

## 红外小目标检测的预处理技术研究

高颖慧,李吉成,沈振康

(国防科技大学 ATR 实验室,湖南长沙 410073)

**摘要:**建立了红外小目标图像的场景模型,分析了小目标情况下图像预处理的特点,根据这些特点对预处理技术进行了分类描述。为了评价预处理结果,定义了两个评价参数——信噪比和背景抑制因子。实验结果表明,不同的预处理方法具有不同的应用范围,只有根据图像特点选择合适的预处理方法,才能取得理想的预处理效果。

**关键词:**小目标; 场景模型; 信噪比; 背景抑制因子; 预处理

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)02-0154-05

### Study of pretreatment technology for detecting infrared small target

GAO Ying-hui, LI Ji-cheng, SHEN Zhen-kang

(ATR Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The scene model of infrared small target image was established, and the characteristics of image pretreatment were analyzed under this condition. Based on the characteristics, the pretreatment technologies were classified. In order to evaluate results of pretreatment, two definitions of signal-to-noise ratio and background suppression factor were given. The experimental results indicate that different pretreatment methods can be applied to different images. In order to get good pretreatment effects, the appropriate pretreatment method should be selected according to the image characteristics.

**Key words:** Small target; Scene model; Signal-to-noise ratio; Background suppression factor; Pretreatment

## 0 引言

为了提高防御武器的预警距离,要求红外探测系

统具有大的探测距离和成像视场,从而可以尽早发现目标。当探测距离和成像视场增大时,即使目标本身很大,在成像平面内也仅表现为几个像素,甚至不到一个像素,称为小目标<sup>[1]</sup>。红外图像的背景一般可分

为大气云层背景、海杂波背景和地面起伏背景等。背景强度一般很高,同时,接收器内的噪声也很强。在低信噪比情况下,目标的强度相对较低,往往淹没在强背景噪声里,并且由于小目标缺乏几何形状、纹理结构等特征,可供检测识别系统利用的信息很少。因此,为了突出小目标,提高信噪比,从而提高目标检测概率,对红外小目标图像进行检测前的背景抑制和噪声削减是十分必要的。在自动目标识别系统中,背景抑制和噪声削减统称为检测前预处理。

## 1 红外小目标图像场景模型

红外小目标图像可以用以下的模型描述:

$$f(m, n) = T(m, n) + B(m, n) + N(m, n) \quad (1)$$

式中  $f(m, n)$  为场景图像;  $T(m, n)$  为目标点灰度;  $B(m, n)$  为背景图像;  $N(m, n)$  为噪声图像。

目标点灰度  $T(m, n)$  通常比背景要亮,但其灰度与一些强噪声点相差不大。背景图像  $B(m, n)$  通常具有较长的相关长度,占据了场景图像  $f(m, n)$  空间频率的低频部分。同时,由于场景和传感器内部热分布的不均匀性,背景图像  $B(m, n)$  一般是一个非平稳过程,图像中局部灰度值可能有较大的变化。 $B(m, n)$  中也包含部分高频分量,主要分布在背景图像各个同质区的边缘处<sup>[1]</sup>。噪声图像  $N(m, n)$  主要是探测器的内部噪声和外部噪声,与背景像素不相关,空间分布是随机的,没有帧间相关性<sup>[1]</sup>。

## 2 红外小目标图像预处理的特点

预处理的对象为背景图像  $B(m, n)$  和噪声图像  $N(m, n)$ 。由于小目标成像面积小、信噪比低、背景复杂等特点,所以与其他特性目标的预处理相比,红外小目标图像的预处理难度更大,并具有以下特点:

(1) 在低信噪比情况下,目标点极易被噪声淹没,单帧图像处理达不到理想效果,往往需要对图像序列进行处理;

(2) 由于背景图像和噪声图像的复杂性,需要将

多种预处理方法结合起来应用;

(3) 在小目标情况下,目标的强度较弱,应将目标增强、背景抑制和噪声削减综合起来考虑。

## 3 常用的红外小目标图像预处理技术

不同的场景图像的背景总是有差别的,从不同的角度分析目标像素和背景像素的差别,可以得到不同的预处理方法。下面讨论常用的红外小目标图像预处理方法及其应用条件。

### 3.1 差分法

(1) 时间差分法<sup>[2]</sup>

对于序列图像来说,某一帧图像上的背景噪声与其前后几帧的背景噪声是相关的。基于这个事实,有人提出了用于图像预处理的时间差分法。

时间差分法滤波器相当于一个 FIR 滤波器,令  $P_n(m, n)$  代表第  $n$  帧图像上  $(m, n)$  处的像素灰度值,则时间差分滤波器的输出为:

$$G_n(i, j) = \sum_{k=0}^N W_k P_{(n-k)}(i, j) \quad (2)$$

式中  $W_k$  是滤波器权值;  $P_{(n-k)}(i, j)$  是第  $(n-k)$  帧图像上  $(i, j)$  处的像素灰度值;  $N$  是差分的阶数。

表 1 给出了 1~4 阶差分方程的权值选取情况。

表 1 1~4 阶差分方程的权值表

Tab. 1 Weight values of difference equations of rank 1~4

	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$
Rank 1	1	- 1			
Rank 2	- 1/2	1	1/2		
Rank 3	1/3	1	- 1	- 1/3	
Rank 4	1/6	- 2/3	1	- 2/3	1/6

对于序列图像,若前后各帧的背景基本不变,使用此方法可以达到抑制噪声、检测运动目标的目的。

(2) 时间/空间差分法<sup>[2]</sup>

背景噪声不仅在时间上具有相关性,而且在空间上也有一定的相关性。时间/空间差分法就是在考虑了这两种相关性的基础上提出来的。这种方法可以

消除图像在空间和时间上相关的一些特征。

时间/空间差分法相当于一个非线性的三维滤波器,具体实现过程是:对应于图像上某一像素,以该点为中心开一个  $N \times N$  的窗口 ( $N$  为奇数),用当前帧窗口内中心位置上的像素值分别减去前一帧相同位置上窗口内的所有像素的灰度值,取这些差值的最小值,即为滤波器在该点的输出,这种方法称为单边时间/空间差分法。若利用了前一帧和后一帧两帧图像的数据来抑制噪声,就称为双边时间/空间差分法。

用该法可以检测运动相对较快的目标,同时抑制缓慢漂移的背景。窗口越大背景抑制效果越好,但对小目标的运动速度要求越高(速度要大于  $(N-1)/2$ )。

### 3.2 空域滤波法

在红外自动目标识别系统中,可以采用高通滤波器、带通滤波器或中值滤波器来抑制起伏的背景。

#### (1) 高通滤波<sup>[3]</sup>

高通滤波器能抑制低频分量,让高频分量通过,故可以用来抑制大面积的背景,同时保留目标和部分高亮度噪声。设滤波器的输入为  $f(x, y)$ , 输出为  $g(x, y)$ , 脉冲响应为  $h(x, y)$ , \* 表示卷积,则:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (3)$$

对于离散图像,一般以卷积模板表示滤波器的脉冲响应函数,记为矩阵  $H$ 。根据不同的应用需求,可以设计出不同的模板。例如,以下的两个矩阵  $H_1$ 、 $H_2$  都是高通模板。

$$H_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 24 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & 4 & 4 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

#### (2) 带通滤波<sup>[4]</sup>

对于由天空和海面组成的背景,天空中的云层干扰是连续的低频信号,而海面上的海浪干扰是间断的高频脉冲。因此,带通滤波技术可以抑制海浪干扰和云层干扰,提高目标的信噪比。

对于带通滤波,理想情况下仅允许位于频率  $\omega_1$  和  $\omega_2$  ( $\omega_1 < \omega_2$ ) 之间的能量通过,传递函数为:

$$G(\tilde{\omega}) = \begin{cases} 1, & \tilde{\omega}_1 \leq |\tilde{\omega}| \leq \tilde{\omega}_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

常用的带通滤波器是用一个非负单峰函数  $K(\omega)$  跟位于  $+\omega_0$  和  $-\omega_0$  处的冲击函数做卷积得到的。此时的传递函数为:

$$G(\tilde{\omega}) = K(\tilde{\omega}) * [\delta(\tilde{\omega} - \tilde{\omega}_0) + \delta(\tilde{\omega} + \tilde{\omega}_0)] \quad (5)$$

一般选  $K(\omega)$  为高斯函数,则上式变为:

$$G(\tilde{\omega}) = A e^{-\tilde{\omega}^2/2a^2} * [\delta(\tilde{\omega} - \tilde{\omega}_0) + \delta(\tilde{\omega} + \tilde{\omega}_0)] \quad (6)$$

实际应用中用带通模板与红外图像的卷积来实现带通滤波。

#### (3) 中值滤波<sup>[5,6]</sup>

中值滤波是常用的非线性滤波,对于提取缓变背景的效果非常好。实现过程是:对图像中某一像素邻域内的像素进行灰度排序,取中间的灰度值代替当前灰度值。设  $f(i, j)$  为输入图像,  $g(i, j)$  为输出图像,  $A(i, j)$  是像素  $(i, j)$  的邻域,大小为  $m \times n$ 。

中值滤波的结果为:

$$g(i, j) = f(i, j) - \underset{A(i, j)}{\text{med}}[f(i, j)] \quad (7)$$

### 3.3 门限法<sup>[2,6]</sup>

#### (1) 一般的阈值门限法

由于背景噪声的复杂性,仅采用差分法或空域滤波法不能将其完全消除。一般采用门限法作为后续处理方法,对图像进行多级处理。

设  $T$  为门限值,输出像素  $G(m, n)$  与输入像素  $P(m, n)$  间的关系表示为:

$$G(m, n) = \begin{cases} P(m, n) & P(m, n) \geq T \\ T & P(m, n) < T \end{cases} \quad (8)$$

$T$  值选取规则:  $T = m + K \times \sigma$ ,  $m$  为背景噪声均值,  $\sigma$  为背景标准差,  $K$  一般取 3.0~5.0。

(2) 自适应阈值门限法

当分割门限随着局部背景分布而变化时,称门限是空间自适应的。通常用一个滑动窗口对背景分布进行变换来实现空间自适应门限。也就是选取一定的模板,用模板与红外图像进行卷积,从而实现去图像局部均值的作用。简单的背景归一化采用模板  $W_1$ , 为了进一步改进处理结果,经过推导(详见参考文献[6]),可以得到改进的自适应模板  $W_2$ 。

$$W_1 = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} -0.3 & 0.125 & 0.3 & 0.125 & -0.3 \\ 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0.125 \\ 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0.3 \\ 0.125 & 0 & 0 & 0 & 0.125 \\ -0.3 & 0.125 & 0.3 & 0.125 & -0.3 \end{bmatrix}$$

### 4 实验结果分析

为了评估以上预处理算法的性能,定义了以下两个评价参数:

(1) 信噪比(SNR)

$$SNR = s / \sigma$$

式中  $s$  为目标灰度均值;  $\sigma$  为图像的灰度标准差。

(2) 背景抑制因子(BSF)<sup>[21]</sup>

$$BSF = \sqrt{x^2} / \sqrt{y^2} \quad (9)$$

式中  $x$  为处理前的像素灰度值;  $y$  为处理后的像素

灰度值。

在天空背景图像序列中选取一帧图像(图 1(a)),在海空背景图像序列中也选取一帧图像(图 2(a)),分别对它们进行预处理,天空背景图像和海空背景图像的预处理结果分别如图 1 和图 2 所示。

(1) 预处理结果

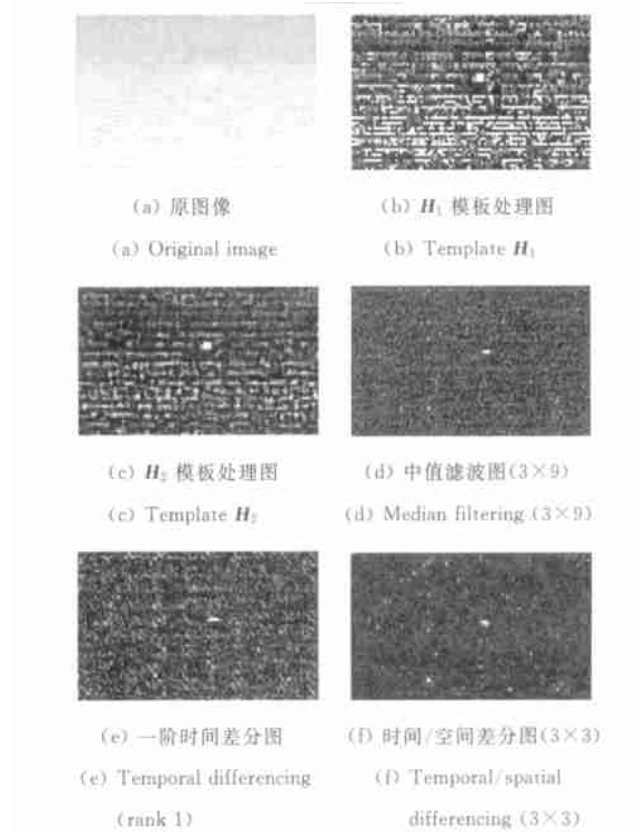
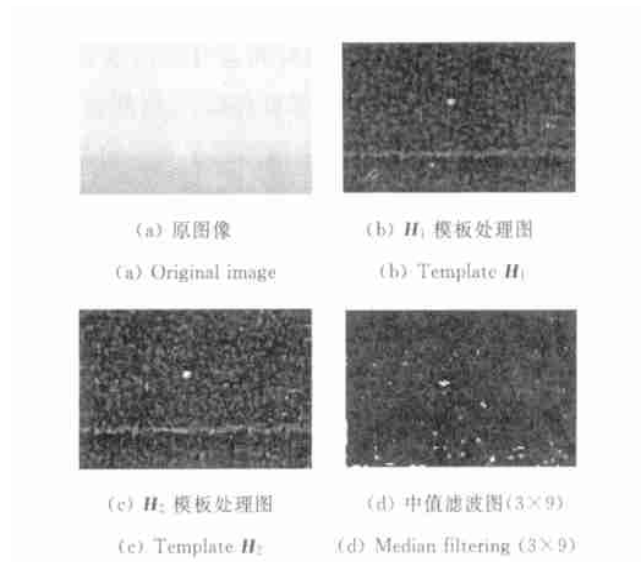


图 1 天空背景图像的预处理结果

Fig. 1 Preprocessing result of the sky background image



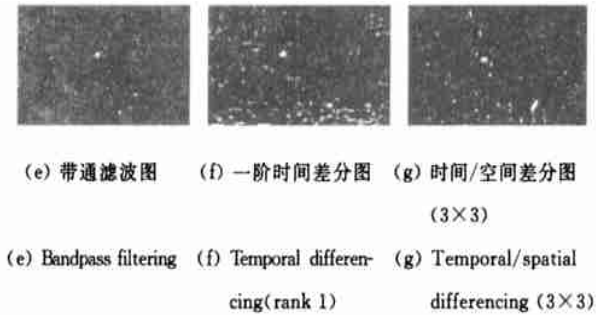


图 2 海空背景图像的预处理结果

Fig. 2 Preprocessing result of the sea-sky background image

### (2) 性能参数对比

表 2 是应用几种不同方法进行预处理后的性能参数对比表。

表 2 预处理的性能参数对比

Tab. 2 Comparison of performance parameters of pretreatment

Parameters	Original images	Difference filtering			Spatial filtering			
		Temporal differencing (rank 1)	Temporal/spatial differencing (3×3)	Template H <sub>1</sub>	Template H <sub>2</sub>	Bandpass filtering	Median filtering (3×9)	
Fig. 1	SNR	2.32	5.39	8.98	3.99	4.67	—	7.11
	BSF	—	6.83	13.98	3.84	4.54	—	12.0
Fig. 2	SNR	1.86	5.96	7.50	5.76	5.21	9.12	7.74
	BSF	—	6.14	7.25	10.9	8.91	33.3	9.45

### (3) 实验结果分析

a. 时间/空间差分法比时间差分法的效果好。这是由于所选图像序列的背景变化较大,时间差分法在检测出运动目标的同时,也检测到了背景的变化。而时间/空间差分法可以较好地滤除运动的背景噪声,并检测出运动较快的目标。

b. 对于天空背景图像, H<sub>2</sub> 模板比 H<sub>1</sub> 模板的处理效果好;对于海空背景图像, H<sub>1</sub> 模板比 H<sub>2</sub> 模板处理效果好。总的来说,高通滤波的效果不佳,有时甚至增强了噪声。图 1 中的 (a)、(b) 两幅图像,噪声就被加强了。

c. 带通滤波的背景抑制效果较好,但其仅适用

于海空背景图像。

d. 中值滤波法是将图像背景提取出来,再用原图像与背景图像相减。滤波窗口的选取是中值滤波的关键。从实验结果可以看出,中值滤波后的目标强度有所减弱。这是因为滤波窗口大小不是很合适,提取背景时未将目标完全滤除,所以当去除背景时,目标的强度也被削弱了。

e. 门限法是作为差分法和空域滤波法的后续处理方法使用的,一般不单独使用。门限法在多级处理过程中的作用,是今后研究的一个方向。

## 5 结束语

实际的红外图像不可避免地受到噪声、起伏及红外干扰的污染,从而给小目标检测带来很大的困难。因此,在检测之前,必须对输入的红外图像进行预处理,以达到抑制干扰和增强目标的双重目的。对常用的预处理方法进行了分类描述,并且给出了每种方法的应用条件。从实验结果可知,由于应用条件的限制,各种方法的处理效果有一定的差别。在实际应用中,要根据处理要求进行合理的选择,并且可以将这些方法组合起来,形成多级处理,多级处理成为红外小目标图像预处理的发展趋势。

## 参考文献:

- [1] 韩客松,复杂背景下红外点目标检测的预处理[J]. 系统工程与电子技术,2000, 22(1):52-54.
- [2] 郎晓虹.起伏背景下的红外目标的检测与跟踪[D].长沙:国防科技大学,1994.
- [3] 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.
- [4] 张金锁,宋利权,靳民会,等.基于带通滤波的红外小目标捕获算法研究[J]. 红外与激光工程,2002, 31(4):294-296.
- [5] Diani M, Baldacci A, Corsini G. Joint striping noise removal and background clutter cancellation in IR naval surveillance systems[J]. IEE Proc-Vis Image Signal Process, 2001, 148(6): 407-411.
- [6] 杨卫平,沈振康.红外图像序列小目标检测预处理技术[J]. 红外与激光工程,1998,27(1):23-28.