

一种基于空间滤波的红外小目标检测算法及其应用

罗军辉, 姬红兵, 刘 靳

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要:针对红外探测系统中单帧红外图像中的小目标检测问题,在分析红外场景模型的基础上,提出了一种基于自适应噪声平滑和空间滤波的背景杂波抑制算法.该方法对于起伏背景下红外小目标的检测有良好的性能,且具有目标信息损失小的优点.同时,利用 ADSP-TS201S 高性能数字信号处理器实现了该算法,并成功应用到某全向红外搜索跟踪系统中.实验结果表明,在低信噪比情况下,算法有很好的检测性能.

关键词:小目标检测;空间滤波;ADSP-TS201S 处理器;全向红外搜索跟踪系统

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

ALGORITHM OF IR SMALL TARGETS DETECTION BASED ON SPATIAL FILTER AND ITS APPLICATION

LUO Jun-Hui, JI Hong-Bing, LIU Jin

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: For small targets detection in single frame infrared image, a background clutter suppression algorithm based on an adaptive smooth filter and spatial filter was used to analyse the IR scene model. The method has good performance to detect the small targets in the undulant background and has the merit with no target information loss. At the same time, the algorithm is realized by the digital processor ADSP-TS201S with high performance and successfully applied in an all directional IRST system. The experiment shows that this method has high detection performance for the small target in single frame at low SNR.

Key words: small target detection; spatial filter; ADSP-TS201S processor; all-direction IRST system

引言

单帧红外图像小目标检测一直是红外目标检测领域的研究热点与难点.由于目标距离远,成像受大气辐射的影响,图像中包含有强的起伏背景和杂波干扰.且目标本身无形状、纹理信息可以利用,不能通过多帧图像积累目标信息,因此,传统基于图像灰度和强度信息的检测方法无法得到良好的检测效果.

已有红外小目标检测算法,主要集中在如何提高小目标的检测概率,概括起来可以分为时域处理与空域滤波两类.对于时域处理算法,主要有图像熵差法^[1],基于面模型的匹配滤波法^[2]和基于序列图像检测法^[3]等.时域处理算法基于不同时间采集的多帧图像,图像序列必须配准,不适用于单帧图像目

标检测.对于空域滤波算法,主要利用小目标亮度高于其邻域背景,且与背景不相关的特性,直接在空域对图像进行处理.空域滤波算法主要有基于形态滤波的小目标检测算法^[4], Butterworth 高通滤波法^[5], K-L 变换法与小波变换法^[6].高通滤波和形态学运算在目标检测中有较强的实用性,但对低信噪比图像的小目标检测性能有限.小波变换是一种优秀的目标检测算法,但该方法运算比较复杂,实时性差,不易用硬件系统实现.

本文结合研制的全向红外搜索跟踪系统,提出了一种基于自适应噪声平滑和 Robinson Guard 背景杂波抑制的空域滤波算法.算法首先对红外图像进行空间预滤波,降低噪声和随机干扰,再使用 $m \times n$ 矩形滤波算子抑制起伏背景,提高小目标的检测信噪比.为了降低待检测目标的信息损失,并在滤波算

收稿日期:2006-08-07, 修回日期:2006-12-25

基金项目:国防预研基金项目(J14105020077)

作者简介:罗军辉(1976-),男,重庆人,博士生,主要从事红外目标检测与系统实现等方面的研究.

Received date: 2006-08-07, revised date: 2006-12-25

子中增设了保护带. 最后, 基于 ADSP-TS201S 高性能数字信号处理器, 实现了该检测算法, 并成功应用到某全向红外搜索跟踪系统中. 实验表明, 本文的单帧红外小目标检测算法有很好的检测性能, 适用于低信噪比情况下的小目标检测.

1 红外背景特性与预滤波

红外图像 $f(i, j)$ 可表示为

$$f(i, j) = T(i, j) + B(i, j) + N(i, j) \quad (1)$$

其中, $T(i, j)$ 表示目标, $B(i, j)$ 表示背景图像, $N(i, j)$ 表示随机噪声. 目标点灰度 $T(i, j)$ 与周围背景相比具有不连续性, 而图像 $B(i, j)$ 具有空间相关性, 通常处于红外场景图像 $f(i, j)$ 的低频部分. 当然, 由于场景和传感器热噪声分布的不均匀性, $B(i, j)$ 中也可能包含部分高频分量, 主要分布在背景图像各个同质区的边缘. 随机噪声 $N(i, j)$ 主要是探测器的内部噪声和外部随机噪声, 与背景不相关.

由于 $N(i, j)$ 的存在, 会降低空域滤波算法的性能. 因此, 图像处理前需要进行降噪处理, 通常采用低通滤波法. 但该方法易造成背景中物体边缘的模糊, 且会损失部分目标信息. 本文采用基于自适应平滑滤波的预处理方法, 该方法在平滑物体内部灰度值的同时, 也能很好的保留强边缘的灰度值, 使其不被模糊化.

红外图像 $f(i, j)$, 自适应平滑滤波如式(2)所示

$$f_L(i, j) = \sum_{m, n=-p}^p \omega_{i, j}(m, n) f(i+m, j+n) \quad (2)$$

其中, p 确定滤波区域, 滤波窗口为 $(2p+1) \times (2p+1)$. $\omega_{i, j}(m, n)$ 为加权系数. 权系数的取值由关于像素灰度值与窗口中心像素灰度值绝对差的某个函数决定, 即

$$\omega_{i, j}(m, n) = \phi(|f(i, j) - f(i+m, j+n)|) \quad (3)$$

若 $f(i, j)$ 为物体内部或弱边缘, 与邻域点的灰度值相差不大, 这时主要使用邻域点对其平滑, 此时选取的权值 $\omega_{i, j}(m, n)$ 要大. 若 $f(i, j)$ 处于物体的强边缘, 其邻域点灰度值与之差异显著, 此时则需要保留 $f(i, j)$. 为此, 权值函数 ϕ 可以选择为单调递减函数, 这里选用高斯函数, 有

$$\omega_{i, j}(m, n) = \exp\left\{-\frac{|f(i, j) - f(i+m, j+n)|^2}{\sigma^2}\right\} \quad (4)$$

其中, σ 用于调节指数衰减速度.

2 Robinson Guard 空间滤波方法

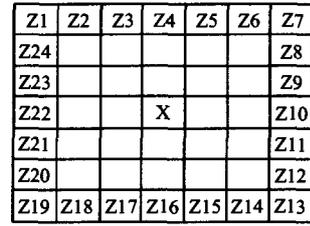


图1 Robinson Guard 滤波器结构图
Fig. 1 Structure of Robinson Guard filter

Robinson Guard 空间滤波器是一种典型的非线性非参数型滤波器, 也是一种边缘增强滤波器. 该滤波器对起伏背景与杂波有很好的抑制性能. 与普通的边缘增强滤波器相比, 该滤波器最大的特点是能有效保留小目标的边缘和目标内部信息, 而普通滤波器只能给出目标的边缘轮廓.

传统的边缘滤波器是在图像空间中借助模板对图像进行邻域操作, 输出图像中每一个像素的取值都是通过模板对输入像素相应领域内的所有像素值进行加权求和得到, 待检测像素周围不设保护带. 而 Robinson Guard 空间滤波器在待检测像素周围设置保护带, 当目标尺寸小于保护带时, 目标的内部信息可以得到很好的保留, 信息损失小.

以尺寸为 7×7 的滤波器模板为例, Robinson Guard 空间滤波器的结构如图1所示.

其滤波器算法表示如式(5)所示.

$$X = \begin{cases} X - \max(Z_i) & X \geq \max(Z_i) \\ \min(Z_i) - X & X \leq \min(Z_i) \\ 0 & \min(Z_i) < X < \max(Z_i) \end{cases} \quad (5)$$

3 全向红外IRST系统与算法实现

全向红外IRST系统主要由红外线阵探测器, 光学系统, 扫描控制系统与图像处理系统构成. 光学系统在扫描控制系统控制下, 在俯仰和方位上匀速圆周扫描, 从而遍扫整个球面空域. 图像处理系统主要完成探测器输出模拟信号的数字化, 数据存储, 冗余数据剔除、目标检测与结果输出.

系统构成框图如图2所示.

根据系统设计要求, 红外探测系统的数据率是

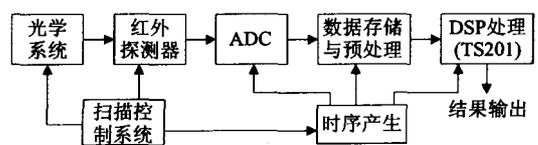


图2 全向红外IRST系统功能框图
Fig. 2 Function block of all-directionalIRST

$54 \times 10^6 \text{ Bytes/s}$, 每个像素用两个字节表示, 因此, 每个像素只有 37 ns 的处理时间. 如此大量的高速扫描数据, 要实现系统高速实时目标检测, 我们采用 ALTERAL 公司高性能 FPGA 与 ADSP-TS201S 高性能数字信号处理器相结合实现. FPGA 主要完成图像数据的存储与自适应平滑预滤波, 而 ADSP-TS201S 实现 Robinson Guard 空间滤波、目标检测和参数提取算法. ADSP-TS201S 主要特性是: 最高工作主频 600 MHz , 内部存储器 24 Mbits , 外部总线宽度 64 位, 内部总线宽度 128 位.

由式(5)可知, Robinson Guard 空间滤波算法包括两个核心运算模块, 一是计算滤波模板边界的最大值, 二是计算最小值, 并与待处理像素比较, 判断是否满足式(6). 因此, 该算法既可以检测暗背景下的弱小目标, 也可以检测亮背景下的弱小目标.

根据算法原理, 在 DSP 开发平台 VisualDSP + 4.0 下, 实现算法的汇编语言编程. 为了提高处理速度, 程序设计在以下 3 个方面进行了充分优化: 一是充分利用了 DSP 的并行处理特性, 双处理器核一次同时并行处理 4 个像素. 二是利用 DSP 内部 128 位总线宽度, 单指令周期可以同时读取 8 个 16 位像素值. 三是充分利用每个像素点运算的中间结果, 在计算相邻像素时直接使用, 避免重复计算. 程序设计步骤说明如下.

步骤 1: 一次从存储区读取 8 个 16 位像素, 并分配到 DSP 的 X 和 Y 运算单元同时并行处理;

步骤 2: 计算滤波模板的最大值与最小值, 并保存;

步骤 3: 判断待检测像素灰度值是否大于最大值或者小于最小值. 如果是, 则该像素灰度值赋为 255 , 否则该像素灰度值赋为 0 ;

步骤 4: 返回, 处理后续 8 个像素.

4 实验结果与分析

在基于 ADSP-TS201S 的全向红外图像处理平台上进行了实验与仿真, 采用信噪比, 信噪比增益和背景抑制因子衡量算法的处理性能, 定义如下:

信噪比:

$$SNR = (G_t - G_b) / \sigma \quad (6)$$

G_t 为目标的灰度值, G_b 代表背景的灰度, σ 为背景的标准差.

信噪比增益:

$$G_{SNR} = SNR_0 / SNR_t \quad (7)$$

SNR_0 为处理后输出图像的信噪比, SNR_t 为原

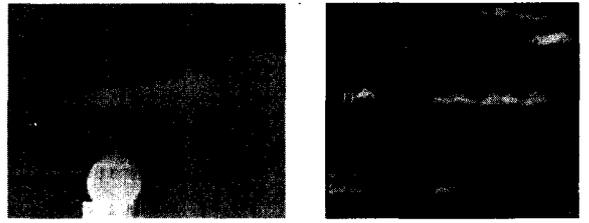


图3 (a)单帧图像 I (b)单帧图像 II
Fig.3 (a)Image I (b)Image II

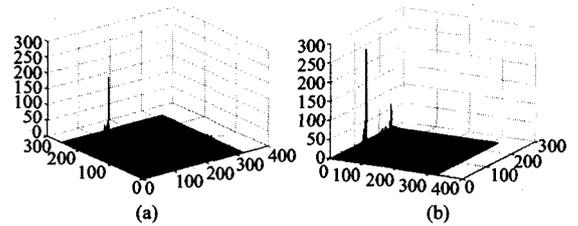


图4 本文方法处理图像 I 和 II 后的三维灰度图 (a) 图像 I 三维灰度 (b) 图像 II 三维灰度
Fig.4 3D chart of image I and II processed with the proposed algorithm. (a)image I (b)image II

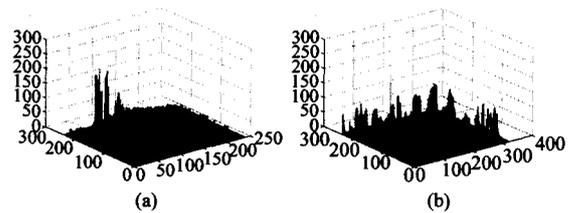


图5 Top-hat 方法处理图像 I 和 II 后的三维灰度图 (a) 图像 I 三维灰度 (b) 图像 II 三维灰度
Fig.5 3D chart of image I and II processed with Top-hat. (a) image I (b)image II

输入图像的信噪比. 当 SNR_t 为负值的情况下, 采用替代统计公式 $G_{SNR} = (SNR_0 + |SNR_t|) / |SNR_t|$.

背景抑制因子:

$$I = C_{in} / C_{out} \quad (8)$$

C_{in} 和 C_{out} 分别代表处理前后杂波的标准差.

采用两组红外图像序列进行实验验证, 并与 Top-hat 滤波方法进行性能对比. 实验环境: ADSP-TS201S 核工作频率 480 MHz , 外设工作频率 80 MHz , 集成调试开发平台采用 VisualDSP + 4.0.

4.1 实验一

在两组 95 帧 256×320 的真实红外图像序列中分别选取一帧图像, 如图 3 所示, 分别采用 5×5 和 7×7 滤波窗口, 利用本文算法和 Top-hat 方法进行空间滤波处理. 图 4 与图 5 为滤波窗口 7×7 时, 分别采用两种算法处理后图像的三维灰度图. 表 1 为两种方法分别在两种滤波窗口下的算法性能对比.

表1 两种方法处理性能对比

Table 1 Comparison of process obtained by two algorithms

图像	SNR_I	处理算法	SNR_0	G_{SNR}	I
I (5*5)	3.193	Top-hat	58.612	18.3564	5.07
		本文方法	105.32	32.9847	19.69
I (7*7)	3.193	Top-hat	51.654	16.1773	4.4846
		本文方法	309.73	97.0028	26.472
II (5*5)	3.314	Top-hat	15.764	4.7568	1.75
		本文方法	34.509	10.413	22.43
II (7*7)	3.314	Top-hat	7.386	2.2287	1.15
		本文方法	144.58	43.627	17.8

由图4和图5可知,本文的空间滤波算法对固定物与云层背景和干扰都有很好的抑制能力,而Top-hat形态学滤波方法基本不能抑制云层背景.表1也表明,本文算法的性能明显优于Top-hat形态学滤波方法,小目标检测能力明显提高.

本文的方法在某全向红外搜索跟踪系统中的DSP实时运行时间统计如表2所示.

表2 算法的DSP处理性能

Table 2 Processing time of the algorithm with DSP

	DSP 执行周期数	DSP 执行时间(μ s)
单像素处理	16	0.03333
256 * 320 图像	1310720	2730.67

由表2可知,该方法完成每个像素的处理时间只需要33ns,满足高速扫描图像的实时处理要求.

4.2 实验二

在一组95帧256*320的真实红外图像背景序列中加入一个大小为2*2的目标,并以每帧一个像素的速度做直线运动穿过云层.分别用本文的算法和Top-hat方法在不同信噪比下对目标进行检测.在检测阈值为100的条件下,图6为两种方法在SNR为1.5时的检测目标轨迹,表3为两种方法在不同信噪比下的检测概率.

从图6可知,在信噪比为1.5时,两种方法在一般强度云层中都可以检测到目标,但在强云层杂波背景下都存在漏检,如图6(a)中的断线部分.但本文方法对云层背景有很好的抑制,几乎无虚假目标,而Top-hat则存在很大的虚警.从表3可知,在不同信噪比下,本文方法的检测概率优于Top-hat,特别是在低信噪比情况下,具有明显的优势.

5 结语

本文提出了一种基于自适应噪声平滑和空域滤



图6 检测目标轨迹 SNR = 1.5 (a) 本文(b) Top-hat
Fig. 6 The target's trajectories obtained SNR = 1.5. (a) the proposed algorithm. (b) Top-hat algorithm

表3 两种方法在不同信噪比下的检测概率

Table 3 Probabilities of detection obtained by two algorithms with different SNR

信噪比	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5
本文方法	97%	93%	87%	76%	72%
Top-hat	92%	85%	80%	34%	0%

波的红外小目标检测新方法,能有效抑制起伏背景,并结合ADSP-TS201S处理器,实现了该算法,成功应用到某全向红外搜索跟踪系统中.实验与分析表明,该检测算法适用于低信噪比下的小目标检测.

REFERENCES

- [1] CHI Jian-Nan, FU Ping, WANG Dong-shu. A detection method of infrared image small target based on order morphology transformation and image entropy difference [C], Guangzhou: Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Aug. 2005.
- [2] Wang G D, Chen Ch Y, Shen X B. Facet-based infrared small target detection method [J], *Electronics Letters*. Oct. 2005, 41(22): 218—219.
- [3] WU Bin, JI Hong-Bing, LI Peng. A new method for moving dim target detection based on third-order cumulant in infrared image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(5): 364—367.
- [4] WEN Pei-zhi, SHI Ze-lin, YU Hai-bin. A detection method for IR point target on sea background based on morphology [J]. *Opto-Electronic Engineering*. 2003, 30(6): 55—58.
- [5] YANG Lei, YANG Jie, ZHENG Zhong-Long. Detecting infrared small targets based on adaptive local energy threshold under sea-sky complex backgrounds [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨磊, 杨杰, 郑忠龙. 海空复杂背景下基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(1): 41—45.
- [6] ABDELKAWY E, MCGAUGHY D. Wavelet-based image target detection methods Wavelet based target detection methods [J], *SPIE-The International Society for Optical Engineering*. 2003, 5094: 337—347.