

双预测结构融合的复杂红外图像背景抑制算法*

赵菲, 张志勇, 肖山竹, 卢焕章

(国防科技大学 ATR 国防科技重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对复杂红外图像的背景抑制问题, 提出了一种双预测结构融合的复杂红外图像背景抑制算法。算法以图像中每个像素为中心, 在其局部区域内根据灰度相似程度和空间分布相关性计算像素的核值相似程度, 然后根据核值相似程度有侧重地融合两种不同结构的空域滤波器的输出作为最终的预测结果, 最后将原始图像与预测图像相减完成背景抑制。实验结果表明, 本文提出的算法能够较好地抑制不同红外图像中的复杂背景, 算法结构简单, 具有较强的应用价值。

关键词: 核值相似程度; 预测融合; 背景抑制; 复杂红外图像

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)03-0113-06

Two-prediction-architecture fused complex IR images background suppression algorithm

ZHAO Fei, ZHANG Zhiyong, XIAO Shanzhu, LU Huanzhang

(National Key Laboratory of Automatic Target Recognition (ATR),
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the complex background suppression problem, a two-prediction-architecture fused complex IR images background suppression algorithm is proposed. In the local region of each pixel, the Nucleus Similarity Degree (NSD) is computed on the basis of the gray value similarity and spatial distribution correlation. Then, the outputs of two spatial filters with different structures are fused as the final background prediction result. Finally, the suppression is done by subtracting the prediction from the original image. The experimental result demonstrates that the proposed algorithm can get better performance in different complex IR images while the structure of the algorithm is simple, and it is suitable for engineering application.

Key words: nucleus similarity degree; fused prediction; background suppression; complex IR image

红外凝视被动探测技术因灵敏度和帧频高、隐蔽性好、不受使用时间限制, 被广泛应用于自寻的武器系统中。一般而言, 红外探测器角分辨率有限, 当目标距离较远时, 探测器接收到的目标辐射能量较低, 同时接收到了视场内其他物体的辐射, 因此成像后的图像中大部分为空间分布不平稳的复杂背景杂波(如云背景、地面背景、海天背景等), 目标不仅信噪比较低, 而且面积较小(1个至几个像素)。

为尽量降低背景杂波的影响, 提高目标的信噪比, 在检测任务之前首先进行背景抑制。已有的背景抑制方法可以分为基于变换域^[1-3]的方法、基于时域^[4-6]的方法和基于空域^[7-10]的方法。总的来说, 基于变换域的方法是将原始图像进行傅立叶或小波变换后, 通过滤除低频的背景并保留高频的目标来达到抑制背景的目的。基于

时域的方法是以背景像素在时域上表现出较强的相关性, 而运动目标所在像素在时域上会形成尖峰为依据, 使用以前的图像对当前图像背景进行预测, 然后用原始图像减去预测图像, 完成静止背景的背景抑制。基于空域的方法根据背景在空间上相关性较强而目标呈现出“奇异点”的特点, 在空域内对背景进行预测, 然后用原始图像减去预测图像, 完成背景抑制。基于变换域和基于时域的方法虽然可以获得良好的背景抑制效果, 但在实际武器系统中, 成像帧频往往较高($\geq 60\text{Hz}$), 从探测器采集、传输到信息处理单元完成对图像所有的处理(目标检测、跟踪、识别等)一般只有几毫秒到十几毫秒, 对算法的实时性要求很高; 同时, 武器系统自身的姿态变化将导致帧间图像存在抖动, 像素在时域上的相关性很难保证。相比之下, 基于空域的背景抑制方法具有更好的实用价值。

* 收稿日期: 2011-06-01

基金项目: 国家部委资助项目; 国家 863 计划资助项目

作者简介: 赵菲(1983—), 男, 甘肃天水人, 博士研究生, E-mail: f_z2010@126.com;

卢焕章(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: luhuanzhang@nudt.edu.cn

基于空域的背景抑制算法将当前像素所在局部区域内的像素作为输入,使用线性或非线性的预测结构对图像背景进行预测,然后使用原始图像与预测得到的背景图像相减完成背景抑制。由于图像内各部分的相关性不尽相同,使用单一的预测结构很难保证在图像各处都达到较好的预测效果。例如图像中边缘与背景区域的空间相关性不同,使用相同的预测结构会使得边缘处的背景预测性能下降,导致残差图像中依然存在较多杂波,进而影响后续的检测性能。如果能够根据图像中不同的相关特性选择适合的背景预测方法,将会取得更好的效果。基于这样的想法,本文提出一种基于核值相似程度、双预测结构融合的背景抑制算法。算法以核值相似程度描述当前像素与局部区域内像素的相似性,并根据该指标融合两种不同预测结构的输出作为最终的预测结果,然后将原始图像与预测背景相减的残差作为最后的输出。算法以滑动窗口的方式处理图像中的像素,结构简单,能够以硬件加速的方式实现。

1 双预测结构融合的复杂红外图像背景抑制算法

1.1 算法原理

包含有弱小目标的复杂背景红外图像序列可描述为

$$F(x, y, k) = F_T(x, y, k) + F_B(x, y, k) + Noise(x, y, k) \tag{1}$$

其中, $F(x, y, k)$ 为红外图像的灰度值, $F_T(x, y, k)$ 为点目标灰度值, $F_B(x, y, k)$ 为背景灰度值, $Noise(x, y, k)$ 为零均值的高斯噪声, k 代表图像帧号, x 和 y 代表图像中的二维坐标。对于复杂红外背景图像而言,大面积的背景内部变化缓慢,呈现低频特性,背景的边缘因具有较剧烈的灰度变化呈现高频特性;弱小目标在图像中表现为奇异点并且呈现出高频特性。正是由于包含弱小目标的复杂背景红外图像中各种分量所表现出的这种特性,才能够使用周围像素对当前像素的背景进行预测,但由于局部区域内的相关性不同,很难利用一种预测结构获得满意的背景预测结果。

本文提出以核值相似程度为基础,融合双预测结构进行复杂红外图像的背景抑制。算法首先根据被预测像素与局部范围内像素的相关性计算被预测点的核值相似程度,然后根据核值相似程度融合两种不同预测结构的预测结果作为最后的背景预测输出,最后用原始图像减去预测图像完

成复杂背景抑制。本文算法的结构与一般背景预测算法的结构对比如图 1 所示。

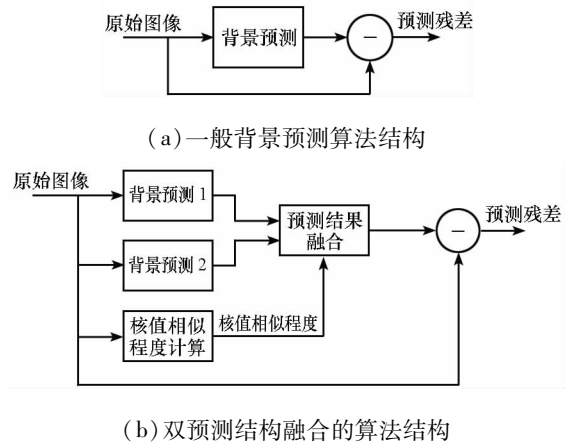


图 1 双预测结构融合算法与一般背景预测算法结构对比

Fig. 1 Architecture comparison of two predictor fused algorithm and normal spatial background prediction algorithm

1.2 核值相似程度

假设当前被预测点的位置为 (i, j) , $M \times N$ 个像素构成点 (i, j) 的局部区域,点 (i, j) 作为局部区域的中心被称为核^[11],如图 2 所示。核值相似程度是指核与 $M \times N$ 局部区域内其他像素的相似程度。针对复杂背景红外图像中弱小目标只包含灰度信息的特点,核与 $M \times N$ 窗口内像素的相似程度从两个方面考虑:

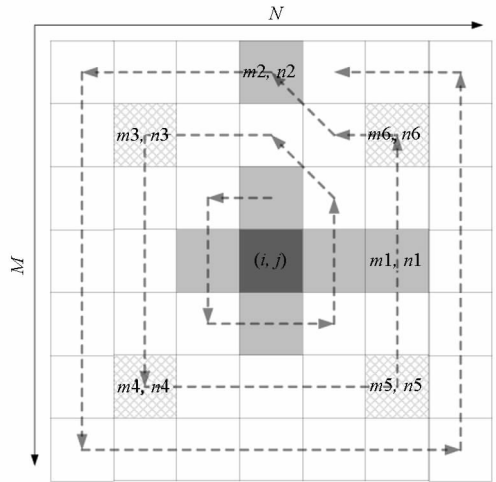


图 2 局部区域示意图

Fig. 2 Figure of local area

(1) 灰度相似程度。 $M \times N$ 窗口内,属于背景的像素往往具有数量较多的灰度相似像素;而目标在局部区域内的灰度相似像素的数量则较少。

(2) 空间分布的相关程度。在灰度相似的基础上,背景像素在空间分布上往往呈现较强的相关性,背景像素连通性较强,分布较广;而弱小目标因呈现为奇异点,局部区域内与其相连的像素

较少,分布较集中。

综合考虑灰度相似程度和空间分布的相关程度,本文算法定义点 (i,j) 的核值相似程度为

$$S(i,j) = \sum_m \sum_n \text{dis}\{(i,j),(m,n)\} \times cc(m,n) \quad (2)$$

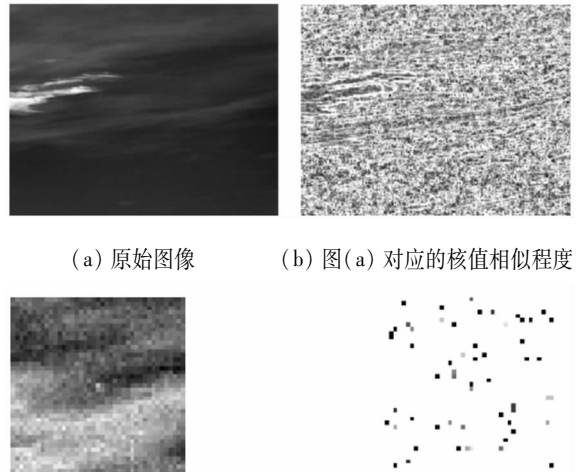
其中 $m \in [i - M/2, i + M/2]$, $n \in [j - N/2, j + N/2]$, m 与 n 皆为整数; $\text{dis}\{(i,j),(m,n)\}$ 代表像素 (m,n) 与核之间的距离,用来衡量空间分布的广度,为方便计算,算法中采用绝对值距离,即 $\text{dis}\{(i,j),(m,n)\} = |m - i| + |n - j|$; $cc(m,n)$ 代表灰度相似像素 (m,n) 与核的连通程度,需根据像素 (m,n) 与核的灰度相似情况及空间连通情况综合判断。令 $M \times N$ 窗口内像素的访问顺序为从内而外的“包围圈”方式,如图2中虚线所示。

$cc(m,n)$ 的赋值需要在灰度相似的基础上进行判断,以 $H(m,n)$ 代表像素 (m,n) 与核 (i,j) 的灰度相似程度,定义 $H(m,n) = \begin{cases} 1, & |G(i,j) - G(m,n)| < T_g \\ 0, & |G(i,j) - G(m,n)| \geq T_g \end{cases}$,其中 $G(i,j)$ 为核的灰度值, $G(m,n)$ 为像素 (m,n) 的灰度值, T_g 为判断阈值, T_g 的取值决定着灰度相似的限度。考虑 T_g 应具有一定的鲁棒性并且计算应简单,文章中选取 $T_g = [\max(G(m,n)) - G_{\text{mean}}] \times \mu$,其中 $\max(G(m,n))$ 和 G_{mean} 分别代表局部区域内的灰度最大值和均值, μ 代表系数,一般可取0.2至0.4。

在灰度相似的基础上,算法中对 $cc(m,n)$ 赋值的准则为: $cc(m,n) = 1$,当 $H(m,n) = 1$ 并且像素 (m,n) 与核连通;否则 $cc(m,n) = 0$ 。算法中像素 (m,n) 与核连通的判据为:像素 (m,n) 与核之间至少存在一条由灰度相似的像素构成的路径。算法以由内而外的“包围圈”方式逐层判断像素的连通性,不仅判断每个像素与核的灰度相似性,同时需要判断其内圈像素中是否有像素与核有连通。以图2为例阐述 $cc(m,n)$ 的赋值准则,假设图中灰色区域代表符合灰度相似条件的像素,按照灰色虚线所示的方式扫描局部区域的所有像素,当扫描到第2圈时,点 $(m1,n1)$ 位于包围圈的右边缘,且 $cc(m1,n1 - 1) \neq 0$,因此 $cc(m1,n1) = 1$;点 $(m2,n2)$ 位于包围圈的上边缘,但 $cc(m2 + 1,n2 - 1)$ 、 $cc(m2 + 1,n2)$ 和 $cc(m2 + 1,n2 + 1)$ 均为0,所以 $cc(m2,n2) = 0$ 。位于每层4个角上的像素点,例如图中标识为阴影的点 $(m3,n3)$ 、 $(m4,n4)$ 、 $(m5,n5)$ 和 $(m6,n6)$,分别判断内层与

其相邻的像素,即 $cc(m3 + 1,n3 + 1)$ 、 $cc(m4 - 1,n4 + 1)$ 、 $cc(m5 - 1,n5 - 1)$ 和 $cc(m6 + 1,n6 - 1)$ 。从以上的定义可以看出, $cc(m,n)$ 不仅衡量像素 (m,n) 与核的灰度相似性,同时也衡量像素 (m,n) 与核的空间连通性。

根据式(2)可知,核值相似程度 $S(i,j)$ 的大小取决于局部区域内其他像素与核的连通程度以及距离。弱小目标面积小,在局部区域内的连通像素少, $S(i,j)$ 较小;背景像素因具有大面积的连通特点,因此 $S(i,j)$ 较大。本文对典型的红外云背景图像计算了其核值相似程度,其结果如图3所示。从图中可以看出,本文提出的核值相似程度能够较好地反映图像中背景和目标的差异,云层内部和边缘都具有较高的核值相似程度值,而目标的核值相似程度则较低;从图(b)和图(d)中可以看出,部分噪声也具有较低的核值相似程度值,通过背景预测结果融合后,噪声可能会被检测出来,但是噪声点在时域上的连续性难以保证,难以形成类似目标的运动轨迹。



(a) 原始图像

(b) 图(a)对应的核值相似程度

(c) 图(a)中目标周围原始图像 (d) 图(c)对应的核值相似程度

图3 复杂背景的核值相似程度图

Fig. 3 NSD of complex background

根据目标和背景在核值相似程度上的差异,本文融合了不同的预测结构的预测结果作为最终的预测输出。

1.3 预测结果融合

根据对图像中每个像素核值相似程度的计算,可以较有效地区分出图像中存在的目标和背景像素。本文算法根据核值相似程度的不同取值,使用了两种预测结构,即有利于突出目标和有利于预测背景的两种结构,考虑算法的复杂性,两种预测结构计算都较为简单。其中有利于突出目标的预测结构具有固定的系数模板,具体为

$$\begin{bmatrix} 1/32 & 1/32 & 1/32 & 1/32 & 1/32 \\ 1/32 & 1/16 & 1/16 & 1/16 & 1/32 \\ 1/32 & 1/16 & 0 & 1/16 & 1/32 \\ 1/32 & 1/16 & 1/16 & 1/16 & 1/32 \\ 1/32 & 1/32 & 1/32 & 1/32 & 1/32 \end{bmatrix},$$

从模板的系数可以看出,该预测结构只使用周围像素对中心像素进行预测,当中心像素经过与原始图像相差后,能够突出中心像素。

本文采用灰度相似像素低通滤波结构作为有利于预测背景的预测结构,其表达式为

$$F_1(i,j) = \sum_{m=i-M/2}^{i+M/2} \sum_{n=j-N/2}^{j+N/2} G(m,n) \times \frac{H(m,n) \times \text{gaussian}(m,n)}{W} \quad (3)$$

其中 $\text{gaussian}(m,n)$ 代表以 (i,j) 为原点的二维高斯滤波器, W 是归一化系数。该预测结构只有灰度与中心像素相近的像素(即 $H(m,n) = 1$ 的像素)参与预测,能更好地预测背景像素的灰度。

假设有利于突出目标和有利于预测背景两种结构的预测结果分别为 $F_1(i,j)$ 和 $F_2(i,j)$, 预测结果的融合表达式为 $F(i,j) = w_1 \times F_1(i,j) + w_2 \times F_2(i,j)$, 其中 w_1 和 w_2 为根据核值相似程度选定的权值,并满足 $w_1 + w_2 = 1$ 。

核值相似程度值 $S(i,j)$ 较高时,说明核所在的点 (i,j) 为背景的可能性较大,因此可以赋值较大的 w_2 和较小的 w_1 ; 反之,点 (i,j) 为目标的可能性较大,则应赋予较大的 w_1 和较小的 w_2 , 同时考虑当 $S(i,j)$ 稍大时,仍然可能存在目标的可能性, w_1 和 w_2 的赋值应考虑一定的冗余。综合以上考虑,本文算法设计 w_1 和 w_2 为 $S(i,j)$ 的分段函数:

$$[w_1, w_2] = \begin{cases} [1, 0], & S(i,j) < T_s1 \\ \left[\frac{T_s2 - S(i,j)}{T_s2 - T_s1}, \frac{S(i,j) - T_s1}{T_s2 - T_s1} \right], & T_s1 \leq S(i,j) \leq T_s2 \\ [0, 1], & S(i,j) > T_s2 \end{cases} \quad (4)$$

其中 T_s1 和 T_s2 是判断点 (i,j) 是目标或是背景相应的核值相似度阈值。本文算法中假设目标为点目标,成像后面积小于 3×3 ; 由于点目标弥散后周围像素的能量较低,较难满足与目标中心像素的灰度相似性,基于这样的考虑,算法中选取 $T_s1 = 3, T_s2 = 9$ 。

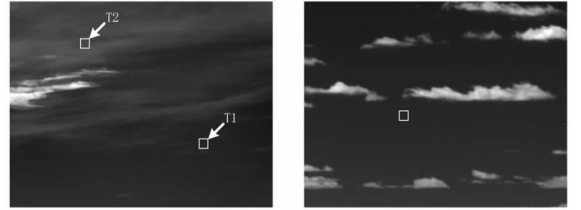
经过 $F_1(i,j)$ 与 $F_2(i,j)$ 融合后的结果作为最后的背景预测值,通过与原图像相减得到背景抑制的结果,即残差图像。

2 实验结果与分析

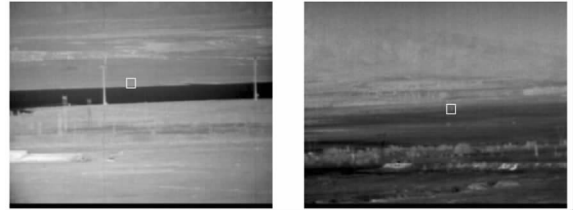
本文以实际红外探测器采集的包含弱小目标

的复杂背景红外图像序列为实验样本,将本文提出的算法和基于空域的背景预测算法如 TDLMS 算法^[7]、形态学 TopHat 滤波算法^[10] 和最大化背景模型算法^[9] 等进行了比较。

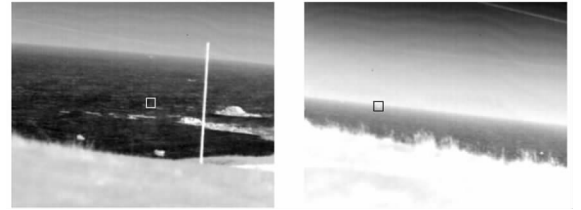
为保证实验数据具有一定的代表性,本文选取的实验图像序列有以天空和云层为背景拍摄的红外图像、以地面为背景拍摄的红外图像和以海面及天空为背景拍摄的红外图像,每种类型各包括两组序列,所有序列均为 235×300 的 8 位图像,如图 4 中(a) ~ (f) 所示,图像中用方块标识的部分为目标,其中(a) 包含两个目标:T1 和 T2。



(a) 天空和云层背景图像 1 (b) 天空和云层背景图像 2



(c) 地面背景图像 1 (d) 地面背景图像 2



(e) 海面 and 天空背景图像 1 (f) 海面 and 天空背景图像 2

图 4 实验图像

Fig. 4 Experiment images

进行实验时,本文算法中关键参数的选取为 $M = N = 7$; TDLMS 算法和最大化背景模型算法的窗口大小选为 3×3 ,学习速率为 10^{-6} , TopHat 算法的结构元素为“十”字型,边长为 3。4 种方法对图 4 所示的 6 幅图像的背景抑制结果如图 5 所示。其中图像的第 1 列是 TDLMS 算法输出的残差图像,第 2 列是形态学 TopHat 滤波输出的残差图像,第 3 列是最大化背景抑制算法输出的残差图像,第 4 列是本文算法输出的残差图像。从滤波残差的结果可以看出,本文算法的滤波残差相对其他 3 种算法明显较小,相对具有较好的背景杂波抑制效果。

本文分别统计了 6 组实验序列中所有图像的

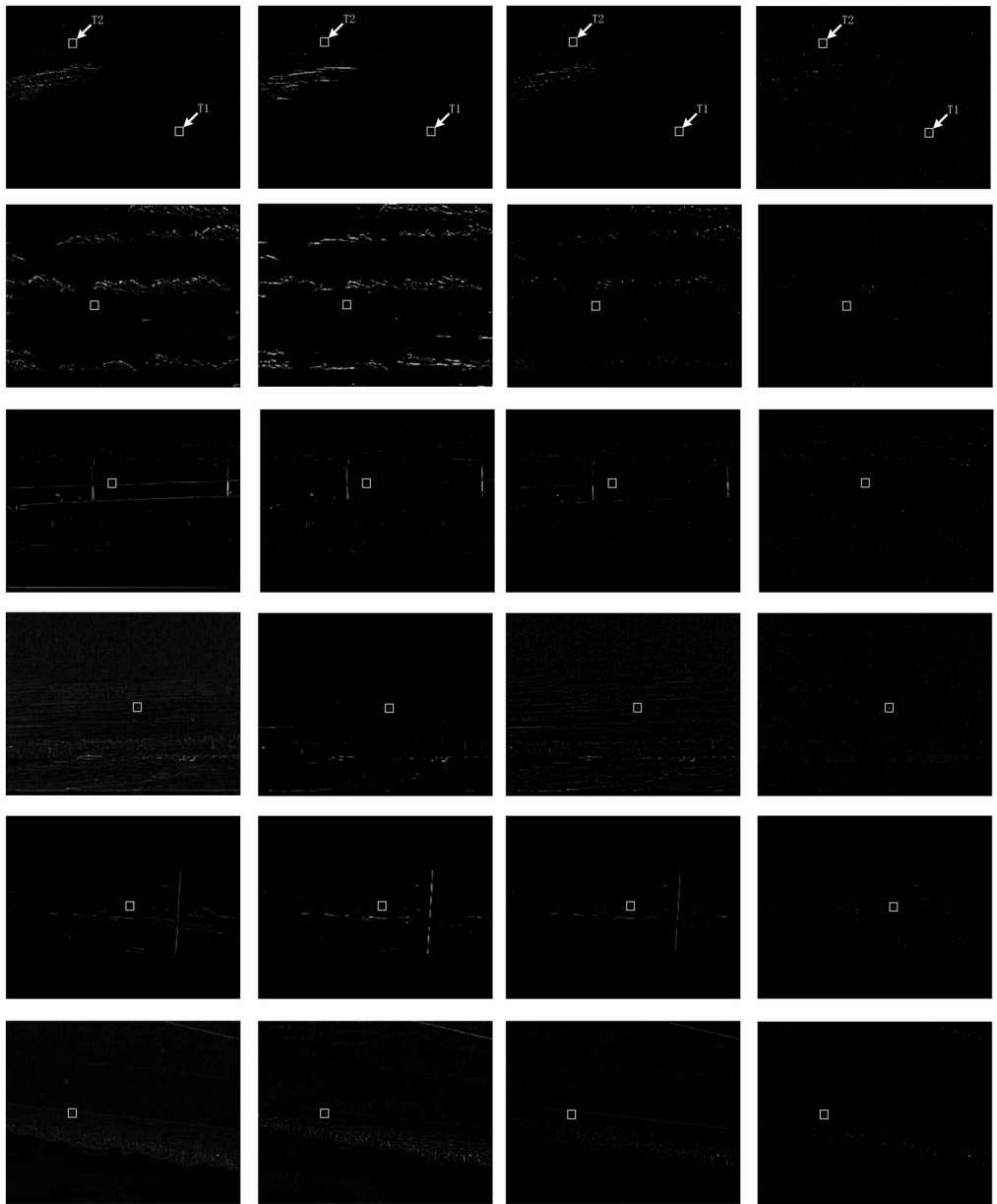


图 5 背景抑制结果

Fig. 5 Background suppression results

目标输入信噪比 SNR_{in} 和图像输入标准差 σ_{in} , 4 种背景抑制算法对应的目标信噪比增益 $Gain(SNR)$ 和标准差增益 $Gain(\sigma)$ [12]。其中目标信噪比定义为: $SNR = \frac{T - m}{\sigma}$, 其中 T 为目标的灰度值, m 为灰度均值, σ 为灰度标准差; 目标信噪比增益定义为: $Gain(SNR) = 20 \log \frac{SNR_{out}}{SNR_{in}}$, SNR_{out} 是目标在残差图像中的信噪比; 图像标准差增益定义为: $Gain(\sigma) = 20 \log \frac{\sigma_{out}}{\sigma_{in}}$, σ_{out} 是残差图像的标准差。由于原始实验图像存在背景杂波的影响, 统计目标在整幅图像中的信噪比无法客观地表现目标的强度, 因此本文在以目标为中心

的 9×9 的窗口内统计目标输入信噪比 SNR_{in} , 尽可能地排除背景的影响; 而通过背景抑制后, 图像应该表现为目标加高斯噪声的形式, 因此本文在整幅图像内统计目标的输出信噪比 SNR_{out} 。输入标准差 σ_{in} 和输出标准差 σ_{out} 均在整幅图像内进行统计。 $Gain(SNR)$ 和 $Gain(\sigma)$ 分别代表目标增强和背景抑制的程度, 对于背景抑制而言, 希望抑制后的残差图像中目标信噪比越大越好, 而背景杂波干扰越少越好, 因此越大的 $Gain(SNR)$ 值和越小的 $Gain(\sigma)$ 值代表背景抑制算法的效果越好。对于 6 组序列的实验结果统计如表 1 所示。表中列出的结果均是序列中所有图像统计结果的均值。其中图像序列 (a) 的实验结果中斜线左边和右边的值分别代表针对 T1 和 T2 得到的结果。

表 1 6 组序列实验结果

Tab. 1 Experiment results of six image sequences

图像 序列 组号	SNR_{in}	σ_{in}	算法	$Gain(SNR)$ /dB	$Gain(\sigma)$ /dB
(a)	4.26/ 2.55	39.45	TDLMS	0.06/2.32	-17.29
			TopHat	0.65/2.41	-16.93
			最大化	1.20/2.97	-17.94
			本文	10.70/12.87	-25.52
(b)	4.50	138.16	TDLMS	-6.82	-21.79
			TopHat	-5.02	-22.53
			最大化	-3.68	-25.61
			本文	5.02	-30.66
(c)	1.21	42.80	TDLMS	8.03	-21.10
			TopHat	12.90	-22.90
			最大化	10.50	-25.50
			本文	18.30	-31.90
(d)	1.33	44.50	TDLMS	9.35	-15.05
			TopHat	11.50	-24.91
			最大化	10.00	-23.70
			本文	17.30	-31.94
(e)	2.10	70.30	TDLMS	5.10	-22.00
			TopHat	7.20	-23.10
			最大化	6.84	-23.10
			本文	13.50	-28.20
(f)	1.19	66.2	TDLMS	12.40	-29.40
			TopHat	14.80	-31.10
			最大化	15.64	-32.22
			本文	23.6	-38.70

从表中对比可以看出,本文提出的算法的目标增强效果 $Gain(SNR)$ 和背景抑制效果 $Gain(\sigma)$ 明显优于其他 3 种算法。在第 2 组序列中其他 3 种算法背景抑制后的全局信噪比甚至低于原图像的局部信噪比,并未达到较好的抑制背景的目的,而本文算法对于 6 组实验序列均具有较好的背景抑制效果。这主要归因于本文算法相对其他方法能够较细致地分辨像素的局部相关特性,并能有侧重地选取更适合的背景抑制方法。

3 总结与展望

本文提出了一种双预测结构融合的复杂红外图像背景抑制算法,该算法先计算像素在局部区域内的核值相似程度,再根据核值相似程度有侧重地融合不同背景预测结果。实验证明,本文提出的算法能够较好地预测复杂红外图像中的背景分量,进而达到抑制背景和增强目标的效果。

下一步将重点研究并丰富核值相似程度的定义,融合更高效的背景抑制方法,进而取得更好的效果。同时,满足不同复杂背景情况下参数的自

适应设置也是下一步的研究内容。

参考文献(References)

- [1] 杨磊,杨杰,郑忠龙. 海空复杂背景中基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(1): 41-45.
YANG Lei, YANG Jie, ZHENG Zhonglong. Detecting infrared small targets based on adaptive local energy threshold under sea-sky complex backgrounds [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(1): 41-45. (in Chinese)
- [2] 杨杰,杨磊. 基于红外背景复杂程度描述的小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2006, 36(3): 382-386.
YANG Jie, YANG Lei. Small target detection algorithm based on infrared background complex degree description [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 36(3): 382-386. (in Chinese)
- [3] 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.
WANG Wenlong, HAN Baojun, ZHANG Hongping. A new algorithm of small target detection for infrared image in background of sea and sky [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 725-728. (in Chinese)
- [4] 徐剑峰,吴一全,周建江. 基于时域背景预测检测红外图像序列中的小目标[J]. 中国图像图形学报, 2007, 12(9): 1598-1603.
XU Jianfeng, WU Yiquan, ZHOU Jianjiang. Small target detection based on temporal predictions of background in infrared image sequences [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(9): 1598-1603. (in Chinese)
- [5] 王博,刘德连,张建奇. 基于背景移除的时域目标检测[J]. 通信学报, 2009, 30(7): 67-72.
WANG Bo, LIU Delian, ZHANG Jianqi. Temporal filtering for target detection algorithm based on static background elimination [J]. Journal on Communications, 2009, 30(7): 67-72. (in Chinese)
- [6] 武斌,姬红兵,李鹏. 基于三阶累积量的红外弱小运动目标检测新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(5): 364-367.
WU Bin, JI Hongbing, LI Peng. New method for moving dim target detection based on third order cumulate in infrared image [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(5): 364-367. (in Chinese)
- [7] Tarun S, James R Z. Performance evaluation of 2-d adaptive prediction filters for detection of small objects in image data [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1993, 2(3): 327-340.
- [8] 朱红,赵亦工. 基于背景自适应预测的红外弱小运动目标检测[J]. 红外与毫米波学报, 1999, 18(4): 305-310.
ZHU Hong, ZHAO Yigong. Detection of weak and small moving infrared targets by adaptive prediction of background [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1999, 18(4): 305-310. (in Chinese)
- [9] 徐军,向健华,梁昌洪. 最大化背景模型用于检测红外图像中的弱小目标[J]. 光子学报, 2002, 31(12): 1483-1486.
XU Jun, XIANG Jianhua, LIANG Changhong. Small target detection based on maximum background model in IR images [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(12): 1483-1486. (in Chinese)
- [10] Zhang F, Li C F, Shi L. Detecting and tracking dim moving point target in IR image sequence [J]. Infrared Physics and Technology, 2005, 46: 323-328.
- [11] Smith S M, Brady J M. SUSAN-a new approach to low level image processing [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.
- [12] Tartakovsky A, Blazek R. Effective adaptive spatial temporal technique for clutter rejection inIRST [C]// SPIE Proceedings: Signal and Data Processing of Small Targets. Orlando, FL, 2000: 85-95.