

低信噪比抖动红外点目标的检测*

熊辉 沈振康

(国防科技大学ATR重点实验室 长沙 410073)

摘要 本文为解决低信噪比条件下抖动红外点目标的检测问题,提出了一种基于膨胀累加、检测前跟踪的检测算法。该算法运用膨胀累加方法能够消除抖动对多帧累加算法的不利影响,使目标能量仍然能够实现有效的积累,从而达到目标增强的目的。本文还采用了小波变换预处理方法,对图象中相关的 $1/f$ 噪声进行白化。模拟实验结果表明,该算法能够快速检测出信噪比为2抖动点目标。

关键词 红外图象处理, 红外目标检测, 小波变换

分类号 O434.12, V448.133

Dithering Infrared Low SNR Target Detection Algorithm

Xiong Hui Zhen Kang Shen Wei An

(ATR LAB, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract In this paper it is presented to resolve the dithering infrared target detection problem under the condition of low SNR. Accumulation of multiframe is often adopted in low SNR infrared target detection, but for dithering low SNR target, this simple accumulation scheme maybe degrade greatly. In this paper, detection algorithm based on dilation before accumulation of multiframe and track before detection is proposed. The dilation operation enables the energy of the same target in different frames to accumulate effectively despite of the dithering of target, thus we can reach the aim of enhancing the target. The false alarm candidates are removed in the procedure of track before detection. A preprocessing algorithm using wavelet transform is also adopted to remove the correlation of $1/f$ noise. At the end of this paper, the whole algorithm is simulated with infrared image sequence. A high performance is obtained and the experimental result indicates that the algorithm can effectively detect the target with SNR= 2.

Key words infrared image processing, infrared target detection, wavelet transform, mathematical morphology

在红外寻的制导过程中,需要能够尽快地截获并锁定跟踪目标。在检测阶段,传感器与目标之间的距离很远,因此目标成像仅为点目标,并且淹没在各种噪声背景之中。多帧累加是实现高空背景中点目标检测的一种有效的方法,这种简单的累加方法对于帧间移动很小的目标十分有效。但在实际环境之中,由于姿态控制不稳而造成的目标抖动是一个不容忽视的因素。通常目标在帧间的抖动达到1~2个像素,因此简单的累加方法并不能够实现有效的能量积累,难于检测出低信噪比并处于不断抖动中的点目标。为解决高空背景条件下抖动点目标的检测问题,本文提出了一种基于膨胀累加、检测前跟踪的算法。膨胀累加是将图像作形态膨胀运算之后再行累加,这样仍然可以使同一点目标在不同帧上的能量累加到同一像素点上,起到突出目标的作用。检测前跟踪的方法利用目标候选点在连续帧上的信息剔除虚警假目标。

本文采用红外线阵扫描图像对该算法进行模拟。线阵图像主要有两种噪声:图像平面上的白噪声

* 国家863计划项目

第一作者:熊辉,男,1970年生,博士生

和线阵扫描方向上的非平稳 $1/f$ 噪声。我们采用小波变换的方法 $1/f$ 噪声进行白化预处理。实验表明, 本文提出的算法能够快速检测出信噪比为 2 的点目标, 取得了很好的实验效果。

本文简要介绍算法的特点, 叙述整个算法的流程和各功能模块, 给出了采用红外线阵扫描图像的模拟实验检测并对算法进行分析, 最后对该算法作出结论。

1 低信噪比抖动点目标的检测算法

整个算法包括七个前后级联的模块: 预处理、阈值分割、膨胀运算、帧累加、二次分割、检测点-航迹关联以及检测判决。算法的流程如下图 1 所示:

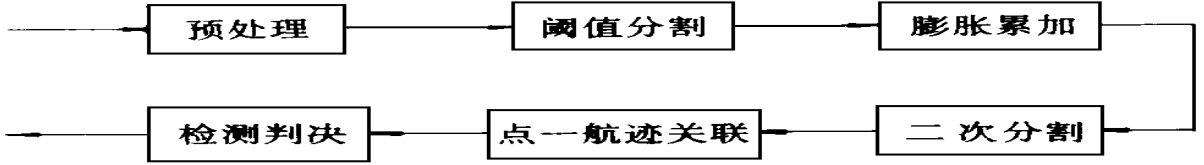


图 1 低信噪比抖动点目标检测算法流程

下面分别叙述各功能模块。

1.1 图像预处理

在高空背景条件下, 红外辐射主要来源于天体与人造物体, 红外图像为探测元对这些物体的辐射响应与传感器内部噪声叠加的输出结果。对于线阵扫描红外图像, 传感器内部噪声主要有不相关的白噪声和线阵扫描方向上相关的 $1/f$ 噪声。因此图像序列可用下面的模型来描述:

$$s(i, j, t) = h\delta(i - i_0, j - j_0, t) + n_f(i, j, t) + \bar{a}(i, j, t) \quad (1)$$

这里目标被看作位于点 (i_0, j_0) 处幅度为 h 的冲激函数。其中 $n_f(i, j, t)$ 为 $1/f$ 噪声, 它实际上是一个统计自相似的随机过程^[1]。我们知道小波变换方法能够刻画分形过程的精细结构, 对于非平稳过程的分析具有一定的优越性。因此本文采用这一方法对噪声进行白化处理。

小波变换将信号在一个由小波函数 $\psi(t)$ 的整数平移和二进尺度伸缩所构成的规范正交基上展开, 对于信号 $x(t)$, 它能够用小波正交基来表示, 同时还可由其小波变换系数来恢复:

$$x_n^m = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_n^m(t) dt \quad (2)$$

$$x(t) = \sum_m \sum_n x_n^m \psi_n^m(t) \quad (3)$$

其中 $\psi_n^m(t) = 2^{m/2} \psi(2^m t - n)$, $\{x_n^m\}$ 即为信号 $x(t)$ 在基 $\{\psi_n^m(t)\}$ 上的小波变换。

Gregory W. Wornell 导出了一种基于小波变换的 $1/f$ 噪声的表示方法^[1], 并证明了 $1/f$ 噪声的小波变换系数可近似地看作彼此互不相关, 通过各个尺度上方差的归一化, 就能够对 $1/f$ 噪声进行白化。

对于 $1/f$ 噪声, 其小波变换系数的方差具有如下形式^[1]:

$$\text{Var}[x_n^m] = \sigma^2 2^{-3m} \quad (4)$$

由于小波变换系数近似互不相关, 小波变换系数可以用下式表示:

$$x_n^m = [\sigma^2 2^{-3m/2}] v_n^m \quad (5)$$

其中序列 v_n^m 为零均值, 单位方差并且互不相关的随机变量, 它对应着一个平稳的白噪声过程 $v(t)$ 。如果我们用 $(\sigma^2 2^{-3m/2})^{-1}$ 对变换系数 x_n^m 尺度化, 那么就能够通过小波重构方程 (3) 得到一个白化的随机过程。

由于红外线阵扫描图像只在扫描方向存在 $1/f$ 噪声, 我们只考虑扫描方向的白化, 这样可以减少计算量。考虑到加性的白噪声, 线阵扫描序列的小波变换系数的方差为

$$\text{Var}(x_{i,j}^m) = \sigma^2 2^{-3m} + \sigma_{\bar{a}}^2 \quad (6)$$

其中 $\sigma_{\bar{a}}^2$ 为白噪声的方差, 经 $(\sigma^2 2^{-3m} + \sigma_{\bar{a}}^2)^{-1/2}$ 对小波变换系数 $x_{i,j}^m$ 尺度化后, 再用式 (3) 进行小波信号

重构, 就能够实现噪声的白化。预处理后的输出为零均值、单位方差的白噪声。

1. 2 图像阈值分割

在该算法中, 我们采用固定虚警概率的方法来实现。阈值化实际上是白噪声中的检测过程, 即要作如下判决:

$$\begin{aligned}
 H_1: & \quad x(i, j) = h + n(i, j) \\
 H_0: & \quad x(i, j) = n(i, j)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

其中 h 为目标的幅度。设阈值为 T_s , 若 $x(i, j) > T_s$, 则判为 H_1 , 保留该像素点; 否则将该像素点阈值化为零。给定虚警概率 P_F , 就可以计算出阈值分割后需保留的非零点数为 $P_F(M \times N)$ 个 (其中 $M \times N$ 为图像的尺寸), 通过直方图即可计算出图像分割的阈值 T_s , 得到阈值分割后的图像。

1. 3 膨胀累加平均

当目标在帧间移动很小时, 直接采用多帧图像累加的方法可以有效地抑制噪声, 提高信噪比。但是对于帧间抖动达 1~2 个像素的点目标, 直接累加并不能够实现目标能量的有效积累。在本文中, 我们首先对图像进行膨胀运算, 将目标由一个点膨胀成一个斑点, 从而使得不同帧上的目标能量仍然能够实现累加, 起到目标增强的作用。结构函数 $g(x)$ 对函数 $f(x)$ 的膨胀运算记为 $f \oplus g$, 它可以由下式计算:

$$(f \oplus g)(x) = \max_{y \in D(g)} \{f(x - y) + g(y)\}
 \tag{9}$$

上式中 $D(g)$ 表示结构函数 $g(x)$ 的定义域, 进一步可以得到二维膨胀运算:

$$(f \oplus g)(i, j) = \max_{(k, l) \in D(g)} \{f(i - k, j - l) + g(k, l)\}
 \tag{10}$$

在本文中, 我们选择平顶形的结构函数, 其尺寸大小根据目标在帧间抖动的大小来选取, 若目标帧间最大抖动 n_d 个像素, 则应取为 $[-n_d, n_d] \times [-n_d, n_d]$ 大小的平顶形窗口, 此时在某一点的膨胀运算结果为原图像中以该点为中心的 $[-n_d, n_d] \times [-n_d, n_d]$ 的窗口内的最大灰度值。

采用多帧累加平均可以起到目标增强的作用, 本文对膨胀处理后的图像进行累加。设每次累加的帧数为 N , 则累加平均后的图像可表示为:

$$a(i, j, t^a) = \frac{1}{N} \sum_{t=(N-1)t_a+1}^{Nt_a} f^d(i, j, t)
 \tag{11}$$

经 N 帧累加平均后, 目标点和噪声点的均值保持不变, 而均方差变为单帧时的 $1/\sqrt{N}$ 。若目标在抖动的同时又具有较高的运动速度, 则积累的帧数不宜过大。利用二次分割进一步筛选出一批最有可能的目标候选点。

1. 4 点- 航迹关联与检测判决

点- 航迹关联将每次帧累加输出的目标候选点连成多条航迹。关联采用最近邻关联的方法, 将目标候选点与已有的航迹进行关联, 以判别候选点是否为该航迹的后续观测。将第一次累加输出后的目标候选点视为一组, 假设当前已得到 N_c 组数据, 若某一目标 i 共检测到 $n_c(i)$ 次, 计算比值:

$$R_c(i) = \frac{n_c(i)}{N_c}
 \tag{12}$$

作为筛选目标候选点的参数, 若 $R_c(i) > T_H$, 则确认为目标; 若 $R_c(i) < T_L$, 则判为虚警目标, 予以删除; 若两者都不满足, 待进一步的观测确定。

2. 算法分析与模拟实验结果

该算法中, 门限的选取对于实验效果影响是相当大的。其中预处理后的阈值选取尤为重要, 下面我们将对这一问题进行详细的讨论。

令 $M_s = (2n_d + 1)^2$, 由于预处理后为零均值、单位方差的白噪声, 可知膨胀运算后图像中任一像素非零的概率为

$$P_0 = 1 - (1 - P_F)^{M_s}
 \tag{13}$$

为使分析的过程简化, 我们把阈值化后非零的像素点的灰度近似看作阈值 T_s , 则阈值化并经膨胀后噪声点的均值和方差分别为

$$m_n = P_0 T_s \quad (14)$$

$$\sigma_n^2 = (1 - P_0) m_n^2 + P_0 (T_s - m_n)^2 \quad (15)$$

膨胀运算后目标所在像素点的均值为

$$m_i = P_D T_s + (1 - P_D) m_n \quad (16)$$

式中 P_D 为单帧检测概率。(以上公式推导见文 [1])。为能够有效地剔除虚警点, 我们希望选择 P_F , 尽可能地增大目标点的均值和噪声点的均值之差

$$\Delta m = m_i - m_n \quad (17)$$

或 $\Delta m / \sigma_n$, 以提高目标点和噪声虚警点之间的区分度。图 2 和图 3 分别给出了噪声为零均值单位方差的高斯分布、 n_d 取 2、信噪比为 2 时, Δm 和 $\Delta m / \sigma_n$ 随虚警概率 P_F 的变化曲线。从中可以看出, Δm 的变化曲线呈单峰状。当虚警概率很小时, 此时的检测概率也很小, 随着虚警概率的增加, 检测概率也相应逐渐增大, 而当虚警概率超过某一数值时, 由于噪声点的均值 m_n 迅速增大, 导致 Δm 迅速减小。因此 Δm 的变化曲线呈单峰状。 $\Delta m / \sigma_n$ 随虚警概率 P_F 的变化曲线在 P_F 取值较大时较为平坦, 只是在 P_F 值很小时, 由于噪声点方差接近于零, 使 $\Delta m / \sigma_n$ 值较大。通过比较图 2 和图 3 的变化曲线, 我们可以看出, 以 Δm 的变化来作为选取 P_F 的依据较为合适。因为虽然可以选择很小的虚警概率 P_F 使得 $\Delta m / \sigma_n$ 较大, 但这样做必然会减小单帧检测概率; 由于还可以通过增加累加的帧数来减小噪声点的方差, 因此在实验中, 应根据 Δm 的变化曲线的峰值来选取单帧虚警概率 P_F 。

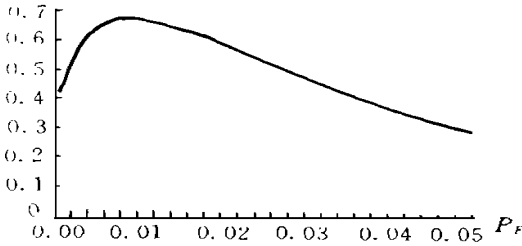


图 2 Δm 随虚警概率 P_F 的变化曲线

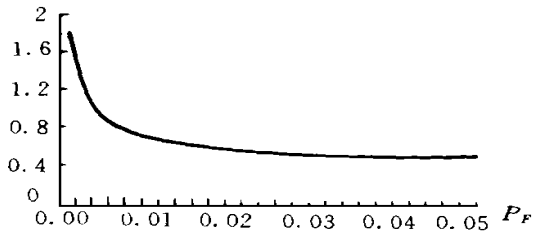


图 3 $\Delta m / \sigma_n$ 随虚警概率 P_F 的变化曲线

本文采用红外线阵扫描图像序列对该算法进行实验模拟。线阵扫描序列的背景主要为 $1/f$ 噪声和白噪声, 图 4 给出了一个序列中的一帧图像, 从图像中可以看到图像在列方向 (扫描方向) 具有很强的相关性。图像中有两个点目标和一个诱饵, 其中一个目标位于图像中心, 信噪比为 2, 另外一个目标位于图像中右偏下的位置, 信噪比为 3, 诱饵位于图像的下方。目标帧间的抖动为 1~2 个像素, 在实验中 n_d 取为 2, P_F 根据 Δm 随虚警概率的变化曲线取为 0.01, 累加的帧数取为 5 帧。图 5~11 给出了各功能模块的处理结果, 从中可以看出该算法能够准确的检测出目标。由于该算法采用对白化后的图像进行膨胀累加平均, 因此该方法具有广泛的适用性。对其它线阵扫描序列的模拟实验结果也正好说明了这一点。在该算法中由于只考虑利用灰度信息进行目标的检测, 因而在检测结果中仍然包含有诱饵, 它需要在后续的跟踪和识别算法中予以剔除。

3. 结论

本文提出了一种膨胀累加、边检测边跟踪的算法, 并采用小波变换的方法对图像进行预处理, 用红外图像序列对该算法进行了模拟实验。该算法能够快速地检测出帧间抖动 1~2 个像素信噪比为 2 的点目标, 取得了很好的实验效果。实验证明, 膨胀累加方法十分适用于解决抖动和高速运动的点目标的检测问题, 能够克服目标的帧间移动对多帧累加效果的不利影响。但是膨胀累加方法也有一些不足的方面, 当膨胀运算的结构函数选取较大的尺寸时, 需要选取较小的单帧虚警概率以利于虚警点的剔

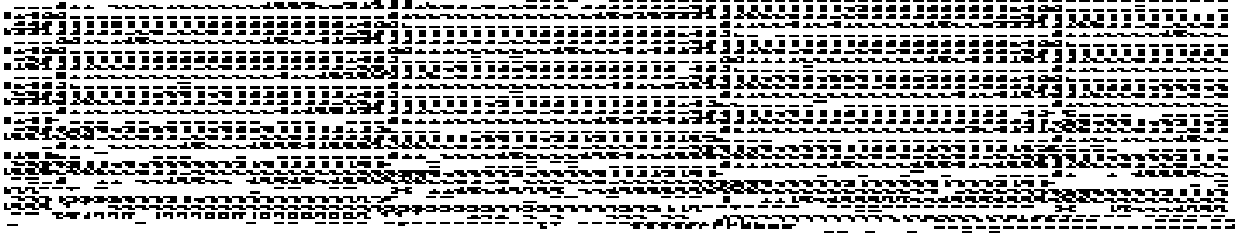


图4 红外线阵扫描图像

图5 经预处理后的图像



图6 膨胀累加平均结果

图7 二次阈值分割的结果

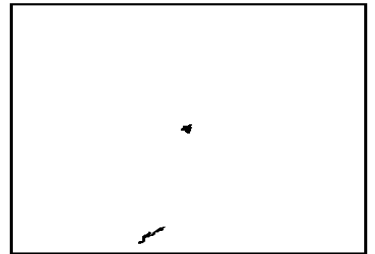
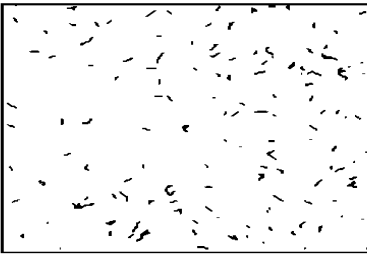


图8 目标候选点的航迹

图9 第80帧的检测判决结果(目标航迹)

除, 这样做必然会是以减小单帧检测概率为代价的。

附录1 膨胀运算后噪声点和目标点均值和方差的推导

我们知道, 虚警概率和分割阈值之间有如下关系:

$$P_F = \int_{T_s}^{\infty} p(x|H_0) dx$$

其中 $p(x|H_0)$ 为 H_0 假设条件下的概率密度函数。由于预处理后为噪声为不相关的零均值、单位方差白噪声, 故任一噪声点阈值化为零的概率为 $1 - P_F$ 。由式 (10) 可知, 经膨胀运算后图像中任一像素非零的概率为

$$P_0 = 1 - (1 - P_F)^{M_s}$$

为使分析的过程简化, 我们把阈值化后非零的像素点的灰度近似看作阈值 T_s , 由概率乘法公式可以得到膨胀后噪声的概率密度函数为

$$p_n(x) = P_0\delta(x) + (1 - P_0)\delta(x - T_s)$$

则阈值化并经膨胀后, 噪声点的均值和方差分别为

$$m_n = P_0T_s$$

$$\sigma_n^2 = (1 - P_0)m_n^2 + P_0(T_s - m_n)^2$$

目标在阈值分割中可能被检测出来, 也有可能漏检。同样运用乘法公式, 得到目标点的概率密度函数为

$$p_i(x) = P_D T_s + (1 - P_D)p_n(x)$$

则可以推出膨胀运算后目标所在像素点的均值为

$$m_t = P_D T_s + (1 - P_D)m_n$$

式中 $P_D = \int_{T_s}^{+\infty} p(x|H_1) dx$, 为单帧检测概率。

参考文献

- 1 Wornell G. W. Wavelet-Based Representations for the 1/f family of fractal processes. *Proc. of IEEE*, 81, (10): 1428-1450
- 2 Rivest J. F., Fortin R. Detection of dim target in infrared imagery by morphological image processing. *Optical Engineering*, 1996, (1) 1886
- 3 崔锦泰. 小波分析导论. 程正兴译. 西安交通大学出版社, 1995
- 4 梁之舜等. 概率论与数理统计. 北京: 高等教育出版社, 1980