

基于自适应 Wiener 滤波的红外小目标检测方法*

聂洪山¹, 沈振康²

(1.国防科技大学电子科学与工程学院, ASIC 研发中心; 2.国防科技大学电子科学与工程学院, ATR 实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 在分析红外场景模型的基础上提出了用自适应 Wiener 滤波器估计起伏背景、自适应门限分割、基于邻域管道目标检测的小目标检测方法。采用连续采集的红外图像序列进行了实验, 仿真了不同信噪比 (SNR) 条件下的目标并给出了目标检测结果及其分析。结果表明, 算法能够从信噪比大于 2.0 的图像序列中检测出目标轨迹。

关键词: 自适应 Wiener 滤波, 红外图像序列, 小目标, 管道

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2004)06-0054-04

引言

由于在成像时大气辐射对红外传感器的影响, 红外图像中包含有严重的起伏背景; 同时由于要求作用距离远, 目标在图像平面上的投影只占几个或者十几个像素; 而且强度较弱、信噪比很低, 这些都给小目标检测带来了很大的难度。近几十年来小目标的检测问题一直是红外图像领域的研究热点^[1~9]。

本文提出了一种利用 Wiener 滤波器自适应估计图像起伏背景的方法, 然后在背景抑制的基础上实现了目标的有效检测。

1 红外图像场景模型

一幅包含小目标的红外图像 $f(n_1, n_2)$ 可以用下式描述^[9]:

$$f(n_1, n_2) = f_B(n_1, n_2) + f_T(n_1, n_2) + n(n_1, n_2) \quad (1)$$

其中: $f_T(n_1, n_2)$ 表示目标; $f_B(n_1, n_2)$ 表示背景图像; $n(n_1, n_2)$ 表示随机噪声。这里, 我们定义了图像的信噪比 SNR:

$$\text{SNR} = f_{\text{mean}} / \sigma \quad (2)$$

式中: f_{mean} 为信号的平均灰度值; σ 局部窗口内背景灰度标准差。

2 自适应 Wiener 滤波背景估计^[10~12]

对于红外图像中的小目标, 其本身的面积很小, 通常只有几个或者十几个像素, 与大面积的背景有着本质区别; 而且由于目标出现的位置也是随机的, 又它与背景之间没有相关性, 目标在图像中更像是加在背景上的噪声, 所以这里我们有充分的理由将其暂时归为噪声一类。于是(1)式可以重写为:

$$f(n_1, n_2) = f_B(n_1, n_2) + v(n_1, n_2) \quad (3)$$

其中: $v(n_1, n_2)$ 为包括目标在内的随机噪声。

2.1 Wiener 滤波

如果我们假定 $f_B(n_1, n_2)$ 和 $v(n_1, n_2)$ 是两个静态零均值随机过程的采样值, 二者线性相互独立, 并且它们的功率谱 $P_{f_B}(\omega_1, \omega_2)$ 和 $P_v(\omega_1, \omega_2)$ 是已知的, $f_B(n_1, n_2)$ 的最优线性最小均方误差估计可以由对 $f(n_1, n_2)$ 进行 Wiener 滤波得到, 这个 Wiener 滤波的频率响应由下式给出:

$$H(\omega_1, \omega_2) = \frac{P_{f_B}(\omega_1, \omega_2)}{P_{f_B}(\omega_1, \omega_2) + P_v(\omega_1, \omega_2)} \quad (4)$$

如果我们进一步假定 $f_B(n_1, n_2)$ 和 $v(n_1, n_2)$ 是高斯随机过程的采样值, 那么(4)式中的 Wiener 滤波器是所有线性和非线性估计器中最优的最小均方误差估计器。

* 收稿日期: 2004-02-03

公式(4)中的 Wiener 滤波器是在假定 $f_B(n_1, n_2)$ 和 $v(n_1, n_2)$ 为零均值过程的采样值的情况下得到的。如果 $f_B(n_1, n_2)$ 的均值为 m_{f_B} 、 $v(n_1, n_2)$ 的均值为 m_v ，那么必须首先从输入图像中减去 m_{f_B} 和 m_v 。然后将其结果信号 $f(n_1, n_2) - (m_{f_B} + m_v)$ 用 Wiener 滤波器滤波。接下来再将背景均值 m_{f_B} 加到滤波结果信号上。如图 1 所示，图 1 描述了怎样处理非零均值的背景和噪声，对于高斯随机过程 $f_B(n_1, n_2)$ 和 $v(n_1, n_2)$ 使 $f_B(n_1, n_2)$ 和 $\hat{f}_B(n_1, n_2)$ 均方误差最小。同时也保证了 $\hat{f}_B(n_1, n_2)$ 是 $f_B(n_1, n_2)$ 的无偏估计。

2.2 自适应 Wiener 滤波

如图 1 所示，Wiener 滤波器需要有关背景均值 m_{f_B} 、噪声均值 m_v 、背景功率谱 $P_{f_B}(\omega_1, \omega_2)$ 以及噪声功率谱

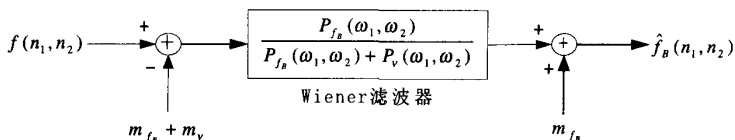


图 1 用于线性最小均方误差估计的非因果 Wiener 滤波器
Fig.1 Noncausal Winer filter for linear minimum mean square error estimation

$P_v(\omega_1, \omega_2)$ 的信息。由于 m_{f_B} 、 m_v 、 $P_{f_B}(\omega_1, \omega_2)$ 、 $P_v(\omega_1, \omega_2)$ 在图像中的不同区域是变化的，所以需要在局部区域对这些量进行估计。这样就得到一个空变的 Wiener 滤波器，如图 2 所示。

假定加性噪声 $v(n_1, n_2)$ 是零均值 ($m_v = 0$) 的白噪声，方差为 σ_v^2 。那么它的功率谱 $P_v(\omega_1, \omega_2)$ 如下：

$$P_v(\omega_1, \omega_2) = \sigma_v^2 \quad (5)$$

考虑一个很小的局部区域，假设其中的背景 $f_B(n_1, n_2)$ 是平稳的。则在这个局部区域内，(4)式可以重写为：

$$H(\omega_1, \omega_2) = \frac{P_{f_B}(\omega_1, \omega_2)}{P_{f_B}(\omega_1, \omega_2) + P_v(\omega_1, \omega_2)} = \frac{\sigma_{f_B}^2}{\sigma_{f_B}^2 + \sigma_v^2} \quad (6)$$

其中： $\sigma_{f_B}^2$ 为局部背景方差。进一步，(6)式可以重写为：

$$H(\omega_1, \omega_2) = (\sigma_f^2 - \sigma_v^2) / \sigma_f^2 \quad (7)$$

其中： σ_f^2 为输入图像局部方差。

经过推导，可以得到图 2 所示的 Wiener 滤波器的输出为：

$$\hat{f}_B(n_1, n_2) = m_f + \frac{\sigma_f^2 - \sigma_v^2}{\sigma_f^2} (f(n_1, n_2) - m_f) \quad (8)$$

其中： m_f 为输入图像局部均值。计算时 m_f 、 σ_f^2 、 σ_v^2 均由图像局部区域估计得到。

2.3 背景去除

由于 Wiener 滤波器具有低通特性，因此，它能保留具有低频特性的起伏背景 $f_B(n_1, n_2)$ 和抑制高频噪声 $n(n_1, n_2)$ 以及抑制具有高频特性的目标 $f_T(n_1, n_2)$ 。如果将输入图像 $f(n_1, n_2)$ 与输出图像 $\hat{f}_B(n_1, n_2)$ 进行相减，则可得到：

$$\Delta f(n_1, n_2) = f(n_1, n_2) - \hat{f}_B(n_1, n_2) = v(n_1, n_2) + n'(n_1, n_2) = f_T(n_1, n_2) + n''(n_1, n_2) \quad (9)$$

其中： $n'(n_1, n_2)$ 是由背景对消残差 $\Delta f_B(n_1, n_2) = f_B(n_1, n_2) - \hat{f}_B(n_1, n_2)$ 带来的噪声， $n''(n_1, n_2) = n(n_1, n_2) + n'(n_1, n_2)$ 。

一般地说, $n'(n_1, n_2)$ 亦是一白噪声, 所以 $n''(n_1, n_2)$ 也可以认为是白噪声。因此, 背景对消后图像 $\Delta f(n_1, n_2)$ 为一含目标 $f_T(n_1, n_2)$ 和噪声 $n''(n_1, n_2)$ 的图像。

3 目标检测

通过上述分析, 我们已获得了背景对消后的图像 $\Delta f(n_1, n_2)$, 遗下的问题是如何基于 $\Delta f(n_1, n_2, k)$ 序列将目标 $f_T(n_1, n_2)$ 从噪声 $n''(n_1, n_2, k)$ 中检测出来。为此, 我们定义门限分割后的图像为^[8]:

$$g(n_1, n_2, k) = \begin{cases} 1 & \Delta f(n_1, n_2, k) \geq \text{th}(k) \\ 0 & \Delta f(n_1, n_2, k) < \text{th}(k) \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\text{th}(k)$ 为阈值亦即门限。为了自适应的目的, 按统计方法令门限为:

$$\text{th}(k) = m(k) + \alpha \cdot \text{var}(k) \quad (11)$$

其中: $m(k)$ 为图像序列中第 k 帧的均值, $\text{var}(k)$ 为其方差, α 为加权系数, 这里取 2~4。

经过门限后, 图像 $g(n_1, n_2, k)$ 中除了目标之外, 还含有少量的噪声点。

进一步根据目标运动的连续性和规则性, 和噪声的随机性, 利用相邻帧中可能目标点之间的位置关系来进行目标判别, 简言之, 就是根据当前帧中的可能目标点, 如果在接下来的 $n-1$ 帧中某点的邻域中出现可疑目标点 $k-1$ 次以上 (含 $k-1$ 次), 亦即相邻 n 帧图像中某一小窗口内 k 次出现潜在目标, 则判定该点为目标点。具体算法如下:

- 1) 初始化参数, 初始化邻域管道;
- 2) 读取图像, 当进入管道的帧数满 n 帧后, 判别器开始工作;
- 3) 判别器得到待判别帧中的可疑目标点位置 $p(i, 1)$, 其中 $i=1, \dots, \text{Num}$, Num 为该帧图像中潜在目标点的个数;
- 4) 对每一个可疑目标点 $p(i, 1)$, 到第 2 帧中该点的一个邻域内观察是否有潜在目标点存在;
- 5) 如果有, 则对应该点的计数器 $\text{counter}(i)$ 加 1, 并记录第 2 帧中潜在目标点的位置为 $p(i, 2)$, 并以 $p(i, 2)$ 为当前位置, 到第 3 帧中进行搜索;
- 6) 如果没有, 则对应该点的计数器 $\text{counter}(i)$ 加 0, 将 $p(i, 1)$ 的值赋给 $p(i, 2)$, 并以 $p(i, 2)$ 为当前位置, 到第 3 帧中进行搜索;
- 7) 依次处理完 n 帧数据后, 如果计数器 $\text{counter}(i)$ 结果大于等于 k , 则判定 $p(i, 1)$ 为目标点, 否则判定 $p(i, 1)$ 不是目标点。
- 8) 丢弃管道中的第 1 帧图像, 后续图像向前移位, 读取下一帧图像放在管道的尾部, 将 $p(i, m)$, $i=1, \dots, \text{Num}$, $m=1, \dots, n$ 清空, 同时将 Num 置零, 转到步骤 3。

4 实验结果

试验用的图像都是实际连续采集的红外图像序列。图像大小为 90×120 。按幅度信噪比定义仿真了不同信噪比的运动目标序列, 仿真的目标信号为: 目标大小 2×2 ; 目标速度 $V_x = 0.3 \text{ pixel/frame}$, $V_y = 0.8 \text{ pixel/frame}$; $\text{SNR} = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3$, 每种信噪比下的图像均为 50 帧。

采用本文介绍的方法对图像序列进行处理后的结果如图 3、图 4 所示。图 4 是在不同信噪比条件下的检测结果。

由试验结果得出如下结论:

- 1) 背景抑制后, 图像信噪比得到较大提高;
- 2) 经过门限后, 只剩下少量可以目标点;
- 3) 本算法具有多目标检测能力;

4) 本算法对信噪比大于等于 2.0 的图像序列都能够很好的进行目标检测;对于信噪比为 1.5 的图像序列,本算法能够检测出目标轨迹,但是产生很多虚警目标;对于信噪比为 1.0 的图像序列,本算法将不能检测出目标;

5) 本算法运算量较小、便于硬件实现。

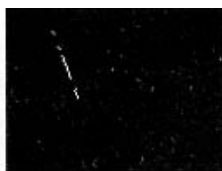


图3 检测到的目标轨迹
SNR=3.0

Fig.3 The target trajectory
with SNR=3.0



(a)SNR=2.5



(b)SNR=2.0



(c)SNR=1.5



(d)SNR=1.0

图4 不同信噪比下的检测结果

Fig.4 Detection results under different SNR levels

5 结论

本文在分析红外图像场景模型基础上,提出了一种采用自适应 Wiener 滤波器抑制背景的红外小目标检测方法,并给出了实验结果。实验结果表明,该方法能够从信噪比大于等于 2.0 的图像序列中检测出目标,同时,该算法具有运算量较小、便于硬件实现的特点。

参考文献

- [1] Alexander Tartakovsky and Rudolf Blazek. Effective Adaptive Spatial-Temporal Technique for Clutter Rejection inIRST. SPIE Proceedings[J]. *Signal and Data Processing of Small Targets*, 2000(4048): 1~11.
- [2] Yair Barniv and Offer Kella. Dyanmic Programming Solution for Detection Dim Moving Targets PART II: Analysis[J]. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1987, 23(6): 776~788.
- [3] I. Reed, R. Gagliardi and L. Stotts. Optical Moving Target Detection With 3-D Matched Filtering[J]. *IEEE Trans. Aerosp. Syst.*, 1988, 24(4): 327~335.
- [4] I. Reed, R. Gagliardi and H. Shao. Application of Three-Dimensional Filtering to Moving Target Detection[J]. *IEEE Trans. Aerosp. Syst.*, 1983, 19(6): 898~905.
- [5] I. Reed, R. Gagliardi and L. Stotts: A Recrusive Moving-Target-Indication Algorithm for Optical Image Sequences[J]. *IEEE Trans. Aerosp. Syst.*, 1990, 26(3): 434~440.
- [6] I. Reed and X. Yu: Adaptive Multi-Band CFAR Detection of an Optical Pattern with Unknow Spectral Distribution[J]. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, 1990, 38(10): 1760~1770.
- [7] Yair Barniv: Dyanmic Programming Solution for Detection Dim Moving Targets[J]. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1985, 21(1): 144~156.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 章毓晋编著. 图象工程(上册)——图象处理和分析[M]. 清华大学出版社, 1999.
- [11] 刘福声, 罗鹏飞. 统计信号处理[M]. 国防科技大学出版社, 1999.
- [12] 赵树杰, 等. 统计信号处理——检测理论 估计和滤波理论及其应用[M]. 西北电讯工程学院出版社, 1986.

作者简介: 聂洪山(1975—), 男, 籍贯黑龙江双城, 博士, 国防科技大学电子科学与工程学院讲师, 主要从事图像处理、目标检测、目标识别、目标跟踪、GPS/GIS 以及 EDA 和 ASIC 芯片设计等方面的研究工作。

(下转第 61 页)

A Method of Image De-noising Based KPCA

LU Bo, BI Du-yan, TAN Jun

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an Shanxi 710038, China)

Abstract: This paper introduces the method of image de-noising based on KPCA by illustration the basic theory of feature extraction through kernel principal component analysis, then successfully dealing with a noised trial image by the choice of Gaussian RBF kernel function.

Key Words: feature extraction, kernel function, KPCA, de-noising

(上接第53页)

- [7] Ilya Pollak, Alan S.Willsky, Hamid Krim. Image Segmentation and Edge Enhancement with Stabilized Inverse Diffusion Equations[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, Feb., 2000, Vol.9, No.2 256~266.
- [8] Guy Gilboa, Yehoshua Y.Zeevi, Nir A.Sochen. Complex Diffusion Process for Image Filtering [R]. Scale-Space'01, LNCS 2106, Springer-Verlay, 2001: 299~307.
- [9] Yu-Li You, M. Kaveh, Fourth-Order Partial Differential Equations for Noise Removal[J]. *IEEE Trans. On Image Processing*, Oct., 2000, Vol. 9(10): 1723~1730.

作者简介:

谢美华:女,1976年8月生,分别于1998年和2001年获国防科技大学应用数学学士和硕士学位,现为国防科技大学信息系统与管理学院系统工程专业博士生,主要研究方向为图像数据处理、试验数据处理。

Nonlinear Diffusion Model Based on Four Directional Derivatives for Image Denoising

XIE Mei-hua

(Institute of system engineering, National University of defense technology, Hunan Changsha 410073,China)

Abstract: Have analyzed the discrete solution of the nonlinear diffusion model for image denoising, and put forward a new model based on four directional derivatives aimed to solve the problem of gradient-obtaining in the old model, the new model adapts the two-order diffusion tensor in the old model to a four-order diffusion tensor, and decides the power of the eight pixels in the neighborhood based on the direction of the edge, which is propitious to preserve the edges and to direct them. Numerical results show that the new model has higher peak signal to noise ratio than the known model.

Keywords: nonlinear diffusion, directional derivatives, image denoising

(上接第57页)

An Algorithm Based on Wiener Filter for Small Targets Detection in IR Image Sequences

NIE Hong-shan¹, SHEN Zhen-kang²

(1.ASIC R&D Center, 2.ATR Lab., School of E&E, NUDT, Changsha 410073,China)

Abstract: In this paper, IR scene model is first introduced, then an algorithm based on the clutter background suppression with adaptive Wiener filter is put foreword, and the small targets are detected with adaptive thresholding and neighborhood-pipeline detection method. Experiments are done with long-range IR image sequences. The results show that this algorithm can detect small targets within IR image sequence with SNR higher than 2.0.

Keywords: adaptive Wiener filter, IR image sequence, small targets, pipeline