

# 基于时域背景预测检测红外图像序列中的小目标

徐剑峰 吴一全 周建江

(南京航空航天大学信息科学与技术学院电子工程系, 南京 210016)

**摘要** 研究存在背景噪声和干扰的情况下红外图像序列中弱小运动目标的检测问题。从背景出发,充分利用在图像序列中占绝大部分的背景像素来构造弱小目标的检测,并提出在时域上利用背景预测技术实现检测。通过编程在含有随机目标的实际红外序列图像中的应用,证明了算法的有效性和优越性。

**关键词** 背景预测 小目标检测 红外图像序列 时域

中图分类号: TP391.41 TN911.71 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)09-1598-06

## Small Target Detection Based on Temporal Predictions of Background in Infrared Image Sequences

XU Jian-feng, WU Yi-quan, ZHOU Jian-jiang

(Department of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** This paper addresses the problem of detecting small, moving, low amplitude objects in infrared image sequences especially for the situation with moving nuisance objects and background noise. Small target is detected by taking full advantage of the information of the background pixels. And the technique of small target detection is put forward based on temporal predictions of the background in infrared image sequences. At last, the effectiveness of the technique is demonstrated by applying the algorithm to real world infrared(IR) image sequences with random targets.

**Keywords** predictions of background, small target detection, infrared(IR) image sequences, temporal

### 1 引言

20世纪80年代末,红外传感器就已经被用于检测远距离的热源,尤其在军事领域,应用更为广泛。随着各种红外隐身技术的运用和探测距离加大,目标的红外辐射强度、辐射面积和对探测系统所成的张角相应大幅减小,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。在图像中,如何快速、准确地将运动小目标检测出来并跟踪是实现精确制导的基础和前提。背景预测技术研究近来较热,通过对相关文献的阅读<sup>[1-3]</sup>,可以体会到背景预测技术的基本思想。但他们都是用同一幅图像中的像素来预测,即为空域预测。如果目标太小,特别是点目标,信噪比

(signal-noise ratio, SNR)和信扰比(signal-clutter ratio, SCR)低,很难检测,不能充分利用小目标的运动特性。那能不能换个角度从时间维来思考呢,提出了时域背景预测算法——即在时域上对每个像素单独进行操作。算法基于以下思考:如果目标在现实世界的运动与背景噪声或干扰在时间和(或)空间上是独立的,可以假设图像序列中的目标在时域上通过的那些像素也和同一场景中的其他像素独立。因此时域上的SNR和SCR比空域上的SNR和SCR高,这意味着更高的检测概率和更低的虚警概率。要从数学上对此证明很难,因为干扰不能成功建模,只能定性地分析。把时域场景中的目标强度和背景噪声标准差 $\sigma_{bg}$ 的比值定义为信噪比SNR及目标强度与平均干扰标准 $\sigma_{cl}$ 的比值定义为信扰比SCR是很有用的。时域中处理帧数相对较少,目标

收稿日期:2006-03-27; 改回日期:2006-06-26

第一作者简介:徐剑峰(1979-),男,2007年于南京航空航天大学获通信与信息系统专业硕士学位。主要从事数字图像处理及DSP研究。E-mail: junqiaoxjf@163.com

强度和空域中一样,而噪声和干扰的强度却降低了。例如在空域、时域中,点目标强度是稳定的,信息量一致,都是一个点。(椒盐)噪声要紧随目标在时间维中连续几帧出现在同一空间小邻域内才能造成虚警,这样的概率明显低于在空域中目标和噪声同时出现在红外焦平面大范围视场内的概率,因此时域中的信噪比较高,形象地说就是用时域中位置的同一性换空域中时间的同一性。对于干扰而言,由于算法在高速硬件上实现,在短时间内,干扰很少有机会体现它的漂移性。它不体现漂移性,在时域中就是普通背景了,所以比空域处理有明显的改善。同时在时域中可以利用小目标运动轨迹的连续性,排除干扰和噪声。由于(椒盐)噪声在空域上特征近似小目标,运动的干扰在空域上的特征也类似小目标,特别是小面积干扰,极易造成误判。另外在空域处理中,干扰一般假设其统计特性符合某种模型,先进行预白化,最后把它作为噪声一起处理,这跟实际有点差异,因为对于干扰通常很难建立成功的模型。在时域中处理就可以充分利用干扰和小目标运动特征的区别,无需建模。本算法同时也免去了空域处理一般要进行的预处理,例如随机噪声的去除,可能还要二值化等,依据信息论的数据处理原理,这些都有可能丧失原图像的信息。经过研究大量红外图像序列及有关文献,提出这个模型:假定有一致的含有 $N$ 帧图像的序列,序列中的每一个像素都属于下面几种可能情况的某一种,或它们的叠加:运动目标像素、背景噪声像素、移动或正展开的干扰像素<sup>[4]</sup>、在场景中仅仅表现其他特征的相对静止的像素,符合客观实际。其次,利用目标运动轨迹的连续性,要求在成像平面上目标必须有几帧之间的相对运动,所以这个方法不适用于目标完全按成像设备的视线运动的情况。

## 2 时域背景预测原理

时域背景预测原理简单定义为:图像序列中的任何一个像素点,如果它是属于时域背景中的点,那它一定可以用前几帧图像中对应位置的背景点来预测,即它跟这些点是同一背景辐射产生的,而背景辐射在某段时间内是稳定的。即使是碰到体现缓慢运动特性的干扰像素,由前几帧中对应的同一位置上的像素值得到的预测值和当前帧该位置上的像素值因为干扰漂移而实质上是不能比较的,但因同一帧

图像中像素与周围像素有较大相关性(因此对图像配准要求也不高),在时域中预测误差不大,而且一般在连续的较短几帧图像中,这些干扰并不会体现出它的运动性。甚者碰到极端情况,要预测的位置上的干扰像素漂移后,填补这个位置的像素刚好和干扰像素截然不同,下面的讨论得出它在时间维上的特征还是与小目标有明显区别的。实际上,任何一点灰度的时域背景预测值都是用它前几帧图像中对应位置的点的灰度值经过线性或非线性组合产生的,将所有点的预测残差代表对比度,只要在预测残差图像上进行特征检测就可以了。目标出现后可能在某帧中被掩盖了,但在后面序列中还会出现目标特征的时域波形,因此还是能检测的。

## 3 时域背景预测算法

通常物体的辐射短时间内变化很小,但也可能会有波动。这里提出利用1维梯度倒数加权滤波器来得到时域预测图。这样可以使辐射值得以平滑,比简单地取平均值要好,预测值受椒盐噪声、多目标轨迹干扰、辐射偶尔突变、热象仪坏点影响较小。

梯度倒数加权定义为

$$d(k) = \begin{cases} \frac{1}{|f(k) - f(k-1)|} & f(k) \neq f(k-1) \\ \theta(\theta > 1) & f(k) = f(k-1) \end{cases} \quad (1)$$

定义一个归一化系数

$$h(k) = \frac{d(k)}{\sum d(k)} \quad (2)$$

预测值为

$$f_L(k) = \sum_{i=k-N}^{k-1} h(i)f(i) \quad (3)$$

普通背景像素的灰度值以及在场景中仅仅表现其他特征的相对静止的像素的灰度值它们在序列中(时域)基本不变,利用时域背景预测技术得到的残差图上像素的灰度值接近零。

本文将远处飞机或导弹等作为检测目标,认为红外目标为单极性,通常为亮的。小目标通过的那些像素在时域上会产生一个窄的正脉冲,所以由前几帧得到的残差图出现脉冲的上边沿时,保留当前预测值,以该值继续取得下面的残差图,直至出现脉冲的下边沿,然后更新预测值。因为采用了梯度倒数加权滤波,所以小目标像素值对下面的预测值计算干扰很小,这样不会漏检多目标。在图像序列中,

几个目标轨迹一致,只是间隔一定距离。这里要说明的是残差值阈值的选取,因为小目标的亮度统计上是稳定的,所以要根据预测值自适应选取。

背景(椒盐)噪声情况近似于小目标,可能会出现极小的负脉冲,以此特征排除部分噪声,剩余的随机噪声可用区别于小目标运动轨迹连续性的特征加以去除,因为随机噪声不太可能连续几帧在同一领域出现,这区别于小目标运动轨迹的连续性特征。

运动干扰的情况可分成两类,一类是干扰为均匀分布的那些像素,此种情况类似普通背景,可以一起处理。因为即使干扰有漂移,但被处理像素的灰度值与周围像素的灰度值很接近,所以残差图灰度值只是在零值上下波动。干扰中的大多像素属于这类,大大简化算法;另一类是与背景值有较大差异的干扰周边沿和小面积漂移干扰。当前帧要与预测值进行比较的像素是体现干扰漂移特征的像素,它们主要出现在干扰的边沿,如由云层亮边沿预测值对应云层漂移过后填补上的背景暗像素值,反之亦然。用出现脉冲上边沿时保留的预测值继续预测,得到的残差图会出现脉宽很宽的正的或负的脉冲。或许直到进入跟踪程序,波形还没出现脉冲下降边沿。这些像素利用脉宽的特征加以排除。其他虚警像素如小面积(快速)漂移干扰,其时域特征接近小目标,会出现较窄脉冲,但它分布区域肯定比小目标大得多,对于一个参照点,它整体移过这个参照点的速度相对小目标就慢很多,反映在时域波形上就是脉宽不一样。因此小目标出现在干扰内部或边沿,时域背景预测技术同样适用。

#### 4 轨迹时域连续性检测

小目标出现在红外图像序列中某一帧的某一位置,残差图序列中对应位置的像素及其前后几帧的像素时域波形表现如图 1 所示。

由图 1 可见,残差波形图中大部分的残差值在零值附近波动,而在对应出现小目标的位置叠加一尖脉冲。该位置空域中的某领域内所有位置对应的时域波形在后续残差图中如有不止一个尖脉冲,可能是噪声,所以还要在这些疑似目标位置领域继续检测,反复几次,形成静态平台的跟踪链,锁定目标,随即可进入动态平台跟踪程序。在实际检测时可进一步简化,连续在可疑目标处下几帧的 8 邻域内作检测(由目标运动速度决定),看是否另外仅有一个

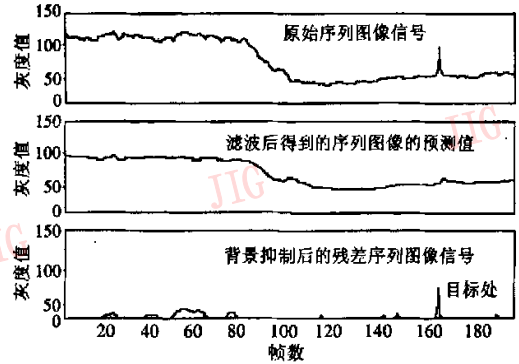


图 1 由云层边沿过渡到暗区的示意图

Fig. 1 Sketch map of transition from cloud edge to dark section

位置存在一个带有尖脉冲的时域波形(小目标轨迹一直在变),或者原来的尖脉冲宽度不超过 2~3 个像素(小目标轨迹暂未变)。有,即可判为小目标;没有,可判为随机噪声或干扰。检测到小目标时,若它的面积占据图像不止一个像素时(因光学扩散影响,可能占 1~3 个像素),移过预测位置时,可以看成是轨迹暂未变,一并处理,这时好像几个点目标连在一起运动,在程序中以此判断为一个目标。

总结一下,对红外图像序列中每个位置的对应像素进行时域背景预测,然后得到残差图序列,再对残差图序列进行时域波形判断,利用波形是否具有脉冲、脉冲的宽度、脉冲的极性以及后续邻近几个位置的波形是否具有近似的脉冲等,这些特征进行小目标检测。确定为小目标后,其周围某一范围不需再检测,实际小目标间不可能靠的很近,还可以利用小目标进入视场的可能性,在程序中安排检测范围的先后次序,减少计算量。

#### 5 目标检测实验结果与分析

图 2~图 10 列出了有代表性的 3 组连续的红外图像序列中一帧或几帧图像。VC 编程仿真都检测出来了。图 2 有两个在复杂地面背景下的小目标,如果不在时域中处理,干扰很大,在时域中检测很容易。图 4~图 9 是典型的云层干扰,从图 7 和图 9 中比较可以看到,间隔上百帧后,大面积云层并没体现它的漂移性,图中黑色区是潜在的会引起错误警报的富有挑战性的云层干扰像素,错误的警报是由运动的云层或空间上非常薄的云层边缘引起的,导致时域剖面和目标像素非常相似。这些少量



图2 两个小目标(复杂地面背景,320×240)  
Fig.2 Two targets(background of complex ground)



图5 图4的边界检测图(边界像素值标为200)  
Fig.5 Character borderline detecting chart of Fig.4

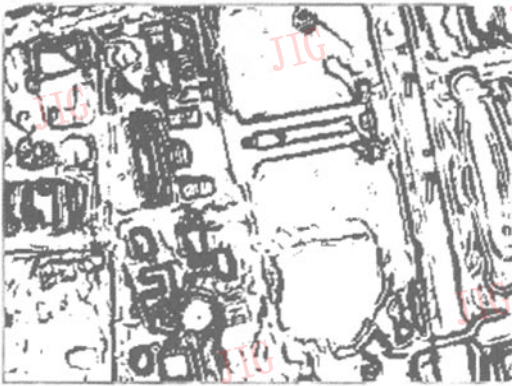


图3 图2的边界检测图(边界像素值标为0)  
Fig.3 Character borderline detecting chart of Fig.2

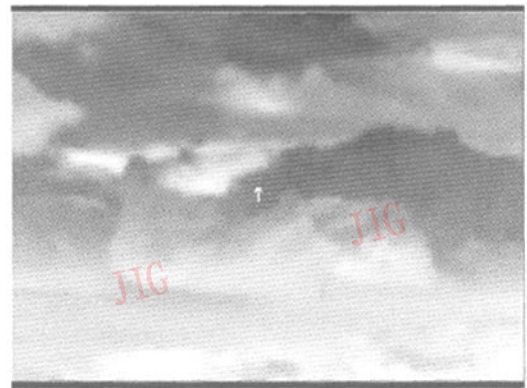


图6 一个小目标与图4是同一序列(第75帧)  
Fig.6 One target, in the same sequence with Fig.4

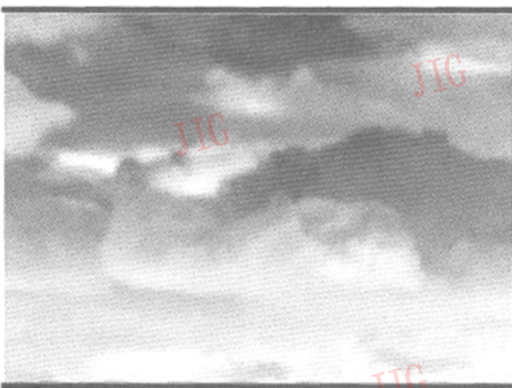


图4 典型云层干扰(第29帧,无小目标,320×240)  
Fig.4 Representative clutter of cloud

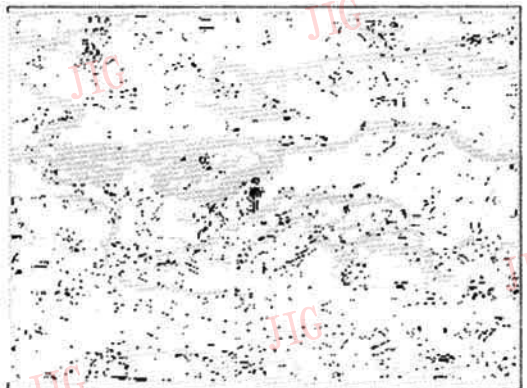


图7 图6的边界图(边界像素值标为0)和图5的叠加,其中黑色区域表示两边界图的差异  
Fig.7 The superposition of character borderline of Fig.6 and Fig.5, and the dark area means the diversity of two charts

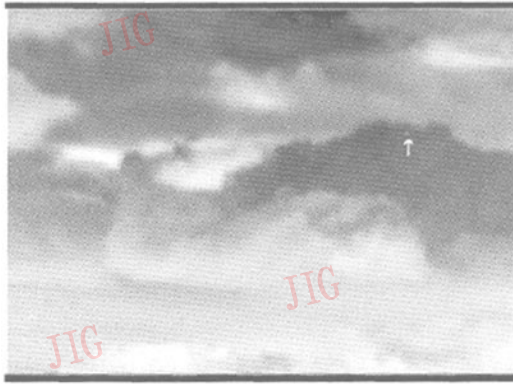


图 8 一个小目标与图 4 是同一序列(第 165 帧)  
Fig. 8 One target, in the same sequence with Fig. 4

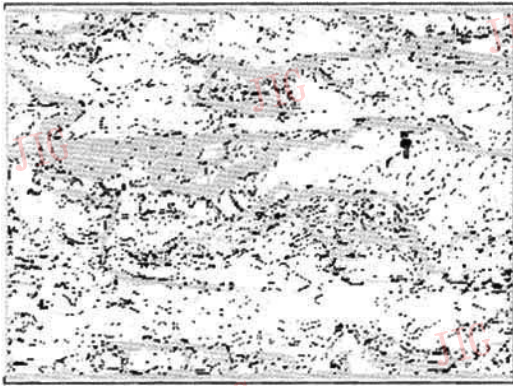


图 9 图 8 的边界图(边界像素值标为 0)和图 5 的叠加,  
其中黑色区域表示两边界图的差异  
Fig. 9 The superposition of character borderline of  
Fig. 8 and Fig. 5, and the dark area means  
the diversity of two charts

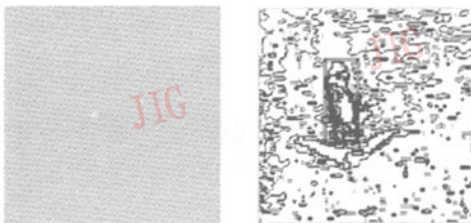


图 10 一个小目标,后一幅为跟踪过程波门图  
Fig. 10 One target, the next chart is the wave  
gate chart of tracking process

的情形可以用进一步的轨迹空间特性检测处理来优化,因为这些云层边缘的空间信号和空间点目标的信号不同,如它们与周围像素的连通性、形状、灰度

等。其实,仔细观察图 7 和图 9 中的黑色像素,利用时域波形是否具有脉冲、脉冲的宽度、脉冲的极性以及后续邻近几个位置的波形是否具有近似的脉冲等这些特征进行检测,其后真正形成虚警的像素很少。这里还要说明的是最终需要在高性能的(多)DSP 处理器运行算法,一般是 25fps,取前 8~12 帧计算预测值,检测过程费时是毫秒级的,所以只要红外焦平面平台在某个时间段不出现大的异常(如剧烈抖动),时域模型及算法就符合实际情况。图 10 很具有挑战性,因为如此多的扫描噪声很可能中间会出现接近小目标特征的噪声,但背景灰度变化不大,残差图中出现大幅度脉冲机会小,当然还可以在程序中加强运动的连续性检测条件,但会增加很多计算量。算法局限性在于图像序列要符合提出的模型:运动的小目标,缓变的干扰,随机的噪声。比如海面背景有时就不太合适,因为如果海面波浪背景起伏很快(起伏速率比舰船还快,但可能性比较小),就不属于缓变干扰,但是这只能说明本文具体算法步骤不适用,但在时域中考虑问题依旧是一种思维方法,可以考虑先找海岸线,再找小目标。

## 6 图像配准

对于红外警戒与跟踪系统来说,在捕获检测目标阶段,通常采取大视场的镜头等候在目标可能出现的区域,或者只有相对缓慢的运动,且运动参数已知,图像配准比较简单,而本文算法对其要求又不高,所以图像配准可以采用多子模板匹配法。开始阶段得到的残差图序列中可以找到例如普通背景像素区域或场景中仅仅表现其他特征的相对静止的像素区域,以此作为模板。假设模板是  $N \times N$  维的,而实时图是  $M \times M$  维的( $M > N$ )。首先,把基准图分成  $n$  个子模板,然后分别将每一个子模板与实时图进行相关比较,由于子模板的像素较少,所以当部分像素发生变化时,主要影响的是相对的子模板,而对其他子模板的影响较小,用这些子模板的匹配结果建立综合的匹配结果,据此可做出较好的配准。多子模板的算法如下:

$$M(x, y) = M_1(x_1, y_1) \cup M_2(x_2, y_2) \cup \dots \cup M_n(x_n, y_n)$$

式中,  $M_i(x_i, y_i)$  为各个子模板,  $n$  为子模板的个数。

由于采用综合处理方法类似表决系统,所以至少需要 3 个以上的子模板才能得到实际位置的修正信息。显然,如果各个子模板的匹配位置换算后基

本上是一致的,则整体匹配位置与初始时各子模板的相对位置相似。若有一个或几个基准子模板出现伪匹配点,则对应于这些伪点的位置能通过一定的判据分辨出来。因为它们组成的相对位置不合理,所以多子模板相关算法具有识别假相关计算峰值的能力。因为定位精度是随着相关面积的减小而几乎成比例下降的,当  $n$  个子模板与实时图进行相关时,使定位精度下降近  $n$  倍,但是基于  $n$  个子模板的匹配位置而估计出来的位置修正点又能使定位精度提高  $n$  倍。所以多子模板相关算法在不改变单模板大小的情况下,不仅可以大大减少几何失真的影响,而且具有单模板相关所获得的匹配定位精度。当系统平台静止时,可省略这一步,而当检测过程中出现大量的可疑目标时就要启动配准程序。

## 7 目标跟踪

假设前面已经检测到目标,同样利用小目标的运动特性,下一帧目标只可能出现在当前位置的某个较大领域内。再把该领域分割成几小块,每块利用递归最大滤波器<sup>[3]</sup>:

$$y(i_0, j_0, k) = g(i_0, j_0, k) + \alpha \times \max_{(i_1, j_1) \in N(i_0, j_0)} y(i_1, j_1, k-1)$$

函数值  $y(i_0, j_0, k)$  实际是目标能量的累加,若当前帧  $g(i_0, j_0, k)$  以前的图像数据对累加值的影响是等权的,随着  $k$  值的增加,  $y(i_0, j_0, k)$  将变得越来越大。这显然不符合实际的情况,于是引入遗忘因子  $\alpha$ 。目标能量累加后,取其最大值为目标区域,如此进行目标跟踪过程中的波门选择<sup>①</sup>,算法简单,效果好。当然会遇到目标被严重遮挡的情况,这时在目标最后出现的区域内重新启动检测程序。

## 8 结论

本文从背景出发,充分利用在图像序列中占绝大多数的背景像素来构造弱小目标的检测,提出了一种利用时域背景预测技术检测红外图像序列中运动小目标的算法,图像中还可能含有运动或展开的干扰。运用目标、干扰和背景噪声是基于单个像素的时域模型的不同特征而得出了不同的时域残差图波形,而后据此加以判断,达到检测小目标的目的,

避免了复杂的预处理等的大量运算。本文的创新点和重点在于提出在时域中利用背景预测算法检测小目标,由算法原理的提出并分析它的可行性和有效性,再到算法的具体实现。通过在实际包含随机目标的红外图像序列中的应用,证明了算法的有效性和优越性。未来工作中集中在空域-时域的联合处理以增强排除噪声和干扰像素的能力。

## 参考文献 (References)

- 1 Li Ji-cheng, Shen Zhen-kang, Lu Xin-ping. Weak and small target detection based on adaptive predictions of IR background clutter[J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(5): 478-481. [李吉成, 沈振康, 鲁新平. 基于背景杂波自适应预测的红外弱小目标检测[J]. *红外与激光工程*, 2004, 34(5): 478-481.]
- 2 Xu Jun, Xiang Jian-hua, Liang Chang-hong. Small target detection based on maximum background model in IR images[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2002, 31(12): 1483-1486. [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.]
- 3 Li Ji-cheng, Shen Zhen-kang. Small moving target detection in clutter infrared background[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1997, 26(6): 8-13. [李吉成, 沈振康. 红外起伏背景下运动点目标的检测方法[J]. *红外与激光工程*, 1997, 26(6): 8-13.]
- 4 Wang C D. Adaptive spatial/temporal/spectral filters for background clutter suppression and target detection[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21: 1033-1038.

① 关于目标跟踪过程如何充分利用空时域信息及算法具体实现,作者在另文介绍。