

文章编号: 0253-2239(2009)11-3066-06

# 面阵扫描型警戒系统目标探测方法

钱惟贤 管志强 陈 钱 顾国华

(南京理工大学远程高速目标探测技术国防重点实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要** 根据红外面阵探测器的成像特点,提出了一种面阵扫描型警戒系统,该系统的新颖之处在于面阵的旋转会带来目标探测有效像元数目的增加,并使得目标探测信噪比得到提高。描述了使用面阵探测器扫描型警戒系统的系统参数和工作过程,推导了该系统的点扩散模型,分析了目标的成像特点,重点描述和分析了针对本系统特点的目标探测算法,并介绍了其信号处理的硬件结构。实验结果表明,基于面阵探测器的红外搜索系统具有很高目标探测概率,并且能够在强杂波环境中检测弱目标。

**关键词** 红外技术; 红外搜索跟踪系统; 目标检测; 面阵探测器

**中图分类号** TN911 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3066

## Target Detection Method of Focal Plane Array Search System

Qian Weixian Guan Zhiqiang Chen Qian Gu Guohua

(Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** In accordance with the features of the area infrared focal plane array (AFPA), a new focal plane array search system is introduced. The system's innovation lies in that the AFPA's rotation will increase the number of the target detection effective pixel, and this will increase the target detection signal to noise ratio (SNR). Firstly, the parameters of focal plane array search system's and its work process, then deduces the system point spread model are described and the imaging characteristics of the target is analyzed. Secondly the target detection algorithm is described and analyzed, and the signal processing hardware architecture is introduced. Finally the experimental results show that the focal plane array search system has high target detection probability, and can detect dim target in the strong clutter environment.

**Key words** infrared technique; infrared search and track system (IRST); target detection; area infrared focal plane array (AFPA)

## 1 引 言

传统的无线电警戒雷达在现代战争中依然处于主导地位,然而其在探测地面、海面、低空、超低空和掠海飞行目标时易于受到地杂波、海杂波及多径效应影响,使其目标分辨能力、目标指示精度和目标探测概率降低其应用受到较大局限。此外,无线电警戒雷达往往以较大发射功率工作,在电子战技术高度发展的今天,往往易于成为反辐射攻击的目标,其战场生存能力受到严重挑战。

在这种背景下,红外警戒探测系统应运而生,并得到迅速发展<sup>[1~6]</sup>。从目前已装备的全方位红外警

戒系统看,探测装置都采用线阵探测器,旋转速度从 1 r/s 到 3 r/s,探测距离在 10 km 以上。但这种扫描结构使得其结构复杂且灵活性低,而一个红外搜索跟踪系统应该具有以下功能<sup>[1]</sup>:360°的全方位扫描;低虚警率的自动目标探测;具备自动跟踪能力;如果可能,应对重点方向实施重点监测。

使用面阵探测器通过面阵探测器连续旋转能够实现 360°全方位探测,并且较容易实现变速扫描以对重点区域实行重点监测,而不用于搜索的主要原因是其在采用连续扫描方式成像时,在探测器积分时间内焦平面和景物之间会产生相对运动,从而使

收稿日期: 2008-12-19; 收到修改稿日期: 2009-02-17

作者简介: 钱惟贤(1980—),男,讲师,博士研究生,主要从事红外图像工程方面的研究。E-mail: developer\_plus@163.com

导师简介: 陈 钱(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测与成像技术等方面的研究。

E-mail: cheng@mail.njust.edu.cn

图像变得模糊;虽然图像质量降低,不利于人眼观察,但作为系统主要功能的自动探测目标,仍然可以通过自动检测算法指示其方向,并且当系统检测到特定目标时,可以立即转为闭环跟踪状态,使从搜索到跟踪状态转换简单、高效。

本文介绍了基于面阵探测器的全方位警戒系统的构成与工作参数,得出面阵的模糊退化模型。在分析了基于面阵探测器目标探测特点的基础上,给出了目标检测流程和硬件实现平台,实验验证了基于面阵探测器的警戒系统在探测目标方面的可行性和有效性。

## 2 系统构成

本文所描述的基于面阵探测器的全方位红外警戒系统结构如图 1 所示,探测器由控制系统作全方位扫描,旋转速度是 2 r/s,使用的探测器分辨率为 256 pixel×320 pixel,视场大小为 3.6°×4.5°,帧频 100 frame /s,探测器的输出图像送入目标检测部分,将检测到的目标进行显示。

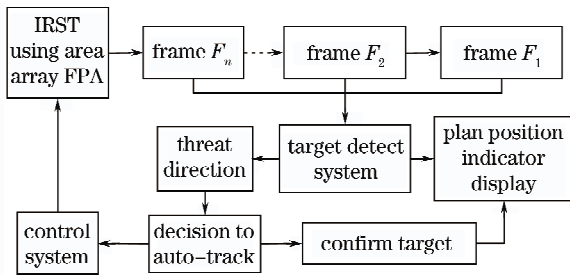


图 1 系统构成

Fig. 1 System architecture

本系统与一般的红外搜索跟踪 (IRST) 系统的主要差别在于使用面阵探测器,其积分时间为 3 ms,同一扫描周期下,相邻两帧图像重叠半幅图像,重叠部分可以避免边界带来的盲区,还可以通过前后帧的冗余以降低虚警率。其成像方式与使用线阵探测器的示意图如图 2 所示。

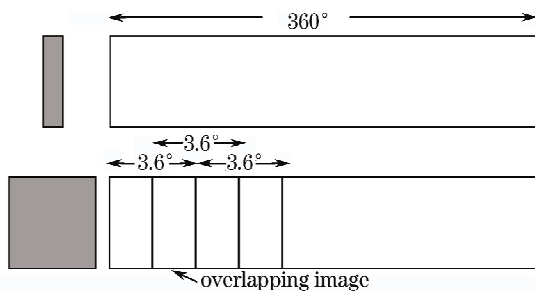


图 2 线阵与面阵扫描模式对比

Fig. 2 Two different scan mode

## 3 面阵探测器目标特征

### 3.1 成像模型<sup>[7]</sup>

设探测器做水平运动,探测器的积分时间为  $T$ ,探测器像元数为  $M \times N$ ,其中  $M$  是水平像元个数, $N$  为垂直像元个数。则场景图像  $f(x, y)$  在探测器上的结果为

$$g(x, y) = \int_0^T f[x - x_0(t), y] dt + n(x, y), \quad (1)$$

式中  $x_0(t)$  是在运动方向上的时间变化参数,这里假设为匀速运动,即:  $x_0(t) = Lt/T$ ,  $L$  为拖尾的长度,  $n(x, y)$  为探测器和电路的噪声总和。将 (1) 式写成离散形式为

$$g(i, j) = \frac{1}{L} \sum_{k=i-D}^i f(k, j) + n(i, j), \quad (2)$$

则图像退化模型的点扩展函数 (PSF) 为

$$h(x) = 1/L \quad 0 \leq x < L. \quad (3)$$

从 (3) 式可以看出,探测器运动造成的模糊相当于用  $L \times 1$  的窗口进行平滑滤波。若  $L$  取值为 30, 则其幅频响应曲线如图 3 所示。

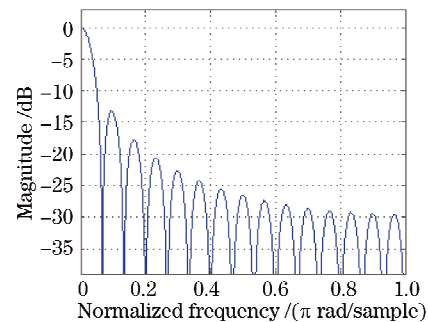


图 3 幅频相应曲线

Fig. 3 The amplitude-frequency curve

本文所描述的基于面阵探测器的全方位红外警戒系统为全方位扫描,当旋转速度为 2 r/s,积分时间 3 ms 时,在积分时间内探测器转过的角度是 0.54°,托尾长度约为 38 pixel。

而目标的宽度  $N_w$  (像素数) 为

$$N_w = n_H n_V = \frac{HV \sin \theta}{S^2 \alpha_0^2}. \quad (4)$$

式中  $n_H$  为目标水平方向像素尺寸,  $n_V$  为目标垂直方向像素尺寸,  $\theta$  为目标运动方向与光学系统主轴的夹角,  $H \times V$  为目标的几何尺寸,  $S$  为目标距系统的距离,  $\alpha_0$  为像元的角分辨率。

如图 2 所示,面阵旋转后,在一圈范围之内,会有多帧图像探测到目标,在一圈范围探测目标的次数称之为重复频率  $f_{PRF}$  :

$$f_{PRF} = (M\alpha_0 T_{circle}) / (360^\circ \times T_{frame}), \quad (5)$$

式中  $T_{circle}$  为旋转一圈所花的时间,  $T_{frame}$  为面阵帧频。由于拖尾造成图像退化, 这样造成的信噪比损失为

$$r_{SNR} = r_{SNR_0} / L, \quad (6)$$

式中  $r_{SNR}$  为旋转后的信噪比,  $r_{SNR_0}$  为静止时信噪比。在一圈范围之内, 会有  $f_{PRF}L$  个像素探测到目标, 将这些像素累加, 则旋转后的信噪比变为

$$r_{SNR} = \sqrt{f_{PRF} / L} r_{SNR_0}. \quad (7)$$

从上面的分析可以得到结论: 只要  $f_{PRF}$  大于托尾的长度  $L$ , 旋转会带来信噪比的提高, 一般情况下认为面阵不旋转时信噪比与线阵扫描的信噪比相当。这也就意味着  $f_{PRF}$  大于托尾的长度  $L$ , 面阵扫描型警戒系统的性能就将优于线阵。而如何有效地利用好面阵扫描时的拖尾效应是发挥面阵扫描性能的关键所在, 而这也正是本文算法区别于其它目标识别算法的关键。图 4 箭头所指处分别为面阵探测器静止和旋转状态下在同一时刻获得的飞机图像。

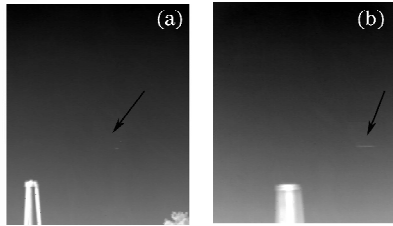


图 4 同一时刻静止(a)与旋转(b)探测到的目标

Fig. 4 Static (a) and rotating (b) target at the same time

### 3.2 目标运动特征

假定来袭目标大小为  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ , 其飞行速度为  $200\text{ m/s}$ , 距离  $15\text{ km}$ , 高度  $1000\text{ m}$ , 直行迎头飞行(如图 5 所示)。

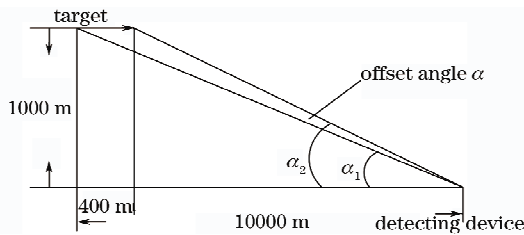


图 5 目标探测示意图

Fig. 5 Schematic diagram of target detection

经过一周旋转运动后, 目标运动  $400\text{ m}$ , 则目标的垂直偏移角为  $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = 0.236^\circ$ ; 如果垂直分辨率为  $320\text{ pixel}$ , 则目标在相邻的两帧出现在探测器的位置垂直的距离相差为  $16.8\text{ pixel}$ 。如果来袭目标与探测器的光轴存在一定的角度, 则目标在探测器上的投影位置变化量将会发生更大的变化。

## 4 目标探测算法<sup>[8~15]</sup>

对一幅包含目标的红外图像序列可以用下式描述

$$f(x, y, k) = f_T(x, y, k) + f_B(x, y, k) + N(x, y, k), \quad (8)$$

式中  $f(x, y, k)$  表示在图像上点  $(x, y)$  在第  $k$  帧的灰度值,  $f_T(x, y, k)$  表示目标经过该点时的灰度值,  $f_B(x, y, k)$  表示背景的灰度值,  $N(x, y, k)$  可以等效为由电路部分引起的噪声总和。

探测算法的处理过程分为背景杂波抑制和目标提取两个部分, 提取后的目标送入轨迹关联处理进行数据关联和航迹处理。

根据上文的目标特性分析, 在面阵探测器上目标除了具有运动特征外, 在空间分布上还具有水平方向的相关性和垂直方向的奇异性(如图 6 所示), 本文所描述的探测算法正是基于这些特性。

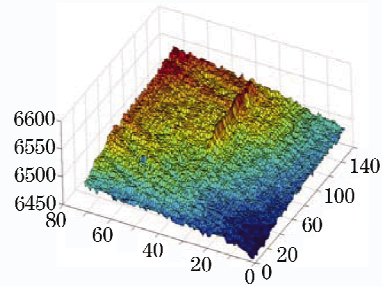


图 6 目标空间三维图

Fig. 6 Target space three-dimensional map

### 4.1 算法描述

从目标的形状分析可以看出, 线状目标与点目标有较大差别, 点目标不具备水平的形状特征, 因此检测算法也有部分差别, 算法步骤描述如下:

#### 4.1.1 背景杂波抑制

其功能是提高目标的信噪比, 抑制背景杂波和对目标进行增强, 下面分别介绍。

##### 1) 图像预处理

在同一扫描周期  $k$  内的相邻帧图像  $f_m^k$  与  $f_{m-1}^k$ ,  $f_{m+1}^k$ , 尺寸为  $M \times N$ , 水平重叠区域为  $X$  个像素帧图像进行累加得到  $f_{am}^k$ , 然后将图像与模板  $h$  进行卷积得到  $f_m^k$ 。

$$f_{am}^k(i, j) = \begin{cases} f_m^k(i, j) + f_{m-1}^k(i, N-j+1), & i \in [1, N], j \in [1, X] \\ f_m^k(i, j) = f_m^k + 1(i, N-j+1), & \\ f_m^k(i, j) = f_m^k + 1(i, N-j+1), & i \in [1, N], j \in [X+1, N] \end{cases} \quad (9)$$

$$f_m^k = f_{am}^k * h, \quad h = \{1, 1, 1\}, \quad (10)$$

式中  $i$  为图像的行坐标,  $j$  为图像的列坐标。

2) 帧差法

将经过预处理的图像与同一视场标号下之前相隔  $n$  帧的经过同样处理的图像作差,其结果为  $d_i^k$ ,

$$d_i^k = f_i^k - f_i^{k-n}. \quad (11)$$

3) 匹配滤波

根据目标的形状特点,对作差后的图像  $d_i^k$  进行匹配滤波,使用卷积模板为  $h_p$ :

$$g_i^k = h_p * d_i^k, \quad (12)$$

$$h_p = \begin{Bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{Bmatrix}.$$

4.1.2 目标提取

经过杂波抑制的图像,对图像进行分割和目标提取,步骤如下:

1) 图像分割

为使目标数不超过后端的航迹处理的能力,对经过二次检测的结果图像  $g_i^k$  利用恒虚警率原理分割.假设  $p(x)$  为  $g_i^k$  的概率密度分布,令

$$F(x) = \int_0^x p(t) dt, \quad (13)$$

可见  $F(x)$  是递增函数.通过求解方程

$$1 - P_{fa} = \int_0^T p(x) dx, \quad (14)$$

可以得到阈值  $T$ ,其中  $P_{fa}$  为恒虚警率,本文  $P_{fa}$  选取为  $5 \times 10^{-2}$ .

2) 像素抽取

对经过分割后的二值图像进行像素抽取以降低图像的分辨力,新的图像的垂直和水平的分辨率均为输入图像的  $1/2$ .

$$k(i, j) = \begin{cases} 1, & \sum_{k=0, l=0}^{k \leq 2, l \leq 2} b(2i+k, 2j+l) < 3 \quad i < M/2, \\ 0, & \text{else} \quad j < N/2, \end{cases} \quad (15)$$

3) 形状识别

对分割后的目标,使用 Freeman 码进行描述,本文使用 8 邻域的 Freeman 码,方向表示如图 7 所示.

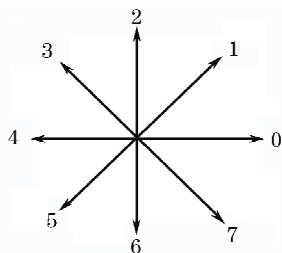


图 7 8 邻域链码方向

Fig. 7 8-neighbor chain code direction

当满足以下两个条件时,该 Freeman 码所描述的连通域即可被认为是目标:

i) Freeman 码长度在  $L \pm 5$  范围内 ( $L$  为目标长度).

ii) 水平码方向码的比重,即其中 0 的个数  $n_0$  与 4 的个数  $n_4$  总和占总长度的 90%.

4.2 算法硬件实现

上述算法,采用分级流水线的处理方式,每一级完成特定功能,并将处理后将结果送入下一级处理,以满足实时性的要求.

图像二维空间处理易于硬件实现,因此背景杂波抑制部分在现场可编程门阵列(FPGA)实现,在图像存储阵列中存储背景图像.目标提取模块具有较高的复杂性,在 FPGA 中实现难度较大,因此在两块 TI 公司的 TMS320DM642 高性能定点 DSP 芯片中软件实现,主频为 600 MHz,并且具有 3 个可配置的视频口 (VideoPort),通过视频口以原始数据 (Raw Data) 格式可以很方便的完成以图像帧的数据交换,DM642-1 完成图像分割和像素抽取算法,DM642-2 完成目标提取算法,其硬件结构如图 8 所示.

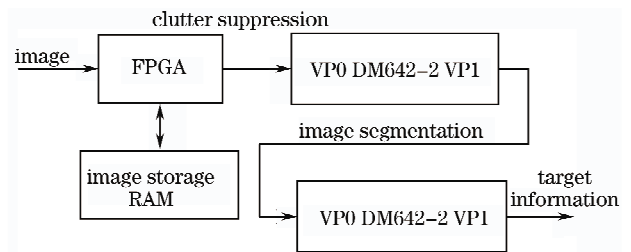


图 8 信号处理硬件结构

Fig. 8 Signal processing hardware structure

4.3 算法分析

1) 在同一扫描周期,利用相邻帧间的重叠部分累加,可以提高信噪比  $\sqrt{2}$  倍,用模板  $h$  对图像进行卷积,同样可以使信噪比提高.

2) 基于前面的分析,即使在直行临飞的情况下,目标在探测器上不同的扫描周期上仍有一定位移,而背景杂波如云层、地面和建筑等,在扫描周期时间内基本是不动或者移动非常缓慢的,因此使用帧差法是可行有效的。

3) 经过帧差法得到的图像,如果直接对其分割,弱目标都会淹没在噪声中,另外由于转台的旋转稳定原因,在水平方向图像会出现一定的位移,导致出现垂直方向的残差。由于线目标具有水平方向的长度和垂直方向奇异的特征,背景残差主要是垂直方向,对纹理特征明显的区域会大面积出现,因此依据这些特征,使用匹配滤波器,对帧差图像进行对在一定范围内的水平晃动误差具有“免疫”能力,可以减弱因晃动产生的边缘残差,并且易于在 FPGA 中实现。

4) 经过分割后的图像,存在许多的单像素亮点,如果直接对其使用链码进行目标形状识别,将会大大增加程序的运行时间和存储空间,并且高分辨率图像的链码运算也占用大量的时间和空间,因此,使用式(13)的抽取运算降低图像的分辨率,既可以消除单像素的亮点,又可以大大减少后面链码程序的运行时间和存储空间。

5) 因为目标具有一定长度和宽度的线状特征,依据此特征,作为目标提取的依据。图 9 是另一组检测结果,在右上角和左下角均有干扰,但其形状与长度与目标具有显著差别,因此被剔除。

## 5 实验结果

仿真试验选取一段以天空和地面结合为背景的红外图像序列,在强杂波环境中的目标识别中,信号与杂波比  $r_{SCR}$  是体现算法的优劣的主要指标,定义目标的信杂比  $r_{SCR}$  如下:

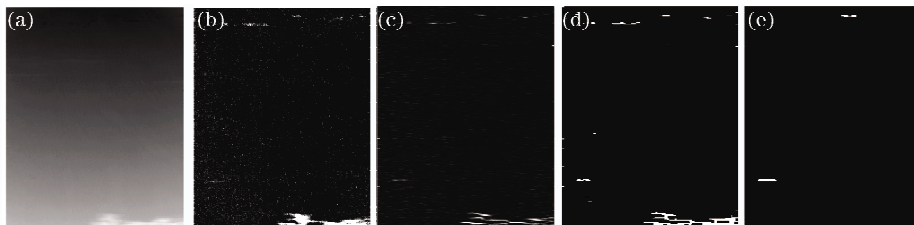


图 10 85 frame 处理的中间过程与结果。(a)原图像;(b)差值图像;(c)目标增强结果;(d)分割结果;(e)目标提取结果

Fig. 10 The 85 frame processing result. (a) original image; (b) difference image; (c) target enhance result;

(d) target partition result; (e) target extraction result

## 6 结 论

全方位红外搜索系统是一种适用广泛的警戒系

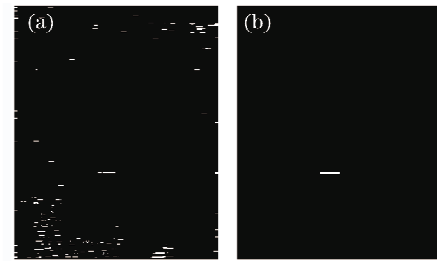


图 9 经过链码限制条件提取的目标。

(a)提取前;(b)提取后

Fig. 9 The extraction target after chain code.

(a)Image before extraction;(b)image after extraction

$$r_{SCR} = \frac{f_T - f_C}{\sigma_C}, \quad (16)$$

式中  $f_T$  为目标的灰度,  $f_C$  为目标周围背景的平均灰度,  $\sigma_C$  为图像的标准差。

对差值图像分别使用形态学 Tophat 方法、 $5 \times 5$ 高通滤波方法和匹配滤波的方法进行比较,对滤波后的目标信噪比分别为:

表 1 形态学、高通滤波与匹配滤波算法比较

Table 1 Difference among morphology, high-pass filter, matched filter

	Tophat $7 \times 3$	Tophat $5 \times 5$	High-pass filter $5 \times 5$	Matched filter
First find frame	97	99	97	85
First find $R_{sc}$	0.0453	0.0488	0.0453	0.0231

从表可见,匹配滤波性能远好于其他方法,比其他方法能够至少提前 10 个扫描周期(20 s)发现目标;不同的形态学算子略有影响,但不明显。

下面给出试验过程中的序列检测的过程(如图 10 所示)和提取中间的关键帧(如图 11 所示)。

统,使用线阵探测器虽然已经在国外的实际系统中被采用,但是其扫描结构导致其结构复杂而且灵活

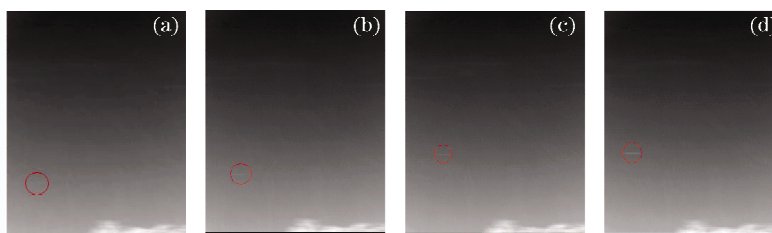


图 11 捕获目标临近过程中的关键帧

Fig. 11 The key frame in the target extraction

性低。基于面阵探测器的搜索跟踪系统同样具有较高的探测率和较低的虚警率。因此该系统也具有很高的研究价值和实用价值。

本文论述了基于面阵探测器预警系统的工作方式,推导了目标成像模型,给出了该系统的目标探测算法和硬件实现结构,并通过试验证明,使用面阵探测器作为全方位预警系统是可行有效的。本系统所使用的目标探测算法处理速度可以达到 100 frame/s,实时性完全可以满足要求。

目前该系统也具有一些不足:由于目标具有一定的长度,使对目标指示精度不高;因此如何进一步提高目标的探测率和提高目标的指示精度是下一步的研究重点。

### 参 考 文 献

- 1 Yu Yanmei, Wang Danwei. Foreign ship-based search and track technology development research[J]. *Intelligence command and control systems and simulation technology*, 2003, 5: 7~10  
于彦梅,王丹伟. 国外舰载搜索跟踪技术发展研究[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2003, 5: 7~10
- 2 Han Genjia. Present status and development trend of shipborne IRSTs[J]. *Modern Defence Technology*, 2007, 35(3): 109~116  
韩根甲. 舰载红外搜索与跟踪系统的最新现状与发展趋势[J]. 现代防御技术, 2007, 35(3): 109~116
- 3 Luo Junhui, Ji Hongbing, Wang Yanguang. System design and realization of the all direction IRST [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 869~872  
罗军辉,姬红兵,王延光. 全向红外搜索跟踪系统的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 869~872
- 4 N. Acito, G. Corsini, M. Diani. Detection performance loss due to jitter in naval IRST systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(1): 326~338
- 5 M. Diani, N. Acito, G. Corsini. Airborne threat detection in navy IRST systems[C]. *Vision, Image and Signal Processing, IEE Proc.-Vis. Image Signal Process*, 2005, 152(1): 45~51
- 6 Chtister Wigren. A generic IRST detection performance model [C]. *SPIE*, 2000, 4030: 206~217
- 7 Wang Bingxue, Zhang Qiheng, Chen Changbin. A mathematical model for operating range of a staring IR search and track system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(7): 8~11  
王兵学,张启衡,陈昌彬等. 凝视型红外搜索跟踪系统的作用距离模型[J]. 光电工程, 2004, 31(7): 8~11
- 8 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Gu Guohua *et al.*. Dim target detection based on optical flow histogram in low frame frequency in clouds background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 1496~1501  
管志强,陈钱,顾国华等. 基于光流直方图的云背景下低帧频小目标探测方法[J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1496~1501
- 9 Wang Xiangjun Wang Yan, Li Zhi. Fast target recognition and tracking method based on characteristic corner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 360~364  
王向军,王研,李智. 基于特征角点的目标跟踪和快速识别算法研究[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 360~364
- 10 Li Hong, Zheng Chengyong, Gao Jingli. Weak and small object detection based on wavelet multi-scale analysis and fisher algorithm [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2003, 22(5): 353~356  
李红,郑成勇,高景丽. 基于小波多尺度分析及 Fisher 分割的红外弱小目标检测[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 353~356
- 11 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. An adaptive background adjusting algorithm for dim target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2163~2168  
管志强,陈钱,钱惟贤等. 一种基于背景自适应调整的弱点目标探测算法[J]. 光学学报, 2007, 27(12): 2163~2168
- 12 Hu Xin, Tang Shuo. Target detection using filter by reconstruction on complete lattices in infrared image [J]. *J. Image and Graphics*, 2008, 13(1): 95~99  
胡欣,唐硕. 基于完备格的重构滤波器在红外图像目标检测中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(1): 95~99
- 13 Lou Yue, Xiang Libin, Liu Bo. A fast background roughness-based infrared navel vessel target detection algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(9): 1759~1763  
娄越,相里斌,刘波. 基于背景粗糙度估计的红外目标检测算法[J]. 光子学报, 2007, 36(9): 1759~1763
- 14 Ling Jianguo, Li Erqi, Liang Haiyan *et al.*. Infrared target extraction method based on kernel density estimation [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, 25(6): 434~438  
凌建国,刘尔琦,梁海燕等. 基于核密度估计的红外目标提取方法[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(6): 434~438
- 15 Zheng Wenlong, Zhang Yong, Tang Xinyi *et al.*. Real-time recognition of infrared small targets in complicated ir background [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2001, 20(6): 433~436  
郑文龙,张涌,汤心溢. 复杂背景下红外小目标实时识别方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2001, 20(6): 433~436