

# 一种基于兴趣区提取的红外搜索系统目标 实时检测算法

王卫华 李志军 何 艳 陈曾平

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 ATR 国防科技重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 针对周扫红外搜索系统对空目标探测面临的图像数据量大、弱目标检测概率低、虚警率高等难点问题,提出了一种基于兴趣区(ROD)提取的目标实时检测算法。算法分析了周扫红外搜索系统获取的图像中目标与背景的特性,根据目标运动特性与灰度特性,在周扫红外搜索系统获取的整幅全景图像中快速提取目标可能存在的兴趣区;针对兴趣区内的局部目标图像切片,进一步精细检测识别,剔除虚假目标干扰。外场试验获取的实测数据目标检测结果表明,算法针对复杂低空背景下弱目标能够实现低虚警率稳健检测,已应用到了周扫红外搜索跟踪系统的工程样机研制中。

**关键词** 图像处理;红外搜索跟踪系统;兴趣区提取;弱目标;目标检测;实时算法

**中图分类号** TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1109001

## A Real-Time Target Detection Algorithm for Infrared Search and Track System Based on Region of Interest Extraction

Wang Weihua Li Zhijun He Yan Chen Zengping

(ATR Key Laboratory, Electronic Science and Engine Institute, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** With regard to the difficulties confronted in the aerial target detection of circumferential scan infrared search and track system, such as large image data quantity, low detection probability of weak target, high false detection rate and so on, a real-time target detection algorithm is proposed based on region of interest (ROI) extraction. It extracts the ROI of the suspected targets by quick real-time algorithm in the whole panorama image, based on the high frequency and movement characteristics of the target pixels. And then, focusing on the suspected target sliced images of ROI, it has further delicate detection and recognition to exclude those false jamming. The detection result of the test images shows, the algorithm has realized stable detection with low-rate false alarm for distant dim targets, and has been applied to the engineering sample of the panorama infrared search and tracking system.

**Key words** image processing; infrared search and track system; region of interest extraction; dim target; target detection; real-time algorithm

**OCIS codes** 100.3008; 100.2960; 040.2480

## 1 引 言

与传统的前视红外探测系统相比,红外搜索跟踪系统获取的图像数据量大,背景成分极其复杂,包含了地面建筑、天空云层、树木、飞鸟等各种干扰。如何在大数据量的全景红外图像中实时稳健地检测识别弱目标成为系统需要解决的关键问题。目前典型的预警红外搜索跟踪系统采用长波线列探测器,

通过 1 r/s 光机扫描实现 360°全景图像获取,输出高达 576×50000 byte/s 的高分辨全景长波红外图像<sup>[1]</sup>。针对如此大数据率中稳健目标检测的要求,本文提出了一种基于兴趣区(ROI)提取的处理算法,算法基于全景整幅图像目标灰度高频特性和运动特性,采用实时性好的快速算法实现疑似目标兴趣区的提取。针对提取的兴趣区目标图像切片,根

收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-01

作者简介: 王卫华(1980—),男,博士,讲师,主要从事红外目标识别方面的研究。E-mail: atrwwh@126.com

据目标特性进行进一步精细检测识别,剔除虚假目标干扰,这样就可实现全景图像的目标稳健低虚警实时检测。实测数据有效验证了算法的有效性。

## 2 目标及背景特性分析

目标与背景特性的差异是实现目标检测识别的基础<sup>[2]</sup>。图1显示了典型低空场景全景长波红外图像,4个条带每个条带显示方位范围 $90^\circ$ ,俯仰视场 $4.15^\circ$ 。图2显示了图1中局部放大的低空背景中远距离点目标和面目标的图像。

飞机目标典型低空背景全景红外图像具备如下的特征:

1) 全景图像数据量大,数据率高达  $576 \times$

50000 byte/s;

2) 远距离目标体现为弱小目标,对于正面迎头的飞机目标约为  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$  的小目标,侧飞的飞机目标则为低对比度的面目标,目标大小一般在  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$  与  $24 \text{ pixel} \times 24 \text{ pixel}$  之间;

3) 对于搜索系统  $1 \text{ frame/s}$  的帧频,根据目标运动速度以及相对于观测点的角度不同,目标在图像相邻帧间体现为每秒一定像素数的运动特性,具备相对规则的航迹,而背景相对静止;

4) 低空背景图像复杂,灰度起伏大,并且存在建筑、远距离山脉、云层、树木以及飞鸟等各类人工或者自然的干扰。

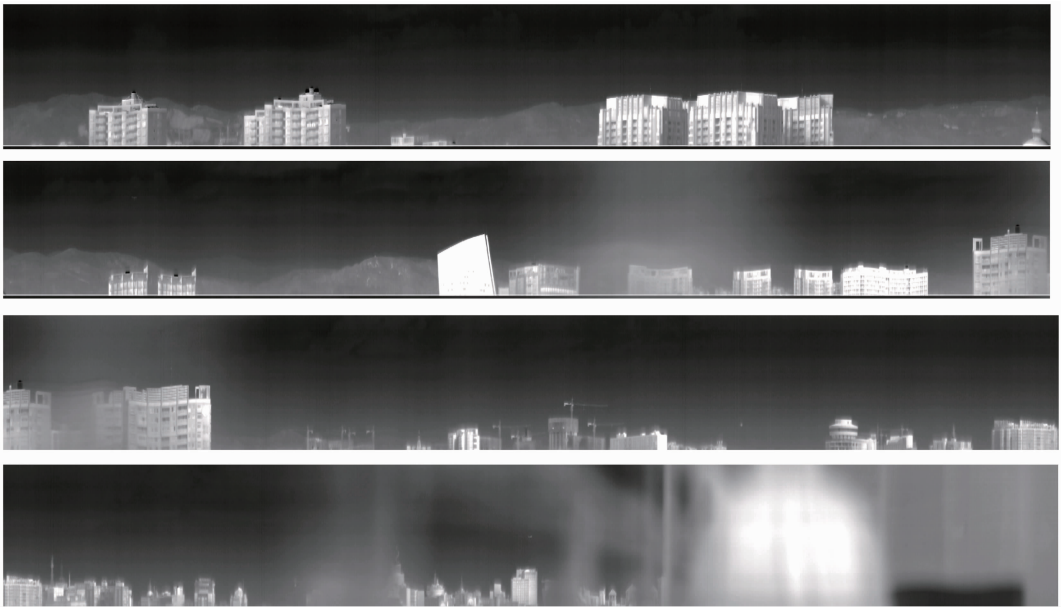


图1 典型场景全景长波红外图像

Fig.1 Typical panorama long-wave infrared image in natural environment

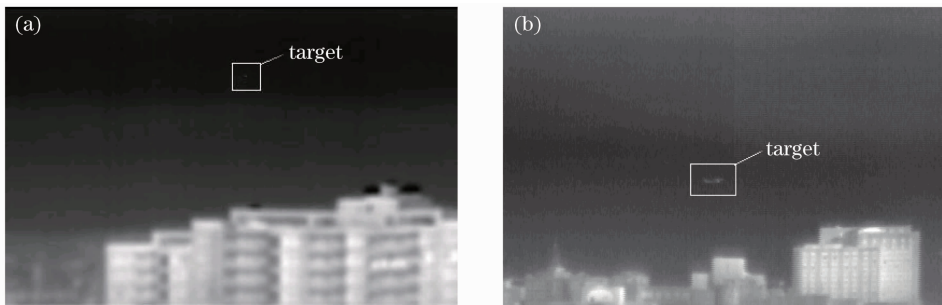


图2 飞机目标局部放大红外图像。(a)点目标图像;(b)面目标图像

Fig.2 Locally amplified infrared image of aircraft target. (a) Point target image; (b) area target image

远程预警的全景红外搜索跟踪系统对目标检测识别算法提出了很高的要求,首先是实现复杂低空全景背景下弱小目标的稳健低虚警率探测,其次是在高达  $576 \times 50000 \text{ byte/s}$  的数据量下算法的实时

性。要实现上述算法要求,红外目标检测识别算法的关键是立足于目标与背景特性的差异性,并综合硬件资源考虑算法的最优化。在低空背景红外图像序列中,在空域上,目标表现为单帧图像上灰度的局

部高亮度,而各类背景则与目标在灰度分布上存在差异;在时域上,目标体现为帧间的运动特性,而背景则相对静止。基于上述特征,采用一种目标兴趣区提起与兴趣区内目标精细识别的处理流程。这样既可以实现算法实时性,又能够实现目标稳健低虚警检测。

### 3 目标兴趣区提取

目标兴趣区提取的目的是从单帧高分辨率的海量图像数据中最快地提取出疑似目标区域。采用一种基于形态学滤波与邻域帧间差分处理的检测算法。其中形态学滤波侧重于抑制背景,增强远距离弱小目标的局部灰度高亮度特性,而邻域帧间差分处理侧重于增强目标的运动特性。二者同时处理能够全面突出目标与背景的特性差异,有效增强目标;同时,形态学滤波可以由硬件现场可编程门阵列(FPGA)实现,而差分处理运算量也相对较小,能够实现高分辨图像的实时处理。算法流程如图3所示。图像序列首先通过形态学滤波处理,然后对滤波后的图像进行时域上差分运算,对差分后的图像进行分块自适应检测以及聚类处理,得到粗检测后的疑似目标兴趣区。

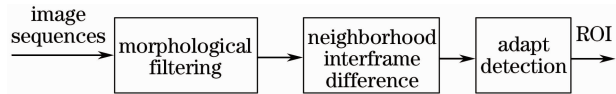


图3 目标兴趣区提取算法流程

Fig. 3 Procedure of target ROI extraction

#### 3.1 形态学滤波

形态学 Hop-hat 滤波的表达式为

$$g = f - (f \circ b), \quad (1)$$

式中 $\circ$ 表示形态学开运算符, $f$ 为输入图像, $b$ 为结构元素。在形态学滤波中,结构元素是最基本、最重要的概念,结构元素形状、大小设计的适当与否,将直接影响背景抑制的结果,需要针对具体目标与背景优化形态学算子。根据全景红外搜索系统关注的远距离目标,目标在图像中大小一般为  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$  至  $24 \text{ pixel} \times 24 \text{ pixel}$  间,这里选用  $25 \text{ pixel} \times 25 \text{ pixel}$  的方形结构元素对图像进行 Hop-hat 滤波。形态学运算耗时与结构元素的尺寸成正比。大尺度结构元素的使用,将大大增加运算量。通过结构元素分解可大大提高形态学运算效率<sup>[3]</sup>。在实际硬件实现时,可先将  $25 \text{ pixel} \times 25 \text{ pixel}$  的方形结构元素分解为  $1 \text{ pixel} \times 25 \text{ pixel}$  和  $25 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$  两个扁平结构元素的运算,然后将  $1 \text{ pixel} \times 25 \text{ pixel}$  和

$25 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$  的扁平结构元素分解成  $1 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  和  $3 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$  的小尺寸结构元素<sup>[4]</sup>,提高计算效率。

#### 3.2 邻域帧间差分处理

对于  $576 \times 50000 \text{ byte/s}$  分辨率的全景红外搜索跟踪系统,视场角为  $4.15^\circ \times 360^\circ$ ,单像素角分辨率为  $0.13 \text{ mrad}$ 。假设目标距离为  $20 \text{ km}$ ,设飞机目标处于巡航状态时速度约为  $300 \text{ m/s}$ ,飞行高度为  $5 \text{ km}$ ,可以计算当飞机正对观测点迎面飞行时,目标帧间运动像素数约为  $29$ ;当目标在垂直于探测器视线平面侧飞时,目标帧间运动像素数约  $119 \text{ pixel}$ 。由分析可知,目标在  $20 \text{ km}$  距离外迎头与正侧飞情况下帧间运动距离均远大于目标面积,目标在图像相邻帧间不存在重叠,而背景仅由于伺服不稳定造成随机的漂移。因此,目标的运动特征是其区别于复杂低空背景的重要特征<sup>[5]</sup>。然而直接将原始图像利用帧间差分提取目标是不合适的,因为探测器伺服周扫机构的不稳定性可能带来全景图像中局部的偏移,偏移可能达到  $2 \sim 4 \text{ pixel}$ ,另外大片的云层可能也存在缓慢运动。直接利用原始图像差分会导致高亮度背景偏移引起的虚假运动区域过多,进而影响真实弱小目标提取,而将经形态学滤波抑制高亮度缓变背景后的图像序列进行帧间差分可有效避免这一情况。另外,采用一种邻域差分算法,可以有效抑制随机缓动背景,增强运动目标。

邻域差分算法的主要思想是用当前帧位置  $(i_0, j_0)$  的像素值减去前一帧对应位置一定邻域范围内最逼近的灰度值,逼近准则是像素值绝对差最小。邻域差分算法能够解决一定范围内的缓动背景配准问题。传统的帧间差分运算为

$$\Delta f(i_0, j_0, k) = |f(i_0, j_0, k) - f(i_0, j_0, k-1)|. \quad (2)$$

邻域差分运算表达式为

$$\Delta f(i_0, j_0, k) = \min_{\substack{i_0 - i_m < i_0 < i_0 + i_m \\ j_0 - j_m < j_0 < j_0 + j_m}} [ |f(i_0, j_0, k) - f(i'_0, j'_0, k-1)| ], \quad (3)$$

式中  $i_m, j_m$  分别为前后帧图像俯仰方位邻域偏移度量值。由于在长波红外图像中目标表现为相对于背景的局部高亮度,故在帧间差分运算时仅保留差分为正值的部分,差分为负值的部分则直接赋值为  $0$ 。

#### 3.3 分区自适应检测

帧间差分后的图像,采用自适应门限对目标进行检测。对于  $576 \times 50000 \text{ byte/s}$  分辨率的图像,采

用单一的门限分割是不合理的,这里采用一种分区的自适应门限方法。具体实现是将图像按照  $576 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$  大小分区,为防止目标处于相邻区间交界处,相邻区间重叠  $100 \text{ pixel}$ ,这样共可分为  $100$  个区间。对于每个区间内的图像,可近似认为由目标信号、均匀背景信号以及高斯白噪声组成。对于高斯白噪声干扰下的信号检测,采用恒虚警门限检测算法,判决门限  $T_h$  为

$$T_h = u[F_d(i, j, k)] + T'_h \sigma, \quad (4)$$

式中  $u[F_d(i, j, k)]$  为当前区间图像的  $F_d(i, j, k)$  均值,  $\sigma$  为当前区间内图像灰度的标准差,  $T'_h$  为一个与目标全局信杂比相关的调节系数。从门限的选择可以看出,全局信杂比大于  $T'_h$  的目标都可以正常检测。实际实现时  $T'_h$  的选择与被检测目标的信杂比相关,在粗检测阶段要求不能漏检目标,故可将  $T'_h$  设置较低,一般  $T'_h$  取  $3 \sim 5$ 。各区间图像根据阈值进行检测,得到检测后的二值图像,对二值图像像素值为  $1$

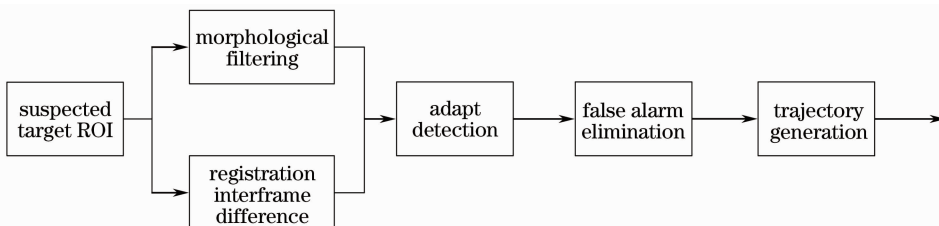


图 4 基于兴趣区的目标精细识别处理流程

Fig. 4 Processing of target meticulous recognition in ROI

#### 4.1 形态学滤波与配准帧间差分融合目标增强

为了消除由于伺服不稳定造成图像背景  $2 \sim 4 \text{ pixel}$  的漂移,首先对目标兴趣区与前一帧相同位置切片进行配准,配准后进行相邻帧间的差分运动目标增强,并将帧间差分的结果与兴趣区形态学滤波的结果进行相乘融合<sup>[6]</sup>。

#### 4.2 目标检测

对形态学滤波与帧间配准差分融合的结果进行自适应分割,分割的门限仍采用恒虚警自适应门限方法,只是调节系数  $T'_h$  此时的取值相对高,可取为  $8$ 。对分割后的二值图像选取距离切片中心最近为  $1 \text{ pixel}$  进行  $8$  邻域聚类,生成精检测后的目标序列  $\{T_d\}$ 。

#### 4.3 虚警剔除

对于精检测后生成的目标序列  $\{T_d\}$ ,根据以下  $5$  个目标特征量来进一步剔除虚警识别真实目标:

##### 1) 目标尺寸

红外搜索系统针对的远距离目标在图像上一般在  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$  至  $24 \text{ pixel} \times 24 \text{ pixel}$  间,目标检

测后尺寸不在区间范围的认为虚警予以剔除。

#### 3.4 兴趣区生成

根据疑似目标集合  $\{T_d\}$  的坐标,可以生成在原始图像中对应的疑似目标图像兴趣区  $\{f_d\}$ 。后续的精识别处理均在疑似目标图像兴趣区  $\{f_d\}$  中进行,这样相对于全幅图像处理可以大大节约计算量。在目标图像兴趣区生成前,首先要剔除面积尺寸不在  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$  至  $24 \text{ pixel} \times 24 \text{ pixel}$  区间的疑似目标。目标图像兴趣区的大小取为固定值  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 。

### 4 基于目标特征的精细识别

兴趣区提取出疑似目标序列  $\{T_d\}$  中,包含有云层边缘、地物建筑边缘、地物固定亮点、探测器噪点、飞鸟等各种虚假目标。精细识别的目的是在疑似目标兴趣区中提取真实目标,实现低虚警率的目标探测。目标精细识别算法流程如图 4 所示。

测后尺寸不在区间范围的认为虚警予以剔除。

##### 2) 目标局部信杂比

局部信杂比反映了小目标在局部区域相对于背景杂波起伏的明亮程度。其定义为  $R_{\text{SNR}} = \frac{f_T - f_B}{\sigma}$ ,其中  $f_T$  取目标的灰度均值,  $f_B$  为目标周围一定邻域背景杂波的灰度均值,  $\sigma$  为邻域内背景杂波的标准差。设置系统可检测最低目标局部信杂比为  $2$ ,小于最低目标可检测局部信杂比的认为虚警予以剔除。

##### 3) 目标局部对比度

目标局部对比度描述的是目标与周围背景之间灰度或者亮度的差异。定义为  $C_2 = \frac{f_T - f_B}{f_B}$ ,设置系统可检测最低目标局部对比度为  $20\%$ ,小于最低目标可检测局部对比度的认为虚警予以剔除。

##### 4) 目标高低门限检测面积比

对于形态学滤波与配准帧间差分融合的图像,恒虚警准则判决门限  $T_h = u[y(i, j, k)] + T'_h \sigma$ ,根据

调节系数  $T'_n$  取值的不同,分割出的目标及虚警数量及面积各不相同。其中对于真实目标,  $T'_n$  的取值分别取一个高门限和一个低门限时,真实目标的分割面积基本不变,而对于云层边缘,当  $T'_n$  的取值分别取一个高门限和一个低门限时,对应云层边缘虚警的分割面积比则偏差较大,通过设定一定目标高低门限检测面积比的阈值范围,可以实现部分云层边缘虚警的剔除。

#### 5) 目标局部分割占空比

根据目标与云层边缘灰度分布差异<sup>[7]</sup>可知:真实目标中心灰度区域最高,向周围逐渐衰减扩散,周围局部邻域内背景灰度变化平缓,而云层边缘灰度呈由暗变亮逐步增加。如果以待选目标中心取一小范围邻域,以目标中心灰度值为阈值分割后,真实目标邻域分割结果会只占几个像素,而云层边缘分割后大于阈值的点会占邻域范围很大部分。基于上述思想,定义目标局部分割面积比为目标一定范围邻域开窗分割后目标面积与邻域大小的比值,通过判决目标局部分割面积比小于一定阈值则判决为真实目标,否则为云层边缘虚警予以剔除。

#### 4.4 航迹生成

经过虚警剔除后,对剩余的目标进行编批建航处理,形成目标航迹,根据目标航迹与目标面积进一步确认目标,剔除残留的飞鸟等自然运动物的干扰。目标航迹生成由以下两个主要步骤组成:

1) 航迹建立:基于目标在短时间内相邻帧间近似为匀速直线运动的规律建立航迹;

2) 航迹确认:对于当前帧所有检测出的目标,根据航迹顺延准则确认是否为已有航迹的顺延。剩余的疑似目标则根据航迹生成准则建立新的航迹。

对于已建立航迹的目标,则可以提取其角速度信息,根据角速度及目标尺寸可以实现目标速度判决。具备规则航迹的为飞机目标,不规则的为飞鸟等自然背景干扰。

## 5 试 验

采用实测的图像序列验证算法。图 5 为针对图 1 中第 3 个条带后兴趣区提取后生成的目标二值图像,其中方框处为真实目标,其余亮点均为噪声或者建筑边缘产生的虚假目标。图 6 为放大后的目标兴趣区检测结果,其中(a)为提取的目标兴趣区,(b)为目标兴趣区切片进行融合增强后的图像,(c)为目标融合分割后的图像,(d)为航迹生成确认后形成的跟踪目标波门。建筑边缘等虚假目标兴趣区切片均在精细检测识别阶段予以了剔除。算法已经实现在基于双 DSP6455+FPGA 的实时信息处理板中,其中兴趣区提取的形态学滤波部分在 FPGA 中实现,其余算法部分在双 DSP6455 中实现,实现了  $576 \times 50000$  byte/s 分辨率图像最多 20 批目标的检测,单帧处理时间控制在 1 s 以内。



图 5 兴趣区提取后目标二值图像

Fig. 5 Suspected target binary images after ROI extraction

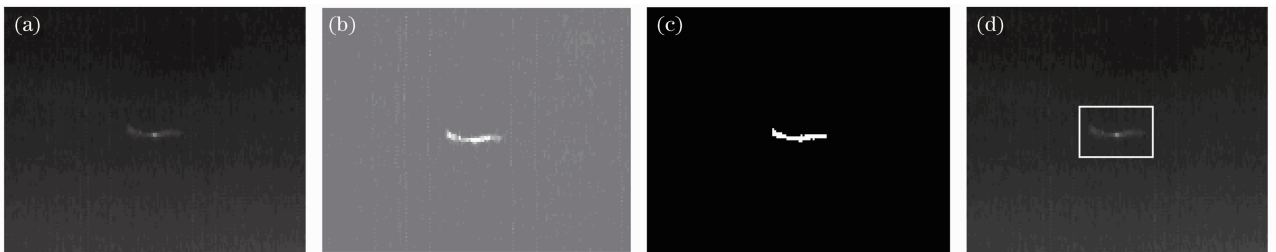


图 6 目标切片精细检测识别处理结果。(a)目标兴趣区;(b)融合增强图像;(c)分割图像;(d)确认目标波门

Fig. 6 Result of target ROI processing. (a) Target ROI; (b) enhanced images after fusion; (c) segmented images; (d) recognized target tracking window

## 6 结 论

针对全景红外搜索跟踪系统获取的高分辨率图

像实时目标检测信息处理的需求,本文提出的兴趣区提取+精细识别的处理算法能够有效兼顾实时性

和弱目标低虚警检测要求。在全幅图像处理时采用硬件实现快速的算法实现疑似目标兴趣区的提取,采用低门限检测实现不漏警,得到疑似目标兴趣区后利用小尺寸目标切片进行精细检测识别,剔除粗检测时产生的虚警。算法有效地应用到了系统工程样机研制的实时信息处理机中,实测数据结果表明,算法针对远距离弱小目标能够实现低虚警率稳健实时检测。

### 参 考 文 献

- 1 Fan Hongbo. A high performanceIRST system based on 1152×6 LWIR detectors[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(1): 20~24  
范宏波. 基于 1152×6 长波线列探测器的高性能红外搜索预警系统[J]. *红外技术*, 2010, **32**(1): 20~24
- 2 Zhang Yanan, Tang Xinyi. Research on performance evaluation approaches of infrared automatic target recognition algorithms [J]. *Infrared*, 2007, **28**(6): 15~20  
张亚楠, 汤心溢. 红外自动目标识别(ATR)算法性能评估的方法研究[J]. *红外*, 2007, **28**(6): 15~20
- 3 Frank Y. Shih, Yi-Ta Wu. Decomposition of arbitrary gray-scale morphological structuring elements [J]. *Pattern Recognition*, 2005, **38**(12): 2323~2332
- 4 Huang Zongfu, Wang Weihua, Han Jiantao *et al.*. A real-time algorithm for weak small targets detection in astronomical optoelectronic image sequences[J]. *Signal Processing*, 2010, **26**(9): 1379~1384  
黄宗福, 王卫华, 韩建涛 等. 一种天文光电图像序列弱小目标实时检测算法[J]. *信号处理*, 2010, **26**(9): 1379~1384
- 5 Luo Huan, Wang Fang, Chen Zhongqi *et al.*. Infrared target detecting based on symmetrical displaced frame difference and optical flow estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1715~1720  
罗 寰, 王 芳, 陈中起 等. 基于对称差分和光流估计的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1715~1720
- 6 Hu Moufa. Research on Detectiong Technology of Dim and Small Targets in Large Field of View and Complicated Background[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2008. 143~149  
胡谋法. 复杂背景下大视场弱小目标检测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. 143~149
- 7 Guo Wei, Zhao Yigong, Xie Zhenghua *et al.*. New method for cloud description and dim small infrared target detection based on nonparametric statistics[J]. *J. Infrared Millimicrowave*, 2008, **27**(5): 383~388  
郭 伟, 赵亦工, 谢振华 等. 基于非参数统计的云层背景描述与红外弱小目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(5): 383~388

栏目编辑:宋梅梅