

红外面阵旋转搜索系统下的恒虚警检测方法

费小亮,任侃,钱惟贤,汪鹏程,陈钱

(南京理工大学 电光学院,江苏 南京 210094)

摘要: 红外面阵旋转搜索系统因其系统结构简单、灵活性高、成本较线阵低等优点备受关注。在红外面阵旋转搜索系统中,复杂背景下的弱小目标检测是一个难题。为了有效抑制背景干扰,降低复杂背景带来的虚警,针对红外面阵旋转扫描系统的成像特性,提出了基于线目标特征加权的恒虚警检测算法。首先,通过背景抑制和阈值分割初步得到离散的潜在目标点迹图。其次,研究分析了线目标的三类特征,并对各类特征进行量化和加权处理,从而得到总的加权值;最后,将加权值映射到离散的目标点迹图上,得到关于加权值的图像序列,再通过恒虚警检测方法得到新的分割阈值,达到二次分割的目的,从而抑制背景干扰、减少虚警和误判。实验结果表明:该方法可以显著地减少红外面阵旋转搜索系统中复杂背景造成的虚警,并保证能够有效检测出弱小目标。

关键词: 红外面阵旋转搜索系统; 线目标; 特征加权; 恒虚警; 图像处理

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0204003

Constant false alarm rate algorithm in infrared focal plane array rotation search system

Fei Xiaoliang, Ren Kan, Qian Weixian, Wang Pengcheng, Chen Qian

(School of Electric & Optic, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Infrared focal plane array rotation search system catches attention because of simple system structure, high flexibility and low cost compared with the linear array search system. The dim-small target detecting technology under complex background is a difficult subject in infrared focal plane array rotation search system. In order to effectively suppress background noise and reduce false alarm caused by complex background, constant false alarm rate algorithm based on weighted feature of linear target was presented aiming at the research of imaging properties of infrared focal plane array rotation system. Firstly, the discrete potential target image was obtained initially by background suppression and threshold segmentation. Next, three characteristics of linear target were analyzed and the total weighted value was calculated by quantifying and weighting. Finally, the weighted value was mapped to the discrete target image and the image sequence about the weighted value was achieved, then a new segmentation threshold obtained by CFAR algorithm was applied to suppress the background interference and reduce false alarm

收稿日期:2015-06-09; 修订日期:2015-07-11

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20130769)

作者简介:费小亮(1991-),男,硕士生,主要从事红外图像处理和目标检测等方面研究。Email:285842359@qq.com

导师简介:任侃(1983-),男,讲师,博士,主要从事图像与视频处理、内容检索、人机交互界面设计和用户体验方面的研究。

Email: k.ren@njust.edu.cn

and false positives. The experiment results show that the proposed method can significantly reduce the false alarm caused by the complex background in infrared focal plane array rotation search system and can ensure to detect the dim-small target.

Key words: infrared focal plane array rotation search system; linear target; weighted feature; constant false alarm rate; image processing

0 引言

目前,国内外装备或者在研的红外旋转搜索系统基本采用线阵探测器,探测距离在 10 km 以上^[1],但是线阵扫描系统结构复杂且灵活性低。使用面阵扫描探测器能够很好地实现 360°全方位检测、对重点区域实行重点监测和能简单高效地切换到跟踪状态,钱惟贤等人提出的面阵旋转系统成像模型^[2]和面阵旋转作用距离方程^[3]分析讨论了红外面阵旋转搜索系统的可行性。

复杂背景下的红外弱小目标搜索是红外空域搜索系统中的一项关键技术。研究复杂背景下的弱小目标的搜索算法可以降低红外预警系统的作用时间,提高搜索定位疑似目标的准确性。目前多采用单帧探测的方法实现弱小目标的探测,常见的方法有形态学 Top-Hat 变换、Laplace 高通滤波、Robinson 滤波等,对目标进行阈值分割,获取单帧疑似目标,最终对疑似目标进行航迹关联或者目标识别来定位目标。

近年来,单帧探测的算法不断得到改进,可以实现目标和背景强度接近的目标探测^[4-9],然而由于红外背景的复杂度和变化性,目标图像经过阈值分割后会出现虚警率不可控和不可预知的问题:虚警率过高导致疑似目标过多,后端程序计算量大;虚警率过低,会出现漏警。参考文献[10]提出了基于背景自适应调整的目标探测算法,利用目标和边缘的奇异性和空间相关性的差别,得到背景调整因子,最后通过 CFAR 检测来提高目标探测率。但是上述方法中,不是有虚警概率不可控的问题,就是有在恒定虚警概率下,算法计算量大、精度不高的问题。

针对上述问题,文中研究了红外面阵旋转搜索系统下的图像序列,提出了一种基于线目标特征加权的恒虚警检测方法。对若干面扫型红外图像的目标和背景特征进行分析,得到面扫型目标区别于背

景的几大特征,然后通过特征加权得到总的加权值并映射到目标阈值分割后的离散点迹图上,最后根据离散点的总加权值分布进行恒虚警控制,达到降低虚警率和减少计算量的目的。通过与其他检测算法的比较,文中所提算法可以显著地提高目标的检测性能。

1 面扫型系统下线目标检测方法

文中的恒虚警检测方法是建立在离散的潜在目标点上的,所以文中首先通过对红外面阵旋转搜索系统下形成的原始图像序列(图 1(a))进行一系列的滤波处理和阈值分割得到离散的疑似目标点。

由于受到探测器工艺的影响,红外图像存在很多盲元点,其在空间灰度上与目标有很大的相似性。而其与目标特征不同的是其和邻域空间的像素完全不相关,因此,首先采用 1×7 的非线性中值滤波进行平滑,消除孤立点,如图 1(b)所示。

其次,为了对红外图像序列中线目标进行增强,这里使用 5×3 的行间差滤波器,行间差滤波器通过比较中心行和隔行的像素均值的差异来抑制背景,其对缓变的平坦和空间相关性强的边缘背景区域有很好的抑制作用,方法如下:

$$f_H(i, j) = \begin{cases} Z_2 - Z_1 (Z_2 > Z_1 \text{ and } Z_2 > Z_3 \text{ and } Z_1 > Z_3) \\ Z_2 - Z_3 (Z_2 > Z_3 \text{ and } Z_2 > Z_1 \text{ and } Z_3 > Z_1) \\ 0(\text{else}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Z_1 = \text{mean}(f_{pre}(i-2, j-1:j+1))$; $Z_2 = \text{mean}(f_{pre}(i, j-1:j+1))$; $Z_3 = \text{mean}(f_{pre}(i+2, j-1:j+1))$ 。

如图 1(c)所示,经过行间差滤波后,背景被有效抑制了,而目标和部分干扰作为潜在目标被保留下来。

最后,通过目标阈值分割,得到所需要的离散目标点,如图 1(d)所示。可以看出:实际的检测结果中有大量的虚假目标,后面会通过恒虚警控制进行剔除。

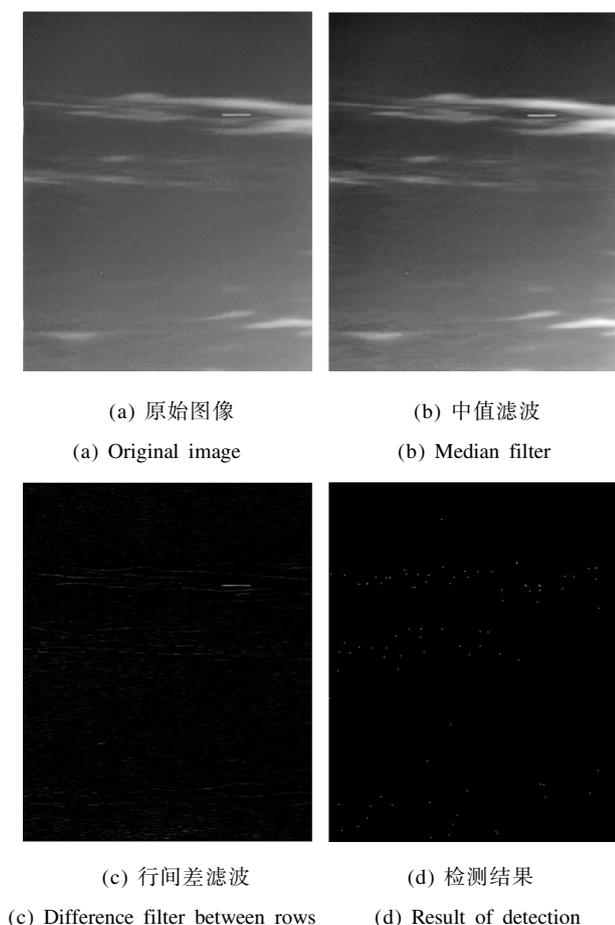


图 1 线目标初步检测结果

Fig.1 Preliminary detection result of linear target

2 目标特征分析

在对红外图像进行背景抑制和阈值分割之后,目标信息变成孤立的数据点,这里称为点迹。对于红外搜索系统,可以获取目标点迹所在的位置信息。为了进一步抑制残余的虚警点,文中根据红外面阵旋转搜索系统的成像原理和模型,分析了弱小目标在红外序列图像上的特征,提取出三类特征:梯度特征、目标横向长度特征、目标纵向费米特征。下面就具体描述了这三类特征,并对各类特征进行量化。

2.1 梯度特征

设图像的灰度函数为 $f(x,y)$, x 和 y 表示像素点在图像中的位置坐标。坐标 (x,y) 处的梯度可以定义为一个矢量,公式如下:

$$\text{grad}[f(x,y)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由梯度定义可知矢量 $\text{grad}[f(x,y)]$ 指向为 $f(x,y)$ 最大增加率方向,用 $G[f(x,y)]$ 来表示该矢量的幅度值,有:

$$G[f(x,y)] = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

显然, $G[f(x,y)]$ 为标量函数,总为正值。其值越大,表明该像素点的边缘越清晰,对比度越好。数字图像中,一般采用差分运算来代替微分运算。在图像中,一般将灰度变化分为三种类型:阶跃型、房顶型、脉冲型。在红外面阵旋转扫描系统中,线目标呈现出脉冲边缘特征,而背景杂波(如:云)在图像序列中表现为阶跃型和房顶型边缘特征。上文提到的行间差滤波由于采用同行像素累加和隔行比较,能很好地抑制背景的边缘特征且能提高目标的信噪比。所以,文中的梯度特征采用行间差滤波后的图像来进行判断。

结合离散点迹的坐标信息,根据当前的梯度图,得到每个点迹的梯度值,定义为 Q 。为了更好的表征梯度特征,将梯度 Q 射到 $[0,1]$ 区间。表达如下:

$$X = \frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad (4)$$

式中: Q_{\min} 和 Q_{\max} 分别对应所有离散点的梯度最小值和最大值。

这样,梯度 Q 能够映射到 $[0,1]$ 区间,并且新的变量 X 很好地拟合了梯度值越大,判断为目标的可能性也越大的趋势。

2.2 目标横向长度特征

由于采用红外面阵旋转扫描系统,目标具有明显的形状特征,空间上分布为水平方向上的相关性和垂直方向上的奇异性。

设转台的转速为 n s/圈,图像的分辨率为 $M \times N$,其中 M 和 N 分别代表探测器水平和垂直的像元个数,视场为 $\text{FOV}_H \times \text{FOV}_V$,积分时间是 T 。有目标的拖尾长度:

$$L = \frac{M \times N \times 360^\circ}{n \cdot \text{FOV}_H} \quad (5)$$

所以,在系统转速、分辨率、积分时间和视场角确定时,在水平方向上,目标的长度具有其独特性。

这里对长度特征进行归一化处理,由于长度特征具有实际的理论值,再结合测量值映射到 $(0,1]$ 区间。表达式如下:

$$Y = \frac{L_o^2}{(L - L_o)^2 + L_o^2} \quad (6)$$

式中： L_0 和 L 分别为长度特征的理论值和实际测量值。通过映射操作后，当实际测量值越接近 L_0 ，变量 Y 越接近 1，否则接近 0。

2.3 目标纵向费米特征

一般情况下，小目标的灰度在图像上的显示符合费米函数：

$$G(\vec{x}) = \frac{L \times \exp(\|\vec{x} - \vec{b}\|/c)}{[1 + \exp(\|\vec{x} - \vec{b}\|/c)]^2} + d \quad (7)$$

式中： \vec{x} 为矢量，表示图像坐标 (x, y) 。

$$\|\vec{x} - \vec{b}\| = \|(x, y) - (b_x, b_y)\| = \sqrt{(x - b_x)^2 + (y - b_y)^2} \quad (8)$$

由于红外面阵旋转搜索系统形成的拖尾效应，线目标在 x 方向上不具有统计特性，而 y 方向上的灰度符合费米函数分布。文中通过优化费米函数，得到关于图像 y 方向的费米函数分布，公式如下：

$$G'(x) = \frac{L \times \exp\left(\frac{|y - b_y|}{c}\right)}{\left[1 + \exp\left(\frac{|y - b_y|}{c}\right)\right]^2} \quad (9)$$

选取潜在目标所在的 15×15 局部区域的子图像 I 构建最优化函数：

$$J = \sum_{y=1}^{15} (G'(y) - I(y))^2 \quad (10)$$

通过解非线性最优化方程，可以得到参数 L 、 c 、 d 。其中 L 表示目标信号能量， c 表示目标大小尺度因子， d 表示目标所在的背景平均灰度。另外， b_y 和 $I(y)$ 已知，分别表示为目标中心坐标的 y 值和窗口横向的灰度平均值。最终，将优化得到的参数 L 、 c 、 d 反带进优化函数中，得到目标对应的 y 方向上的残差。

为了更好地进行特征量化，将关于所有残差的数据统计值进行归一化处理，得到新的变量 Z 来表征目标的费米特征。表达如下：

$$Z = \frac{J_{\max} - J}{J_{\max} - J_{\min}} \quad (11)$$

式中： J_{\max} 和 J_{\min} 分别表示残差统计数据中的最大值和最小值。

这样通过归一化操作，实现残差值越小变量 Z 越接近 1 的目的。

3 改进的恒虚警检测算法

基于之前的分析，由于线目标的三类特征(梯度

特征、长度特征、费米特征，分别定义为参量 X, Y, Z 都是经过归一化处理映射到区间 $(0, 1)$ 上，为了更好地进行下一步目标分割，修正传统意义上介于 $(0, 1)$ 之间的权重，定义每个归一化变量 (X, Y, Z) 的相关度系数为 α, β, γ ，加权得到总加权值 W ，公式如下：

$$W = \alpha X + \beta Y + \gamma Z \quad (12)$$

式中：变量 X, Y, Z 表示潜在目标点对应各个特征归一化后得到的值。此外，相关系数 (α, β, γ) 的取值为 10 的整数倍，文中设定为 $(100, 100, 100)$ 。

然后，将第一节目标分割后得到的点迹图映射到 W 特征平面，得到每个点目标对应的特征加权值，非潜在目标像素点分值为 0，表达如下：

$$W(i, j) = W(f_{\text{end}}(i, j)) \quad (13)$$

式中： $f_{\text{end}}(i, j)$ 为线目标检测后的离散点迹图像。

假设点迹图像的目标总特征值 W 满足高斯分布，其概率密度函数为：

$$p(w) = \prod_{n=0}^{N-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{w_n - \mu}{\sigma}\right)^2\right\} \quad (14)$$

式中： $p(w)$ 为关于点目标总加权值的概率密度函数； μ 和 σ^2 分别对应于均值和方差； w_n 为各个点目标对应的总加权值； N 为区域内被统计的目标点个数。

对于虚警率 P_{FA} ，其与上述概率密度函数的关系如下：

$$1 - P_{\text{FA}} = \int_0^T p(w) dw \quad (15)$$

式中： T 为检测门限。

由公式(14)和(15)可得：

$$T = \sqrt{2\sigma^2} \operatorname{erf}^{-1}(1 - 2P_{\text{FA}}) \quad (16)$$

这样将最终点目标各类特征引入到恒虚警检测中来，达到在线目标检测算法后端剔除虚假目标和降低虚警率的目的。

4 实验仿真和分析

仿真实验选取红外面阵旋转搜索系统下得到的线目标图像序列(如图 1(a)所示)。在经过一系列滤波处理和目标阈值分割后得到离散点迹图(如图 1(d)所示)的基础上，对每个潜在目标点进行特征加权打分，得到相应的总加权值。所有离散点的目标总加权值分布如图 2 所示，经过特征加权之后，目标点对应的分值得到增强。

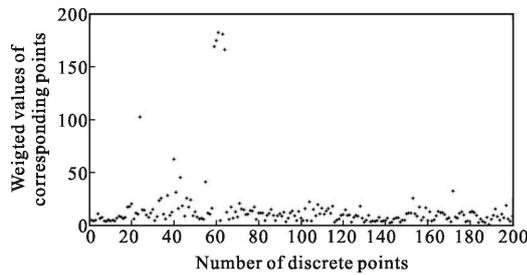
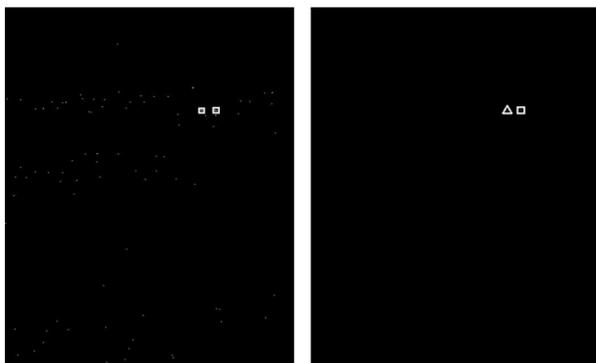


图 2 离散点目标的总加权值分布

Fig.2 Distribution of total weighted value of discrete target points

最后在总特征分值 W 平面上,加入恒虚警检测算法,控制虚警率为 $1e-6$ 。结果如图 3(a)、图 3(b)所示。图 3(a)表示通过文中恒虚警检测算法分割目标离散点迹图后得到的对应两个目标点(方块区域表示);图 3(b)中,方块区域目标为虚假目标,三角形区域目标为真实目标。



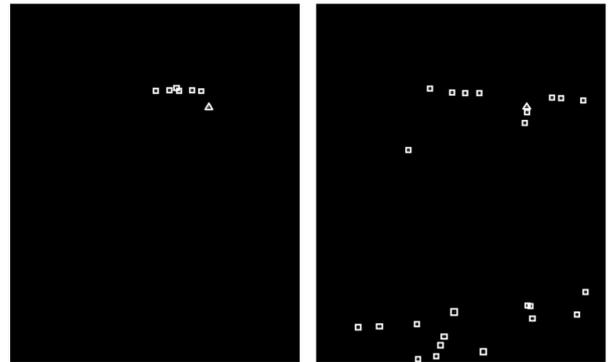
(a) 文中算法检测结果对应离散点迹图位置 (b) 目标检测结果判别
(a) Result of detection algorithm of this paper corresponding to the location of discrete target points (b) Identification of target detection result

图 3 文中恒虚警检测结果

Fig.3 Results of the CFAR algorithm of this paper

为了分析文中的算法优势,比较参考文献[10]提出的基于背景自适应调整的目标恒虚警检测算法和传统的基于灰度的恒虚警检测算法。其检测结果分别如图 4(a)和图 4(b)所示(方块区域目标为虚假目标,三角形区域目标为真实目标)。

由图 2(b)、图 3(a)和图 3(b)的检测结果可以看出:在同样的虚警率控制下,文中的算法精确度明显高于另外两种算法。在不同虚警率控制下,三类算法检测到真实目标时,共检测到的目标个数如表 1 所示。



(a) 基于背景自适应恒虚警检测结果 (b) 传统的基于灰度的恒虚警检测结果

(a) Result of the CFAR algorithm based on background adjusting (b) Result of traditional CFAR algorithm based on gray

图 4 另外两种恒虚警检测结果

Fig.4 Results of the other two CFAR algorithms

表 1 虚警率确定的情况下,三类检测算法得到的总目标个数

Tab.1 Total target number got by three kinds of detection algorithms under fixed probability of false alarm

P_{FA}	CFAR algorithm of this paper	CFAR algorithm based on background adjusting	Traditional CFAR algorithm based on gray
$1e-1$	80	179	81
$1e-1.5$	78	120	80
$1e-2$	75	79	80
$1e-2.5$	53	54	80
$1e-3$	30	47	79
$1e-3.5$	29	30	69
$1e-4$	29	24	65
$1e-4.5$	28	20	43
$1e-5$	28	13	39
$1e-5.5$	15	7	30
$1e-6$	2	5	27
$1e-6.5$	2	4	18
$1e-7$	2	3	16
$1e-7.5$	2	2	10
$1e-8$	2	2	9

但为了客观评价各个算法的优劣,首先定义一个新的变量 M ,表示为在固定的虚警率 P_{FA} 下,当检测到目标时,真实目标个数占所有检测点个数的比例。

$$M = \frac{S}{N} \quad (17)$$

式中： S 为真实目标个数； N 为所有检测点个数。

文中针对实际的红外图像序列，分别在不同的虚警率 P_{FA} 下比较各个算法的 M 值和检测到真实目标时，所有的检测点个数 N ，对应得到 $P_{FA}-N$ 曲线和 $P_{FA}-M$ 曲线分别如图 5(a)、图 5(b) 所示。

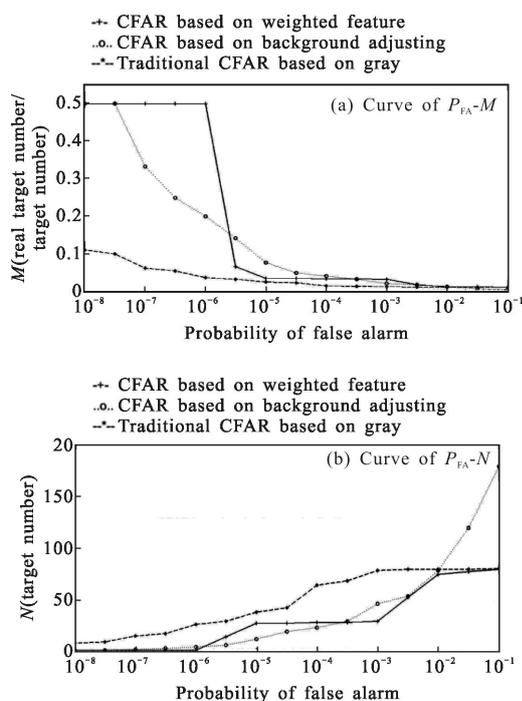


图 5 不同虚警率下，比例值 M 和总的目标检测个数 N

Fig.5 Percentage values— M and total number— N of target detection under different probabilities of false alarm

由图 5(a)、(b) 和表 1 可知，当虚警率 P_{FA} 大于 $1e-2$ 时，通过文中算法和传统的恒虚警检测算法得到的所有目标个数明显少于基于背景自适应算法，但是此时真实目标个数占总目标个数的比例值普遍较低；然而，当虚警率 P_{FA} 处于 $(1e-4, 1e-2)$ 区间时，文中算法和基于背景自适应算法的检测性能得到较大的提高，总目标个数和真实目标所占比值都得到改善；在 $1e-4$ 到 $1e-5$ 区间，文中算法的检测精度变化比较稳定，和基于背景自适应的算法性能差别不大；但是，虚警率 P_{FA} 在 $1e-5.5$ 之后，文中的算法精度提高速度明显高于另外两种方法，即：该算法在虚警概率低于 $1e-5.5$ 时，更加容易剔除图像序列中的虚假目标，并且检测的结果也很稳定。

综合上述分析，可以得到这样的结果：当虚警率控制在 $1e-5$ 以上时，文中算法的精度和另外两种算法的精度不相伯仲；但是当虚警概率低于 $1e-5$ 的时

候，文中的检测算法性能明显好于另外两种。基于此，文中所提基于目标特征加权的恒虚警检测算法优势更加突出，能很好地降低目标检测虚警率。

5 结论

红外面阵旋转搜索系统在红外预警系统中占有重要地位，而针对该系统的复杂背景下弱小目标检测一直是难点。基于背景自适应的恒虚警检测算法只是考虑将背景复杂度引进图像序列再进行阈值分割，但是算法的精度不够。文中提出的基于线目标特征加权的恒虚警检测方法是在分析线目标特征的基础上，通过特征加权显著地增强了目标和抑制了背景的加权值，最后再经过恒虚警检测会很好地剔除虚假目标并保留真实目标。实验证明该方法行之有效。

参考文献：

- [1] Liu Zhongling, Yu Zhenhong, Li Liren, et al. Status and development trend of infrared search and track system [J]. *Modern Defence Technology*, 2014, 42 (2): 95-101. (in Chinese)
刘忠领, 于振红, 李立仁, 等. 红外搜索跟踪系统的研究现状与发展趋势[J]. 现代防御技术, 2014, 42(2): 95-101.
- [2] Qian Weixian, Guan Zhiqiang. Target detection method of focal plane array search system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3066-3071. (In Chinese)
钱惟贤, 管志强. 面阵扫描型警戒系统目标探测方法 [J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3066-3071.
- [3] Qian Weixian, Chen Qian. Distance equation of infrared focal plane array rotation search system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2078-2084. (in Chinese)
钱惟贤, 陈钱. 红外面阵旋转搜索系统作用距离方程[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2078-2084.
- [4] Wang Xiaoyang, Peng Zhenming, Zhang Ping, et al. Infrared small dim target detection based on local contrast combined with region saliency [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(9): 32-38. (in Chinese)
王晓阳, 彭真明, 张萍, 等. 局部对比度结合区域显著性红外弱小目标检测[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(9): 32-38.
- [5] Wei Daozhi, Huang Shucai, Xia Xunhui, et al. Temporal-spatial fusion filtering algorithm for small infrared target detection [J]. *Infrared Technology*, 2014, 11: 905-908. (in Chinese)

- 韦道知, 黄树彩, 夏训辉, 等. 基于时空域融合滤波的小目标检测算法[J]. 红外技术, 2014, 11: 905-908.
- [6] Qi S, Ming D, Ma J, et al. Robust method for infrared small-target detection based on Boolean map visual theory [J]. *Appl Opt*, 2014, 53(18): 3929-40.
- [7] Gu Y F, Wang C W. A kernel-based nonparametric regression method for clutter removal in infrared small-target detection applications [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3): 469-473.
- [8] Wang P, Tian J W, Gao C Q. Infrared small target detection using directional high pass filters based on LS-SVM [J]. *Electron Lett*, 2009, 45(3): 156-158.
- [9] Rong Shenghui, Liu Gang, Zhou Huixin, et al. Infrared dim and small target background suppression based on the improved shearlet transform and the guide filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 68-73. (in Chinese)
荣生辉, 刘刚, 周慧鑫, 等. 基于改进的剪切波变换和引导滤波的红外弱小目标背景抑制方法 [J]. 光子学报, 2015, 44(2): 68-73.
- [10] Guan Zhiqiang, Chen Qian. An adaptive background adjusting algorithm for dim target detection [J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, 27(12): 2163-2168. (in Chinese)
管志强, 陈钱. 一种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.