

## 红外多光谱图像弹道目标检测算法\*

黄树彩, 凌强, 韦道知, 吴潇

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安 710051)

**摘要:**在红外多光谱图像中,弹道导弹尾焰拥有两大特征,一是由强烈红外辐射引起的灰度差异,二是独特的光谱特性。然而,传统的单波段检测技术只利用了尾焰强烈的辐射特性,而近些年发展起来的多光谱检测技术则只利用了尾焰独特的光谱特性。为了充分利用导弹尾焰的两大特征,将单波段检测技术和多光谱检测技术结合起来,提出三种检测算法,并从算法的检测效果、运算量和鲁棒性三方面详细分析它们的优缺点。采用人工合成的红外多光谱图像进行验证,实验结果表明,相比单独使用单波段或多光谱的检测算法,融合算法的检测性能更好。

**关键词:**弹道目标检测;单波段目标检测;多光谱目标检测;红外多光谱图像

**中图分类号:**TP751;TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)06-142-06

## Ballistic target detection in infrared multispectral imagery

HUANG Shucui, LING Qiang, WEI Daozhi, WU Xiao

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** There are two important characteristics for missile plume in infrared multispectral imagery: one is the gray-scale difference caused by strong infrared radiance; and the other one is the unique spectral signature feature. However, the classical single-band detection technology only uses the first characteristic, and the multispectral detection technology which has been developed in recent years only uses the second characteristic. In order to fully exploit the characteristics of missile plume, three detection algorithms were proposed by combining the single-band and multispectral detection technology. The advantages and disadvantages of the three algorithms were discussed in detail in the aspects of detection performance, computational complexity and robustness. Experiments on synthetic infrared multispectral imagery demonstrate a better performance of the combined algorithms when compared with single-band or multispectral detection algorithm.

**Key words:** ballistic target detection; single-band target detection; multispectral target detection; infrared multispectral imagery

弹道导弹在助推段会产生强烈的红外辐射,这为天基红外预警系统探测导弹提供了契机。传统的探测技术以宽带成像为基础,由于弹道目标所占像素较少、信噪比较低且其他强辐射目标在红外图像中表现出和弹道目标相似的特性,因此利用单一波段的红外图像探测弹道目标难以达到实用要求。近年来,随着窄带成像技术的发展,红外多光谱图像开始应用于目标检测<sup>[1]</sup>,使得弹道目标检测发生了革命性的变化。红外多光谱图像不仅记录了导弹尾焰与其周围背景像素灰度的空间差异,还获得了导弹尾焰独特的光谱特性,这为弹道目标检测提供了另一个更为有效的途径。因此,研究如何利用红外多光谱信息提高弹道目标检测性能显得尤为重要,然而目前国内外缺少这方面的研究。

单波段目标检测通过目标与其局部背景的灰度差异来区分目标,典型的算法有最大中值滤波<sup>[2]</sup>、二维最小均方滤波<sup>[3]</sup>、核各向异性扩散滤波<sup>[4]</sup>等。多光谱目标检测通过光谱特征来区分目标,根据有无目标光谱信息,可分为光谱匹配检测和光谱异常检测。光谱匹配检测利用已知的目标光谱信息来突出目标、抑制背景,典型的算法有光谱匹配滤波算法<sup>[5]</sup>、匹配子空间算法<sup>[6]</sup>、稀疏表示算法<sup>[7]</sup>等;光谱异常检测利用待测光谱与其周围背景光谱的显著差异来检测目标,典型的算法有 Reed-Xiaoli 算法<sup>[8]</sup>、支持向量数据描述算法<sup>[9]</sup>、联合表示算法<sup>[10]</sup>等。然而,对于弹道目标而言,无论是单波段目标检测技术还是多光谱目标检测技术都只利用了目标两个特性中的一个。为充分利用目标的两大特征,本文将单波段检测

\* 收稿日期:2015-06-23

基金项目:航空科学基金资助项目(20130196004)

作者简介:黄树彩(1967—),男,湖北黄梅人,教授,博士,博士生导师,E-mail:hsc67118@126.com

技术和多光谱检测技术结合起来,提出了三种有效的弹道目标检测算法。

## 1 单波段检测和多光谱检测结合算法

由于单波段红外图像易受背景杂波影响,且难以区分其他强辐射目标,单波段检测算法的效果和鲁棒性往往较差,但算法的运算量较小。与单波段红外图像相比,红外多光谱图像的数据量急剧增大,相应的多光谱检测算法也往往更复杂,运算量较大,但算法的检测效果和鲁棒性相对较好。为充分利用两者的优点,将单波段检测技术和多光谱检测技术结合起来,提出三种检测算法,根据它们的结合方式,分为并联式检测、串联式检测和混合式检测。

### 1.1 并联式检测

并联式检测算法,顾名思义就是将单波段检测技术和多光谱检测技术以并联的方式进行结合,其检测流程如图1所示。并联式检测算法首先将红外多光谱各波段的图像通过加权相加的方式进行融合,得到普通的二维图像,再分别进行单波段检测和多光谱检测,最后将两者的检测结果以加权相加的方式进行图像融合,对融合图像进行阈值分割后输出检测结果。

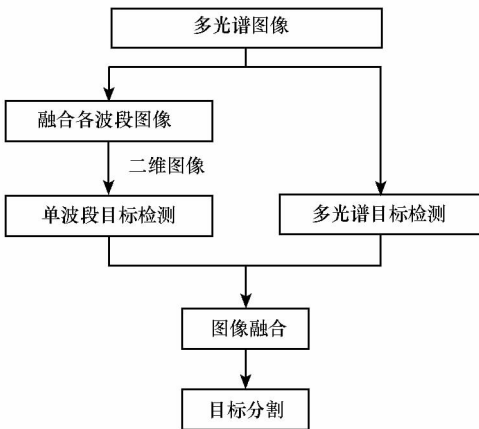


图1 并联式检测流程

Fig. 1 Flow chart of parallel type detection

可以看出,并联式检测算法将单波段检测和多光谱检测分开进行,再将两者的检测结果“并联”,这充分利用了导弹尾焰强烈的辐射特性和独特的光谱特性,在一定程度上提高了算法的检测效果。

然而,并联式检测算法存在一个致命的缺点:算法的运算复杂度太高。显然,并联式检测算法的运算量是单波段检测算法和多光谱检测算法之和,而多光谱检测算法往往因为运算量大而达不

到实时性要求。因此,并联式检测算法的应用前景堪忧。

### 1.2 串联式检测

为有效减小并联式检测算法的巨大运算量,提出了串联式检测算法,顾名思义就是将单波段检测技术和多光谱检测技术以串联的方式进行结合,其检测流程如图2所示。同并联式检测算法一样,串联式检测算法首先将各波段图像加权融合,再对融合后的图像用单波段检测算法进行背景抑制,然后进行阈值分割提取可疑的目标像素点,将可疑像素点作为待检测像素点,用多光谱检测算法对原始红外多光谱图像中的这些像素点进行检测,阈值分割后输出检测结果。

可以看出,串联式检测算法只是将单波段检测作为多光谱检测的辅助手段。在进行多光谱检测前,先用单波段检测对整个图像进行一次“预选”,提取待检测像素点,这大大减小了多光谱检测将要处理的像元数目,从而减小了算法的运算量,有效提高了算法的实时性。

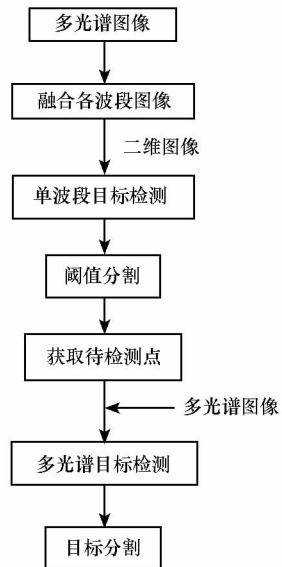


图2 串联式检测流程

Fig. 2 Flow chart of tandem type detection

然而,串联式检测算法存在两个明显的缺点。一是单波段检测后的阈值选取较难。由于单波段检测的效果往往不太理想,如果阈值选得太大,一些目标像素点可能在阈值分割后就被认定为背景点,造成漏警;如果阈值选得太小,阈值分割后保留的可疑目标像素点较多,算法的运算量减小就不明显。一般来说,在保证一定实时性的基础上,阈值选得越小越好,以尽量避免漏警情况的发生。二是单波段检测的结果利用不够充分。若单波段检测后的阈值分割不存在漏警,检测的实际效果

只取决于多光谱检测,“目标的灰度值在局部范围内表现为极大值”这一特征没有得到有效利用。

对于单波段检测后的图像,可以采用一种简单的自适应全局阈值分割方法,阈值  $T$  根据图像的统计特性来确定,即:

$$T = \mu + k\sigma \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为图像灰度的均值,  $\sigma$  为图像灰度的标准差,  $k$  为常数。

下面讨论常数  $k$  的选取问题。可以假设单波段检测后图像的灰度值服从正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ , 则灰度值分布在  $(-\infty, \mu + \sigma)$  范围内的概率为 84.13%, 分布在  $(-\infty, \mu + 2\sigma)$  范围内的概率为 97.72%, 分布在  $(-\infty, \mu + 3\sigma)$  范围内的概率为 99.87%。而目标的灰度值较大, 可以认为是小概率事件, 但为尽量避免漏警情况的发生, 可以将  $k$  选为 1。这样, 理论上串联式检测算法将多光谱检测的运算量减小了 84.13%。

### 1.3 混合式检测

在算法的运算量和检测效果这两方面, 串联式检测算法和并联式检测算法在一定程度上呈现出互补关系。那么, 可不可以将它们联合起来, 使算法具有较小的运算量和较好的检测效果呢? 于是, 本文又提出了混合式检测算法, 其检测流程如图 3 所示。检测流程的前半部分和串联式检测算法一样, 多光谱检测结束后的流程和并联式检测算法类似, 只是不再是对单波段检测和

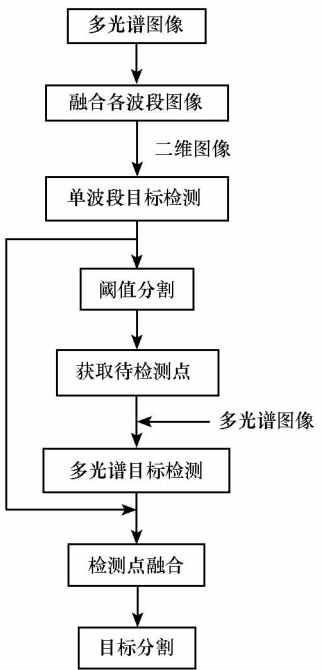


图 3 混合式检测流程

Fig. 3 Flow chart of hybrid type detection

测的整个检测结果图像进行融合, 而是对检测点的结果以加权求和的方式进行融合, 对于非检测点则用单波段检测结果代替, 对融合结果进行阈值分割后输出检测结果。

可以看出, 混合式检测算法充分利用了单波段检测结果, 其运算量和串联式检测算法相当, 而检测效果在无漏警情况下和并联式检测算法相当, 它巧妙地结合了两者的优点, 具有较小的运算量和较好的检测效果。

由于非检测点保留了单波段检测结果, 混合式检测算法在一定程度上削弱了单波段检测后阈值选取的影响, 但并没有完全解决阈值选取问题。同串联式检测一样, 在保证一定实时性的基础上, 阈值选得越小越好, 以尽量削弱阈值选取的影响。在实际应用中, 阈值由式(1)确定。

## 2 实验结果及分析

信噪比是衡量单波段检测算法性能的一个非常重要的指标, 根据它在红外图像中的定义<sup>[11]</sup>, 可将红外多光谱图像的信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 定义为:

$$SNR = \left| \frac{\mu_t - \mu_b}{\sigma_b} \right| \quad (2)$$

式中,  $\mu_t$  表示目标灰度的均值,  $\mu_b$  表示背景灰度的均值,  $\sigma_b$  表示背景灰度的标准差。若  $\mu_t, \mu_b, \sigma_b$  由多光谱图像的某个波段求得, 则式(2)表示该波段的信噪比; 若  $\mu_t, \mu_b, \sigma_b$  由多光谱图像的所有波段求得, 则式(2)表示多光谱图像的信噪比。

### 2.1 多光谱图像合成

由于目前无法获得包含弹道目标的真实红外多光谱图像, 故采用人工合成的红外多光谱图像进行实验验证。首先在一幅包含 10 个波段的红外多光谱图像中加入 18 个弹道目标, 每个目标的大小为  $3 \times 3$ , 所有波段的均值如图 4(a) 所示 (记为 MSI-I)。为了展示多光谱检测在识别弹道目标方面的优越性, 又在图像中加入了 12 个喷气式飞机目标作为虚假目标, 每个目标的大小为  $3 \times 3$ , 所有波段的均值如图 4(b) 所示 (记为 MSI-II)。MSI-I 和 MSI-II 中前三排目标为三种不同类型的弹道导弹光谱和该像素点原始光谱混合而成, 从左至右导弹光谱的丰度分别为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8; MSI-II 中后两排目标为两种不同类型的喷气式飞机, 它们均为纯像元。MSI-I 和 MSI-II 的真实目标分布如图 4(c) 所示。导弹和飞机的光谱曲线如图 5 所示。

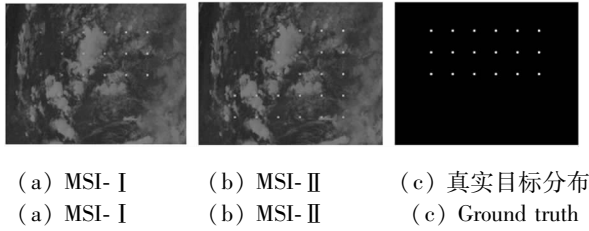


图4 合成多光谱图像及真实目标分布

Fig.4 Synthetic multispectral image and target locations

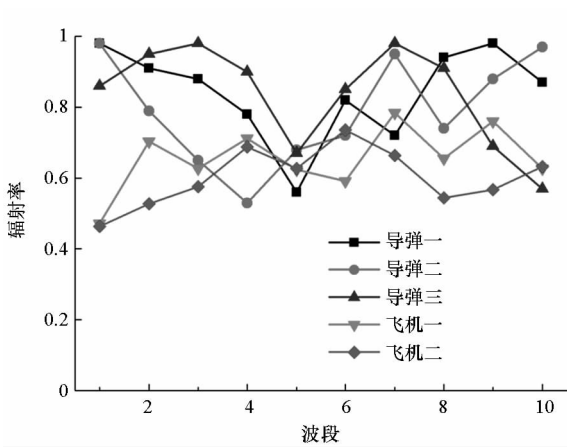


图5 导弹和飞机光谱曲线

Fig.5 Spectrums of different missiles and airplanes

### 2.2 性能分析

信噪比是影响单波段检测性能的重要因素,在实际应用中,各波段图像融合的权值应根据各波段的信噪比来确定。实验中,为了简便,各波段图像融合的权值均设为 0.1。一般情况下,多光谱检测的效果好于单波段检测,因此融合时单波段检测和 multispectral 检测的权值分别设为 0.4 和 0.6。实验中,单波段检测采用具有良好鲁棒性的核各向异性扩散背景抑制算法<sup>[4]</sup>,滤波窗口设为  $7 \times 7$ ;多光谱检测采用具有亚像素检测能力的稀疏表示目标检测算法<sup>[7]</sup>,内窗设为  $5 \times 5$ ,外窗设为  $7 \times 7$ ,稀疏度设为 8,目标字典即为图 5 中的三条导弹光谱曲线。

首先,从算法的检测效果和运行时间两方面对提出的三种检测算法进行分析。检测效果采用接收机工作特性 (Receiver Operating Characteristic, ROC) 曲线以及该曲线下的面积 (Area Under the Curve, AUC) 进行评价<sup>[12]</sup>。其中多光谱图像 MSI-II 的单波段检测、多光谱检测、并联式检测、串联式检测以及混合式检测的检测效果如图 6 所示。五种算法的 ROC 曲线如图 7 所示,其  $1 - AUC$  值和运行时间分别见表 1 和表 2。

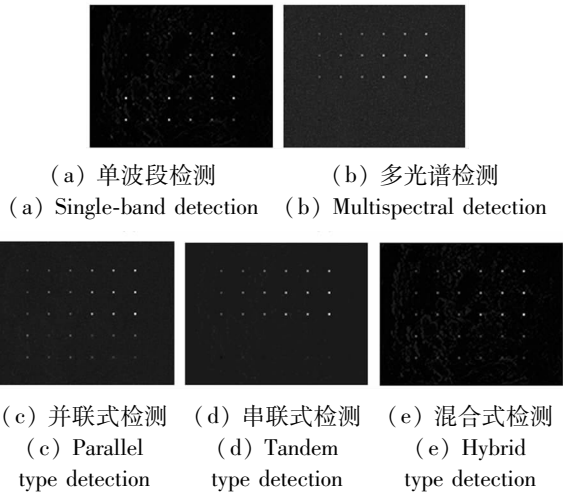
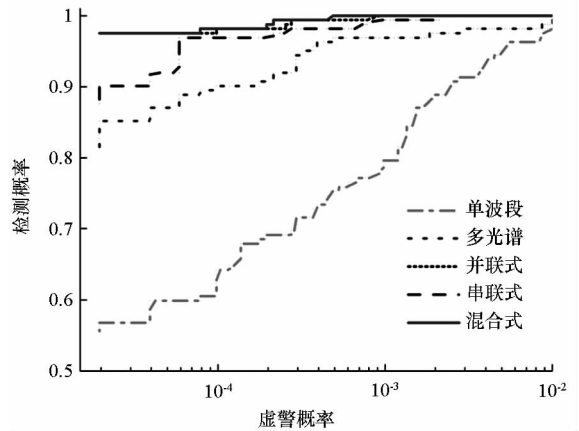
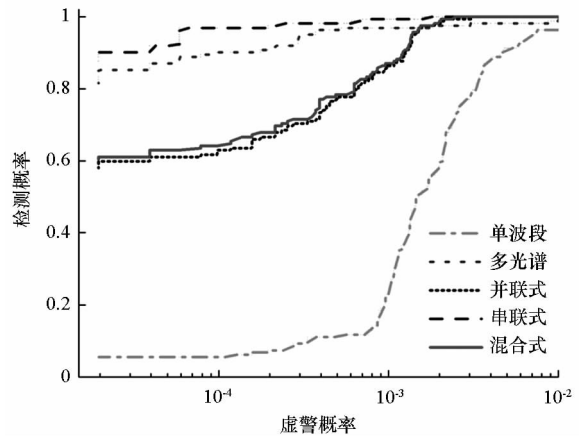


图6 五种算法的检测效果图

Fig.6 Detection results of five algorithms



(a) MSI-I



(b) MSI-II

图7 五种算法的 ROC 曲线

Fig.7 ROC curves of five algorithms

表1  $1 - AUC$  值

Tab.1 Values of  $1 - AUC$   $\times 10^{-4}$

	单波段	多光谱	并联式	串联式	混合式
MSI-I	8.794	3.310	0.091	0.297	0.059
MSI-II	23.485	3.335	3.161	0.243	2.945

表 2 运行时间

Tab.2 Execution time s

	单波段	多光谱	并联式	串联式	混合式
MSI-I	3.07	14.75	17.69	4.57	4.62
MSI-II	3.03	14.58	17.56	4.18	4.21

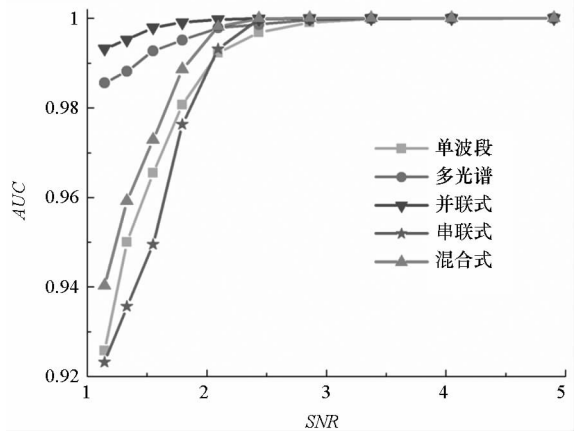
需要说明的是,对于多光谱图像 MSI-I 和 MSI-II,串联式检测和混合式检测在单波段检测后均没有发生漏警情况。从 ROC 曲线和 AUC 值可以看出,多光谱检测的效果相对好于单波段检测的效果;相比单独使用单波段检测或多光谱检测,融合检测算法的检测效果明显提升;由于滤除了部分背景点,混合式检测的检测效果比并联式检测的稍好。

从对 MSI-I 的检测效果可以看出,检测效果:混合式检测 > 并联式检测 > 串联式检测。但是对于 MSI-II,串联式检测的效果最好。这是因为单波段检测对飞机目标的抑制效果较差,而多光谱检测利用光谱信息较好地抑制了飞机目标,由于融合检测引入了单波段检测的较差结果,并联式检测和混合式检测的 AUC 值比串联式检测的小,效果更差。于是,在低虚警概率区域,并联式检测和混合式检测的检测概率比多光谱检测和串联式检测的低,但随着虚警概率的增大,融合的优势体现出来,并联式检测和混合式检测的检测概率超过了多光谱检测的,AUC 值也比多光谱检测的稍大。因此,总体上来说,并联式检测和混合式检测的效果优于多光谱检测。

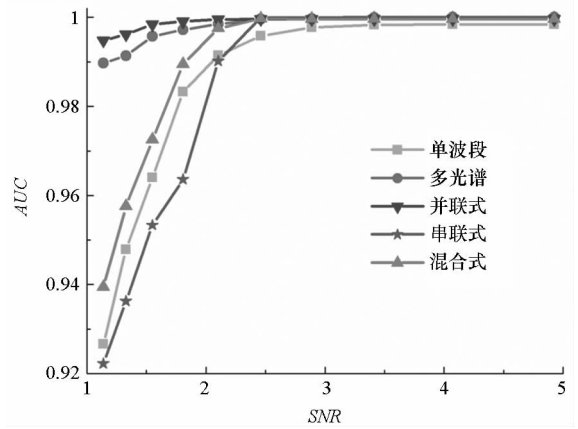
在运行时间上,单波段检测比多光谱检测短得多。串联式检测的运行时间比单波段检测的长约 1.33 s,表明对阈值分割后的检测点,多光谱检测所用时间从 14.67 s 左右减少到了 1.33 s 左右,大概减少了 90.93% 的计算量。显然,并联式检测的运行时间近似等于单波段检测和多光谱检测之和。混合式检测的运行时间比串联式检测的稍长,这是由于混合式检测只是在串联式检测后加入了一个检测点融合过程。

其次,从算法的鲁棒性方面进行分析。对于低空弹道目标,大气对导弹尾焰产生了巨大的衰减作用,使得弹道目标检测更加困难,因此,鲁棒性是算法能否实际应用的重要影响因素。在生成多光谱图像时先将整个多光谱图像乘以不同系数模拟不同强度背景,然后再加入导弹和飞机目标,以此来检验算法的鲁棒性。大气透过率越低,信噪比越小,目标越难检测。可用信噪比来衡量不同背景环境的复杂程度,不同信噪比下五种算法

的 AUC 值如图 8 所示。



(a) MSI-I



(b) MSI-II

图 8 SNR 对检测效果的影响

Fig. 8 Influence of SNR on detection performance

总的来说,信噪比越高,算法的检测性能越好。显然,鲁棒性:并联式检测 > 多光谱检测 > 混合式检测 > 单波段检测 > 串联式检测。串联式检测的鲁棒性相对较差,特别是在极低信噪比的情况下,串联式检测的 AUC 值比单波段检测还低,这是因为在低信噪比下单波段检测效果不佳,使得串联式检测在阈值分割后造成了固定漏警,不可能再分割出目标,而单波段检测和混合式检测却可以设置更小的阈值分割出目标。随着信噪比的增大,这种影响被良好的多光谱检测所抵消,所以串联式检测的 AUC 值在信噪比为 2.1 左右超过了单波段检测。对于 MSI-II,当信噪比增大到一定程度以后,单波段检测的 AUC 值趋于 0.998 4,而不是 1,这是因为飞机目标的灰度值与其周围背景对比太大,单波段检测后形成了固定虚警。

### 3 结论

本文提出了三种红外多光谱图像弹道目标检

测算法,并从检测效果、运算量和鲁棒性三方面分析了三种算法的性能。实验结果表明,三种算法各有优缺点,并呈现出一定的互补关系,实际应用时应根据作战任务和环境条件进行选择。并联式检测算法的鲁棒性最好,但算法的运算量大,适合在低信噪比、实时性要求不高的条件下使用;串联式检测算法的运算量较小,但算法的鲁棒性较差,适合在高信噪比、有其他强辐射目标的条件下使用;混合式检测算法的鲁棒性比串联式检测算法的稍好,运算量相当,适合在高信噪比、无其他强辐射目标的条件下使用。

## 参考文献 (References)

- [1] 王陈来, 杨春玲, 戴景民. 基于 GLRT 的红外多光谱弱小运动目标检测[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 149 - 155.  
WANG Jianlai, YANG Chunling, DAI Jingmin. Dim moving target detection in multispectral IR image sequence based on GLRT[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(2): 149 - 155. (in Chinese)
- [2] Deshpande S D, Er M H, Venkateswarlu R, et al. Max-mean and max-median filters for detection of small targets [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3809: 74 - 83.
- [3] Cao Y, Liu R M, Yang J. Small target detection using two-dimensional least mean square (TDLMS) filter based on neighborhood analysis [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 29(2): 188 - 200.
- [4] 凌强, 黄树彩, 吴潇, 等. 基于核各向异性扩散的红外小目标检测[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(1): 93 - 98.  
LING Qiang, HUANG Shucai, WU Xiao, et al. Infrared small target detection based on kernel anisotropic diffusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(1): 93 - 98. (in Chinese)
- [5] Nasrabadi N M. Regularized spectral matched filter for target recognition in hyperspectral imagery [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008, 15: 317 - 320.
- [6] Scharf L L, Friedlander B. Matched subspace detectors [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 2146 - 2157.
- [7] Zhang Y X, Du B, Zhang L P. A sparse representation-based binary hypothesis model for target detection in hyperspectral images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3): 1346 - 1354.
- [8] Reed I, Yu X. Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution [J]. IEEE Transactions on Acoustic, Speech, Signal Processing, 1990, 38(10): 1760 - 1770.
- [9] Gurram P, Heesung K. Support-vector-based hyperspectral anomaly detection using optimized kernel parameters [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 2(6): 1060 - 1064.
- [10] Li W, Du Q. Collaborative representation for hyperspectral anomaly detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3): 1463 - 1474.
- [11] 吴一全, 尹丹艳. 基于 FLS-SVM 背景预测的红外弱小目标检测[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2806 - 2811.  
WU Yiquan, YIN Danyan. Detection of small target in infrared image based on background prediction by FLS-SVM [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2806 - 2811. (in Chinese)
- [12] 康孙, 钢金, 朱晓华, 等. 基于 Q-MMSPF 的海杂波多重分形互相关分析和目标检测 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(3): 170 - 175.  
KANG Sun, GANG Jin, ZHU Xiaohua, et al. Multifractal cross-correlation analysis of sea clutter and target detection based on Q-MMSPF [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(3): 170 - 175. (in Chinese)