [11] G Boccignone A Chianese A Picariello. Small target detection using wavelets [C]//Proceedings 14th International Conference on Pattern Recognition ICPR'98, 1998: 1776–1778.
- [12] HOU Jie XIN Yunhong. Detection of infrared small target based on the wavelet transformation and image enhancement technology [J]. Laser & Infrared 2013 43(6):683–688. (in Chinese)
- 侯洁 辛云宏. 基于小波变换与图像增强技术的红外小目标检测 [J]. 激光与红外 2013 43(6):683–688.
- [13] Ye Y Cai Y. A spatially adaptive denoising with activity level estimation based method for infrared small target detection [J]. Intelligent Control and Automation IEEE, 2014: 2911–2917.
- [14] ZHANG Xiaolu LI Ling XIN Yunhong. Adaptive multi-mode infrared small target detection based on wavelet transform [J]. Laser & Infrared 2017 47(5):647–652. (in Chinese)
- 张晓露 李玲 辛云宏. 基于小波变换的自适应多模红外小目标检测 [J]. 激光与红外 2017 47(5):647–652.
- [15] SUN Cuijuan YANG Weiping SHEN Zhenkang. A small infrared target detection system based on matched filtering [J]. Laser & Infrared 2006 36(2):147–150. (in Chinese)
- 孙翠娟 杨卫平 沈振康. 一种基于匹配滤波的红外小目标检测系统 [J]. 激光与红外 2006 36(2):147–150.
- [16] 任国鹏. 基于二维匹配滤波的红外小目标检测 [D]. 西安: 西安电子科技大学 2017.
- [17] M. M. Hadhoud D. W. Thomas. The two-dimensional adaptive LMS (TDLMS) algorithm [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems 1988 35(5):485–494.
- [18] S H M Ohki. Two-dimensional LMS adaptive filters [J]. IEEE Trans. Consum Electr 1991 37(1):66–73.
- [19] ZHAO Xiaoming YUAN Shengchun MA Xiaoli et al. Research on infrared small target detection method based on mobile pipeline filtering [J]. Infrared Technology 2009, 31(5):295–297. (in Chinese)
- 赵小明 袁胜春 马晓丽, 等. 基于移动式管道滤波的红外小目标检测方法研究 [J]. 红外技术 2009 31(5):295–297.
- [20] LIU Jin JI Hongbing. Infrared dim small target detection based on mobile weighted pipeline filtering [J]. Journal of Xidian University 2007 34(5):743–747. (in Chinese)
- 刘靳 姬红兵. 基于移动式加权管道滤波的红外弱小目标检测 [J]. 西安电子科技大学学报 2007 34(5):743–747.
- [21] Cordon N J Salmond D J Smith A F. Novel approach to nonlinear/non-gaussian Bayesian state estimation [C]//Proc. of the Radar and signal Processing 1993: 107–113.
- [22] HU Hongtao JING Zhongliang HU Shiqiang. Pre-detection tracking algorithm for small infrared targets based on auxiliary particle filter [J]. Control and Decision-making, 2005 20(11):1208–1211. (in Chinese)
- 胡洪涛 敬忠良 胡士强. 基于辅助粒子滤波的红外小目标检测前跟踪算法 [J]. 控制与决策 2005 20(11):1208–1211.
- [23] CHENG Jian et al. Infrared target tracking based on particle filter [J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2006 25(2):113–117. (in Chinese)
- 程建 等. 基于粒子滤波的红外目标跟踪 [J]. 红外与毫米波学报 2006 25(2):113–117.
- [24] Horn B K Schunck B G. Determining optical flow [J]. Artificial Intelligence 1981 17(10):185–203.
- [25] Markandey V. Motion estimation for moving target detection [J]. IEEE Trans on AES. 1996 32(3):866–874.
- [26] Shan Fu. Pridmore T. Image flow field detection [J]. Signal Processing. 1996 2(3):1090–1093.
- [27] Blostein S D Huang T S. Detection of small moving objects in image sequences using multistage hypothesis testing [J]. IEEE ICASSP. 1988:1068–1071.
- [28] Blostein S D Richardson H S. A sequential detection approach to target tracking [J]. IEEE Trans AES 1994 30(1):197–212.
- [29] S Kim Y Yang J Lee Y Park. Small target detection utilizing robust methods of the human visual system for IRST [J]. J. Infr. Millim. Terahertz Waves 2009 30(9):994–1011.
- [30] X Wang G. Lv and L. Xu. Infrared dim target detection based on visual attention [J]. Infrared Phys. Technol., 2012 55(6):513–521.
- [31] S X Qi J Ma C Tao et al. A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds [J]. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2013 10(3):495–499.
- [32] Y Chen Y Xin. An efficient infrared small target detection method based on visual contrast mechanism [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 2016 13(7):962–966.
- [33] LIU Runbang ZHU Zhiyu. Infrared dim small target detection method based on visual contrast mechanism [J].

- Laser & Infrared ,2017 ,47 (9) : 1169 – 1173. (in Chinese)
- 刘润邦 朱志宇. 基于视觉对比机制的红外弱小目标检测方法[J]. 激光与红外 ,2017 ,47(9) : 1169 – 1173.
- [34] Y Qin ,B Li. Effective infrared small target detection utilizing a novel local contrast method [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters ,2016 ,13(12) : 1890 – 1894.
- [35] Y Shi ,Y Wei ,H Yao ,et al. High-boost-based multiscale local contrast measure for infrared small target detection [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters ,2018 ,15(1) : 33 – 37.
- [36] Chen C L P ,H Li ,Y Wei ,et al. A local contrast method for small infrared target detection [J]. Geoscience and Remote Sensing , IEEE Transactions , 2014 , 52 (1) : 574 – 581.
- [37] J Han ,Y Ma ,B Zhou ,et al. A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters ,IEEE ,2014 ,11 (12) : 2168 – 2172.
- [38] Y Wei ,X You ,and H Li. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection [J]. Pattern Recognit. ,2016 ,58(10) : 216 – 226.
- [39] R J Liou ,M R Azimi-Sandjani ,Dim target detection using high order correlation method [J]. IEEE T Aero Elec Sys , 1993 ,29(3) : 841 – 856.
- [40] SONG Minmin ,WANG Shuang ,et al. An infrared dim small target detection method under the background of complex universe and sky [J]. Infrared Technology ,2018 ,40(10) : 76 – 81. (in Chinese)
- 宋敏敏 王爽 等. 一种天地复杂背景下的红外弱小目标检测方法[J]. 红外技术 ,2018 ,40(10) : 76 – 81.
- [41] YANG Hui ,et al. Infrared small and weak moving target detection under ground and air background [J]. Infrared Technology ,2018 ,40(5) : 462 – 467. (in Chinese)
- 杨慧 等. 地空背景下红外弱小运动目标检测[J]. 红外技术 ,2018 ,40(5) : 462 – 467.
- [42] DAI Jun ,TANG Xiangcheng ,GAO Zhifeng. Design and implementation of infrared image processing system under sea and air background [J]. Infrared Technology ,2016 ,38 (2) : 121 – 125. (in Chinese)
- 戴军 唐湘成 高志峰. 海空背景下红外图像处理系统设计与实现[J]. 红外技术 ,2016 ,38(2) : 121 – 125.