

# 红外图像弱小目标探测技术综述

刘让<sup>1,2</sup> 王德江<sup>1</sup> 贾平<sup>1</sup> 周达标<sup>1</sup> 丁鹏<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 介绍了红外图像弱小目标探测的研究背景与技术难点,并对空域滤波法、变换域滤波法、时域滤波法三类典型红外图像弱小目标探测算法进行综述,并对空域滤波法、变换域滤波法中常用目标探测算法以及边缘分割方法进行实验分析。实验结果表明,这三类红外图像弱小目标探测算法各有优缺点,具体目标探测算法的选取受目标特征和背景特征影响较大。并简述了红外图像弱小目标探测技术的发展趋势。

**关键词** 探测器;红外弱小目标探测;空域滤波;变换域滤波;时域滤波

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.050004

## Overview on Small Target Detection Technology in Infrared Image

Liu Rang<sup>1,2</sup> Wang Dejiang<sup>1</sup> Jia Ping<sup>1</sup> Zhou Dabiao<sup>1</sup> Ding Peng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Airborne Optical and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The background and technical difficulties of infrared small target detection are introduced. Three types of small infrared target detection algorithms are summarized, such as spatial-domain filtering, transform-domain filtering and time-domain filtering. The common target detection method and edge segmentation method of spatial-domain filtering and transform-domain filtering are analyzed through experiments. Experimental results show that three types of small infrared target detection algorithms have both advantages and disadvantages. Selecting specific target detection algorithm is more affected by the target and background feature. And the development trend of small infrared target detection is discussed briefly.

**Key words** detectors; small infrared target detection; spatial filtering; transform-domain filtering; time-domain filtering

**OCIS codes** 040.3060; 040.1880; 070.4340; 100.2000

## 1 引言

相较于雷达系统在探测低空目标上存在缺陷,红外探测系统以完全被动的工作方式,利用目标和背景辐射能量的不同来进行目标探测识别。红外探测系统不辐射电磁波,不受电磁干扰,不易被对方探测到;红外探测系统可以 24 h 全天候工作;体积小,携带方便,便于隐藏;灵敏度高,能够穿透烟雾,可以获得比雷达分辨率高的图像。红外探测系统是雷达的重要补充,也是现代信息战不可缺少的一部分。

自 20 世纪 70 年代以来,世界各国纷纷意识到红外目标探测技术的军事价值。美国率先开展对红外探测技术的研究,将其列为国家安全防御体系的重要课题;法国研制了舰载旺皮尔系列 IRST 系统,可同时跟

收稿日期: 2015-11-16; 收到修改稿日期: 2015-12-08; 网络出版日期: 2016-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61308099)、吉林省重大科技攻关专项(11ZDGG001)

作者简介: 刘让(1990—),男,硕士研究生,主要从事图像处理和目标检测跟踪方面的研究。

E-mail: liurang14@mailsucas.ac.cn

导师简介: 贾平(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学动态成像控制和图像处理技术等方面的研究。

E-mail: jiap@ciomp.ac.cn

踪 100 多个空中和水面目标;随后,加拿大、荷兰和英国等军事强国也投入大量资金进行红外探测系统的研制。而我国在这方面研究起步较晚,但是发展速度可观<sup>[1]</sup>。

要开展对红外弱小目标的有效探测,最重要的就是对图像进行噪声削减和背景抑制。由于很多时候探测器噪声对小目标探测影响微弱,所以常用的目标探测方法以背景抑制为主。根据小目标与背景所在的地理位置高度或性质的不同,可把小目标所处的背景分成以下几类,并列对应背景下可能存在的干扰因素:1) 在天空背景中,可能会出现小目标被大面积云层遮挡的情况;2) 在地物背景下,带有动力的地面干扰极多,如电站、车辆等,其产生的热量均会对周围的小目标探测产生影响;3) 在海洋背景下,海面的热辐射、海面反射的天空辐射,以及海面到探测器的大气辐射,都会对成像质量产生影响<sup>[2]</sup>。这些因素显然增加了红外弱小目标探测的难度。针对不同的背景特点,采用不同的目标探测技术对复杂背景进行抑制,从而提高目标的信噪比,方便进行下一步的目标跟踪。

综上所述,研究红外弱小目标探测算法不仅具有重要的理论意义,而且具有重大的军事价值。红外弱小目标探测对于红外预警系统、精确制导武器等领域的发展具有重要的战略意义。因此,对红外弱小目标进行实时稳定、高效通用的探测已经成为亟待解决的研究难题。

## 2 红外弱小目标探测的研究概况

红外弱小目标包含弱和小两个方面的涵义,它们是目标属性的两个方面。弱是指目标红外辐射的强度,它可以采用对比度和信噪比(SNR)来描述,其中图像对比度描述了目标与周围背景之间的强度差异,SNR表示目标信号强度与噪声之间的比值。所谓小是指目标在图像中所占的像素数目少<sup>[3]</sup>。

国际光学工程学会(SPIE)对弱小目标作如下描述:对比度小于 15%,信噪比小于 1.5,成像尺寸小于 80 pixel,即 256 pixel $\times$ 256 pixel 的 0.15% 的目标为弱小目标<sup>[4]</sup>。

近年来,国内外研究机构及学者对红外弱小目标探测算法进行大量研究,红外弱小目标探测技术发展迅速。目前,红外弱小目标探测方法大体上可以分为两类:1) 基于单帧图像的跟踪前检测算法(DBT);2) 基于序列图像的检测前跟踪算法(TBD)。DBT 方法首先对图像进行预处理抑制平滑背景,然后根据目标的探测概率、虚警概率、信噪比等信息计算出图像的探测门限对图像进行阈值分割,提取众多疑似目标,最后在图像序列上根据目标运动轨迹进行目标确认。此法虽然抗干扰能力比较差,但是流程直观,算法简单,容易在硬件上实现,是经典的小目标探测方法。而 TBD 方法则是先根据图像序列中小目标运动的规律进行跟踪,然后根据探测概率获得疑似目标的运动轨迹,最后排除虚假目标,探测出真实目标。此法探测效率较高,抗干扰能力强,但是多帧探测会造成算法计算量和存储量大,在硬件上难以实现,因此在实际工程中应用很少。

在红外预警系统中,图像的帧频较高,这样的高帧频使得帧与帧之间弱小目标的运动特性很难出现突变,这就为 DBT 算法的实现提供了很大的便利<sup>[5]</sup>。研究稳定、可靠的目标探测算法成为提高 DBT 算法性能的关键。

目前,常用的红外弱小目标探测算法很多,一般可以分为三大类:1) 空域滤波方法;2) 变换域滤波方法;3) 时域滤波方法。本文对三类典型的弱小目标探测算法以及边缘分割方法进行测试分析。

## 3 红外弱小目标探测算法

### 3.1 空域滤波方法

空域滤波方法首先对图像的背景信号进行预测,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以此探测出红外弱小目标<sup>[6]</sup>。背景估计的步骤为:对图像中每个像素为中心的领域进行一系列的运算,然后将得到的结果代替原来的像素值,遍历图像上每个像素点以获得背景预测图。常用的空域滤波方法有空域高通滤波方法、中值滤波方法、基于形态学的方法、二维最小均方误差法等。

#### 1) 空域高通滤波方法

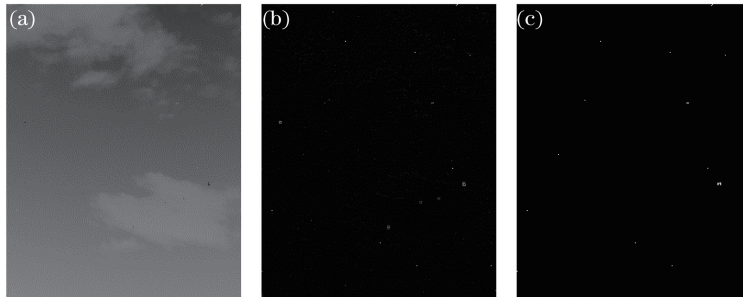
空域高通滤波是利用高通模板与原始图像进行卷积运算,相当于对原图像进行高频分量估计。与频谱滤波相比的优势在于运算速度快、实时性好。一般来说,滤波模板的设计方式为中间值大于零,周围的值小

$$F_1 = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad F_2 = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 24 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

图 1 两种常用的空域高通滤波模板

Fig. 1 Two common high-pass filtering templates in the spatial-domain

法,可达到抑制背景并保留目标的目的<sup>[7]</sup>。两种常用的高通滤波模板为图 2 是采用两种滤波模板对原图像滤波的效果比较,图 2(a)为原始图像,图 2(b)、(c)分别为采用  $F_1$ 、 $F_2$  模板滤波的结果。

图 2 (a)原始图像;(b)  $F_1$  模板滤波结果;(c)  $F_2$  模板滤波结果Fig. 2 (a) Original image; (b) filtering result of  $F_1$  template; (c) filtering result of  $F_2$  template

从图 2(b)、(c)可以看出,两种模板对平缓背景滤波效果较好,能部分提升图像信噪比,但是仍存在一些噪点,这是高通滤波无法避免的。空域高通滤波方法对于缓慢变化的背景抑制效果明显,但是对于复杂背景的抑制效果较差。

## 2) 中值滤波方法

中值滤波是一种保护边缘的非线性滤波算法,平滑效果优于均值滤波,抑制噪声的同时产生的模糊比较少,在需求目标增强的图像中应用非常广泛。采用统计排序的方法,把目标像素邻域中的像素灰度值按照从大到小顺序排列,然后选择中间值作为该像素点的预测值。图(3)为采用中值滤波方法对原图像滤波的效果,图 3a 为原始图像,图 3b 为中值滤波的效果。

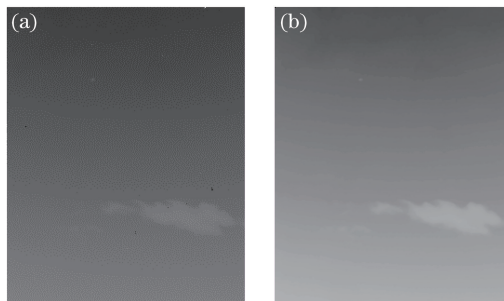


图 3 中值滤波的结果。(a) 原始图像;(b) 中值滤波图像

Fig. 3 Results of median filter. (a) Original image; (b) median filter image

从图 3 可以看出,中值滤波对噪声的抑制效果很好。这种滤波方法结构简单,容易在硬件上实现,但是背景云层依旧存在,可知此方法对背景的抑制效果比较差,同时中值滤波法受模板窗口尺寸和形状的影响较大,需要具体问题具体分析。

## 3) 形态学滤波方法

形态学方法主要以图像的形态特征为研究对象,通过开、闭运算这两个最常用的形态运算簇对图像奇异点进行过滤或修补。图像的开运算对目标图像先做腐蚀处理,再做膨胀处理,开运算常用来对目标图像进行去噪处理,同时,图像的开运算可以选择性地保留弱小目标结构元素中几何性质的部分,而过滤掉相对结构元素来说残损的部分。图像的闭运算对目标图像先做膨胀处理,再做腐蚀处理,闭运算常用来对目标图像分

开的区域进行连接及对图像中的细小缝隙进行填补。对图像使用闭运算可以使目标背景图像变得更加清晰。利用上述运算获得预测背景,然后将预测背景与原始图像进行差分,得到弱小目标图像。常用的形态学方法为顶帽变换。用数学公式表达如下:

$$G(x,y) = I(x,y) - (I \circ b)(x,y), \quad (2)$$

式中  $G(x,y)$  为处理后得到的图像,  $I(x,y)$  为原始图像,  $b(x,y)$  是结构元素,  $\circ$  表示开运算。

形态学滤波方法对背景抑制的效果取决于结构元的尺寸与形状,结构元尺寸大于目标尺寸时才能将目标滤除<sup>[8]</sup>。图4为顶帽变换的处理结果。

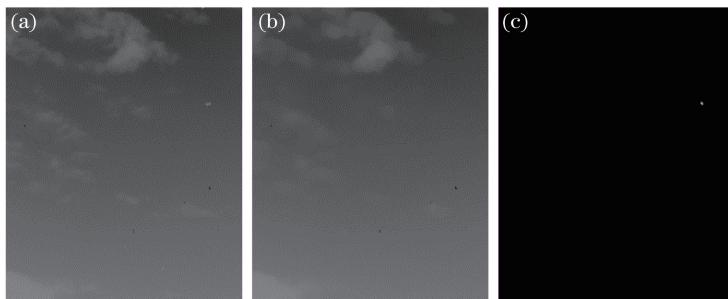


图4 顶帽变换结果。(a)原始图像;(b)预测背景;(c)差分滤波结果

Fig. 4 Results of top-hat transformation. (a) Original image; (b) forecast background; (c) result of differential filter

程焜等<sup>[9]</sup>提出了一种基于形态学带通滤波和尺度空间理论的弱小目标检测算法,这种算法采用形态学带通滤波对红外图像进行处理,得到红外弱小目标的潜在区域,然后利用高斯差分算子和尺度空间的极大值检测候选目标,此法对复杂背景下的红外弱小目标检测效果显著。

#### 4) 二维最小均方误差法<sup>[10]</sup>

二维最小均方误差算法(TDLMS)是一种迭代算法,文献[1]给出了如图5所示的TDLMS算法原理图,该算法思路是考虑图像中目标的奇异性以及背景邻域的相关性,预测邻域中心像素的背景图像,然后对加权系数矩阵进行修正.该算法稳健性强,去噪效果好,而且自适应性强,能够自动计算矩阵参数进行迭代.但是由此造成的运算量大,TDLMS算法实现效果较差。

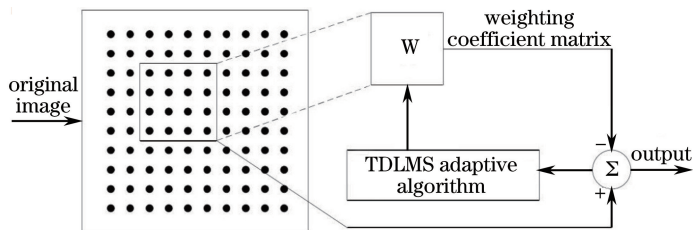


图5 TDLMS算法原理

Fig. 5 Principle of TDLMS algorithm

#### 5) 偏微分方程法

Zhang等<sup>[11]</sup>提出一种基于偏微分方程的红外弱小目标探测方法。该算法首先根据目标特征把图像分成八种模型,用于描述图像中的背景、角点、边缘、边界、纹理、噪声、目标点及其中的各种疑似点。然后,采用Perona-Malik偏微分方程模型对背景抑制过程进行规整化,来识别8种基本模型中的弱小目标,同时进行目标信号增强。最后,对背景和噪声等非目标点模型进行抑制。图6给出了偏微分方程法对小目标探测的处理结果。

从图6可以看出,偏微分方程法对背景云层、噪点抑制效果很好,较为准确地探测出弱小目标。但是,该方法有一定的局限性,若目标图像背景较为复杂时,处理后会产生严重的背景泄露现象。

#### 6) 双边滤波方法

文献[12]提出使用双边滤波方法探测目标。双边滤波方法是一种非线性、非迭代的滤波方法,该方法结合空间分布和灰度分布,使用双高斯滤波器进行噪声去除,而且不改变滤波后图像邻域的均值。在计算出滤



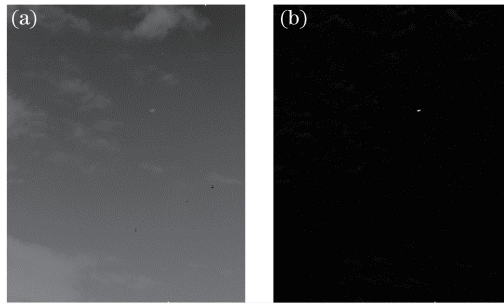


图6 偏微分方程法滤波结果。(a)原始图像;(b)背景抑制图像

Fig. 6 Filter results of partial differential equations. (a) Original image; (b) background suppression image

滤波器的模板后,对原始图像进行滤波,获得预测背景。双边滤波方法同时考虑了邻域像素点距离滤波点的空间信息和强度信息,因此该算法可以很好地保存背景边缘。但是,双边滤波方法平滑噪声的同时,也不同程度的削弱了弱小目标的能量。文献[13]研究出一种双窗口的环状结构模板与双边滤波结合对目标进行探测。孙继刚<sup>[14]</sup>采用加窗的双边滤波结合顶帽变换算法对背景进行抑制后,小目标在差分图像得到完整保留,信噪比得到很大提高。

### 3.2 变换域滤波方法

变换域滤波是用特定的方法将图像从空间域变换到变换域,然后在变换域研究目标特性,并进行滤波的方法。常用的变换域滤波方法有频域滤波和小波分析滤波等方法。

#### 1) 频域滤波方法

频域滤波首先通过傅里叶变换将图像从空间域变换到频率域,然后在频率域内对图像进行高通滤波,最后通过傅里叶逆变换转换到空间域。这种方法能够很好地抑制背景,保留弱小目标信息。主要介绍三种经典的频域高通滤波器:理想高通滤波器、巴特沃斯高通滤波器、高斯高通滤波器。图7依次为三种滤波器频谱幅值的三维投影图,图8为三种高通滤波器滤波的结果。

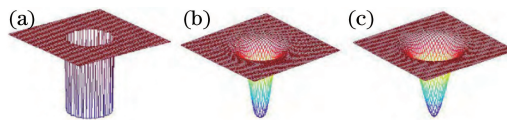


图7 三种滤波器频谱幅值的三维投影图。(a)理想高通滤波器;(b)巴特沃斯高通滤波器;(c)高斯高通滤波器  
Fig. 7 3D projection of three filters spectrum magnitude. (a) Ideal high-pass filter; (b) Butterworth high-pass filter; (c) Gaussian high-pass filter

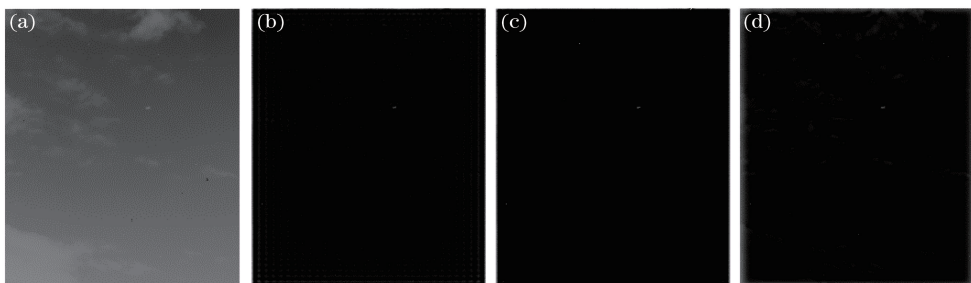


图8 三种高通滤波的结果。(a)原始图像;(b)理想高通滤波器;(c)巴特沃斯高通滤波器;(d)高斯高通滤波器  
Fig. 8 Results of three high-pass filters. (a) Original image; (b) ideal high-pass filter; (c) Butterworth high-pass filter; (d) Gaussian high-pass filter

从图8(b)~(d)可以看出,巴特沃斯高通滤波器的滤波效果相比其他两种高通滤波器较好,对背景图像进行较好地抑制。理想高通滤波器处理过的图像整体比较模糊,振铃现象十分明显,边缘存在大量的虚警点,妨碍对弱小目标进行探测。高斯高通滤波器振铃效应相比理想高通滤波器较弱,但是对目标周围背景的抑制作用显然没有巴特沃斯高通滤波器效果好。

## 2) 小波分析滤波

自 20 世纪 90 年代以来,小波分析得到了快速的发展,已成功应用于图像的去噪、边缘检测、分割及编码。Boccignone 等<sup>[15]</sup>最早将小波变换应用于噪声背景中的弱小目标探测。小波分析滤波基本步骤是首先对图像进行分解,得到图像的低频部分和高频部分,由先验知识得知目标处于高频部分,较大的背景处于低频部分,就可以对图像进行背景抑制,而且还可以利用阈值法抑制噪声的影响,从而提高小目标的信噪比。图 9 为带有阈值分割的小波分析滤波的结果。

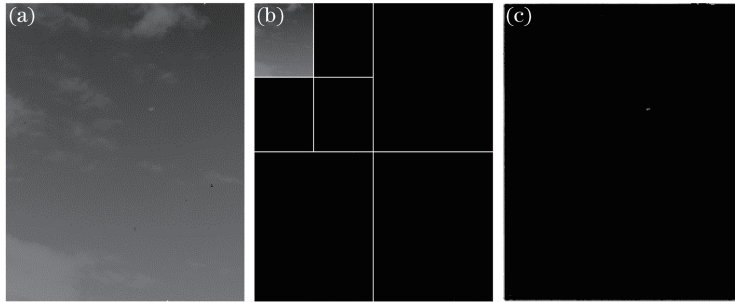


图 9 小波分析滤波的结果。(a) 原始图像;(b)小波分解图像;(c)重构处理图像

Fig. 9 Results of wavelet analysis filter. (a) Original image; (b) wavelet decomposition image; (c) reconstructed image

从图 9(c)可以看出,小波分析滤波法有效抑制住背景和噪声,增强了目标的对比度,能较准确地探测出弱小目标。从理论上来说,分层越多目标探测效果越好,但分解的层数多算法的复杂度也随之增加,实时实现变得困难。因此,需要在二者之间采取折中处理,通常分解两到三层即可。

## 3.3 时域滤波方法

通常认为,在红外序列图像上,背景在帧间具有平稳性,所以经常使用有限冲击响应滤波器(FIR)和无限冲击响应滤波器(IIR)对连续多帧的图像进行背景抑制,进而可以有效地提取小目标。Silverman 等<sup>[16-17]</sup>最早提出时域红外小目标探测,指出时域方法能够以较小运算量抑制杂波干扰,同时有效地探测出红外图像序列中的运动弱小目标。Tzannes 等<sup>[18]</sup>提出一种基于三个假设检验的弱小目标探测方法,系统地分析了红外序列图像中像素点的时域分布特性,将背景上的时域剖面分为 3 种类别:目标、空背景和云杂波,针对不同的剖面采取不同的算法进行处理。Lim 等<sup>[19]</sup>在此之后对这种分类方法进行研究改进,进一步分析了这三类时域剖面像素点的均值和方差特性,提出了一种自适应均值方差滤波法,该方法在简单背景中探测效果很好,但是当目标处在复杂背景时,目标探测就会遇到困难。Liu 等<sup>[20]</sup>提出一种基于下驻点连线的时域滤波算法,解决了云杂波时域剖面起伏较大的问题,有效提高了小目标的探测能力。

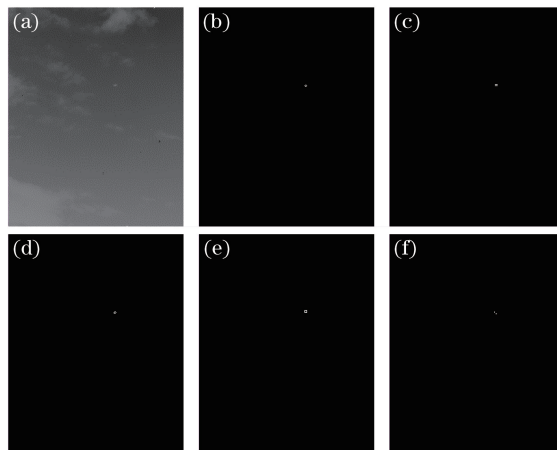


图 10 边缘分割算子的结果。(a)原始图像;(b) Sobel 算子结果图;(c) Roberts 算子结果图;  
(d) Prewit 算子结果图;(e) Canny 算子结果图;(f) Log 算子结果图

Fig. 10 Results of edge segmentation operator. (a) Original image; (b) result of Sobel operator; (c) result of Roberts operator; (d) result of Prewit operator; (e) result of Canny operator; (f) result of Log operator

### 3.4 边缘分割方法

边缘检测是利用目标和背景在某种图像特征上的差异来实现的。不同的图像灰度不同,边界处会有明显的边缘,利用此特征可以分割图像。常见的红外弱小目标边缘检测方法有微分算子、Canny 算子和 Log 算子等。常用微分算子有 Sobel 算子、Roberts 算子和 Prewit 算子。各算子采用不同的检测模板对目标图像进行分割处理。阈值分割技术是最流行的图像分割方法之一,通常根据图像的灰度直方图选取阈值。将边缘分割和阈值分割结合在一起可有效地对目标进行检测。图 10 为带有阈值分割的各边缘检测算子处理结果图。

## 4 数据分析

所有图片处理结果均在 Matlab R2014a 软件平台上实现,使用 PC 的 CPU 为 i7-4790,3.60 GHz;内存为 4 GB。算法运行的时间复杂度直接关系到红外弱小目标的实时探测,表 1 为上述主要算法各运行 10 次平均每次耗时。

表 1 各算法耗时比较

Table 1 Contrast of running time with each algorithm

Algorithm	Running time /s
$F_1$ -template filter	0.113
$F_2$ -template filter	0.157
Median filter	0.139
Top-hat transformation	0.515
Ideal high-pass	0.385
Butterworth high-pass	0.349
Gaussian high-pass	0.381
Wavelet analysis	0.598
Sobel operator	0.193
Canny operator	0.205

综合而言,空域红外弱小目标探测方法直接在像素空间对图像进行处理,算法运行时间短,易于在硬件上对弱小目标进行实时探测,工程应用价值较高,但是当目标背景复杂时处理结果存在背景泄露现象。具体来说,空域滤波方法多种多样,其中形态学滤波方法、二维最小均方误差法、偏微分方程法、双边滤波方法较空域高通滤波方法、中值滤波法而言对小目标提取效果较好,目标探测概率均在 90% 以上,但是时间复杂度比后两者大。变换域红外弱小目标探测方法则是在变换域上对目标图像进行处理,算法更为精细复杂,背景抑制效果较好,但是计算量较大。其中,小波分析滤波法比频域滤波法对目标探测效果更好,有很高的研究价值。时域红外弱小目标探测方法基于图像序列来探测弱小目标,不需考虑复杂云杂波背景,因此对目标探测跟踪容易很多,对运动速度快的小目标处理效果较好。但是,时域滤波法跟踪数据量较大,实时实现有点难度,值得深入研究。

## 5 结束语

探测红外弱小目标的手段既要实时可靠,又要运算量小、容易在硬件上实现,需要同时兼顾到目标与背景特征、大气传输、红外探测器、探测理论与算法等多角度的问题。从上面的分析可以看出目标特征和背景特征对探测目标算法选取起重要作用。有效提高目标和背景灰度分布的差异性,成为提高目标探测算法性能的关键。针对目标和背景的关系,有些时候可能将空域、变换域、时域滤波中的方法结合应用到红外弱小目标探测上,这样既可以保证弱小目标提取的可靠性,抑制杂波和噪声的影响,又可以提高处理速度,解决实时检测问题。

不难看出,红外弱小目标探测技术的发展趋势:1)研究更先进的信号处理技术和目标探测技术,适用于

探测各种复杂环境下的红外弱小目标,同时算法精炼,易于硬件实现,可以适当采用紫外线辅助探测目标,减小虚警率;2)增加精确定位与激光测距技术,军事领域中对危险来袭目标进行定位和测距,有利于战前战术布置;3)适应性强,可在各种恶劣条件下如高温、强氧化性等对小目标进行有效探测;4)系统小型化,便捷性强,适当减轻探测系统体积和重量,方便搭载在无人机上。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Dabao, Research on infrared weak small targets detection and tracking technology under complex backgrounds[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.  
汪大宝. 复杂背景下的红外弱小目标检测与跟踪技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- 2 Zhao Zhenwei, Wu Zhensen, Method for determining fog drop size distribution and fog attenuation at infrared wavelength [J]. Journal of Xidian University (Nature Science), 2002, 29(2): 253-256.  
赵振维, 吴振森. 确定雾滴谱的方法和雾的红外辐射衰减特性[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2002, 29(2): 253-256.
- 3 Liviu I V, Ron P, Harley R M, Detection performance prediction on IR images assisted by evolutionary learning[C]. International Society for Optics and Photonics, 1999: 282-292.
- 4 Chapple P B, Bertilone D C, Caprari R S, *et al.*. Target detection in infrared and SAR terrain images using a non-Gaussian stochastic model[C]. AeroSense99. International Society for Optics and Photonics, 1999: 122-132.
- 5 Xu Jun, Research on the detection of weak and small targets in infrared images[D]. Xi'an: Xidian University, 2003.  
徐 军. 红外图像中弱小目标检测技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.
- 6 Hou Wang, Sun Xiaoliang, Shang Yang, Present state and perspectives of small infrared targets detection technology[J]. Infrared Technology, 2015, 37 (1): 1-10.  
侯 旺, 孙晓亮, 尚 洋. 红外弱小目标检测技术研究现状与发展趋势[J]. 红外技术, 2015, 37 (1): 1-10.
- 7 Peng Jiexiong, Zhou Wenlin, Infrared background suppression for segmenting and detecting small target [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(12): 47-51.  
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.
- 8 Li Xiaolong, Shuai Renjun, One kind of segmentation of brain tumors based on morphology[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015, 30(1): 157-162.  
李晓龙, 帅仁俊. 一种基于形态学的脑肿瘤分割[J]. 液晶与显示, 2015, 30(1): 157-162.
- 9 Cheng Gong, Guo Lei, Han Junwei, *et al.*. Infrared dim small target detection based on morphological band-pass filtering and scale space theory[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1015001.  
程 焱, 郭 雷, 韩军伟, 等. 基于形态学带通滤波和尺度空间理论的红外弱小目标检测[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1015001.
- 10 Fan H, Wen C. Two-dimensional adaptive filtering based on projection algorithm [J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 2004, 52(3): 832-838.
- 11 Zhang B Y, Zhang T X, Cao Z G. Fast new small-target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter[J]. Optical Engineering, 2007, 46(10): 1-6.
- 12 Bai X, Zhou F, Xie Y, *et al.*. Adaptive morphological method for clutter elimination to enhance and detect infrared small target[C]. Internet Computing in Science and Engineering, International Conference on. IEEE, 2008: 47-52.
- 13 Arnold J, Pasternack H. Detection and tracking of low-observable targets through dynamic programming[C]. Signal and Data Processing of Small Targets, 1990, 1305: 207-217.
- 14 Sun Jigang, Research on algorithm of infrared small target detection and tracking in image sequence[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.  
孙继刚. 序列图像红外小目标检测与跟踪算法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- 15 Boccignone G, Chianese A, Picariello A. Small target detection using wavelets [J]. Proceedings 14th International Conference on Pattern Recognition, 1998: 1776-1778.
- 16 Silverman J, Mooney J M, Cafer C E. Temporal filters for tracking weak slow point targets in evolving cloud clutter[J]. Infrared Physics & Technology, 1996, 37(6): 695-710.
- 17 Cafer C E, Silverman J, Mooney J M, *et al.*. Temporal filtering for point target detection in staring IR imagery: I.



- damped sinusoid filters[C]. Aerospace/Defense Sensing and Controls. International Society for Optics and Photonics, 1998: 111-122.
- 18 Tzannes A P, Brooks D H. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2002, 38(2): 570-586.
- 19 Lim E T, Shue L, Venkateswarlu R. Adaptive mean and variance filter for detection of dim point-like targets[C]. AeroSense 2002. International Society for Optics and Photonics, 2002: 492-502.
- 20 Liu D, Zhang J, Dong W. Temporal profile based small moving target detection algorithm in Infrared image sequences[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 28(5): 373-381.