

中图法分类号: TP751.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)04-0600-06

论文索引信息: 孙宁, 翟尚礼, 赵春光. 扫描型红外图像实时目标检测研究[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 600-605

# 扫描型红外图像实时目标检测研究

孙宁, 翟尚礼, 赵春光

(中国电子科技集团公司第 28 研究所, 南京 210007)

**摘要:** 针对扫描型红外图像数据量大、背景复杂、横纹杂波干扰大和目标图像信噪比低等特点, 提出一种适用于 360°全方位扫描型红外图像目标检测的实时处理算法。算法预处理部分消除横纹杂波, 实现目标增强和背景抑制; 然后采用两级特征提取, 大幅降低图像的数据量; 最后根据帧间图像灰度特征相关的思想, 完成扫描型红外图像目标检测的功能。根据本文算法的特点, 以 DSP + FPGA 为核心处理器设计了具有实时处理能力强, 数据传输容量大等优点的图像处理板。实验结果表明, 本文算法是有效、可行的, 图像处理板稳定、可靠, 能满足扫描型红外图像实时目标检测的需求。

**关键词:** 扫描型红外图像; 目标检测; 实时图像处理

## Studies on real-time target detection of scanning infrared images

Sun Ning, Zhai Shangli, Zhao Chunguang

(The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007 China)

**Abstract:** Scanning infrared imagery has the characteristics of giant data, complex background, heavy clutter and low SNR. A real-time processing method is proposed to detect targets on all-azimuth scanning infrared imagery. The proposed method firstly suppresses the clutter and backgrounds to enhance the target by preprocess. Then it adopts two level feature extraction to dramatically decrease the image data. At last according to the idea of inter-frame image gray-level dependencies, accomplishes the target detection of scanning infrared images. Image processing card is designed based on DSP&FPGA processor with the advantage of real-time data processing and data transmission. The results show that the method is efficient and viable, the image processing card works reliably and stably, which can satisfy with the need of real-time target detection of scanning infrared images.

**Keywords:** scanning infrared images; target detection; real-time image processing

## 0 引言

当前, 光电技术已成为军事侦察监视与预警中的核心技术和重要手段之一。其中, 红外搜索跟踪系统<sup>[1]</sup>是军用光电技术的重要应用领域, 其具有被动探测、昼夜工作、实时成像和抗电磁干扰等优点, 日益受到各国军方和科研部门的重视, 成为军用光电技术的热点研究方向。

红外搜索任务要求红外传感器快速覆盖大范围的地域、海域或空域, 持续接收红外辐射, 由此发现目标, 并且标示目标位置。红外搜索系统通常使用扫描型红外焦平面 (IRFPA)<sup>[2]</sup>作为红外探测器, 通过扫描机构便可以获取 360°的红外图像, 这种全方位大视场的红外图像称为扫描型红外图像。由于需要在很短时间内 (小于 1s) 完成一周的扫描, 扫描型红外探测器积分时间很短, 获取远方目标的红外辐射十分微弱。还有, 扫描型红外图像中包含大量的

收稿日期: 2009-06-04; 修回日期: 2009-10-21

第一作者简介: 孙宁 (1978—), 男, 高级工程师。2007 年于东南大学信号与信息处理专业获博士学位, 主要研究方向为光电系统设计、图像处理和模式识别。E-mail: sunning.nj@gmail.com。

地物背景和杂波等干扰。以上情况使得扫描型红外图像中目标的图像信噪比极低,有效进行目标检测的难度很大。此外,一帧扫描型红外图像的数据量通常为几千万个像素,有些甚至要达到上亿像素。因此,要实现扫描型红外图像的实时检测功能,需要研究有效、便捷的图像处理算法和设计高性能的图像处理平台。

对于红外图像目标检测,国内外研究人员进行了大量的研究,并取得了不少研究成果<sup>[3-8]</sup>。其中大部分是面向凝视型红外图像的,很难直接应用到扫描型红外图像检测中。扫描型红外探测器虽然已有实际系统投入应用<sup>[9]</sup>,但是公开的技术文献甚少<sup>[10]</sup>。针对扫描型红外图像的特点和红外搜索任务的要求,基于帧间图像的灰度特征相关的思想,提出一种实时目标检测的方法,该方法首先利用背景白化滤波来抑制扫描型红外图像中特有的横纹和背景杂波,并对残差图进行二次滤波增强目标信噪比。滤波后图像经过特征提取处理,在保留关键图像信息的条件下,大幅减少数据量。对输入图像特征数据进行背景学习和建立自适应阈值。当新一帧图像输入后,与建立的背景数据进行相关处理,根据自适应阈值,便可以确定目标出现的位置。针对本文算法,设计了以 DSP + FPGA 为核心处理器的图像处理板,利用该图像处理板,工程化本文算法,实现了扫描型红外图像实时目标检测的功能。

## 1 图像预处理

扫描型红外图像是由扫描型红外探测器通过 1 维扫描机构成像得到的。以  $576 \times 6$  元扫描型红外探测器为例,当该探测器进行 1 维扫描时,视频场为 576 行,在扫描方向对 6 个元件进行串联扫描,6 个元件中每个探测器依次扫过同一景物,输出同一像素信号,通过时间延迟积分(TDI)技术将 6 个元件信号相叠加得到该列的灰度数据。由于焦平面上光敏元件存在响应不均匀的现象,即不同元件对同一光信号输出的电信号不同,其结果是造成扫描型红外图像出现条纹状背景,如图 1 所示。实际应用中,这些横纹出现的位置和灰度值还会随着时间和场景的变化而变化。以上情况会对目标检测产生严重影响,因此,必须要在预处理阶段进行滤波处理对背景进行抑制,对目标进行增强。

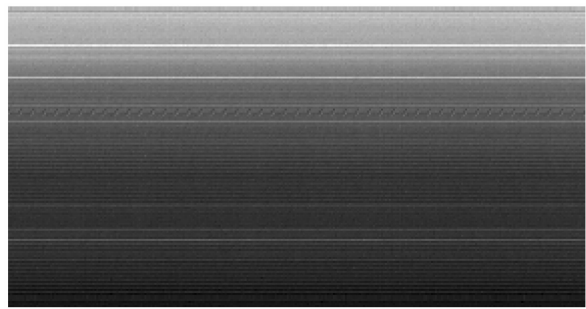


图 1 光敏元件不均匀导致的横纹背景

Fig. 1 Stripes background caused by element nonuniform

### 1.1 背景白化滤波

背景白化滤波主要实现抑制背景条纹、大块的背景景物和保留目标信息的目的。针对上述扫描型红外图像的特点,本文使用了大小为  $1 \times 7$  的行方向中值滤波,求以某点为中心,  $1 \times 7$  范围内像素的中值,计算该点像素与中值的残差值作为滤波结果,该方法可以为

$$I_f(x, y) = I(x, y) - \text{Median}(I(x, y - 3), I(x, y - 2), \dots, I(x, y + 3)) \quad (1)$$

### 1.2 目标增强

经过背景白化滤波后,背景横纹和大块的景物得到了很好的抑制,但是目标区域的绝对灰度值也大幅下降。因此对以上滤波后的残差图像进行二次滤波,使得目标的信噪比进一步提高。根据典型目标呈斑点状的特点,目标增强采用了旋转均值滤波算法。根据文献[11]报道,使用旋转均值可以将目标的图像信噪比提高 2~3 倍。

旋转均值滤波算法将局部区域分解成几个 1 维窗口,每个 1 维窗口均单独采用均值滤波并对每个方向均进行去均值处理。本文采用的是大小为  $7 \times 7$  局部窗口,图 2 给出了  $7 \times 7$  窗口用到的 8 个不同方向的示意图。(b) 是 (a) 中离散化后相对于方向 7, 4, 5 与 6 的 1 维窗口。每个 1 维窗口中,黑色方块为当前的像素,即为窗口中心令其位置为  $(x, y)$ 。其灰度值为  $f(x, y)$ , 令 8 个不同方向的定义域分别为  $D_1, D_2, \dots, D_8$ 。

经旋转均值滤波后当前位置的值  $f'(x, y)$  为

$$f'(x, y) = \sum_{i=1}^8 \left\{ f(x, y) - \frac{1}{7} \sum_{j=-3}^3 \sum_{k=-3}^3 f(x+j, y+k) \cdot A(i) \right\} \quad (2)$$

式中,  $i$  表示第  $i$  个方向,  $i=1, 2, \dots, 8, j, k(-3 \leq j \leq 3,$

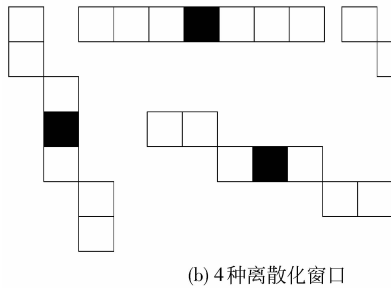
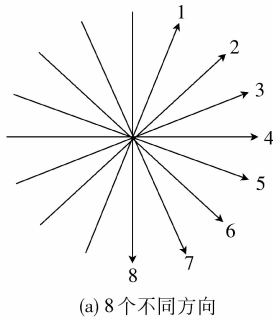


图 2 旋转均值滤波中的不同方向示意图  
Fig. 2 Rotating mean filter in different directions

$-3 \leq k \leq 3$ ) 为位置参数;  $A(i)$  的定义为

$$A(i) = \begin{cases} 1 & (x + j, y + k) \in D_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

## 2 基于帧间灰度相关的目标检测方法

通过深入分析扫描型红外探测器的成像方式, 总结扫描型红外图像具有以下特点:

1) 图像覆盖  $360^\circ$  全方位场景, 数据量很大, 但图像的各个局部之间的关联性不强, 可以分段处理;

2) 图像中存在大量景物, 如建筑物、树木、云等。但是, 景物相对固定, 在俯仰不变的条件下, 图像中景物的位置呈现静止 (如建筑物) 或缓慢移动 (如云) 的特征;

3) 目标的灰度分布具有“凸包”特点, 目标区域的灰度值要高于周围背景区域的灰度值;

4) 来袭目标具有“闯入”视场的特性, 目标在图像中存在的整个过程可以描述为“闯入→持续出现→消失”。

在充分考虑硬件实现的前提条件下, 结合扫描型红外图像的特点, 提出一种基于帧间灰度相关的目标检测方法。该方法主要分为灰度特征提取、背景学习以及相关检测与参数更新 3 个部分。下文以某型扫描型红外热像仪为例, 对算法流程进行详细介绍。该扫描型红外热像仪采用  $576 \times 6$  的红外探测器, 通过一个以  $2.8 \text{ s/周}$  匀速旋转的转台得到分辨率为  $576 \times 162\,000 \times 16 \text{ bit}$  的扫描型红外图像。

### 2.1 灰度特征提取

每帧扫描型红外图像的分辨率达到  $576 \times 162\,000 \times 16 \text{ bit}$ , 存储在硬盘上则需占用  $1\,424 \text{ MB}$  的存储空间。如果要在  $2.8 \text{ s}$  内完成如此大数据量图像的目标检测工作, 就必须对图像进行压缩。采用两级特征提取的方法对图像进行压缩, 大幅减少了数据量, 如图 3 所示。

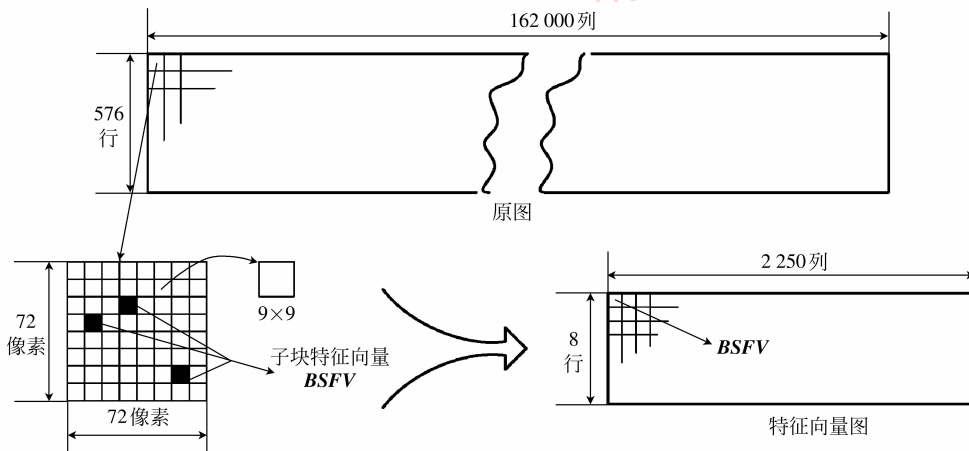


图 3 灰度特征提取流程示意图

Fig. 3 Flow chart of gray-value feature extraction

具体步骤如下:

1) 将图像等分为  $64 \times 18\,000$  个  $9 \times 9$  的区域,并计算每个  $9 \times 9$  区域的两个特征:最大值、均值。等效于图像的  $576 \times 162\,000$  个灰度值,映射为  $64 \times 18\,000 \times 2$  个特征值(最大值、均值)。

2) 将每  $8 \times 8$  个上述  $9 \times 9$  区域作为一个子块。全图共有  $8 \times 2\,250$  个子块。计算一个子块(实际子块取  $81 \times 81$  个像素区域,使得子块间有交叠部分,以保护目标被割裂的情况)中的(最大值+均值)最大的3个  $9 \times 9$  区域( $B_1, B_2, B_3$ )作为该子块的特征值,当前帧图像提取的每个子块的特征向量称为当前子块特征向量( $CSFV$ ),可用下式表示

$$CSFV^{i,j} = [Max_{B_1}^{i,j}, Mean_{B_1}^{i,j}, Max_{B_2}^{i,j}, Mean_{B_2}^{i,j}, Max_{B_3}^{i,j}, Mean_{B_3}^{i,j}] \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, 8; j = 1, \dots, 2\,250$$

经过两级特征提前后,原图  $576 \times 162\,000$  个像素,被压缩为  $8 \times 2\,250 \times 6$  个特征值,压缩后的数据量为原始数据量的 0.12%。在压缩算法中,提取了每个子块中3个(最大值+均值)最大的  $9 \times 9$  区域,这种设计的目的是为了提高提取特征的稳健性,保证在某些恶劣的情况下,(如子块中出现比目标灰度更高的噪声,或是目标出现在高亮的背景附近)目标的灰度信息仍能出现在特征向量中。

## 2.2 背景学习

算法开始运行后的前五帧进行背景学习,利用3.1节中所获取的特征向量图建立背景特征向量图和自适应阈值( $AT$ )。背景特征向量图中每个子块特征向量(称为背景子块特征向量( $BSFV$ ))由前五帧的特征向量(图中相应位置的子块特征向量取平均)求得,初始的  $BSFV$  可表示为

$$BSFV^{i,j} = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 CSFV_n^{i,j} \quad (5)$$

由于扫描型红外图像中场景复杂,图像中某些子块的特征向量变化很小,而有些子块则变化很大(例如树枝的摇动的),因此不同子块应该赋予不同的阈值来体现子块中背景的变化性。本文将前5帧的帧间子块特征向量差的模作为初始的自适应阈值,可用下式表示

$$AT^{i,j} = \frac{1}{4} \sum \| CSFV_{n+1}^{i,j} - CSFV_n^{i,j} \| \quad (6)$$

后续的每帧数据的背景特征向量图和自适应阈值则根据相关检测的结果进行参数更新。此外,对于每

个子块都维护一个子块类型标志( $BTF$ ),该标志有两种状态:1表示该子块在前一帧为目标区,0表示该子块在前一帧为背景区。初始状态将所有的  $BTF$  都置为0,随后每帧的  $BTF$  根据相关检测的结果进行更新。

## 2.3 相关检测与参数更新

完成背景学习后,我们已经获取了大小都为  $8 \times 2\,250$  的背景特征向量图和自适应阈值。根据扫描型红外图像的成像特点,当有目标出现在视场中的某个子块时,该子块的  $CSFV$  将出现一定程度的灰度突变。因此,本文算法就是利用这种目标“闯入”视场时发生的帧间灰度突变现象进行目标相关检测。具体算法流程如下:

1) 根据式(5)获取当前帧某子块的  $CSFV_n^{i,j}$ ,利用下式计算该子块的帧间灰度特征向量差

$$FDFV_n^{i,j} = \sum_{k=1}^6 (CSFV_n^{i,j}(k) - BSFV_{n-1}^{i,j}(k)) \quad (7)$$

若该子块的  $BTF_{n-1}^{i,j} = 1$ ,则转到流程2);

若该子块的  $BTF_{n-1}^{i,j} = 0$ ,则转到流程3)。

2)  $BTF_{n-1}^{i,j} = 1$  时的处理

判断  $FDFV_n^{i,j} > -\alpha \cdot AT_{n-1}^{i,j}$

是:若  $FDFV_n^{i,j}$  为正值,则说明当前帧该子块的灰度特征要强于前帧,该子块仍存在目标;若  $FDFV_n^{i,j}$  为负值,则判断该值的绝对值是否小于  $\alpha \cdot AT_{n-1}^{i,j}$ ,  $\alpha$  为比例系数,通常取 0.3 ~ 0.5。说明当前帧该子块的灰度特征虽然低于前帧,但是变化不大,仍然认为该子块存在目标。这种情况下置  $BTF_{n-1}^{i,j} = 1$ 。参数更新如下:

$$BSFV_n^{i,j} = 0.5 \cdot BSFV_{n-1}^{i,j} + 0.5 \cdot CSFV_{n-1}^{i,j} \quad (8)$$

$$AT_n^{i,j} = 0.9 \cdot AT_{n-1}^{i,j} + 0.1 \cdot \text{abs}(FDFV_n^{i,j}) \quad (9)$$

否:则认为该子块灰度变化大,目标已经离开该子块,标注  $BTF_{n-1}^{i,j} = 0$ 。参数更新如下:

$$BSFV_n^{i,j} = CSFV_n^{i,j} \quad (10)$$

$$AT_n^{i,j} = AT_{n-1}^{i,j} \quad (11)$$

3)  $BTF_{n-1}^{i,j} = 0$  时的处理

判断:  $FDFV_n^{i,j} > AT_{n-1}^{i,j} + Weight$

是:则认为该子块的灰度特征较前帧有大幅增强,有目标出现在该子块,标注  $BTF_{n-1}^{i,j} = 1$ 。  $Weight$  为加权系数,体现前后帧灰度特征的差异强度,根据实际工程情况取值。参数更新如下:

$$BSFV_n^{i,j} = CSFV_n^{i,j} \quad (12)$$

$$AT_n^{i,j} = AT_{n-1}^{i,j} \quad (13)$$

否:则认为该子块的灰度特征较前帧变化小,无目标出现,标注  $BTF_{n-1}^{i,j} = 0$ 。参数更新如下:

$$BSFV_n^{i,j} = 0.9 \cdot BSFV_n^{i,j} + 0.1 \cdot CSFV_n^{i,j} \quad (14)$$

$$AT_n^{i,j} = 0.9 \cdot AT_{n-1}^{i,j} + 0.1 \cdot \text{abs}(FDFV_n^{i,j}) \quad (15)$$

### 3 目标检测算法的硬件实现

FPGA 器件适合进行并行处理,可以胜任大数据量的重复简单运算,但是难以实现结构复杂的算法。DSP 能处理高阶复杂的信号处理,并且计算精度高,但是 DSP 并行处理的能力比较差,处理速度方面要远逊于 FPGA。

回顾本文算法,可以分为背景白化滤波、目标增强、灰度特征提取、背景学习以及相关检测与参数更新 5 个主要步骤。其中,背景白化滤波、目标增强和第一级灰度特征提取是在原始尺寸的图像上进行的,数据量大,但是运算规则较为简单;余下的几个步骤的特点是包含结构较复杂的计算,然而数据量要减少很多。因此,将图像信号接入、背景白化滤波、目标增强和第一级灰度特征放在 FPGA 器件中处理,余下步骤以及通讯功能则由 DSP 来完成。根据上述需求设计了以 DSP + FPGA 为核心处理器的图像处理板,其结构如图 4 所示。

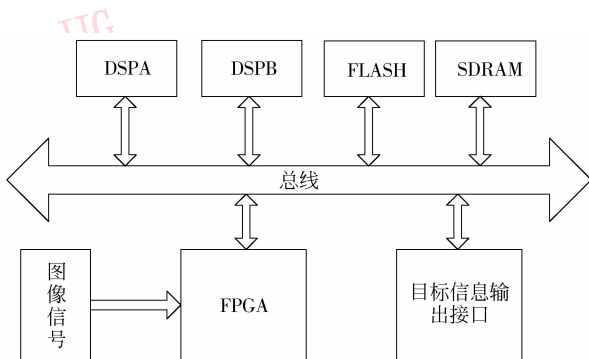


图 4 图像处理板硬件结构

Fig. 4 Hardware structure of the image processing board

第一级灰度特征提取后,一帧图像的数据量仍有  $64 \times 18\,000 \times 2 \times 16 \text{ bit}$ ,使用 1 块 DSP 无法满足实时处理的要求。所以,图像处理板中使用了 2 片 DSP,利用乒乓机制来降低单块 DSP 的处理负荷,使得图像处理板可以在 2.8s 的时间内,实时地完成目标检测的功能。

### 4 实验结果

实验数据共 60 帧,都是外场实验采集的真实扫描型红外图像。不失一般性,截取目标所在的部分图像来验证本文算法的有效性。原始图像如图 5 所示,图像中可以明显看到存在大量的横纹,背景中有不少大片的云,目标(图中圆圈处)十分微弱,目标的图像信噪比为 1.6。经过预处理后的背景白化滤波和目标增强后,图像中的横纹基本上都得到了抑制,而目标的图像信噪比则得到了大幅增强,达到了 6.2,如图 6 所示。



图 5 原始扫描型红外图像

Fig. 5 Original scanning infrared image

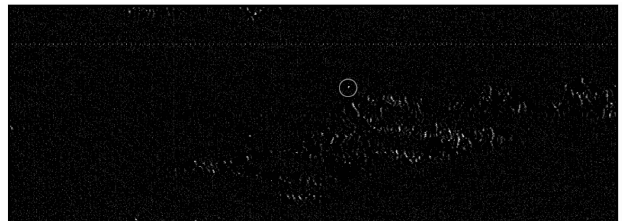
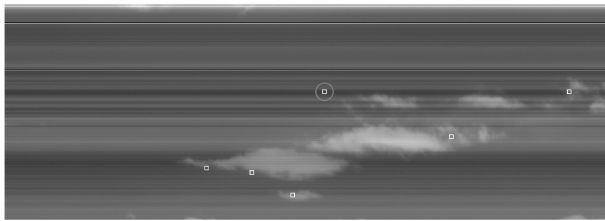


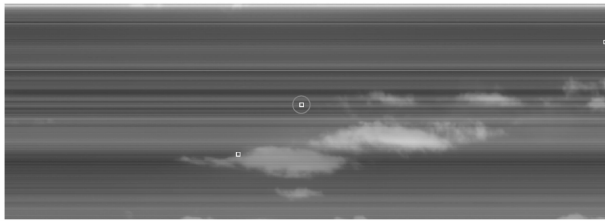
图 6 经过预处理后的扫描型红外图像

Fig. 6 Preprocessed scanning infrared image

图 7 中的白方框为算法检测出的目标。由图可以看出,本文算法都有效地检测出了微弱的目标(图中圆圈处),由于实验图像中只存在一批目标,图中的其他白方框为算法产生的虚警,这些虚警大多产生在云的边缘,是由于云的缓慢运动造成的。其他的如快速掠过的飞鸟,突发的噪声等都会产生虚警。这些虚警可以利用目标的运动特征通过航迹跟踪处理得到抑制。扫描型红外图像的航迹跟踪技术是红外搜索系统的另一项关键技术,不是本文研究重点,此处不作论述。



(a) 第10帧图像的检测结果



(b) 第30帧图像的检测结果



(c) 第50帧图像的检测结果

图7 图像的检测结果

Fig.7 The detection result of image

由上述实验结果可以看出,本文算法可以有效抑制扫描型红外图像的横纹杂波和大块的背景图像,能大幅提高目标的图像信噪比;并能在复杂背景条件下,稳定检测出图像信噪比极低的目标,同时产生的虚警数量也较少。

## 5 结论

深入分析扫描型红外图像的特性,按照红外搜索任务的需求和扫描型红外图像的特点,在充分考虑算法的硬件可实施性的前提下,提出一种扫描型红外图像实时目标检测方法。该方法首先进行图像预处理来抑制杂波、背景,增强目标,利用目标“闯入”视场后产生前后帧灰度特征突变的思想,进行相关检测。实验结果表明,本算法可以有效完成扫描型红外图像中信噪比极低目标的检测功能,虚警数量较少。最后,介绍了图像处理板的构成和本文算法在该平台上的硬件实现方法。该图像处理板作为扫描型红外热像仪的目标检测模块进行了多次外场实验,测试结果表明,该图像处理板工作稳定、可靠,满足扫描型红外图像实时目标检测的要求。

## 参考文献 (References)

- [1] Dudzik M C. Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing [M]//The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. Bellingham, German: Infrared Information Analysis Center, Environmental Research Institute of Michigan and SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [2] Mei Suisheng, Wang Rongrui. Optoelectronic Technology- the New World of Information Weapon Equipment of Information [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. [梅遂生, 王戎瑞. 光电子技术—信息化武器装备的新天地[M]. 北京:国防工业出版社,2008.]
- [3] Maybeck P S, Mercier D E. A target tracker using spatially distributed infrared measurements [J]. IEEE Transactions on ACS, 1980, 25:222-225.
- [4] Xu Y. Small moving target detection in infrared image sequences [J]. Infrared Technology, 2002, 24(6): 27-30.
- [5] Peng Jiaxiong, Zhou Wenlin. Infrared background suppression for segmenting and detecting small target [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(12):47-51 [彭嘉雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测[J]. 电子学报, 1999, 27(12):47-51.]
- [6] Hu J, Tung W W, Gao J B. Detection of low observable target within sea clutter by structure function based multifractal analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(1):136-143.
- [7] Wang Guoyou, Chen Zhenxue, Li Qiaoliang. A review of infrared weak and small targets detection under complicated background [J]. Infrared Technology, 2006, 5(28):287-292. [汪国有, 陈振学, 李乔亮. 复杂背景下红外弱小目标检测的算法研究综述[J]. 红外技术, 2006, 5(28):287-292.]
- [8] Zhang Changcheng, Yang Degui, Wang Hongqiang. Algorithm surveys for dim targets track-before-detect in infrared image [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(2):104-107. [张长城, 杨德贵, 王宏强. 红外图像中弱小目标检测前跟踪算法研究综述[J]. 激光与红外, 2007, 37(2):104-107.]
- [9] HGH Infrared. Infrared Panoramic Surveillance Camera [EB/OL]. (2008-01-09). <http://www.hgh.fr/surveillance-panoramique-infrarouge-infrared-panoramic-vision-cn.php>.
- [10] Xu Jiangfeng, Zhang Yong, Tang Xinyi, et al. Research on real-time signal processing technology of large view field infrared image detecting system [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(6):421-425. [徐江丰, 张涌, 汤心溢, 等. 大视场红外成像探测系统实时信号处理技术研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(6):421-425.]
- [11] Zhang Shijun, Jing Zhongliang, Li Jianxun. Rotating mean filter and its application to the improvement of the signal to noise ratio of infrared point target images [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(5):391-394. [张世俊, 敬忠良, 李建勋. 旋转均值滤波及其在提高红外点目标图像信噪比中的运用[J]. 激光与红外, 2004, 34(5):391-394.]