

文章编号:1002-2082(2012)05-0964-05

复杂背景下红外弱小目标检测算法研究

罗蓓蓓¹, 伊兴国¹, 申 越², 孔 鹏¹, 董期林¹, 张 卫¹, 李晨光¹, 傅 强¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

摘 要:复杂背景下低信噪比弱小目标的检测是红外预警系统中的重点和难点。为解决红外图像中杂波干扰多、目标信噪比低等问题, 提出一种非线性空间滤波的目标检测方法。该算法在传统线性空间滤波算法的基础上, 通过对预测点周围 4 个象限的背景灰度值进行计算, 并动态地调节阈值, 以达到突出小目标的目的。试验结果表明: 当背景包含较多复杂因素时, 采用非线性空间滤波的检测方法可有效地抑制杂波, 实现弱小目标的提取, 与线性滤波算法结果相比较, 虚警数降低了 3/4, 且易于工程实现。

关键词:红外目标检测; 非线性空间滤波; 线性空间预测; 虚警数

中图分类号: TN215

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201233.0506001

Infrared small target detection under complex background

LUO Bei-bei¹, YI Xing-guo¹, SHEN Yue², KONG Peng¹, DONG Qi-lin¹, ZHANG Wei¹,

LI Chen-guang¹, FU Qiang¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Academy of China Ordnance Science, Beijing 10089, China)

Abstract: Small target detection in complex background is a critical technology in the infrared warning system. Aiming at the problems that there is clutter interference in infrared image and the target's signal-to-noise ratio is low, this paper presents a non-linear spatial filtering detection method. Based on traditional linear spatial filter algorithm, the algorithm calculates the gray value around the four quadrants of the potential target, and adjusts the dynamic threshold properly. The results show that when the background contains more complex factors, the non-linear spatial filtering method can effectively suppress the clutter to achieve the extraction of the weak target. Compared with the results of linear filtering algorithm, this algorithm decreases the number of false alarms by 3/4, and has easy engineering realization.

Key words: infrared target detection; non-linear spatial filter; linear spatial filter; false alarm rate

引言

红外预警系统的重要用途之一是根据其所获得的红外图像对空、海等自然背景中的运动目标进行检测, 使防御武器有足够的反应时间。故要求目标在很远处就能被检测到。另一方面接收器内的噪声及背景杂波干扰通常较强, 小目标分割与检测性能的好坏将直接决定红外预警系统的有

效作用距离及设备的复杂程度^[1-2]。自适应空间预测滤波是工程中常用的一种检测方法, 但在杂波较多、信噪比低的情况下有很大的局限性^[3]。本文针对自然背景和运动目标在红外辐射空间分布上的特点和差别, 在传统的线性空间预测滤波的基础上提出目标检测方法: 利用预测点周围 4 个象限的背景灰度值进行相关运算, 分析预测误差,

收稿日期: 2012-04-04; 修回日期: 2012-05-21

基金项目: 国防预研项目支撑。

作者简介: 罗蓓蓓, (1982—), 女, 湖南长沙人, 工程师, 硕士, 主要从事信息处理技术研究工作。

当误差超过一定阈值时意味着预测点不同于背景,因此可以判定为潜在的运动目标。

1 目标特征分析

检测、识别弱小目标的可用信息除了目标本身的灰度信息外,还必须采用目标周围像素的灰度分布和灰度起伏特征^[4]。在原始采集的红外图像中,背景中任何一点的灰度值与周围像素点的灰度值有较强的相关性,而对属于目标的像素点,它的灰度值与周围像素点的灰度值相关性较差,这就是利用背景预测来检测弱小目标的出发点^[5-6]。当目标在很远处时,它的成像会很小(约 2×2 像素)、很弱(对比度非常低),如图1所示。在图1中圆形标注为真实红外目标,图2表示对应目标的放大灰度图像,图3为原始红外图像的灰度三维图。

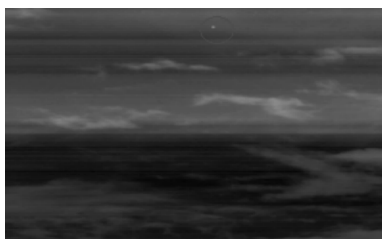


图1 存在小目标的原始红外图像

Fig.1 Original infrared image with small object



图2 目标放大图

Fig.2 Enlarge object

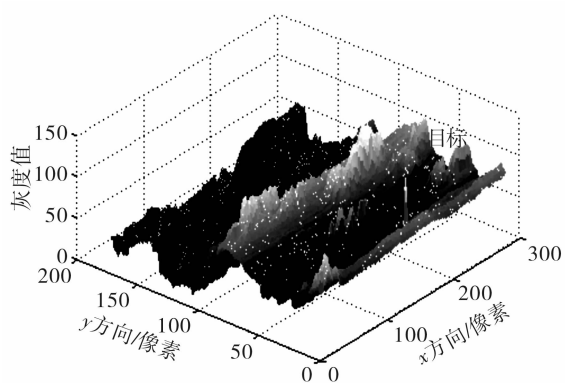


图3 包含目标的红外场景图像的三维灰度图

Fig.3 3D grey-level image of infrared scene including object

如图2所示,较小的红外目标图像具有模糊的块状结构,目标特征由3个参数组成:目标中心位置、尺寸和峰值强度,这3个特征为我们设计滤波器提供了依据。

本文的第一个关键点是选择最优的空间滤波器,同时使目标信号与背景的差值达到最大,并使背景杂波最小;第二个关键点是如果测试图像中包含物体边缘、地平线等,则这种异类背景会产生很大的背景杂波,增加了虚警数。为此,在原有的线性空间滤波的基础上提出一个新型的预处理滤波器来去除异类结构背景。

2 线性空间滤波

线性空间滤波的机理是选择适合的空间滤波算子对待处理图像进行卷积运算^[7]。最基本的空间滤波模型如下:

$F(i, j)$ 表示原始图像在 (i, j) 点处的灰度值,根据该点邻域内其他点的灰度值对该点的灰度进行线性预测,估计值 $G(i, j)$ 可以表示为

$$G(i, j) = \sum_{l, k \in S} W(l, k) F(i-l, j-k) \quad (1)$$

式中 $W(l, k)$ 为权重矩阵即线性预测系数。采用自适应阈值分割目标, $G'(i, j)$ 为线性空间滤波后的输出。选取阈值 Th 作为分割门限,阈值 Th 的定义为

$$G'(i, j) = \begin{cases} 1, & G(i, j) \geq Th \\ 0, & G(i, j) < Th \end{cases} \quad (2)$$

$$Th = E + k\sigma \quad (3)$$

(3)式中: Th 为分割阈值; E 为图像均值; σ 为图像标准差; k 为经验系数,可以根据实际场景来调节。

该算法对于单一的背景或同一区域背景的内部是有效的,但是对于背景中的一些强烈变化的情况则无能为力,尤其对于高强度背景边缘,经过掩模线性卷积后,这部分会变得异常明显。

3 非线性空间滤波算法

线性空间预测滤波算法虽然能够通过修正权重矩阵的方式在一定程度上适应背景的非平稳性起伏,但会出现明显的误差,使得在物体边缘处背景的抑制效果变差,出现虚警^[8-9]。对于这种情况,不能依靠调节滤波器的权值来预测背景,而应选择预测窗口内图像本身的灰度值参与运算,以降低亮云层边缘所产生的误差。根据这一思想本

文对上述算法进行修正,采用非线性滤波方法解决^[10]。以预测点为中心,将该点周围划分为4个区域,对应着欧几里德空间的4个象限,如图4所示。具体的步骤如下:

(1) 输入 $M \times N$ 像素大小的参考图像,在图像上运行一个 $(2n+1) \times (2n+1)$ 像素大小的滤波窗口。

(2) 以扫描到图像中的当前像素点 $F(i, j)$ 为中心,分别计算4个象限内 $n \times n$ 个像素的中值。

(3) 比较4个象限的中值,找出最大值和最小值。

(4) 将当前像素点 $F(i, j)$ 与修正后的最大值和最小值比较,见(7)式,得出最终输出 $G(i, j)$ 。

(5) 是否扫描完所有像素,若是,则转入(6);否则,返回(2)。

(6) 结束。

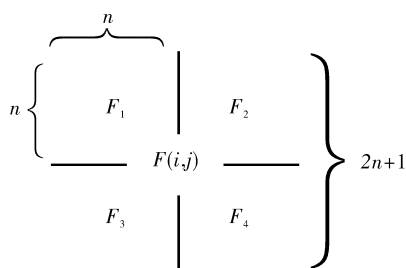


图4 非线性空间滤波算法示意图

Fig. 4 Non-linear spatial filter

算法如下:每个象限的领域 n 可以根据实际目标大小取值,实验中我们取 n 为2,整个滤波窗口大小为 $(2n+1) \times (2n+1)$ 像素。其中 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 分别为4个象限的中值, F_{\max} 为4个中值的最大值, F_{\min} 为最小值,其表达式如下:

$$\begin{aligned} F_1 &= \text{median}(F(i-2, j-2), F(i-2, j-1), \\ &\quad F(i-1, j-2), F(i-1, j-1)) \\ F_2 &= \text{median}(F(i-2, j+1), F(i-2, j+2), \\ &\quad F(i-1, j+1), F(i-1, j+2)) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F_3 &= \text{median}(F(i+1, j-2), F(i+1, j-1), \\ &\quad F(i+2, j-2), F(i+2, j-1)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_4 &= \text{median}(F(i+1, j+1), F(i+1, j+2), \\ &\quad F(i+2, j+1), F(i+2, j+2)) \end{aligned}$$

$$F_{\max} = \max(F_1, F_2, F_3, F_4) \quad (5)$$

$$F_{\min} = \min(F_1, F_2, F_3, F_4) \quad (6)$$

则最终输出值为

$$G(i, j) = \begin{cases} F(i, j) - F_{\max} & F(i, j) \geq F_{\max} + k\sigma \\ |F(i, j) - F_{\min}| & F(i, j) < F_{\min} - k\sigma \\ 0 & F_{\min} < F(i, j) < F_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: k 为修正系数,可根据实际情况调整 k 的最优值; σ 为输入图像的标准差,是灰度分布均匀性的一种度量。在滤波处理之后,通过原图像和周围像素的中值极大值可以计算出目标与背景强度之差。对于单个孤立点,可以突出其中心位置。而对于强边缘的异类背景不产生响应,很大程度上减少了由于非平稳背景产生的虚警。

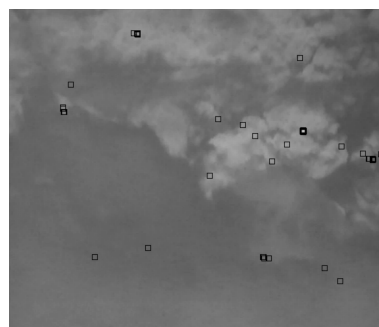
上述改进后的算法在处理复杂背景中弱小目标的检测有较好的效果。鉴于红外视频信号的高数据率,采用两维的空间数字滤波器,选用 FPGA 芯片为主处理单元完成。

4 实验结果与分析

为了更好地进行比较,用 Matlab 工具对本文中的两种算法进行了评估实验。利用一台扫描型长波红外热像仪采集测试序列,图像分辨率为 768×576 像素。测试基于3种不同场景:复杂云层的天空场景、简单天空场景、存在建筑物的场景,对视频以1帧/s的速率采样获得,每种场景采用50帧图像进行实验。仿真结果如图5—7所示。



(a) 复杂云层场景下的原始红外图像



(b) 线性空间滤波后的目标



(c) 非线性空间滤波后的目标

图 5 复杂云层场景下的两种滤波算法结果

Fig. 5 Two filtering algorithm results in context of complex clouds



(a) 简单天空场景下的原始红外图像



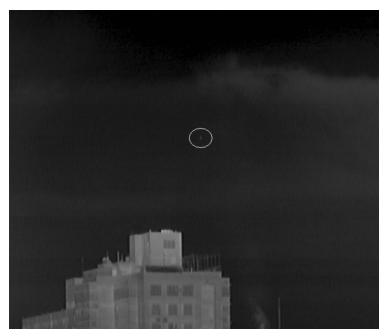
(b) 线性空间滤波后的目标



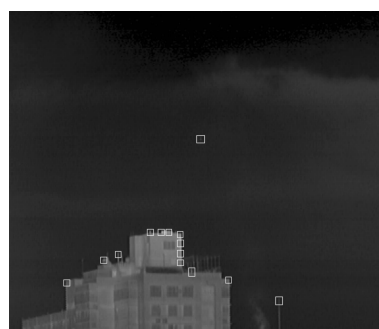
(c) 非线性空间滤波后的目标

图 6 简单天空场景下的两种滤波算法结果

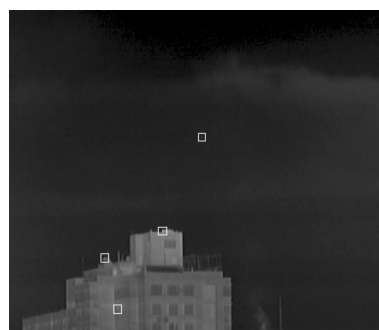
Fig. 6 Two filtering algorithm results in simple sky background



(a) 存在建筑物场景的原始红外图像



(b) 线性空间滤波后的目标



(c) 非线性空间滤波后的目标

图 7 存在建筑物场景的两种滤波算法结果

Fig. 7 Two filtering algorithm results in scene of building

以上图中圆形标注的是真实目标,矩形表示检测到的可能目标。图 5(a)是复杂云层天空场景的原始红外图像,云层杂波较多,运动目标约为 1×2 像素,属于亚像元成像。图 5(b)是采用线性空间预测滤波算法处理后的图像,平均虚警数为 23 个/帧。图 5(c)是采用非线性空间滤波算法处理后的图像,平均虚警数可降低到 5 个/帧。图 6(a)是简单天空场景的原始红外图像,运动目标约为 1×2 像素,两种算法滤波后虚警数分别为 3 个/帧、1 个/帧。图 7(a)是存在建筑物的场景,建筑物边缘较锐,容易产生虚警,运动目标约为像素,两种算法滤波后虚警数分别为 13 个/帧、3 个/帧。

从图 7(b)与图 7(c)可以看出,线性空间预测滤波算法对灰度高亮的建筑物边缘有较强的响应,这是拉普拉斯核卷积后带来的边缘效应。而非线性空间滤波算法只突出单个的点,边缘轮廓可以很好地被过滤。3 种场景均为 50 帧图像的统计,平均每帧的虚警数见表 1。从实验统计可以看出,非线性空间滤波算法具有较低虚警数,可将虚警数减少到原算法的 1/4,尤其在背景复杂的条件下显示出更好的杂波抑制性能。

表 1 两种算法的虚警数

Table 1 Comparison of false alarms numbers between two algorithms

场景	线性空间滤波算法虚警数(个/帧)	非线性空间滤波算法虚警数(个/帧)
场景一	25	6
场景二	3	1
场景三	12	3

5 结束语

本文考虑到红外图像的复杂背景和弱小目标的特点,改进了传统的线性空间滤波算法,给出了一种非线性空间滤波算法,并比较了两种算法的性能。使用非线性滤波算法一方面可以突出增强预测目标,另一方面能很好地抑制起伏较大的异类背景。采用 3 种实拍场景的红外图像进行了实验验证,与线性滤波算法结果相比较,虚警数降低了 3/4。该算法已通过 FPGA 硬件平台实现。

参考文献:

- [1] 杨磊. 复杂背景条件下的红外弱小目标检测与跟踪算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2006.
YANG Lei. Study on infrared small target detection and tracking algorithm under complex backgrounds [D]. Shanghai: Shanghai Jiao-tong University,2006. (in Chinese)
- [2] 余农,吴常泳,汤心溢. 红外目标检测的自适应背景感知算法[J]. 电子学报,2005,33(2):200-204.
YU Nong, WU Chang-yong, TANG Xin-yi. Adaptive background perception algorithm for infrared target detection [J]. Acta Electronica Sinica, 2005,33(2): 200-204. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 刘洋. 复杂背景下红外图像中弱小目标的检测[D]. 吉林:吉林大学,2006.
LIU Yang. Small and dim targets detection in infrared image under complex backgrounds [D]. Jilin: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [4] 张艳晶,杨卫平. 一种起伏背景下的红外弱小目标检测算法[J]. 红外技术,2004,26(1):48-51.
ZHANG Yan-jing, YANG Wei-pin. A detection algorithm of small infrared target under clutter background [J]. Infrared Technology, 2004, 26(1): 48-51. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 彭鼎祥,汤心溢,王世勇. 复杂背景下红外弱小目标检测流水线快速预处理算法[J]. 半导体光电,2006,27(1):75-78.
PENG Ding-xiang, TANG Xin-yi, WANG Shi-yong. Pipeline pretreatment for infrared weak-target detection under complex background [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(1): 75-78. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 朱红,赵亦工. 基于背景自适应预测的红外弱小运动目标检测[J]. 红外与毫米波学报,1999,18(4):305-310.
ZHU Hong, ZHAO Yi-gong. Detection of weak and small moving infrared targets by adaptive prediction of background [J]. Infrared Millim Wave, 1999, 18(4):305-310. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 俞建成,孙胜利,陈桂林. 红外图像中小目标检测研究[J]. 红外,2006,27(4):15-19.
YU Jian-cheng, SUN Sheng-li, CHEN Gui-lin. Study of point target detection in infrared images [J]. Infrared, 2006, 27(4): 15-19. (in Chinese with an English abstract)
- [8] WEN Pei-zhi, SHI Ze-lin, YU Hai-bin, et al. A method for automatic infrared point target detection in a sea background based on morphology and wavelet transform [J], SPIE, 2003, 5286: 248-253.
- [9] DESHPANDE S D, ER MH, RONDA V, et al. Max-mean and max-median filters for detection of small-targets [J], SPIE, 1999, 3809: 74-83.
- [10] BARNETT J. Statistical analysis of median subtraction filtering with application to point target detection in infrared backgrounds [J], SPIE, 1989, 1050: 10-15.