

〈综述与评论〉

红外弱小目标检测技术研究现状与发展趋势

侯 旺^{1,2}, 孙晓亮¹, 尚 洋¹, 于起峰¹

(1. 国防科技大学航天科学与工程学院图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;

2. 海军装备研究院航空所, 上海 200436)

摘要: 在一些关键的军事和民用红外成像应用领域, 待突破的技术瓶颈往往都集中在红外弱小目标检测技术上。简介了红外弱小目标检测的含义和在军事、民用方面的意义, 重点综述了目前红外弱小目标检测的各类典型算法原理和特点, 最后对红外弱小目标检测技术的研究和发展趋势进行了预测。

关键词: 红外弱小目标; 目标检测; 空域滤波; 频域滤波; 跟踪算法

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8891(2015)01-0001-10

Present State and Perspectives of Small Infrared Targets Detection Technology

HOU Wang^{1,2}, SUN Xiao-liang¹, SHANG Yang¹, YU Qi-feng¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Image measurement and Vision Navigation, College of Aerospace Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Institute of Aviation Equipment, Naval Academy of Armament, Shanghai 200436, China)

Abstract: Small infrared target detection often plays an important role, even a bottleneck, in lots of military and civil infrared application fields. In this paper, a brief description on small infrared target detection was given firstly. Then, a detail overview on the present kinds of small infrared target detection algorithms was given, including the principle and character of the algorithms. Finally, the perspective of small infrared targets detection technology was predicted.

Key words: small infrared target, target detection, spatial filtering, frequency domain filtering, tracking algorithm

0 引言

人类对红外目标检测技术的研究最初来源于对响尾蛇捕食机制的研究。响尾蛇的视觉系统非常迟钝, 几乎对可见光刺激没有任何反应。但是由于响尾蛇对红外热源非常敏感, 因此它可以很容易地捕获食物。响尾蛇的热源敏感器位于眼睛和鼻孔之间, 该敏感器在收集小动物的热信号后, 将其传递给大脑, 之后大脑控制响尾蛇获取食物。受此启发, 在 20 世纪 40 年代, 人们研制出一种空对空导弹, 它的红外敏感元件的材料使用硫化铅, 对飞机的尾焰发射的红外辐射线非常敏感。当导弹上红外敏感器接收到红外辐射线后, 在控制系统引导下对飞机尾部进行攻击。从此以后, 世界各国都开始对红外目标检测技术进行研

究。

红外目标检测技术主要利用背景和目标之间的红外辐射差异来进行目标识别, 它的载体为红外目标检测系统。该系统的主要组成部分有: 扫描与伺服控制器、信息处理器、光学系统、红外探测器、信息输出的接口、中心计算机、显示装置等。它的工作过程为: 首先由红外探测器接收目标和背景的红外辐射信号, 然后由信号处理器将接收到的信号转换为电信号并将其校正、放大并转换, 随后利用目标检测算法提取目标, 最后在显示设备上实时显示检测到的目标及状态^[1]。

相比雷达探测系统, 红外目标检测系统的优势体现为^[1-2]:

1) 红外目标检测系统利用目标的热辐射特性进

收稿日期: 2014-11-10; 修订日期: 2015-01-02.

作者简介: 侯旺 (1986—), 男, 工程师, 博士, E-mail: simon_zero@126.com.

通讯作者: 于起峰, 男, 中国科学院院士, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: yuqifeng@vip.sina.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目, 编号: 11332012, 11472302.

行被动探测，很难受到干扰，它不辐射电磁波，不易受到导弹攻击；而雷达系统需要发射电磁波并接收回波进行目标检测，于是这种系统不仅很容易受到电磁干扰，而且很容易被敌方发现。近年来，反雷达导弹武器发展迅速，如美国 AGM-88“哈姆”反辐射导弹、美国 AGM-45“百舌鸟”、AGM-78“标准”系列、我国的飞腾 2000 以及俄罗斯的 AS-17 等，因此，雷达系统在战场上的生存能力受到极大威胁^[3]。

2) 红外目标检测系统可以检测到雷达探测不到的电磁隐身设备，而且它对飞行器尾焰敏感，可以探测到雷达探测不到的低空飞行的巡航导弹，弥补了雷达盲区。

3) 红外目标检测系统可以在夜间工作，并且该系统没有强辐射，有利于隐蔽。该系统体积小、重量轻、机动性强、配置方便，非常有利于搭载在预警卫星和无人机上。另外，红外检测系统可以产生比雷达细节丰富，分辨率高的图像。

另外，红外目标检测技术的军事价值极高，待检测的目标如战斗机、导弹、舰船等，对预警及侦察极其重要，可以直接影响高级指挥所对于战场局势的判断和决策。因此，红外目标检测技术成为当今世界高技术领域的热门研究课题，这项技术逐渐引起各国的高度重视。

衡量红外目标检测算法性能主要体现在对红外弱小目标的检测能力上。以红外检测系统为例，当待检测的目标距离检测器很远时，目标的光谱能量经过大气传输，在大气扰动、光学散射和衍射等等影响下，检测器靶面接收目标信号的光谱辐照度很小，导致目标的信噪比很低。另外，由于目标距离检测器很远，因此目标在检测器靶面上的成像面积也很小，远距离目标的检测非常困难。

在实际应用中，更高的分辨率可以检测更远距离的目标，但是由于检测设备受到平台体积和重量的限制，不可能无休止的提高摄像系统设备的固有分辨率，通过升级硬件的方式不仅代价昂贵，而且不易实现。对于相同的目标，若采用一般的目标检测技术能够检测极限距离为 1 km 的目标，如果想要检测极限距离为 3 km 的目标，就需要将摄像机硬件设备提高 3 倍分辨率；但是如果采用弱小目标检测技术，就可以利用序列图像信息，在硬件设备分辨率不变的情况下检测到极限距离为 3 km 的目标。由以上分析可知，使用基于软件的方式可以在不改变硬件水平的条件下增加对目标的探测距离。

随着时代的发展，弱小目标检测的需求已从红外波段扩展到几乎整个波段。其应用也越来越广泛。在军事领域，弱小目标检测技术在预警系统、精确打击

武器和防空系统等领域中发挥重要作用。在民用领域，这项技术的应用领域有：科学成像、安全警戒、刑侦、森林防火和消防、交通管理、医学成像、遥感、机器人、自动驾驶、航天、搜索或跟踪天空中的流星、卫星或其他运动目标、城市红外污染分析、海面人员搜救和卫星大气红外云图分析等^[3-6]。

综上所述，红外弱小目标检测技术是近年来信息处理技术，尤其是军事侦察等领域的研究热点之一。但是，实时、鲁棒、通用的红外弱小目标检测算法尚未出现。对军事领域而言，复杂背景下高效、鲁棒、可靠的弱小目标检测算法的研究是一项非常关键的技术，进行红外弱小目标检测和跟踪技术的研究对于提高预警能力、反击能力以及在未来战争中的制空能力都有很高的军事价值。

1 红外弱小目标检测技术的研究现状

在国外，对弱小目标检测的主要研究机构有美国的海军实验室、空军实验室、NASA 以及加利福尼亚大学应用数学中心等。许多国际刊物也经常刊登一些弱小目标检测技术的研究成果。国际光学工程学会（Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers，简记为 SPIE）从 1989 年开始，几乎每年都会举办有关弱小目标检测技术的国际会议，研讨弱小目标检测技术的最新研究成果。

在国内，国家在弱小目标探测技术方面进行了大量的投入，已初具规模，但仍然与国外最先进的技术差距较大。国内在弱小目标检测方面的相关研究机构有：国防科技大学、华中科技大学等高校以及兵器工业集团第 211 研究所、兵器工业集团第 205 研究所、中电集团第 27 研究所、中国船舶工业总公司 717 所等。其中，研究的重点集中在红外预警系统、机载前下视系统对地面及低空目标的监测、红外制导等领域。一些国内期刊也经常发表一些与弱小目标检测相关的研究成果。另外，我国也将高性能红外探测器研制、红外精确制导武器、弱小目标信号处理技术列为红外预警和探测系统中的重点技术。

1.1 红外弱小目标成像的数学模型

红外成像，由于受大气散射、折射、光学散焦、镜头污染、镜头变形等影响，被探测器接收时目标可能非常弱小。如图 1 所示，图(a₀)和(a₁)为 2 幅实际红外图像。为清晰显示，放大这 2 幅图像中弱小目标的局部区域，然后调节其对比度，最后将其分别标注于图像的右上角。图(b₀)和(b₁)分别为这 2 幅图像上的弱小目标三维强度分布图。通过观察可知：图中弱小目标的形状为中心对称、向四周辐射的形状，与二维高斯函数非常相似。

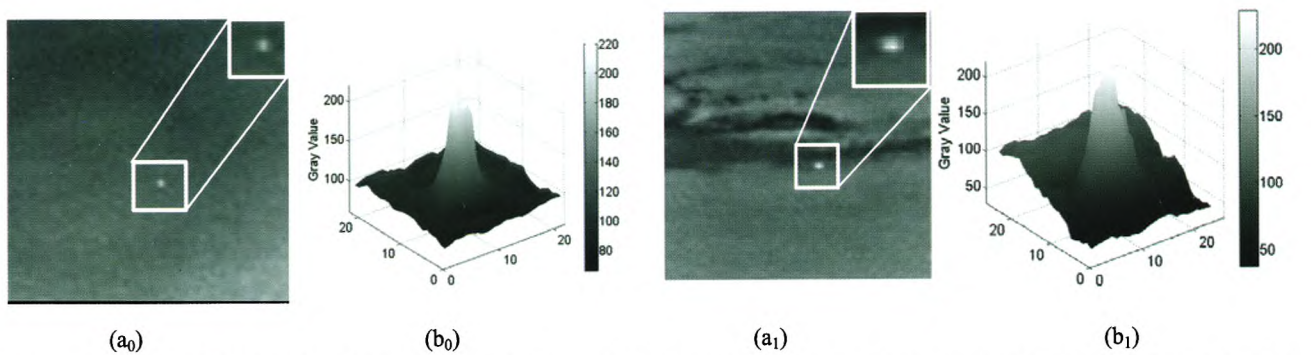


图1 实际红外图像中的弱小目标及其三维强度图像 Fig.1 A small target in an infrared image and its 3D intensity distribution

很多学者都使用二维高斯函数对弱小目标进行建模，模型如下^[7]：

$$f_T(r)=f_{T0}(x,y)=\lambda \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2+\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\right\} \quad (1)$$

式中： σ_x 和 σ_y 为横向和纵向的尺度参数； λ 为目标的灰度幅值； $f_T(r)$ 为该弱小目标的空间分布灰度函数。根据 SPIE 的定义，成像尺寸小于 81 个像素，即 256 × 256 的 0.12% 的目标为弱小目标^[8]。基于上述弱小目标数学模型就可以对弱小目标检测算法进行理论分析。

红外弱小目标检测算法可以分为 2 类：第一类是基于单帧图像的跟踪前检测算法（Detect before Track，简记为 DBT）；第二类是基于序列图像的检测前跟踪算法（Track before Detect，简记为 TBD）^[8-9]。

1.2 红外弱小目标的跟踪前检测算法

跟踪前检测算法的基本思想是：首先对序列图像中的每幅图像都进行预处理、分割，获得众多疑似目标，然后根据目标运动规律的先验知识和灰度分布形式对目标进行确认。此算法逻辑清晰，实现简单。但是，当目标的信噪比较低时，分割出的疑似目标中很可能不包含真实目标，导致算法失效。因此，这类算法只有在目标信噪比较高的条件下有效（SNR>10 dB）^[8]。

复杂背景的低频部分为缓慢变化的背景，而高频部分为弱小目标、随机噪声以及景象边缘等信号。DBT 方法首先对图像进行预处理，目的是抑制平缓变化的背景。然后利用人工设定的阈值分割图像，获取众多疑似目标。最后，在序列图像上进行目标确认。

目前对单帧图像的处理算法很多，一般可以分为 2 大类：一类是空域滤波方法；另一类是频域滤波方法。这 2 类算法的不同之处在于：前者是在空域上对图像进行处理，后者是在频域上对图像进行处理。这 2 类算法的相同之处为：从本质上来说它们都是通过高通滤波抑制平缓变化的背景。

1) 空域滤波方法

空域滤波方法首先通过背景预测的方式对图像的背景信号进行估计，然后利用估计的背景与原始图像进行差分运算，最后对差分图像进行阈值分割并检测弱小目标。其中背景估计的过程为：对图像上每个像素点取局部区域，综合利用此局部区域上的灰度信息估计该像素点的背景强度值，遍历图像上每个像素点获得背景预测图。传统的空域滤波方法有高通模板预测方法、中值滤波方法、基于形态学的方法等^[10]。

(1)高通模板滤波方法

高通模板滤波方法是一种背景估计的方法。这种方法通过高通模板对原始图像做卷积运算，在理论上等价于对图像在频谱上进行高通滤波。这种方法相比频谱滤波的优势在于运算速度较快、实时性较好。滤波模板的设计方式为中间值大于零，周围的值小于零。易知，利用这种模板对图像进行处理，图像上孤立的噪声点和实际目标点受到的影响很小，而平缓变化的背景受到的抑制效果非常明显。可知，处理的效果可达到抑制背景并且保留目标的目的^[11]。

(2)中值滤波方法

中值滤波方法是一种经典的图像非线性空域滤波方法。这种滤波方法同样可以将复杂背景中的目标信号去除，对图像中的平缓变化的背景进行预测^[12]。具体做法为：首先对图像上每个像素点取一个矩形邻域，然后对每个像素点的灰度值都进行排序，取中间值为该像素点的预测值。以此方法遍历整幅图像，获得背景预测图像。将预测图像与原始图像进行差分。在差分图像上进行弱小目标检测。这种滤波方法处理简单，较易实现，但是这种方法受模板尺度影响较大。

(3)最大中值（均值）滤波方法

使用中值滤波方法对图像进行处理，差分后图像上会保留大量的边缘信息。这些信息会严重干扰对弱小目标的检测。于是，一些学者提出了最大中值（均值）滤波方法对图像背景进行预测^[13]。这 2 种方法都

是非线性的滤波方法,滤波后进行差分运算。在处理过程中,当像素点位于景象边缘时,如果使用传统的中值(均值)滤波算法,计算得到的背景预测值为矩形邻域内的中值(均值),即矩形邻域内信号的平均强度值。由于景象边缘属于景象局部剧烈变化的信号,并且景象边缘在矩形邻域内占比例较少,因此该像素点的强度值与预测值必然相差很大。随后进行差分运算的响应值也很大。但是,该点并不是目标点,大的响应值会干扰目标点的检测。而使用最大中值(均值)滤波算法,得到的背景预测值为景象边缘上的平均强度值。于是该像素点的强度值与预测值的差异很小。进行差分运算后该点的响应值也很小。

当像素点在目标上时,不论是使用传统的中值/均值算法,还是最大中值/均值算法,背景预测值都近似为像素点邻域的平均信号强度值。而目标点的信号强度值与目标点邻域平均强度值差异很大。于是,进行差分运算后响应值也较大。当像素点在平缓变化的背景上时,使用传统方法和最大中值(均值)滤波方法,背景预测值与该像素点的灰度值都非常接近,进行差分运算后响应值较小。可见,最大中值(均值)算法不仅能有效抑制图像上起伏的背景信号,而且能抑制景象边缘纹理信息,对弱小目标的检测非常有利。

(4)形态学方法

形态学方法是一种非线性滤波方法,这种方法通过集合的开、闭运算对图像进行操作以抑制图像上的奇异点,最常用的方法为 Top-Hat 算子^[14]。我们利用 Top-Hat 算子作为示例介绍形态学方法。具体原理是:构造合适的结构元素(其大小和形状可以根据先验知识确定),利用形态学开运算滤除小于结构元素的亮奇异点,利用形态学闭运算滤除小于结构元素的暗奇异点,而图像上缓慢变化的背景受影响很小。最后利用背景预测图像与原始图像进行差分,得到包含残差和弱小目标的图像。

形态学滤波的结构元素尺寸要大于目标的尺寸,才能将目标滤除。因此,结构元素的选取和构造方法就成为形态学滤波的关键点和难点。

(5)TDLMS 方法

LMS (Least mean square) 方法最初的应用为一维信号处理领域。Hadhoud, Mohiy M.等人于 1988 年将 LMS 方法扩展到二维信号处理领域,提出 TDLMS (three dimensional least mean square) 方法^[15],应用于数据压缩、图像增强以及去噪。之后 TDLMS 方法被应用于弱小目标检测,取得了一系列的研究成果。该算法为迭代算法,可以根据图像内容自动计算模板参数,并在每一次迭代过程中将预测图像与期望图像求

差异,得到误差函数。当误差函数小于某一设定的值,停止迭代,输出预测的背景图像。

TDLMS 方法鲁棒性很强,可以通过自适应迭代方法自动对背景做出准确估计。这种方法被提出之后,很多学者对其进行了改进。主要集中在模板更新步长参数的自适应确定^[16]和不同特征区域的选取^[17]。而 TDLMS 方法的缺点是需要通过迭代的方式确定最优模板,计算量很大,实时性很差。

(6)BF 滤波方法

Tomasi 和 Manduchi 首先提出双边滤波方法 (Bilateral filter, 简记为 BF),这种非线性滤波方法使用双高斯滤波器进行锐度增强和噪声去除^[18],并通过归一化,保证滤波后图像邻域的均值不发生变化。双边滤波器第一个高斯函数的意义是:邻域像素点距离滤波点越近,赋予的权值越大。第二个高斯函数的意义是:邻域像素点的强度值与滤波点强度值差异越小,该像素点被赋予的权值越大。

在计算出滤波器的模板后,对原始图像进行滤波,获得背景预测图像。由于 BF 方法综合考虑了邻域像素点距离滤波点的空间距离和强度距离,因此可以较好的预测景象边缘,使景象边缘对弱小目标检测的影响较小^[18]。

2) 频域滤波方法

以上介绍的基于空间域的背景抑制方法实时性较好,已经被广泛应用于工程实践中。但是随着时代的进步,计算机技术的发展和算法执行效率的提高,基于频谱滤波的算法的实时性也可以保证。于是基于频谱滤波的方法也逐渐开始应用于工程实践中。这类方法的具体过程为:首先通过傅里叶变换将图像变换到频域上,然后对其进行高通滤波,最后进行逆傅里叶变换得到结果图像。这种方法可抑制缓慢变化的背景,同时保留弱小目标、随机噪声和景象边缘。

(1)经典频域高通滤波器

介绍 3 种经典的频域高通滤波器,它们是:理想高通滤波器、Butterworth 高通滤波器以及高斯高通滤波器^[19]。理想高通滤波器为阶跃滤波器。Butterworth 高通滤波器的滤波效果介于理想高通滤波器与高斯高通滤波器之间。

如图 2 所示,显示了这 3 种经典频域高通滤波器。其中图(a)、(d)为理想高通滤波器,图(b)、(e)为 Butterworth 高通滤波器(二阶),图(c)、(f)为高斯高通滤波器。图(a)、(b)、(c)为这些滤波器的一维变化曲线(从频谱中心出发到频谱边缘的频谱幅值变化曲线),图(d)、(e)、(f)为这些滤波器的频谱幅值函数的三维显示。

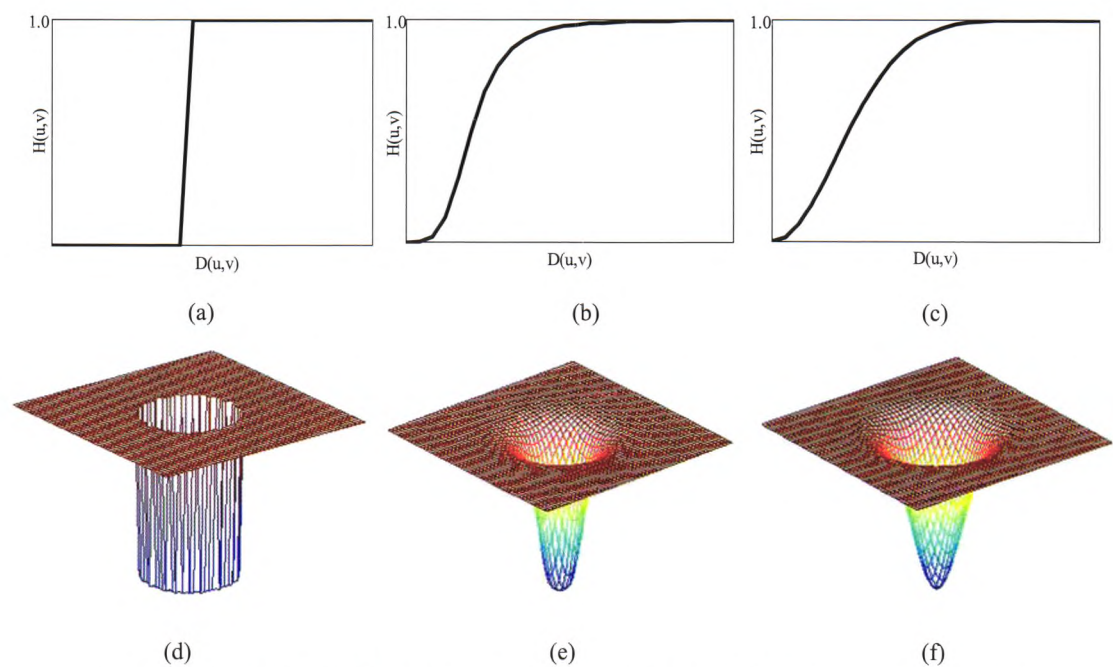


图2 三种经典的频域高通滤波器 Fig.2 Three kinds of classic high pass frequency filters

虽然理想高通滤波器滤波效果最好，但是存在明显的“振铃”效应，滤波后弱小目标附近出现大量虚警点，对弱小目标检测干扰很大。而高斯高通滤波器虽然滤波效果不如理想高通滤波器，但是“振铃”效应微弱，对目标检测影响较小。**Butterworth**高通滤波器可以在这两者之间取得一个平衡，既保证滤波效果良好，同时“振铃”效应又可以接受。实验结果表明，2阶 **Butterworth** 高通滤波器效果最好，可以用于背景预测^[20]。

(2)小波滤波器

由小波变换的性质可知，高斯白噪声的小波变换后在频谱上依然是高斯分布的噪声，而目标信号仅仅分布于频谱的某些频带上。因此，可以通过构造特定的小波变换提取仅含有弱小目标及噪声的图像^[21]。这种方法不仅可以凸显图像上的感兴趣特征，而且可以抑制噪声，进而提高图像上目标的信噪比。

1998年，Boccignone等^[8]最早将小波变换应用于弱小目标检测。他们利用不同小波分解下的 **Renyi** 信息熵，对弱小目标进行检测^[22]。李秋华等人提出一种基于多尺度特征融合的弱小目标检测方法。首先提取目标在子带图像上的多个特征，然后进行信息融合获取目标检测置信度图，最后在此图上进行目标检测^[23]。温佩芝等人提出一种基于小波变换的复杂海面背景红外弱小目标检测方法。首先对图像进行基于正交小波的多尺度分解，提取各种空间分辨率和各个方向的子图像。然后利用低频部分确定海天线，垂直和水平方向的高频信号确定目标区域^[24]。荣健等人提出一种基

于小波变换和支持向量回归的红外弱小目标检测方法。首先利用小波变换抑制背景杂波，然后利用基于支持向量回归的自适应滤波器对高频小波系数进行处理，提高目标的信噪比，最后基于序列图像中目标的轨迹信息进行处理以进一步提高检测性能^[25]。王文龙等人提出一种基于 **Donoho** 的小波变换方法，采用新的阈值求取方法对目标进行检测^[21]。

1.3 红外弱小目标的检测前跟踪算法

检测前跟踪算法的基本思想是：首先根据目标运动规律的先验知识对序列图像进行搜索，然后根据判定准则获取疑似目标运动轨迹，最后根据新输入的序列图像进行真实目标运动轨迹确认。这类方法对目标信噪比的要求不高，在搜索目标轨迹时，一旦搜索到正确的目标轨迹，就有可能检测到目标。

1) 管道滤波方法

管道滤波算法是一种时空域滤波算法。该算法认为目标在图像上进行连续运动。首先定义三维时空域 $O-xyt$ ，如图3所示。然后对首帧图像进行检测，得到一些候选目标点。创建几条固定半径的管道，管道的初始位置为候选目标点位置，管道的半径（圆形管道）为目标邻域大小，管道的长度代表图像帧数。随后在管道中进行目标出现次数的检测，若目标出现次数大于设定的阈值，就认为管道中存在目标^[8, 18, 26]。

当检测过程中目标在图像上移动的距离很长时，就需要使用移动管道滤波的方式进行。做法为：每输入一帧图像，就在管道内检测目标，当管道内检测不到目标时，沿用上一帧图像的目标位置。当检测到目

标时，若目标的位置不变，管道的位置也不变；若目标的位置发生变化，位置变化权值加一，管道的位置不变，于是获得位置变化权值，当此权值超过设定的阈值时，相应地改变管道的位置^[27]。

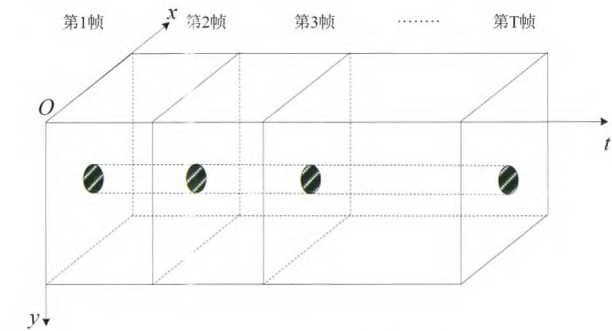


图3 管道滤波示意图

Fig.3 A diagrammatic sketch of channel filter

2) 多假设检验方法
多假设检验算法 (Multistage Hypothesis Testing, 简记为 MSHT) 由 Steven D. Blostein 和 Thomas S. Huang 于 1988 年提出。

这种算法首先对目标的运动形式 (如匀速直线运动、匀加速直线运动等) 进行假设, 根据设定的运动形式在序列图像中寻找疑似目标轨迹, 将这些目标运动轨迹按照树的形式列出。然后分别计算这些树的截断序贯假设检验值。通过人工设定的 2 个阈值判断哪些树为真实目标运动轨迹。具体的判定过程为: 如果树的截断序贯假设检验值高于设定的高阈值, 认为该树为真实目标轨迹; 如果树的检验值低于设定的低阈值, 认为该树为噪声, 将此树删除; 如果树的检验值位于 2 个阈值之间, 暂时不对该树进行处理, 而根据下一帧图像进行判断^[28]。

这种检测方法的优势在于采样长度不需要人为设定, 并且该方法可以同时检测多个目标。但是, 当目标的信噪比较低时, 疑似目标轨迹树个数太多, 计算量十分巨大, 算法实时性会变差。

为部分克服上述困难, Blostein 等人还提出一种多重多假设检验的方法 (MMSHT), 使用多假跟踪的方法滤除更多的虚假航迹^[29]。

3) 动态规划方法
在弱小目标检测领域中, 假设随机噪声服从同一分布, 通过叠加的方式会削弱噪声, 而目标在经过叠加后不会被削弱。因此, 沿目标运动轨迹叠加信号, 获得的能量要强于沿其它轨迹获得的能量。1981 年, Mohanty 等人^[30]首次提出在序列图像中遍历搜索所有像素点的直线组合, 从而检测弱小目标的方法。虽然这种方法貌似简单, 但运算量十分巨大, 工程上很难

实现。
为减小计算量, Barniv 等人于 1985 年^[31]首次将动态规划方法 (Dynamic Programming Algorithm, 简记为 DPA) 应用于弱小目标检测中。该方法将序列图像中每帧都进行阈值分割并获取疑似目标点, 然后将这些疑似目标点设置为动态规划的节点, 同时定义基于最大概率准则下的目标函数。每输入一帧图像, 就进行一次递推的动态规划算法处理, 每次处理的结果都进行阈值分割以检测目标。目标轨迹可以通过结果图像上检测到目标的位置进行逆推获得。

1995 年, Tonissen 等人^[32]提出一种基于动态规划算法以及恒速运动弱小目标的检测算法。在目标慢速机动运动及信噪比较低时, 此算法检测效果良好。然而, 当目标进行大机动运动时, 检测效果非常差。2003 年, J. Arnold 等人^[33]对传统动态规划方法进行了改进, 该算法被改写为帧内搜索的方式, 计算复杂度降低了一个数量级。设计新的评价准则在非高斯噪声的条件下对算法性能进行测试。2002 年, Johnston 等人^[34]在 Tonissen 的研究基础上, 进行极限理论分析并分析了算法性能, 最后推导出虚警率和检测率的理论表达式。

由于传统的三维匹配滤波只能检测匀速直线运动的目标, 在目标运动速度未知的条件下需要设计多个速度滤波器组检测目标。而基于动态规划的方法不仅可以检测匀速运动的目标, 而且可以检测机动运动的目标。然而, 不少研究结果证明, 随着目标信噪比的降低, 基于动态规划的算法性能下降非常明显。而且这种算法的空间复杂度比较高, 算法实时性较差。

4) 贝叶斯估计及粒子滤波方法
1999 年, Stone 等人首次提出基于贝叶斯估计的弱小目标检测算法^[35]。这种算法的核心思想是: 利用最新输入的观测量和先验信息估计目标的状态量。这种处理方式输入一帧图像处理一帧图像, 所以计算量很小, 在工程实践上很容易实现。然而, 最优贝叶斯估计的解析解只存在于理论上。在实际条件下, 很难推导出其解析表达式。在线性模型、加性噪声和状态量的分布符合高斯分布的条件下, 贝叶斯估计的最小均方差解即为卡尔曼滤波。对实际的系统, 一般都无法得到解析解, 只能得到近似解。在这种情况下, 可以采用扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman Filter, 简记为 EKF) 进行解算。该方法在自变量小范围定义域上将非线性函数进行泰勒展开, 然后取一阶近似项, 最后采用高斯概率函数对后验概率进行估计。但是这种方法的精度比较差, 算法结果有可能发散^[36]。

近些年来, 一些学者提出使用粒子滤波 (Particle

Filter, 简记为 PF) 的方式对目标进行基于最优贝叶斯估计的检测。2001 年, Salmond 等人首次提出这种方法^[37]。首先建立目标的运动及测量模型, 然后将目标状态量的后验概率用随机样本表示, 并用二值量作为状态量表示目标是否存在。其中每个粒子都可以表示目标是否存在以及目标的轨迹。每次输入数据, 就对原始数据进行一次更新, 重新计算状态量。最后利用生成的粒子以及消失的粒子估计状态量, 并使用人工设置的阈值判断目标是否存在。

虽然这种基于粒子滤波的算法功能十分强大, 但是为保证算法检测性能不下降, 需要生成大量的粒子, 从而直接导致算法计算量增加, 实时性变差, 工程实现难度增加。

5) 高阶相关方法

1993 年, Liou 等人提出一种基于高阶相关的算法以检测弱小目标^[38]。算法利用目标航迹的连续性, 在序列图像上计算其高阶相关响应图。在响应图上检测目标。当响应图上某点的能量超过一定阈值时, 判断其为目标。

具体的方法为: 输入一批序列图像, 对第一帧图像进行阈值分割, 在该图上检测到众多疑似目标点。然后取其中一个疑似目标点并以该点为中心在其邻域检测下一帧上的目标。若下一帧上依然可以检测到目标, 就保留该点; 若没有检测到目标, 则舍弃该点。以此类推, 遍历这些疑似目标点, 获得待检测结果。在该图上进行阈值分割检测以检测目标, 分割阈值由人工设置。他们还提出一种基于神经网络的高阶相关算法, 对目标运动特征添加很多约束, 不仅可以提高算法对背景的抑制能力, 而且还可以提高算法的计算效率。

这种方法的缺点在于分割阈值的设置, 如果选取不合适的分割阈值, 那么这种算法的效果就非常差。

6) 投影变换法

基于投影变换的方法实际上是将三维空间轨迹检测问题转化为二维平面的轨迹检测问题, 从而提高算法的实时性。1978 年, Falconer 提出一种新的基于 Hough 变换的目标检测算法, 通过人为设定参数空间阈值, 提取大于该阈值的响应值从而检测直线运动的目标^[39]。

此后, 1988 年, Peter L. Chu 等人^[40]进行了大量的基于投影变换的方法研究。他们提出一种最佳投影算法, 最后与传统的最大投影算法以及叠加投影算法进行对比, 验证了该算法的有效性。该方法在目标运动速度较慢的条件下效果较好, 当目标运动较快时, 该算法的性能会变差。

用于对比的 2 种传统投影算法具体过程为: 最大值投影算法对序列图像上每个像素点的时域剖面进行求最大值运算, 遍历每个像素点后得到特征图像, 最后在此特征图像上进行弱小目标轨迹检测。而叠加投影算法将求最大值的运算变为直接求和的运算。最大值投影算法在目标信噪比较大时检测性能较好。

由于基于投影变换的方法可以极大地减少检测的存储量, 并且可以同时提高计算速度。因此, 这种方法具有一定的优势。但该方法在投影过程中会损失一部分目标能量, 特别是在目标信噪比很低的条件下, 投影后目标能量非常微弱, 直接导致目标的轨迹十分难以检测。

7) 三维匹配滤波方法

1983 年, 美国的 Reed 教授等人将一维和二维的匹配滤波器扩展到三维空间上。将弱小目标检测问题转化成三维空间上的速度匹配的问题^[41]。理论推导获得频域上最优三维匹配滤波方程。在此方程基础上, 推导得到线性假设条件下最佳速度以及目标能够达到的最佳信噪比。另外, 他们还推导了速度不匹配时的三维匹配滤波方程以及信噪比的解析表达式。但是三维匹配滤波器需要知道目标的灰度分布函数和目标运动速度, 在实际应用中, 这些参数很难事先得到。如果使用与目标实际运动速度偏差很大的速度进行三维匹配滤波, 匹配滤波器的性能非常差。因此, 当未知目标运动速度时, 需要在速度域进行遍历搜索以检测目标, 缺点是搜索的运算量非常大。针对这个问题, Stock 和 Chen^[42-43]提出了速度滤波器组的概念。一组滤波器代表一定的速度范围, 在实际应用中可根据先验知识选取多组速度滤波器进行滤波, 这种方法可以部分解决搜索量太大的问题。但是, 如果先验信息不准确, 需要设计多组滤波器进行滤波, 运算量也非常大。

1990 年, Reed 等人又提出了迭代目标检测算法 (recursive moving target indication, 简记为 RMTI)。该算法首先假设目标进行匀速直线运动, 然后根据目标的运动速度, 将序列图像上的目标能量累积起来。最后在叠加图像上进行目标检测。这种算法形式简单, 实现方便。但是只有在目标大致进行匀速直线运动时, 算法才有效。Xiong Yan 等人^[44]提出一种基于匀加速运动模型的三维匹配滤波弱小目标检测方法, 采用了线性系数差分方法检测匀加速运动的弱小目标。随后推导了图像信噪比的理论公式。张天序等人^[45]提出一种基于粗精搜索模式的三维匹配滤波检测方法。这种方法可以有效减少算法的运算量, 提高算法的实时性。

8) 时域滤波方法

当使用凝视相机拍摄时，相机上每个像素点的灰度值在时间序列上都表现为一维波动信号。此波动信号被称为时域剖面（Temporal Profile，简记为 TP），可以反映该时间段内信号变化情况。对场景上不同类型的像素点，波动变化情况都不相同。当弱小目标划过某像素点时，此像素点的时域剖面上会出现冲击信号。可以利用上述性质检测弱小目标。

1995 年，Mooney 等人提出一种时域剖面弱小目标检测方法^[46]。他们设计了一种新型的时空域滤波器检测目标，并通过基于大量的实验验证算法。2002 年，Tzannes 等人^[47]对天空背景上的时域剖面进行详细分析，并将其分为 3 种类型：目标、云以及晴空背景。随后对这 3 种时域剖面分别建立数学模型。其中晴空背景利用常数叠加加性噪声表示，云背景利用一阶马尔科夫模型表示，目标利用冲击信号、常数和加性噪声的和表示。提出一种基于以上 3 个假设的弱小目标检测算法。Lim 等人对这 3 种类型场景进行了更加详细的分析，研究了时域剖面的方差及均值，提出基于自适应均值及方差的滤波算法^[48]。但是他们的方法仅仅在晴空背景下效果良好，如果背景中出现云，图像上会出现众多虚警，对目标检测非常不利。他们还分析了时域剖面的频谱^[49]，发现在晴空背景下的时域剖面并没有明显规律，可用均匀分布表示。云背景下时域剖面的频谱分布于低频部分，而有目标划过的时域剖面频谱分布在中低频上。基于以上认识，他们设计了带通滤波器对目标进行检测。2010 年，Tae-Wuk Bae 等人^[50]提出了一种基于矢量积的时域滤波方法，利用时域剖面的矢量积、背景和目标时域剖面的不同特性区分目标和背景，然后对时域剖面进行预测，并设计多组实验验证算法。

9) 高阶累积量方法

高阶累积量(Higher Order Statistics, 简记为 HOS)已经被广泛应用于信号处理中，在很多领域都发挥着重要作用。例如，在天文学、地震数据处理、通信、声学、雷达信号处理和分析等领域该累积量都得到了应用。无论有色还是白色高斯噪声，高于二阶的高阶累积量都为零，利用上述性质，高阶累积量可以用于被高斯噪声污染的图像中进行弱小目标检测。

1991 年，Jacovitti^[51]提出将高阶累积量应用于图像分解、盲卷积、编码和模式识别、纹理分析和数据的聚类分析。Carrato 和 Ramponi 提出一种基于高阶累积量(skewness)的边缘检测算子^[52]。他们的方法使用三阶累积量 skewness 检测图像边缘，其鲁棒性和适应性都较好。Alexandrou 等人提出基于四阶累积量

的高阶统计量^[53]。F.Maussang 等人^[54]将高阶累积量应用于声纳信号中的目标检测领域。首先假设图像背景服从 Weibull 分布。具体的处理流程为：(1)用矩形滑动窗口计算高阶累积量；(2)利用匹配滤波器进行滤波；(3)使用形态学方法对此区域进行运算；(4)用一个人工设置的固定灰度阈值对目标进行分割以检测弱小目标。他们提出的算法鲁棒性很强。但是，这种方法还需要已知一些先验信息才能进行检测，如待检测目标的尺寸等信息。M.Nafi Gurcan 等人^[55]将高阶累积量的应用于器官 X 线照片钙化检测上。首先对图像进行子带频谱分解，然后将分解后的图像分割成若干重叠的图像块，对这些图像块统计高阶累积量 skewness 和 kurtosis，从而估计区域的不对称性和冲击性。那些 skewness 和 kurtosis 较高的区域被列为兴趣区。仿真结果表明，他们的方法在钙化区域检测方面效果良好。

2 红外弱小目标检测技术的研究和发展趋势

进行稳定、鲁棒、通用的红外弱小目标检测的难度很大。在自然气象条件（风速、天气、气温、风向、太阳辐射等）以及背景环境（天空、地表等）等因素的影响下，经过大气衰减，红外探测系统接收到的弱小目标能量较弱，在视场中背景及噪声所占的比例较大，同时背景比较复杂，并且在不断发生变化，导致图像中目标的信噪比很低。在远距离成像时，目标在检测器靶面上的投影面积很小，且目标没有纹理和结构信息，采用传统目标检测方法很难检测。于是，需要利用序列图像的信息才能进行可靠检测。但是在缺少目标轨迹、方向以及位置等先验信息条件下，检测的难度更大。而且在实际条件下，待检测的目标运动方式为机动运动，同时图像上噪声为非高斯噪声，使用传统跟踪算法效果不理想。因此，需要设计新的算法对目标机动运动条件下进行实时准确的检测。另一方面，随着科技的发展，硬件设备和处理算法逐渐升级，处理图像的分辨率越来越大，算法也越来越复杂，算法的存储量和运算量呈几何级数增加。于是，算法实时的难度越来越大，需要研制性能更高的软硬件平台以适应新的算法。

可以预见，未来红外弱小目标检测技术的研究和发展趋势是：

1) 研制性能更高的检测器

随着科技的发展，红外检测系统需要具备穿透云层的能力和在复杂环境下正常工作的能力以实现全天候和远距离的目标检测与识别。探索新型材料制作性能优良的焦平面器件，成为了发展方向之一。美国

已将多光谱大面积凝视焦平面红外探测器阵列及相应的制冷技术列入了导弹防御技术计划^[9]。

2) 研究复合和双波段探测技术

在目标被伪装、环境干扰以及辐射频谱不稳定的条件下,单一波段的红外检测系统的检测能力将会大幅下降。如果利用双波段检测,对虚假目标的识别能力将会大幅提升,同时还可以提高系统对目标的检测距离。此外,如果采用雷达/红外/紫外/激光复合检测系统,可以拓展系统的响应频谱范围,同时降低系统的虚警率^[2]。例如,美国空军装备在 B2 轰炸机上的复合报警器,就可以同时检测来自可见光、红外、紫外以及射频的威胁。

3) 研究更先进的目标检测算法

红外检测系统中成像系统正在朝凝视型焦平面阵列方向发展,于是,系统要处理和传输的数据量将会非常大,必须采用更加先进的目标智能化检测和识别技术,同时使用处理速度更快的硬件处理器以提高系统的处理速度,系统的自动告警能力以及在复杂环境下对多目标的信号进行处理的能力。

4) 系统模块化和小型化

为了增强红外检测系统的适应性以及便捷性,系统需要进行小型化设计,特别是红外扫描头。同时,系统还需要向着模块化以及组合化的方向发展从而不断提高系统的可靠性和可维修性。

5) 安装激光测距机以准确定位距离

例如,法国的 OSF 红外探测预警系统传感器包含 2 个感应头,第一个感应头为红外探测器用于弱小目标检测,第二个感应头安装激光测距器进行测距。该系统不仅可以在夜间检测敌方目标,而且可以在广角范围内进行目标的跟踪、识别和测距。

(6) 预警体系综合一体化

在日益复杂的未来战场上,采用综合一体化的预警探测系统不仅可以大幅降低虚警率,而且还可以识别各种伪装。

参考文献:

[1] 吴晓航,黄树彩,肖科,等. 红外探测技术在导弹防御系统中的应用与发展[J]. 飞航导弹,2013(5): 44-49.
[2] 林武文,徐锦,徐世录. 红外探测技术的发展[J]. 激光与红外,2006,36(9): 840-843.
[3] 刘丹华,黄道君. 红外探测技术的军事应用[J]. 红外技术,2003,25(2): 1-3.
[4] 罗利锐,刘志刚,陈文涛,等. 红外探测技术在海底隧道地质预报中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(4): 775-780.
[5] 张天序,左峥嵘. 天上运动目标识别的若干关键问题[J]. 红外与激

光工程,2001,30(6): 395-400.
[6] A. Strehl, J. K. Aggarwal. Detecting Moving Objects in Airborne Forward Looking Infra-Red Sequences[C]//IEEE Workshop on Computer Vision Beyond the Visible Spectrum:Methods and Applications, (CVBVS 1999) Proceedings, Fort Collins, Colorado, USA, 1999: 3-12.
[7] S. Kim, J. Lee. Robust scale invariant target detection using the scale-space theory and optimization forIRST[J]. Pattern Anal Applic, 2011, 14: 57-66.
[8] 张惠娟,梁彦,程咏梅,等. 运动弱小目标先跟踪后检测技术的研究进展[J]. 红外技术,2006,28(7): 423-430.
[9] 周冰,王永仲,应家驹. 弱小目标检测技术浅析[J]. 红外技术,2007,29(1): 30-33.
[10] 杨磊. 复杂背景条件下的红外小目标检测与跟踪算法研究[D]. 上海: 上海交通大学,2006.
[11] 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.
[12] 王博. 红外序列图像中运动弱小目标时域检测方法[D]. 西安: 西安电子科技大学,2010.
[13] S. D. Deshpande, M. H. Er, V. Ronda, et al. Max-mean and max-median filters for detection of small targets[C]//SPIE, 1999, 3890: 74-82.
[14] X. Bai, F. Zhou. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. Pattern Recognition, 2010, 43: 2145-2156.
[15] 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.
[16] S. H. M. Ohki. Two-dimensional LMS adaptive filters[J]. IEEE T Consum Electr, 1991, 37(1): 66-73.
[17] T. Wang, C. L. Wang, A new two-dimensional block adaptive FIR filtering algorithm and its application to image restoration[J]. IEEE T Image Process, 1998, 7(2): 238-246.
[18] T. Bae, K. Sohng. Small Target Detection Using Bilateral Filter Based on Edge Component[J]. J Infrared Milli Terahz Waves, 2010, 31: 735-743.
[19] R. C. Gonzalez, R. E. Woods. Digital Image Processing[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2010.
[20] D. Comaniciu. An algorithm for data-driven bandwidth selection[J]. IEEE T Pattern Anal, 2003, 25(5): 564-575.
[21] 王文龙,韩保君,张红萍. 一种海空背景下红外小目标检测新算法[J]. 光子学报,2009,38(3): 725-728.
[22] G. Boccignone, A. Chianese, A. Picariello, Small target detection using wavelets[C]//Proceedings 14th International Conference on Pattern Recognition ICPR'98, 1998: 1776-1778.
[23] 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.
- [24] 温佩芝, 史泽林, 于海斌. 基于小波变换的复杂海面背景红外小目标检测[J]. 激光与红外, 2003, 33(6): 449-452.
- [25] 荣健, 申金娥, 钟晓春. 基于小波和 SVR 的红外弱小目标检测方法[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(5): 555-560.
- [26] 韩客松, 王永成. 红外序列图像中缓动点目标的流水线检测算法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(8): 66-67.
- [27] 董维科, 向健勇, 袁胜春. 一种红外弱小目标跟踪方法[J]. 激光与红外, 2005, 35(3): 184-186.
- [28] 李凡. 复杂背景抑制及弱小目标检测算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [29] S. D. Blostein, H. S. Richardson. A sequential detection approach to target tracking[J]. *IEEE Transactions On AES*, 1994, 30(1): 197-212.
- [30] N. C. Mohanty. Computer tracking of moving point targets in space[J]. *IEEE Transactions On PAMI*, 1981, 1(3): 606-611.
- [31] Y. Barniv. Dynamic Programming Solution for Detection Dim Moving Targets[J]. *IEEE T Aero Elec Sys*, 1985, AES-21(1): 144-156.
- [32] S. M. Tonissen, R. J. Evans. Performance of Dynamic Programming Techniques for Track-Before-Detect[J]. *IEEE T Aero Elec Sys*, 1996, 32(4): 1440-1451.
- [33] J. Arnold, S. Shaw, H. Pasternack. Efficient target tracking using dynamic programming[J]. *IEEE T Aero Elec Sys*, 1993, 29: 44-56.
- [34] L. A. Johnston, V. Krishnamuthy. Performance of a dynamic programming track before detect algorithm[J]. *IEEE T Aero Elec Sys*, 2002, 38(1): 228-242.
- [35] Lawrence D. Stone, Carl A. Barlow, Thomas L. Corwin. *Bayesian Multiple Target Tracking*[M]. Norwood. MA: Artech House, 1999.
- [36] R.E. Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 1: 35-45.
- [37] D. J. Salmond, H. Birch. A particle filter for track-before-detect[C]//*Proceedings of the American Control Conference*, 2001: 3755-3760.
- [38] R. J. Liou, M. R. Azimi-Sandjaji. Dim Target Detection Using High Order Correlation Method[J]. *IEEE T Aero Elec Sys*, 1993, 29(3): 841-856.
- [39] D. G. Falconer, M. Park. Target tracking with the Hough transform[J]. *IEEE*, 1978, 1(1): 249-252.
- [40] P. L. Chu. Optimal Projection for Multidimensional Signal Detection[J]. *IEEE Transactions On Acoustics Speech and Signal Processing*, 1988, 36(5): 775-786.
- [41] I. S. Reed, R. M. Gagliardi, H. M. Shao. Application of Three-Dimensional Filtering to Moving Target Detection[J]. *IEEE T Aero Elec Sys*, 1983, 19(6): 898-905.
- [42] W. B. Kendall, A. D. Stocker, W. J. Jacobi. Velocity filter algorithms for improved target detection and tracking with multiple-scan data[J]. *SPIE*, 1989, 1096: 127-137.
- [43] A. D. Stocker, P. Jensen. Algorithm and architectures for implementing large velocity filter banks[J]. *SPIE*, 1991, 1481: 140-155.
- [44] Y. Xiong, J. Peng, M. Ding. An Extended Track-Before-Detect Algorithm for Infrared Target Detection[J]. *IEEE T Aero Elec Sys*, 1997, 33(3): 1087-1092.
- [45] T. Zhang, M. Li, Z. Zuo. Moving dim point target detection with three-dimensional wide-to-exact search directional filtering[J]. *Pattern Recogn Lett*, 2007, 28: 246-253.
- [46] C. E. Cafer, J. Silverman, J. M. Mooney. Optimization of Point Target Tracking Filters[J]. *IEEE T Aero Elec Sys*, 2000, 36(1): 15-25.
- [47] A. P. Tzannes, D. H. Brooks. Detecting Small Moving Objects Using Temporal Hypothesis Testing[J]. *IEEE T Aero Elec Sys*, 2002, 38(2): 570-586.
- [48] E. T. Lim, L. Shue, V. Ronda. Adaptive mean and variance filter for detection of dim point-like targets[C]//*Proceeding of SPIE*, 2002, 4728: 492-502.
- [49] E. T. Lim, C. W. Chan, V. Ronda. Dim Point Detection and Tracking System in IR Imagery[C]//*Proceeding of SPIE*, 2000, 4728: 277-284.
- [50] T. Bae, B. Kim, Y. Kim, et al. Small target detection using cross product based on temporal profile in infrared image sequences[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2010, 36: 1156-1164.
- [51] G. Jacovitti. Applications of higher order statistics in image processing[C]//*Proceedings of International Signal Processing Workshop on Higher Order Statistics, Chamrousse, France*, 1991: 241-247.
- [52] S. Carrato, G. Ramponi. Edge detection using generalized higher-order statistics[C]//*Proceedings of Ieee Signal Processing Workshop on Higher-Order Statistics, South Lake Tahoe, Calif, USA*, 1993: 66-70.
- [53] D. Alexandrou, C. de Moustier, G. Haralabus. Evaluation and verification of bottom acoustic reverberation statistics predicted by the point scattering model[J]. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91(3): 1403-1413.
- [54] F. Maussang, J. Chanussot, A. Hetet, et al. Higher-Order Statistics for the Detection of Small Objects in a Noisy Background Application on Sonar Imaging[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007: 1-17.
- [55] M. N. Gurcan, Y. Yardimci, A. E. Cetin, et al. Detection of Microcalcifications in Mammograms Using Higher Order Statistics[J]. *IEEE Signal Proc Let*, 1997, 4(8): 213-216.