

星空背景下红外弱小目标的快速检测

蒲静松, 许 东, 刘乙君, 赵子杰
(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了实时检测天基平台上超远距离成像的星空背景下红外弱小运动目标, 提出了一种基于时空域方向滤波和最小二乘预测的算法。首先, 介绍了传统的方向滤波及时序上的双向滤波两者的频域理论推导, 并经过对比说明了双向滤波的优点。接着, 在双向滤波基础上, 提出了一种新型方向滤波算法, 并分析了新型算法在时耗方面的优势。然后, 在分析新型方向滤波算法性能的基础上, 说明了基于过门限率的图像分割方法。最后, 介绍了最小二乘预测的理论, 并给出了相应的跟踪算法。实验结果表明: 目标的位置跟踪偏差平均约为 1 个像素, 在图像大小为 256×256 像素的情况下, 20 帧图像的检测跟踪时间平均约为 1.137 s。检测跟踪效果满足精度要求, 检测时间也基本能满足超远距离成像红外系统的实时性要求。

关键词: 弱小目标检测; 时空域方向滤波; 目标跟踪; 最小二乘预测

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.04.024

Rapid detection of infrared dim targets under starry sky background

PU Jing-song, XU Dong, LIU Yi-jun, ZHAO Zi-jie

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to detect the moving infrared dim targets in real-time under starry sky background, a method was proposed based on the spatio-temporal directional filter and the least square (LS) prediction. Firstly, the theoretical derivation in frequency domain of both the traditional directional filter and the bi-directional filter was introduced, and the advantages of bi-directional filter were illustrated through contrast. Then, on the basis of the bi-directional filter, a new directional filter algorithm is proposed, and the advantages of time consumption were analyzed. Secondly, after analyzing the performance of the new directional filter algorithm, the image segmentation method based on threshold rate was illustrated. Finally, the theory of LS prediction was introduced, and the corresponding tracking algorithm was given. The experimental results show that the average location deviation of object tracking is about 1 pixel, and it will take about 1.137 seconds to detect and track the image with 20 frames when the image size is 256×256 pixels. The detection and tracking results meet the requirement of precision, and the detecting time can basically meet the real-time requirement of the infrared system imaging at extreme distance.

Key words: dim target detection; spatio-temporal directional filter; targets tracking; LS prediction

1 引 言

在军事预警系统中, 红外弱小目标检测一直是

被重点研究的技术之一。目前红外弱小目标检测技术^[1]大体分为两类: 跟踪前检测和检测前跟踪。跟

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61378077) 资助。

作者简介: 蒲静松 (1992 -), 男, 硕士研究生, 主要从事模式识别, 机器学习方面的研究。E-mail: ehustpjs@163.com

收稿日期: 2016-08-24; **修订日期:** 2016-10-05

跟踪检测的特点是计算速度快、实时性好,但对于低信噪比的情况检测效果较差,常见的有形态学滤波、局部对比度、自适应滤波、极值理论等^[2-6];检测前跟踪能适用于低信噪比情况,但计算速度慢实时性不好,常见的有帧间非线性滤波、二维最小均方滤波、时空域方向滤波、时空域维纳滤波等^[7-11]。

当目标在高速运动且被天基平台超远距离成像在星空背景下时,形成的红外图像有以下三个特点^[12]:①目标成像为没有任何几何特征的目标;②红外传感器的积累时间较短,目标亮度很弱;③星空背景简单,只由很多几个像素大小的星斑组成。由于目标强度通常只比高斯白噪声略高,因此需要用检测前跟踪的方法才能达到效果。传统的检测前跟踪方法一般需要先对图像进行背景抑制,然后对速度空间进行搜索以确定目标运动方向,这都大幅增加了算法的运算时间。为了兼顾检测效果和实时性,本文提出了一种基于方向滤波的新检测算法。

2 基于方向滤波的目标初始检测

2.1 时空域方向滤波及双向滤波的理论推导

时空域方向滤波是检测弱小运动目标的一种经典方法,它可以对淹没于白噪声的运动目标进行能量累积。当目标沿某一方向穿过成像系统视场时,它在时空域的轨迹为一条直线,用参数方程描述为:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t \\ y = y_0 + v_y t \end{cases} \quad (1)$$

其中, x, y 为二维空间坐标; x_0, y_0 为初始坐标; v_x, v_y 分别为 x, y 方向的速度; t 为时间。在离散情况下用冲激函数描述为:

$$\begin{aligned} s(x, y, t) &= \delta(x - x_0 - v_x t) \delta(y - y_0 - v_y t) \\ &= \delta^2(\bar{r} - \bar{r}_0 - \bar{v}t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\bar{r} = (x, y)$, $\bar{r}_0 = (x_0, y_0)$, $\bar{v} = (v_x, v_y)$, $\delta(x - x_0 - v_x t)$ 、 $\delta(y - y_0 - v_y t)$ 为目标运动在 x, y 方向的脉冲表现形式。

由于目标运动时间 T 是有限的,时空域的目标轨迹实际上是一条线段,因此根据式(2)可把实际的轨迹方程描述为:

$$s(\bar{r}, t) = \prod(t) \delta^2(\bar{r} - \bar{r}_0 - \bar{v}t) \quad (3)$$

其中, $\prod(t)$ 为矩形脉冲函数:

$$\prod(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

对式(3)做傅里叶变换得到目标信号的频域

描述:

$$\begin{aligned} S(\bar{\omega}, \omega_t) &= T \exp\{-j\bar{\omega} \cdot \bar{r}_0\} \\ &\exp\{-j(\bar{\omega} \cdot \bar{v} + \omega_t)T/2\} \text{sinc}[(\bar{\omega} \cdot \bar{v} + \omega_t)T/2] \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\bar{\omega} = (\omega_x, \omega_y)$ 。在高斯白噪声背景下,传统的单方向滤波器在频域中描述为:

$$\begin{aligned} H(\bar{\omega}, \omega_t) &= \frac{S^*(\bar{\omega}, \omega_t)}{N_0} \exp\{-j\bar{\omega} \cdot \bar{r}_0\} \\ &= \frac{T}{N_0} \exp\{j(\bar{\omega} \cdot \bar{v} + \omega_t)T/2\} \text{sinc}[(\bar{\omega} \cdot \bar{v} + \omega_t)T/2] \end{aligned} \quad (6)$$

其中, N_0 为高斯白噪声的常量功率谱; $*$ 表示复共轭。则由式(5)和式(6)可得滤波后的目标信号:

$$\begin{aligned} G(\bar{\omega}, \omega_t) &= H(\bar{\omega}, \omega_t) S(\bar{\omega}, \omega_t) \\ &= \frac{T^2}{N_0} \text{sinc}^2[(\bar{\omega} \cdot \bar{v} + \omega_t)T/2] \exp\{-j\bar{\omega} \cdot \bar{r}_0\} \end{aligned} \quad (7)$$

把式(7)变换到时空域则为:

$$\begin{aligned} g(\bar{r}, t) &= h(\bar{r}, t) \cdot s(\bar{r}, t) \\ &= \frac{T}{N_0} \delta^2(\bar{r} - \bar{r}_0 - \bar{v}t) \Lambda(t/T) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\Lambda(t/T)$ 为三角形脉冲形式的增益函数:

$$\Lambda(t/T) = \begin{cases} t/T, & 0 \leq t \leq T \\ 2 - t/T, & T \leq t \leq 2T \end{cases} \quad (9)$$

分析式(9)中三角脉冲函数可以看出,只有时间 t 取 T 附近的值时才能有较强的增益,而在 0 和 $2T$ 附近几乎没有增益。因此,传统的单向滤波对于前后数帧图像中的目标不能得到很好的加强。故而考虑在单向滤波后对结果图像反时序地再进行一次方向滤波,变单向滤波为双向滤波,此时方向滤波器的频域描述为:

$$\begin{aligned} H_D(\bar{\omega}, \omega_t) &= \frac{T}{N_0} [\exp\{j(\bar{\omega} \cdot \bar{v} - \omega_t)T/2\} + \\ &\exp\{-j(\bar{\omega} \cdot \bar{v} - \omega_t)T/2\}] \text{sinc}[(\bar{\omega} \cdot \bar{v} + \omega_t)T/2] \end{aligned} \quad (10)$$

傅里叶反变换转换到时空域描述为:

$$g_D(\bar{r}, t) = \frac{T}{N_0} \delta^2(\bar{r} - \bar{r}_0 - \bar{v}t) \prod(t/T) \quad (11)$$

跟式(8)比较可知,双向滤波与单向滤波的区别仅在于增益函数 $\prod(t/T)$ 和 $\Lambda(t/T)$ 的不同。比较两个增益函数可以看出,时序上的双向滤波对整个图像序列的目标信号都有较强的增益。

2.2 基于方向滤波的新型算法

初始红外图像中包含三类信号:目标、背景和高

斯白噪声。传统的方向滤波算法需要先削弱背景再用方向滤波算法检测。然而在星空背景下,背景只由一些小面积的星斑组成,此时额外的背景抑制算法会带来时间上的浪费。因此本文针对简单背景提出一种不需要背景抑制的方向滤波算法来快速检测星空背景下的弱小目标。

在图像坐标系下,把一个点相对于另一个点的位置分为8个区域,每个区域都有一个中心方向,定义位移矢量:

$$\mathbf{s} = (m, n), m, n \in \{-d, d, 0\} \quad (12)$$

其中, d 为正整数决定位移大小; m, n 不同时为0。因此可以用矢量 $\mathbf{s}$ 来表示8个中心方向上的相对位置。

定义函数:

$$dcorr(x, y) = ky \cdot \text{INT}(x/t_0) + kx \cdot \text{INT}(y/t_0), \quad 0 \leq x, y \leq nt_0 \quad (13)$$

其中, k 为比例系数; x, y 为自变量; t_0 为基数; n 取整数; n 与 t 的乘积决定自变量的取值范围, $\text{INT}(x)$ 为取整函数。

取 k 为0.5, n 为5, t_0 为50, 画出如图1所示的函数图。由该函数图像可以看出, 在 n, t_0, k 确定的情况下, 只有当 x, y 同时取较大的值时才能得到较大的函数值。星空背景下, 星斑背景近似不动, 噪声点随机分布, 而目标却是沿某一方向有规律的运动。因此, 如果将 $dcorr(x, y)$ 中的 x 作为当前点的亮度值, y 作为前一帧中相对位置为 $\mathbf{s}$ 的像素点亮度值, 那么如果当前点为目标点, 则在 d 合适的情况下总能找到方向匹配的 $\mathbf{s}$ 使函数取极大值; 而如果当前点是噪声或星斑背景, 则无论 $\mathbf{s}$ 取何方向都会得到较低的函数值。因此该函数能很好地把目标从背景和噪声中区分出来, 相应的算法公式如下:

$$g_i(x, y) = kf_i(x, y) \cdot \text{INT}(g_{i-1}(x + m, y + n)/t_0) + kg_{i-1}(x + m, y + n) \cdot \text{INT}(f_i(x, y)/t_0) \quad (14)$$

其中, $g_i(x, y)$ 为滤波后的第 i 帧图像; $f_i(x, y)$ 为滤波前的第 i 帧图像; $g_{i-1}(x, y)$ 为滤波后的第 $(i-1)$ 帧图像; m, n 为方向参数。

在检测过程中, 位移矢量 $\mathbf{s}$ 除了要与目标运动方向匹配之外, 还要与目标速度大小匹配, 即 d 的取值要合理。而目标速度大小往往只知道大概范围, 因此直接使用式(14)进行滤波是不可行的。因此考虑将式(14)中的 $g_{i-1}(x + m, y + n)$ 取值为点 $(x + m, y + n)$ 周围 $(2l + 1) \times (2l + 1)$ 邻域中的最大值,

l 为正整数。这样, 式(14)就能检测出速度范围为 $(d - l)$ 到 $(d + l)$ 的目标。 l 大小的选择除了考虑目标速度大小变化范围之外, 还应考虑沿 $\mathbf{s}$ 包含的8个方向进行滤波是否能覆盖整个方向空间, 因此 l 还需满足下式:

$$\arctan(l/d) \geq 22.5^\circ \quad (15)$$

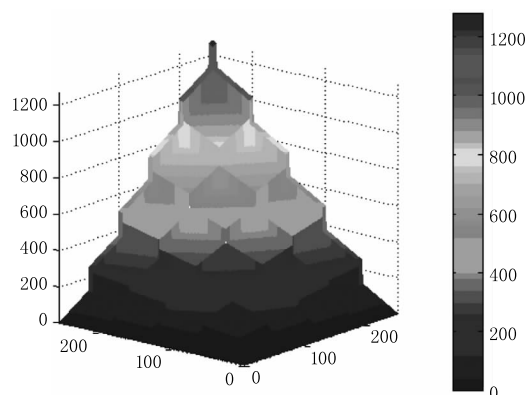


图1 dcorr 函数的三维图像

Fig. 1 The three-dimensional image of function dcorr

综上给出沿某一方向进行滤波的算法流程:

(1) 对于第一帧图像, 令 $g_0(x, y) = f_0(x, y)$, 读取下一帧图像。

(2) 对于后续图像 $f_i(x, y)$ 的每个像素点, 访问 $g_{i-1}(x, y)$ 中相对位移 $\mathbf{s}$ 像素点 $g_{i-1}(x + m, y + n)$, 在 $g_{i-1}(x + m, y + n)$ 的 $(2l + 1) \times (2l + 1)$ 邻域中寻找最大灰度值并赋值给 $g_{i-1}(x + m, y + n)$, 然后使用式(14)得到滤波后的图像 $f_a(x, y)$, 令 $g_i(x, y) = f_a(x, y)$, 读取下一帧图像。

(3) 如果到达序列的最后一帧, 则将滤波后的图像序列反时序进行步骤(1)、(2)的操作, 直到处理完整个图像序列。

使用这种方向滤波算法有以下三个优势:

(1) 基于式(14)的算法能让一定速度范围内的目标信号得到大幅加强, 而对于静止或运动速度缓慢的小面积背景和随机分布的白噪声则能逐步消除。

(2) 基于式(14)的方向滤波算法在速度方向不匹配的情况下会逐步过滤掉所有信号, 因此只需要沿8个方向分别滤波, 再按图像序列号分别做加法运算即可得到最终的序列, 而不需要在速度空间中进行搜索, 因此运算时耗得到大幅减少。

(3) 在检测多条轨迹时, 该算法仍然只需做8次双向滤波, 不会增加额外的时间花费。

3 基于最小二乘预测的目标跟踪

3.1 基于阈值的图像分割

常用的自适应图像分割方法有大津法、局部自适应分割法等^[13]。图像经过基于式(14)的方向滤波算法处理后,目标本身亮度得到很大加强,不再是弱小目标,但目标周围的噪声也有一定程度的加强,因此上述分割方法并不适用。考虑到目标数目未知,本文采用基于过门限率的图像分割方法,即根据图像中非零像素点个数和过门限比率,选取图像中亮度最高的若干像素点置为255,其他置为0。由于算法中是根据图像中非零像素点数目来确定过门限像素数目,因此对于单目标和多目标都能有很好的分割效果。图2给出了该算法的示意图。

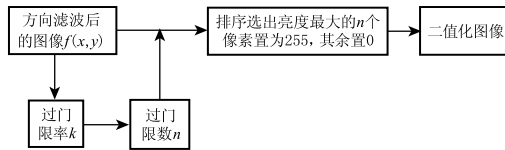


图2 基于过门限率的图像分割算法

Fig. 2 The image segment algorithm based on threshold rate

3.2 基于最小二乘预测的跟踪算法

由于目标运动是连续的,因此可以用最小二乘法拟合一个多项式来近似描述其轨迹,从而能根据轨迹方程跟踪目标。具体算法推导如下:

首先根据已经记录的 n 个数据点 (x_i, y_i) , 求 $(m-1)$ 次最小二乘拟合多项式:

$$P_{m-1}(x) = a_0 + a_1x + \cdots + a_{m-1}x^{m-1}, m \leq n \quad (16)$$

其中, $a_0, a_1, \cdots, a_{m-1}$ 是待求参数。用 m 个正交多项式之和描述为:

$$P_{m-1}(x) = c_0Q_0(x) + c_1Q_1(x) + \cdots + c_{m-1}Q_{m-1}(x) \quad (17)$$

其中, $c_0, c_1, \cdots, c_{m-1}$ 是待求参数; $Q_0, Q_1, \cdots, Q_{m-1}$ 是一组最高次数为 $(m-1)$ 的正交多项式。正交多项式组可以用下式来推导:

$$\begin{aligned} Q_0(x) &= 1 \\ Q_1(x) &= x - \alpha_1 \\ &\vdots \\ Q_{j+1}(x) &= (x - \alpha_{j+1})Q_j(x) - \beta_jQ_{j-1}(x), \\ j &= 1, 2, \cdots, m-2 \end{aligned} \quad (18)$$

令 $d_j = \sum_{i=0}^{n-1} Q_j^2(x_i)$, 则有:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_j &= \frac{1}{d_j} \sum_{i=0}^{n-1} x_i Q_j^2(x_i) \\ \beta_j &= \frac{d_j}{d_{j-1}} \end{aligned} \right\} j = 0, 1, \cdots, m-2 \quad (19)$$

利用式(18)、式(19)并根据最小二乘原理,可得式(17)中各项待定参数:

$$c_j = \frac{1}{d_j} \sum_{i=0}^{n-1} y_i Q_j^2(x_i), j = 0, 1, \cdots, m-1 \quad (20)$$

用 $x_{i+1} = x_i + \frac{(x_i - x_0)}{i}$ 作为下一点的 x 坐标估计值,代入式(17)得到下一点的 y 坐标估计值 y_{i+1} , 那么就把下一帧图像中 (x_{i+1}, y_{i+1}) 邻域内距离最近的疑似目标点 (x_e, y_e) 作为第 $(i+1)$ 帧图像中的目标点。

4 实验及结果分析

第一个实验对象为星空背景下的单目标点,图像大小 256×256 ,序列长度为20帧,目标运动速度 $3 \sim 4$ 像素/帧,灰度值125左右,图像所加噪声为均值为0、归一化方差为0.005、实际方差为325.125的高斯白噪声。方向滤波中参数 d 取3, l 取2。仿真结果对比图如图3所示。

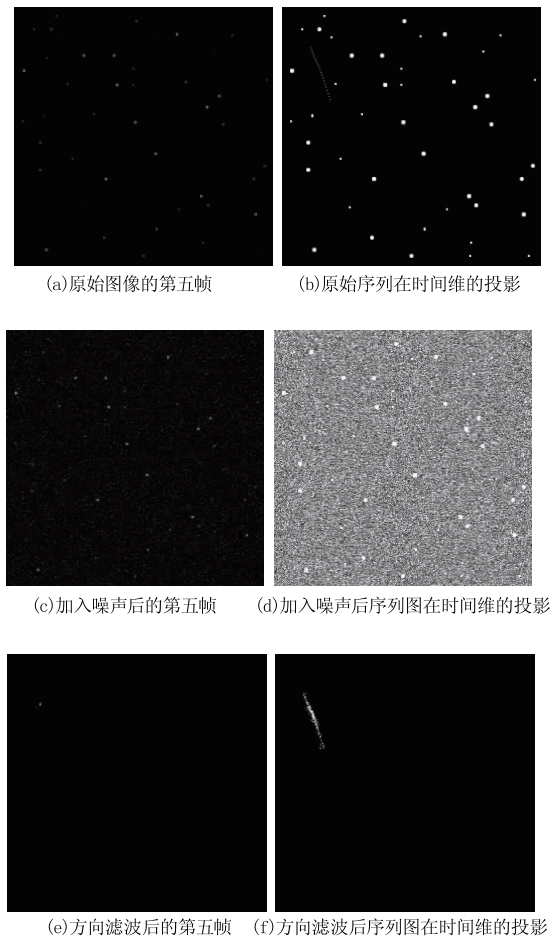


图3 单目标仿真结果

Fig. 3 The simulation results of single target

第二个实验对象中包含两个运动目标,目标运动速度 $2 \sim 4$ 像素/帧,目标灰度值 $100 \sim 200$,其他

参数及测试环境均与第一个对象一致。仿真结果对比如图4所示。

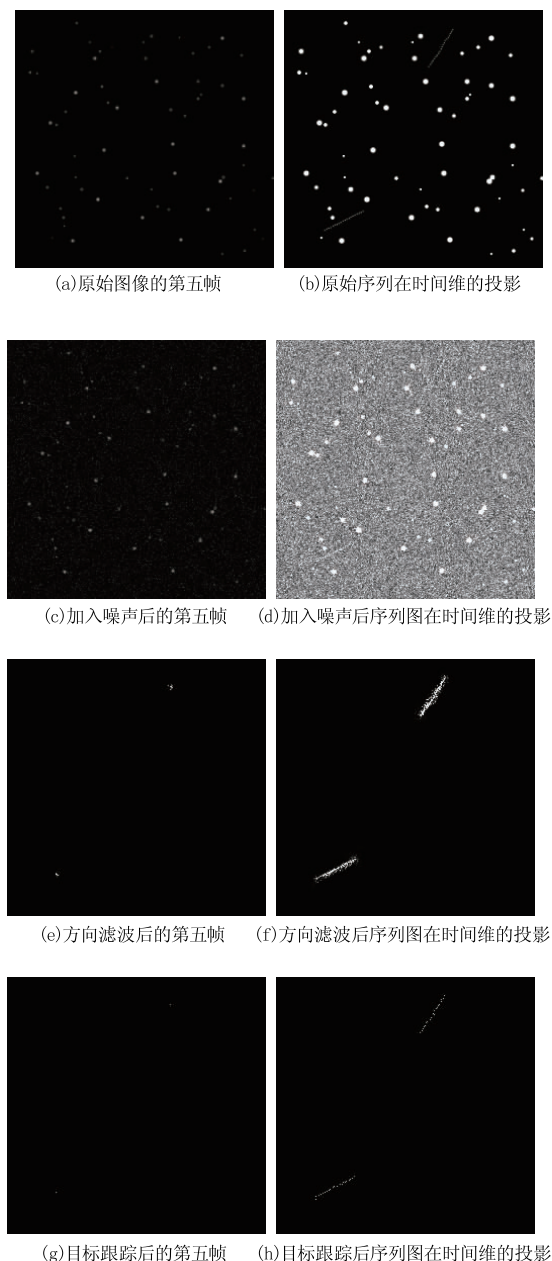


图4 双目标仿真结果

Fig. 4 The simulation results of double targets

仿真测试环境为:Windows 7 系统,2.5 GHz Intel Core5 处理器,4G 内存,仿真软件为 Visual Studio 2012。从图3、图4 两组图像中原图与跟踪后的图像对比可以看出,整个算法对红外弱小目标有较好的检测跟踪效果。经过多组实验测试后发现,跟踪得到的目标点与原始目标点之间的平均偏差约为1 像素,因此该算法的检测跟踪效果能满足要求。另外在时耗方面,表1 列出了该算法及几种传统的检测方法的时耗。

表1 各检测算法的时耗对比

Tab. 1 The time-consumption comparison of different detection algorithms

	序列长度/帧	运算时间/s
PLCM	20	约 160
粗精搜索三维方向滤波	20	约 124
基于 Robinson 算子的时空域算法	20	约 24
本文算法	20	约 1.137

表中可见该算法运算时间远远小于传统的方向滤波算法,同时对于其他弱小目标检测算法来说也大幅提升了运算速度^[4,7,11]。

5 结 论

针对星空背景下的红外弱小运动目标,提出了一种基于方向滤波和最小二乘法的快速检测跟踪方法,并用实验验证了方法的有效性。在目标检测方面采用一种新型的时空域双方向滤波算法,既能消除星斑背景,又能把淹没于白噪声中的目标点提取出来;在图像分割方面采用基于过门限率的阈值分割方法,很好地解决了多目标分割问题;在目标跟踪方面采用基于最小二乘预测的跟踪方法,准确地排除了虚警点。实验结果证明:对于20 帧 256×256 图像中的弱小目标,检测跟踪误差约为1 个像素,检测跟踪时间约为1.137 s。不仅能准确地检测跟踪目标,而且在运算耗时方面相对于其他的弱小目标检测方法来说大幅减少。但这种方法仅能直接用于包含星斑等小面积杂波的背景,对于复杂背景则需要配合其他算法才能达到检测效果。

参考文献:

- [1] HOU Wang, SUN Xiaoliang, SHANG Yang, et al. Present state and perspectives of small infrared targets detection technology[J]. Infrared Technology, 2015, 37(1): 1 - 10. (in Chinese)
侯旺,孙晓亮,尚洋,等. 红外弱小目标检测技术研究现状及发展趋势[J]. 红外技术, 2015, 37(1): 1 - 10.
- [2] X Bai, F Zhou. Analysis of new top-hat transformation and the application for the infrared dim small target detection [J]. Pattern Recognition, 2010, 43: 2145 - 2156.
- [3] ZHOU Huixin, ZHAO Ying, QIN Hanlin, et al. Infrared dim and small target detection algorithm based on multi-scale anisotropic diffusion equation [J]. Acta Photonica

- Sinica, 2015, 44(9): 1-5. (in Chinese)
- 周慧鑫, 赵莹, 秦翰林, 等. 多尺度各向异性扩散方程的红外弱小目标检测算法[J]. 光子学报, 2015, 44(9): 1-5.
- [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): 1-7. (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): 1-7.
- [5] Chen C L P, Li H, Wei Y T, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote sensing, 2014, 52(12): 574-581.
- [6] WANG Gang, CHEN Yongguang, YANG Suochang, et al. Detection of infrared dim small target based on image patch contrast[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1424-1433. (in Chinese)
- 王刚, 陈永光, 杨锁昌, 等. 采用图像块对比特性的红外弱小目标检测[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1424-1433.
- [7] LI Meng. Research on novel detection algorithms for moving infrared dim small targets[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- 李勰. 红外序列图像弱小运动目标检测新方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [8] CAO Qi, WANG Dejiang, ZHANG Qi, et al. Energy accumulation in infrared point target detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 741-747 (in Chinese)
- 曹琦, 王德江, 张齐, 等. 红外点目标检测中的能量累积[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 741-747.
- [9] HU Taotao, SHENG Hu, WANG Liming. Infrared small target tracking based on spatial-temporal planer characterization[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(10): 1159-1163. (in Chinese)
- 胡涛涛, 盛琥, 王立明. 基于时空二维目标描述的红外小目标跟踪[J]. 激光与红外, 2014, 44(10): 1159-1163.
- [10] SONG S J, QIN Q. A new algorithm for small target detection in liquid image sequence[C]//IEEE International conference on intelligent control and information processing, Dalian P. R. China, 2011, 5: 234-237.
- [11] HUANG Fuyu, SHEN Xueju, LIU Xumin, et al. Detection of super wide-field infrared target based on spatial-temporal fusion processing[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(8): 2328-2338. (in Chinese)
- 黄富瑜, 沈学举, 刘旭敏, 等. 基于空时域融合处理检测超大视场红外目标[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2328-2338.
- [12] LIU Jing. Complex moving target detection in the star field and bilateral filtering algorithm[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- 刘静. 星空背景下复杂运动目标检测和双边滤波算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [13] LI Zhiyong, SHEN Zhenkang, YANG Weiping, et al. Dynamic image analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. (in Chinese)
- 李智勇, 沈振康, 杨卫平, 等. 动态图像分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.