

基于多阈值分类与逆向求证的红外序列图像 弱小目标检测方法

袁红刚 孙卫东

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 弱小点目标检测是红外探测技术中的一个关键问题。针对目前序列红外图像目标检测中单阈值分割时弱小目标易丢失及快速移动目标的能量欠积累问题,提出了一种基于多阈值分类与逆向求证的弱小红外目标检测方法。在背景抑制的基础上,首先采用自适应多阈值分类的方法提取多类候选目标,强化了各类弱小候选目标的检测能力。在当前帧候选目标点的真伪无法判定时,根据目标在相邻帧间的位置变化信息构造相应的时空管道,沿时空管道逆向寻找可能出现的各类候选目标,并将其能量与当前帧候选目标点的能量进行加权求和后再进行门限判决,较好地解决了弱小目标及快速移动目标的能量积累问题。最后,通过若干实际红外数据验证了上述方法的有效性。

关键词 红外目标检测 弱小目标 快速移动目标 多阈值分类 逆向求证

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)08-1583-07

Weak and Small Target Detection Based on Multi-threshold Classification and Backward Verification for Infrared Image Sequence

YUAN Hong-gang, SUN Wei-dong

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Weak and small target detection is a crucial problem in infrared technology. Facing the problems of losing weak/small target in single threshold segmentation and insufficient energy accumulation for fast-moving targets in the target detection of infrared image sequence, a new method based on multi-threshold classification and backward verification has been proposed in this paper. After background suppression, an adaptive multi-threshold classification is adopted for the extraction of multi-class candidates, which has enhanced the capability of weak and small targets extraction. When the candidate in the current frame can not be justified due to its weakness and movement, a kind of spatial-temporal pipeline will be constructed according to the candidate's movement in adjacent frames, and a backward search will be carried out for possible existence of any kinds of candidate. After that, the energies of these candidates will be weighted accumulated with that of the candidate in the current frame and justified with a fixed energy threshold. In the end of this paper, some experimental and comparison results using real infrared image sequences will be given to show the effectiveness of this new method.

Keywords infrared target detection, weak and small target, fast-moving target, multi-threshold classification, backward verification

收稿日期:2008-04-17;改回日期:2008-05-19

第一作者简介:袁红刚(1972~),女。2008年于清华大学电子工程系获硕士学位。主要从事图像处理与目标检测方面的研究工作。

E-mail: yuanhg05@sina.com

1 引言

随着高灵敏度红外传感器的出现,红外探测技术得到了迅猛的发展并广泛应用于武器装备中。目标检测作为系统最前端的处理环节,是红外探测设备的重要组成部分。只有及时地检测到场景中存在的目标,才能保证后续目标跟踪、识别等工作的顺利进行。然而,远距离红外探测获取图像中的目标只是一个很小的亮点或斑点,没有明显的边缘轮廓和结构特征,且信噪比(SNR)较低。特别是在非平稳的起伏背景干扰下,目标甚至被大量噪声淹没,极易产生弱小目标的丢失问题。此外,快速移动目标空间对应关系的建立较为困难,这给“能量积累”等典型处理过程带来了诸多不利。因此,弱小、快速移动条件下的红外目标检测是武器系统成败的关键因素之一^[1]。

现有的红外目标检测主要有两大主要解决思路:一是先跟踪后检测(TBD),二是先检测后跟踪(DBT)^[2-3]。TBD法根据多帧检测的思想,采用将空间和时间信息整合到多帧处理过程中,对原始序列图像中的多个可能轨迹进行跟踪,再进行门限判决,最终达到目标检测的目的。文献[4]给出了一种用“双向3维匹配滤波器(3DDDF)”进行运动弱小目标检测的TBD方法。这种方法能够在有限长的3维时空图像中将目标点的能量进行很好的积累,大大提高了弱小目标的检测性能,但该方法的使用条件较为苛刻:固定场景、相对静止的图像背景、目标运动速度已知且恒定,这限制了该方法的实际应用。在已知噪声特性和目标运动信息的情况下,TBD法的目标检测性能优于DBT法,但其应用受限,计算量和实现难度较大,在实时性上有待进一步改进。DBT算法则采用“单帧检测和多帧确认”的策略,先进行背景抑制,然后对图像进行分割,获取候选目标点,再根据目标运动信息的帧间高相关性,进行多帧图像的能量累积,对单帧检测的结果进行跟踪判决。这样极大地减小了跟踪判决的难度,因此在算法复杂度和实现难易度两方面占有优势,是目前实时处理中采用较多的方法^[1]。文献[5]中提出了通过膨胀后的多帧能量积累(DA)来检测红外弱小目标的DBT算法。其基本思路是通过单阈值分割获取候选目标点,并用适当的结构元素进行膨胀处理,在连续的几帧内将膨胀区域相互重叠部分

的能量进行积累,之后,搜索所有的局部极大值,并进行门限判决。这一方法即可将目标点处的能量进行积累又可以适应目标运动方向的改变,但当目标的运动速度较快时在积累过程中膨胀区域相互重叠的次数减少,易造成能量积累不足而丢失目标。而文献[6]中则以膨胀叠加后连通域面积的大小进行目标检测,这一方法会将缓动的目标点误判为噪声。此外,这种方法对分割阈值选取非常敏感,阈值较高不利于弱小目标的检出,阈值较低会导致虚警率增加。

针对上述单阈值分割下的弱小目标易丢失和快速移动目标的能量欠积累问题,本文提出了一种基于多阈值分类与逆向求证的弱小红外目标检测方法(MCBV)。该方法在对图像进行基于预测模型的背景抑制的基础上,采用自适应多阈值分类的方法提取候选目标,并根据目标在相邻帧中位移的大小来构造时空管道,在当前帧候选目标点的真伪无法判定时,沿时空管道逆向寻找可能出现的各类候选目标,并在时空管道内部将各类候选目标点的能量与当前帧候选目标点的能量进行加权求和,再设置合理的能量阈值判定候选目标的真实性。该方法将候选目标按灰度值分成不同级别的候选目标类,并给以相应的能量权值,以此来提高弱小目标的检测能力,并且通过时空管道的弯曲来适应目标的快速运动,较好地解决了快速移动目标的能量积累问题。最后通过若干实际红外数据验证了上述方法的有效性,并与文献[5]中的膨胀积累法进行了比较。

2 单帧图像的背景抑制

在红外图像中,由于弱小目标成点状,SNR较低,若直接进行目标检测会给检测过程带来很大的困难。所以,目标检测前通常先对单帧图像进行有效的背景抑制,从而达到提高图像SNR的目的。现有的背景抑制法主要分为两类:时间处理法和空间处理法^[2]。时间处理法是利用时间上连续几帧的图像信息完成背景抑制,具体方法包括图像差分、累加平均等;空间处理法的基本出发点是点目标与背景不相关,因此可以在图像空间上通过滤波或背景预测的方式抑制背景,其中又包括中值滤波法、高通滤波法、形态学滤波法、小波变换法及基于预测模型的背景抑制法等。由于基于预测模型的背景抑制方法对帧间成像背景的变化具有更好的适应能力,因

此采用了基于预测模型的背景抑制方法。其基本策略是:对于图像中的任何一个像素点,如果是该像素点属于背景,那么它的灰度值一定可以用周围区域像素点的灰度值来预测。对于属于目标上的像素点,它的灰度值与周围像素点灰度值的相关性较差,若用周围区域像素点的灰度值来预测该点的灰度值,将会与该点的实际灰度值产生较大差异,由此可以实现背景像素点和目标像素点的区分和抑制。

背景预测模型可以通过下式加以描述:

$$y(m, n) = \sum_{l \in S_j} \sum_{k \in S_j} w_j(l, k) f(m-l, n-k) \quad (1)$$

$$m = 0, 1, \dots, M-1; n = 0, 1, \dots, N-1$$

式中, f 是大小为 $M \times N$ 的输入图像; y 为预测图像; w_j 为预测模型的权重矩阵; S_j 对应着局域背景选取点的范围集合, 局域背景选取点的范围 S_j 和权重矩阵中的权值可由背景的复杂程度决定。根据式(1), 预测图像与输入图像之间的差图像为

$$e(m, n) = f(m, n) - y(m, n) \quad (2)$$

式中, $y(m, n)$ 被认为是 (m, n) 这一像素点的局部背景灰度; e 为差图像, 当像素点 (m, n) 与 S_j 中的像素点同属同一背景时, 值 $e(m, n) \approx 0$, 这样就达到了背景抑制的作用。

3 基于多阈值分类的候选目标提取

经过背景抑制后, 大部分像素集中在低灰度区, 只有目标点和少量噪声点分布在高亮度区, 其中目标点较之大多数噪声而言要明显亮一些。为了将候选目标点从图像中分离出来, 最常用的方法是根据图像的 SNR 自适应地给出一个阈值对图像进行二值化处理, 高于阈值的点被视为是候选目标点^[7]。这一阈值的选择, 对整个过程的处理速度和目标判定的准确性有很大影响: 阈值过低, 得到的候选目标太多, 这会大大增加后续处理的数据量, 也容易造成虚警; 阈值过高, 对弱目标的检测能力下降, 甚至可能丢失候选的目标而造成漏警。因此采用一种改进的多阈值分类方法对图像进行分割, 以提高弱小目标的检测能力。该方法的具体算法如下:

设图像 $f(x, y)$ 其灰度取值范围为 $G = \{0, 1, \dots, N-1\}$, 取分割阈值 $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$; ($0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < N-1$), 将图像分割成 $(n+1)$ 个部分。 $B = \{b_0, b_1, b_2, \dots, b_n\}$; ($b_0 < b_1 < b_2 < \dots < b_n$) 代表与上述 n 个分割阈值所对应的 $n+1$ 个权值, 它刻画了各

分割阈值间隔内该像素点隶属目标点的程度。在此定义下, 图像 $f(x, y)$ 在 n 个分割阈值 (t_1, t_2, \dots, t_n) 下的分割分类结果可以表示为

$$f_i(x, y) = \begin{cases} b_0 & 0 \leq f(x, y) \leq t_1 \\ b_i & t_i < f(x, y) \leq t_{i+1} \\ b_n & t_n < f(x, y) \leq N-1 \end{cases} \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n-1)$$

出于自适应的目的, 采用根据图像统计特性确定各分割阈值的方法, 即

$$t_i = m + k_i \cdot \sigma \quad (4)$$

$$(k_1 < k_2 < k_3 < \dots < k_n \quad i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

其中, m 为当前帧图像的均值, σ 为其标准差, k_i 为加权系数, 通过实验得出 k_i 在 4~9 之间取值较为理想。

经过上述分割后, 图像中的像素点被分为 $n+1$ 个类, $f_0(x, y) = b_0$ 的这一类像素点将被认为是单纯的噪声点从图像中滤除, 此时 $\{f_i(x, y) = b_1, \dots, f_i(x, y) = b_i, \dots, f_n(x, y) = b_n\}$ 的像素点构成 n 类候选目标集(其中 f 和 b 的下标 i 对应该候选目标点所属的类), 候选目标 $f_i(x, y)$ 的下标越大表明该像素点隶属目标点的程度越大, 因此所赋予的能量权值 b_i 也就越高。

4 时空管道与逆向求证目标判定

多阈值分类基础上的逆向求证目标判定方法充分利用了弱小目标在序列图像中灰度值与位置的相关性, 在当前帧候选目标点的真伪无法判定时, 则沿时间轴逆向、在之前收到的几帧图像中寻找目标判定的依据。即首先根据目标在相邻帧的位置变化信息构造适当的时空管道, 沿时空管道逆向逐帧寻找可能出现的各类候选目标, 并将出现的各候选目标点的能量与当前帧候选目标点的能量进行加权求和, 然后再设置合理的阈值判定目标的真实性。

设第 k 帧中的候选目标 $f_i^k(x, y)$ 为待判定的候选目标点, 则相应的时空管道构造、逆向能量加权求和与真实目标判定算法由下述 5 个步骤组成。

(1) 最大可能位移量估算 根据目标属性、运动速度、红外成像平台的抖动情况及成像设备的帧频, 估算目标在相邻帧中的最大可能位移量 D_{\max} (单位: 像素)。对于非合作目标, 作为系统外部参数的目标属性及运动速度可以根据系统的作战任务和使

用环境来确定。

(2) 构造逆向时空管道 在时间轴上从第 K 帧起在逆向 L 帧 ($k, k-1, \dots, k-L+1$) 内, 构造一个以 P_r ($P_r > D_{\max}$) 为半径、中心可移动时空管道。具体方法如图 1 所示, 首先将第 k 帧中以候选目标 $f_i^k(x, y)$ 为中心、 P_r 为半径的图像区域 S_k 作为时空管道的起始, 将管道延伸至第 $k-1$ 帧; 若在第 $k-1$ 帧中出现的候选目标为 $f_i^{k-1}(x, y)$, 且 $f_i^{k-1}(x, y)$ 与 $f_i^k(x, y)$ 的距离小于 P_r , 则将时空管道的中心移至 $f_i^{k-1}(x, y)$; 若在第 $k-1$ 帧中未出现候选目标, 则将时空管道直接延伸至第 $k-2$ 帧, 等待候选目标的出现。依此类推下去, 将时空管道延伸直至第 $k-L+1$ 帧。在构建过程中, 若时空管道内的候选目标点数量发生变化, 则允许时空管道出现分支与会合。

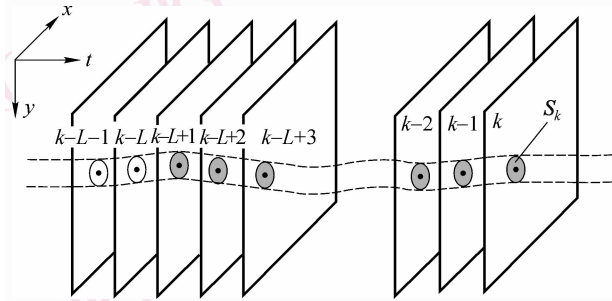


图 1 时空管道示意图

Fig. 1 Sketch of spatial-temporal pipeline

(3) 各类候选目标点能量加权求和 根据式(5), 对在上一步构造好的时空管道内出现的所有 n 类候选目标点的能量进行加权求和, 评估第 k 帧候选目标 $f_i^k(x, y)$ 为真实目标的总体可能性。

$$\begin{aligned}
 A_{k,L} &= \sum_{m=k}^{k-L+1} \max_{\substack{f_i^m(x,y) \in S_m \\ i \in [1,n]}} (f_i^m(x,y)) \\
 &= \sum_{m=k}^{k-L+1} \max_{\substack{f_i^m(x,y) \in S_m \\ i \in [1,n]}} (b_i^m) \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中, L 为时空管道的长度, S_m 表示第 m 帧中以 $f_i^m(x, y)$ 为中心以 P_r 为半径的图像区域, b_i^m 表示第 m 帧中属于 S_m 的第 i 类候选目标点能量权值, $A_{k,L}$ 表示第 k 帧中的候选目标 $f_i^k(x, y)$ 在长度为 L 帧的时空管道内对所有候选目标点能量的加权求和。

(4) 门限判决 设置合理的目标检测门限 T , 在时空管道内对第 k 帧中的候选目标 $f_i^k(x, y)$ 的逐帧

逆向求证时, 只要管道内的能量加权和满足 $A_{k,L} \geq T$ 即可判定 $f_i^k(x, y)$ 为真实目标。

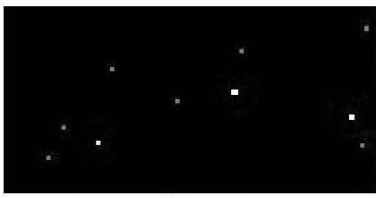
(5) 在第 k 帧中遍历所关注的各类候选目标点, 重复上述步骤(1)~(4), 对所关注的每个候选目标点的真伪进行判定。

不难看出, 除了针对快速移动目标的自适应时空管道弯曲, 以及针对弱目标的分类别能量加权求和外, “正向”膨胀积累法与本文“逆向”求证法的另一主要区别体现在运算量上。若当前帧为第 k 帧, “正向”膨胀积累法要为第 $k-L+1$ 至第 L 帧出现的所有关注候选目标点进行能量加权求和与判定处理, 而“逆向”求证法仅需为第 k 帧中所关注的少数候选目标点构建时空管道, 进行能量加权求和与判定, 这有利于减少运算量。

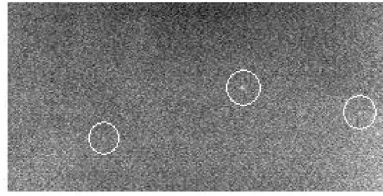
5 实验结果与分析

选用了 3 组不同情形的实际红外图像序列, 重点就本文所提出的新的弱红外目标检测法的弱小目标与快速移动目标检测能力进行了实验验证和定量分析。在第 1 组实验用序列图像中存在单一目标, 该目标在平面内位移量较小, 但 SNR 值较低, 比较适合于弱小目标检测能力的分析评估; 第 2 组图像中的单一目标在图像平面内位移较大, SNR 值较高, 比较适合于快速移动目标检测能力的分析评估; 第 3 组图像中单一目标在图像平面内位移最大, SNR 值较低, 检测难度较大, 比较适合于弱小与快速移动特性兼备的、极端情况下的目标检测能力分析评估。

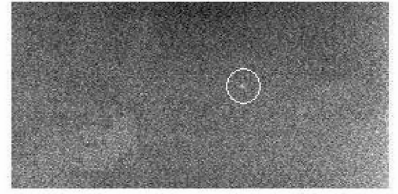
为了更好地说明本文方法的有效性, 实验中分别采用膨胀积累法^[5]和本文方法对上述 3 组实验用序列图像进行比较实验处理, 图 2 为第 1 组缓动、弱目标图像序列的目标检测结果, 图 3 为第 2 组快速运动目标图像序列的目标检测结果, 限于篇幅这里省略第 3 组图像的目标检测结果图, 仅给出其定量分析结果。实验中为了便于描述, 将多阈值分类数设为 3, 即获取除背景外的两类候选目标点, 并以不同的灰度值进行了标示; 灰度值较高的为第 1 类候选目标点, 所对应的能量权值 $b_1 = 1$, 灰度值较低的为第 2 类候选目标点, 所对应的能量权值 $b_2 = 0.5$ 。图中, 白色圆环的半径等于时空管道的半径 P_r , 根据目标的基本运动特性, 图 2 和图 3 中 P_r 的取值分别为 10 和 15 个像素。膨胀积累法所采用的分割阈



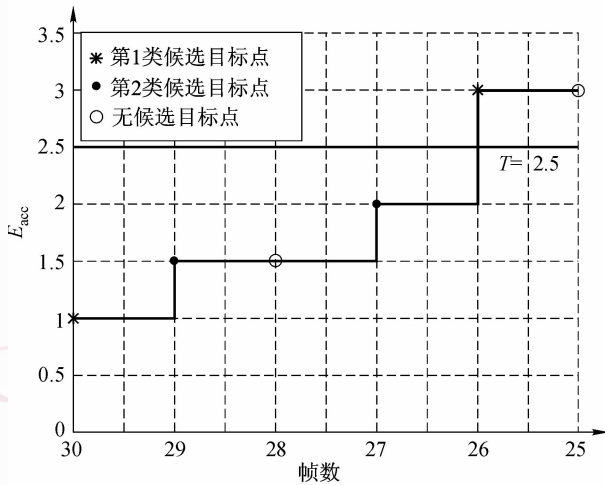
(a) 逆向求证法中的两类候选目标点



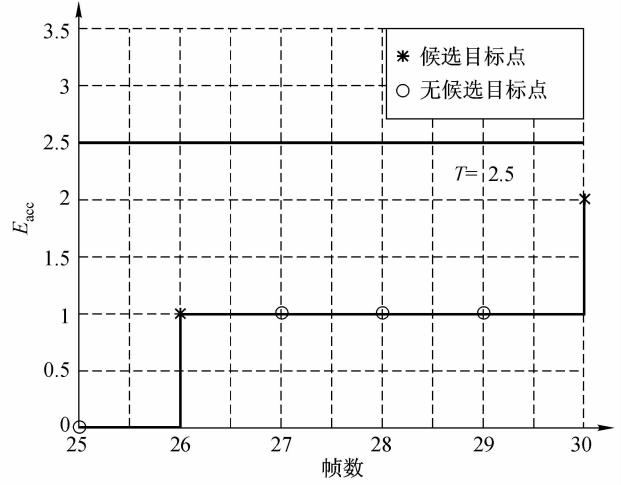
(b) 第1类候选目标对应的时空管道



(c) 第30帧逆向求证目标检测结果



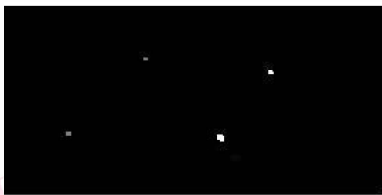
(d) 逆向求证法中的逆向能量加权求和曲线



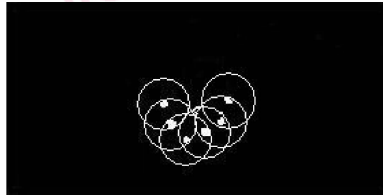
(e) 膨胀积累法中的正向能量积累曲线

图 2 缓动、弱目标第 30 帧图像的目标检测结果

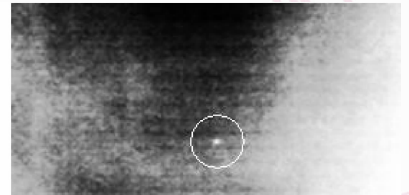
Fig. 2 Slow-moving and weak target detection results in 30th frame



(a) 逆向求证法中的两类候选目标点



(b) 连续6帧中的时空管道平面投影图



(c) 第24帧逆向求证目标检测结果

图 3 快速移动目标第 24 帧图像的目标检测结果

Fig. 3 Fast-moving target detection results in 24th frame

值与本文方法的第 1 类候选目标的分割阈值相同,两种方法的目标判决门限均设为 $T = 2.5$ 。由图 2(e)可以看出,在该组第 30 帧图像进行目标检测时,膨胀积累法的能量积累值 E_{acc} 小于判决门限,在该帧中未能正确检出目标。而在图 2(d)中,本文方法将弱目标的能量进行有效的积累和判决,正确检出了目标。在图 3 所示的快速运动目标图像序列目标检测实验中,由图 3(b)中连续 6 帧图像中时空管道平面的投影结果不难看出,由于目标在图像序列中存在明显的快速移动(抖动),基于膨胀积

累的目标检测由于能量积累不足出现了漏检,而本文方法却成功检测出了目标。

表 1 给出上述 3 组实验用图像序列下两种不同目标检测方法的定量分析结果。表 1 中 MCBV 表示基于多阈值分类与逆向求证的目标检测方法,DA 表示膨胀积累目标检测方法; N_{acc} 表示膨胀积累法中膨胀后必须积累的帧数,为了公平起见实验中给了两种不同的取值; N_{total} 表示图像序列总帧数, N_{target} 表示检出目标总帧数, N_{first} 表示首次检出目标帧。可以认为 N_{target} 表明了算法的弱目标及快速移

表 1 3 组图像序列下两种方法的检测结果对比

Tab. 1 Comparison of two target detection methods for three infrared image sequences

单位: 帧

Parameter	第 1 组图像序列			第 2 组图像序列			第 3 组图像序列		
	MCBV	DA	DA	MCBV	DA	DA	MCBV	DA	DA
	$P_r = 10, L = 6, T = 25$	$N_{acc} = 4$	$N_{acc} = 6$	$P_r = 15, L = 6, T = 2$	$N_{acc} = 4$	$N_{acc} = 6$	$P_r = 20, L = 6, T = 25$	$N_{acc} = 4$	$N_{acc} = 6$
N_{total}	50	50	50	62	62	62	100	100	100
N_{target}	46	45	43	59	50	51	83	76	79
N_{first}	3	4	6	2	4	6	3	4	6

动目标检测能力, N_{first} 表明了算法的早期检测能力。由表 1 中的 N_{first} 可以看出, 多阈值分类策略的引进使得本文方法在各组实验中更早检测出了目标。如在检测帧数均为 6 帧的情况下, 本文方法比膨胀积累法提前 3~4 帧检测出了目标。由表 1 中的 N_{target} 可以看出, 本文方法在弱目标的检出率优势明显, 特别是第二、三组实验用图像序列以及检测帧数均为 6 帧的情况下, 检出率分别提高了 15.69%, 5.06%。同时, 由 N_{target} 还可以看出, 当目标的运动速度较快时, 较长的积累长度不利于目标的早期检测, 较短的积累长度又会导致检出目标总数的减少。实验表明, 与膨胀积累法相比, 本文方法在目标的早期检测、弱目标检出率和对目标在图像平面内快速移动的适应性上都略胜一筹。下面对产生这一结果的原因进行详细的分析。

(1) 早期检测性能分析 本文方法在对候选目标进行逐帧逆向求证时, 只要能量加权和高于检测门限即可判定为真实目标, 如表 1 中的第 2 组图像序列, 在接收到第 2 帧时就检出了目标。而膨胀积累法采用固定帧长的积累, 以 4 帧积累为例, 只有在接收到第 4 帧图像时才能首次检出目标。

(2) 弱目标检测性能分析 膨胀与能量积累法采用了单一阈值来提取候选目标, 阈值较高不利于弱小目标的检出, 阈值较低会导致虚警率增加。若用同样的阈值作为本文方法中第 1 类候选目标的分割阈值, 多阈值分类后的逆向求证使得更多低灰度目标点的能量得到积累, 有利于提高弱目标检测能力。

(3) 快速移动目标检测功能分析 在传统的膨胀积累法中, 能量积累的峰值取决于膨胀区域相互重叠的次数。当目标移动速度较快或沿某一方向持续运动时会出现能量积累不足, 导致目标不能正确检出。而本文方法构造的时空管道中心可在帧间变动, 时空管道可以随着目标运动的轨迹弯曲, 即使目

标移动速度较快或沿某一方向持续运动时, 仍能通过时空管道随目标运动轨迹的弯曲将目标点的能量进行加权求和, 这样有利于快速运动目标的检出。

6 结 论

针对目前序列红外图像目标检测中单阈值分割时弱小目标易丢失和快速移动目标的能量欠积累问题, 提出了一种基于多阈值分类与逆向求证的弱小红外目标检测方法。该方法在单帧图像背景抑制的基础上, 用多阈值分类的方式提取多类候选目标, 并按其隶属于目标的程度赋予不同的能量权值, 强化了各类弱小候选目标的检测能力。在此基础上, 根据目标在相邻帧可能的最大位移值构造半径适当的时空管道, 在当前帧候选目标点的真伪无法判定时, 沿时空管道逆向寻找出现的所有候选目标点, 将这些候选目标点的能量与当前帧候选目标的能量进行加权求和, 再设置合理的能量阈值从候选目标中检测出真实目标。最后, 通过 3 种不同的实际红外图像序列验证了上述方法的有效性, 并与基于膨胀能量积累的目标检测法进行了比较分析。实验结果表明, 该方法较好地解决了弱小目标及快速移动目标的能量积累问题, 对弱小红外目标能够及早发现, 弱目标的检出率高, 且对由于红外探测设备的抖动或目标本身运动引起的目标点快速移动适应性好。应该指出的是, 本文虽然提出了一种通过多阈值分类提高候选目标检测能力的措施, 但分类类别数量与弱小目标检测能力的关系仍有待进一步的分析。

参考文献 (References)

- 1 Liu Ling. The Algorithm Research about Infrared Dim Target [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. [刘玲. 红外弱小目标检测算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.]
- 2 David S Chan, David A Langan, Daniel A Staver. Spatial processing

- techniques for the detection of small targets in IR clutter [A]. In: Proceedings of SPIE Signal and Data Processing of Small Targets 1990 [C], Orlando, FL, USA, 1990, **1305**:53-62.
- 3 Manuel F Fernandez, Tom Aridgides, Bray D. Detecting and tracking low-observable targets using IR [A]. In: Proceedings of SPIE Signal and Data Processing of Small Targets 1990 [C], Orlando, FL, USA, 1990, **1305**: 193-206.
- 4 Li Meng, Zhang Tianxu, Yang Weidong, *et al.* Moving weak point target detection and estimation with three-dimensional double directional filter in IR cluttered background[J]. Optical Engineering, 2005, **44**(10):145-148.
- 5 Wen Pei-zhi, Shi Ze-lin, YU Hai-bin. A detection method for IR point target on sea background based on morphology [J]. Opt-Electronic Engineering, 2003, **30**(6):55-58. [温佩芝, 史泽林, 于海斌. 基于形态学的海面背景红外目标检测方法[J]. 光电工程, 2003, **30**(6):55-58.]
- 6 Ren Huo-rong, Zhang Ping, Wang Jia-li. A method for small target detection based on energy accumulation and morphological opening by reconstruction in infrared image sequences[J]. Infrared Technology, 2003, **25**(6):28-30. [任获荣, 张平, 王家礼. 基于能量积累和形态重构开的红外图像序列小目标检测方法[J]. 红外技术, 2003, **25**(6):28-30.]
- 7 Hao Xiao-ran. Study of Moving Point Targets Detection in Image Sequences[D]. Shandong: Shandong University, 2005. [郝晓冉. 序列图像中运动点目标检测方法的研究[D]. 山东: 山东大学, 2005.]