

文章编号:1004-4213(2010)11-2049-6

# 基于时空联合滤波技术的缓慢运动红外弱小 目标检测算法\*

张媛, 辛云宏<sup>†</sup>, 张春琴

(陕西师范大学 物理与信息技术学院, 西安 710062)

**摘 要:**针对天空云层杂波与噪音背景下红外弱小目标的检测和跟踪问题,提出了一种基于时域和空域联合滤波的检测算法.首先对所获取的红外图像序列进行标准化预处理,再用时域滤波算法对预处理后的图像序列进行滤波,然后采用目标增强算法,对残留的云层杂波和噪音做进一步抑制.最后,通过实验对所提出的算法进行检验,结果证明了算法的有效性.

**关键词:**红外弱小目标;时域和空域联合滤波;标准化处理

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103911.2049

## 0 引言

随着军事力量的持续发展,红外成像及其信号处理方法已成为重点的研究技术,并广泛应用于成像制导,红外遥感,红外报警等多个领域.其中,红外弱小目标的检测和跟踪就是一项具有重要军事应用背景的关键技术.由于距离较远,红外目标在像平面上呈现点状并且强度微弱,无法利用其形状、大小、纹理等特征进行检测.在移动缓慢的情况下,目标轨迹仅占用几个像素,很难对其进行精确地估计,加之云层杂波和红外探测器等设备带来的噪音的影响,使得红外图像信噪比较低,为目标的检测和跟踪增添了更多困难.

当前,许多专家与学者已经提出了多种红外目标检测与跟踪算法,如利用像素点的灰度值与背景均值的差值来抑制背景,提取出目标的背景减除法<sup>[1-2]</sup>;利用微分几何理论,通过分析图像的曲率特性,对图像进行分割的目标检测算法<sup>[3]</sup>;利用模型图像与目标图像的匹配度来跟踪目标点<sup>[4-6]</sup>.另外,还有结合维纳滤波的三维时空自适应预测滤波<sup>[7]</sup>、形态学抑制复杂背景的方法<sup>[8-9]</sup>、基于 Mean-shift 算法的目标跟踪方法<sup>[10-12]</sup>和基于相似度量的目标跟踪算法<sup>[13-14]</sup>.这些跟踪与检测算法都有其各自的优点,但对于天空背景下缓慢运动的小目标,这些算法却有一定的局限性.所以为了解决缓慢移动弱小目标在检测和跟踪上的难题,Jonathan M. Mooney 等人

在文献[15]中提出了一种由奇异值分解得来的时域滤波算法,它利用目标点和云层经过像素点时的时域响应的差异抑制了云层杂波,取得了一定效果,但对于云层边界的处理效果仍然不太令人满意.

本文借鉴文献[15]的思想,在时域滤波算法中引入图像标准化预处理过程,从而有效地抑制了云层边界和背景杂波,明显降低了云层边界在目标检测过程中的影响,改善了目标的检测性能.最后的实验结果表明了改进算法的有效性.

## 1 目标的观测模型

在天空背景下的红外弱小目标的检测,可以用红外图像序列的观测模型表示为

$$f(x, y, k) = A(x, y, k) + B(x, y, k) + N(x, y, k) \quad (1)$$

式中: $x$ 和 $y$ 表示像素点在红外像平面上的坐标, $k$ 值表示帧数; $f(x, y, k)$ 表示第 $k$ 帧中 $(x, y)$ 坐标上所对应像素的信号幅度, $A(x, y, k)$ 、 $B(x, y, k)$ 、 $N(x, y, k)$ 分别表示目标、云层、背景和噪音在 $(x, y)$ 处所产生的红外辐射信号强度.

由此观测模型可以看出,测量信号中包含目标信号、背景信号和噪音三个分量,且都有各自的特性.红外弱小目标由于成像距离较远,目标的几何尺寸仅占几个像素,呈现一个亮点或者亮斑,与周围背景不相关,属于图像的高频分量.天空背景一般变化缓慢,像素之间具有较强的相关性,占图像中的低频分量,但也存在部分高频分量,主要分布在云层边缘.而红外探测仪等设备带来得随机噪音与背景不相关,同目标和云层边缘一样也属于高频分量.所以,为了从复杂的天空背景中检测出微弱的点目标,

\*国家自然科学基金(10974128)和陕西省自然科学基金(2006F47)资助

<sup>†</sup> Tel: 029-85303924 Email: robber@stu.snnu.edu.cn

收稿日期: 2010-04-02

修回日期: 2010-06-04

仅采用单帧的空域处理方法是无法实现的,必须利用多帧信号的能量积累方法才可能达到,也就是说必须运用时域信号处理技术来实现这个目的.其中,时域滤波方法是通常采用的技术之一.

## 2 时域滤波原理

时域滤波算法的基本思想是通过目标点与背景云层在经过固定像素点时的时域响应的差异来区分目标与云层背景,从而达到抑制云层杂波,有效提取目标点的目的.

云层与目标经过一个固定像素点的时域响应曲线如图1.其中,图1(a)为云层经过一个固定像素点时的时域响应曲线,从图中可以看出云层进入固定像素点时,由于云层的运动速度缓慢,像素强度值会持续增加.图1(b)为目标点经过固定像素点时的时域响应曲线,由于红外弱小目标的运动速度相对于云层较快,因此目标时域响应曲线有一个比较尖锐的峰值.从曲线图上可以看出,像素点对云层与目标的时域响应明显不同,可以利用这一特性,使用时域滤波算法将云层背景与目标区分开来.

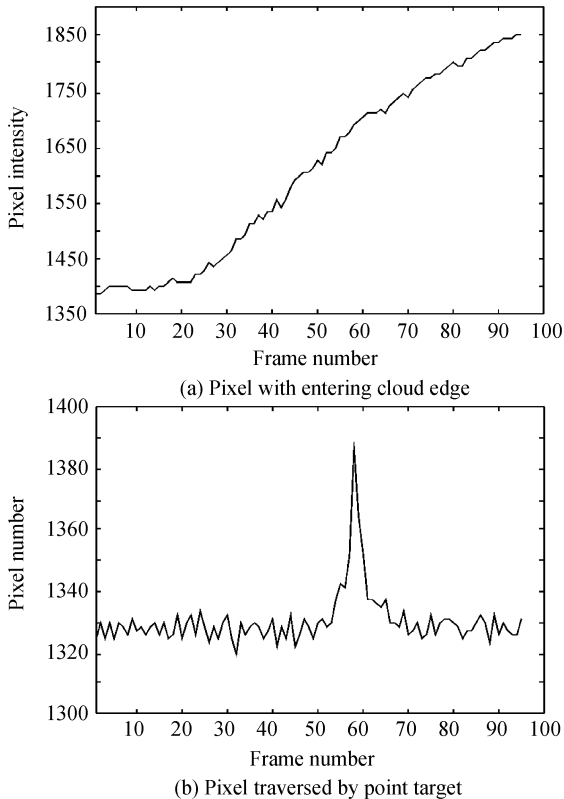


图1 红外图像序列的时域框图

Fig.1 Temporal profiles of IR image sequence

红外图像序列的每一帧都可以看成式(2)所示的二维矩阵,图像序列在时间方向上可以看成是三维矩阵, $m$ 和 $n$ 分别代表矩阵的行数和列数.

$$f = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

二维矩阵 $f$ 从左到右从上到下重新排列成如式(3)所示的一维列向量,即

$$f_z = [x_{11}, x_{12}, \cdots, x_{1n}, \cdots, x_{m1}, x_{m2}, \cdots, x_{mn}]' \quad (3)$$

设红外图像序列共用 $t$ 帧,将每一帧图像重新排列成一维列向量的形式,再将这 $t$ 个一维列向量组合成一个新的二维矩阵 $F$ ,其行数为 $m \times n$ ,列数为 $t$ ,如式(4)

$$F = [f_1, f_2, \cdots, f_t] \quad (4)$$

至此,将图像序列转换成了一个二维矩阵,该矩阵包含了所有的图像信息.参考文献[15]根据云层与目标的差异,提出了一种用递归的衰减正弦函数来实现时域滤波算法,其数学定义如式(5)

$$I_{k+1} = I_k \alpha e^{i\theta} + f_{k+1} e^{i\phi} \quad (k=1, 2, \cdots, t) \quad (5)$$

式中 $I_k$ 是第 $k$ 次运算的输出结果; $f_{k+1}$ 为时域滤波器的输入值,是矩阵 $F$ 中第 $k+1$ 个列向量; $\alpha$ 是一个介于0与1之间的衰减因子,用 $\alpha = e^{\log(0.5)/l}$ 表示, $l$ 是指数函数衰减到最大值的一半时的带宽,用以控制衰减速度; $\theta = 2\pi/P$ ,其中 $P$ 是用图像序列的帧数表示的周期; $\phi$ 是正弦函数的相位,用式(6)表示.

$$\phi = \arctan \left( \frac{1 - \alpha \cos \theta}{\alpha \sin \theta} \right) \quad (6)$$

由公式可知,时域滤波受参量 $P$ 和 $l$ 控制,根据经验值,当 $P$ 和 $l$ 相等时滤波结果更佳,用 $T(P, l)$ 表示参量为 $P$ 和 $l$ 的时域滤波器.

基于上述时域滤波原理,文献[16]提出了一种三重时域滤波算法(Triple Temporal Filter, TTF).该算法利用两个不同周期的时域滤波器和一个指数衰减滤波器对图像序列进行多次滤波,从而达到进一步抑制云层和提高信噪比的目的.文献[17]提出的一种多变参量时域滤波算法.在系统存储资源方面有很好的改进.但是,经实验检验,这些时域滤波算法都不能很好地滤除云层边界,而且受参量的影响,存在周期性,不能做到每一帧图像都有较好的处理结果,部分图像不能完全滤除云层,目标轨迹不够清晰.为了解决这个问题,本文提出了基于标准化处理的时域滤波算法.

## 3 图像序列的标准化

标准化处理<sup>[18]</sup>是对红外图像序列中相同位置上的像素点求均值和方差的过程,利用其均值和方差的特性来去除背景分量,并且将原始图像变换成均值为0,方差为1的标准图像信号.具体方法叙述为

对于二维矩阵  $F$ , 首先求其每一行的均值  $E$  和方差  $D$ , 然后对矩阵  $F$  的每个像素减去其相应行的均值再除以其标准差, 如式(7)

$$F_{ij} = (F_{ij} - E_i) / D_i \quad (i=1, 2, \dots, mn; j=1, 2, \dots, t) \quad (7)$$

式中

$$E_i = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t F_{ij} \quad (8)$$

$$D_i^2 = \frac{1}{t-1} \sum_{j=1}^t (F_{ij} - E_i)^2 \quad (9)$$

( $t$  为矩阵  $F$  的列数;  $i=1, 2, \dots, mn; j=1, 2, \dots, t$ )

经过图像序列的标准化处理, 有效地去除了图像部分背景分量. 将标准化预处理的结果作为时域滤波的输入值, 对时域滤波结果有了明显改善, 但是滤波后的图像中依然还有少量的噪音点. 为此, 本文加入了目标增强算法, 以进一步抑制噪音, 提高目标点的检测能力.

## 4 目标图像增强算法

经过时域滤波处理后, 图像中除了目标轨迹外, 还残留有少量的杂波点. 由于目标的轨迹具有连续性, 而残留噪音具有随机性. 因此, 本文采用目标增强算法, 以达到进一步降低噪音的目的.

对图像中的每一个像素, 以其为中心定义一个  $3 \times 3$  小区域, 在这个小区域内沿四个方向求像素的累加和, 如图 2.

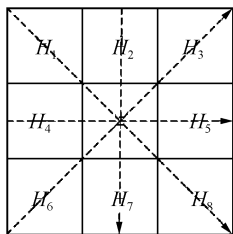


图 2 像素的移动方向

Fig. 2 The directions of pixel moving

首先在四个方向上求像素值累加的最大值  $S$ , 即  $H_1 + Z + H_8$ 、 $H_4 + Z + H_5$ 、 $H_3 + Z + H_6$ 、 $H_2 + Z + H_7$  的最大值, 然后设定一个阈值, 将它与  $S$  进行比较. 当  $S$  大于阈值时, 认为中心像素点  $Z$  是目标像素点, 而小于阈值时则认为中心像素点是噪音. 目标增强算法属于空域滤波范畴, 通过这种方式, 可以对残留的杂波点起到有效的抑制作用.

## 5 算法实现

本文所提算法的基本框架为: 首先对所获取的红外图像序列进行标准化预处理, 再用时域滤波算法对预处理后的图像序列进行滤波, 然后采用目标增强算法, 对残留的云层杂波和噪音做进一步抑制.

算法的具体实现步骤为:

1) 将  $t$  帧、大小为  $m \times n$  的红外图像序列中的每一帧按从左到右从上到下的顺序排列成列向量的形式, 如式(3)所示; 再将这  $t$  个列向量组合成一个二维矩阵  $F$ , 其中行数是一帧图像的像素总数, 列数是红外图像序列的帧数.

2) 把步骤 1) 中得到的二维矩阵  $F$  进行标准化处理. 首先根据式(8)和(9)求出矩阵中每一行的均值和方差, 然后利用式(7)完成标准化处理, 从而达到去除部分背景分量的目的.

3) 把标准化处理的输出结果作为时域滤波的输入. 标准化处理后的矩阵的每一列作为时域滤波的输入值  $f_{k+1}$ , 然后利用式(5)进行时域滤波处理, 其中输出结果  $I_k$  的初始值  $I_1$  用标准化处理后的矩阵的第一列表示, 从而有效地抑制云层边界.

4) 将时域滤波输出  $I_k$  转化成二维矩阵, 再利用目标增强算法对其进行处理, 以去除残留的杂波点.

## 6 实验结果与分析

本文利用的红外图像序列都是在云层杂波背景下缓慢移动的弱小点目标, 且目标运动速度都介于  $0.1 \sim 0.5$  像素/帧之间.

本文采用两组红外图像序列, 图像大小都是  $320 \times 244$ , 帧数为 95. 序列 1 是包含一个目标点的红外图像序列, 而序列 2 是包含两个目标点的红外图像序列, 两组图像序列都是以云层为背景的缓慢移动的目标点. 图 3 为两组图像序列中的第一帧图像. 图 4~7 分别给出了采用三重时域滤波算法和本文提出的基于标准化处理的时域和空域滤波优化算法的实验仿真结果.

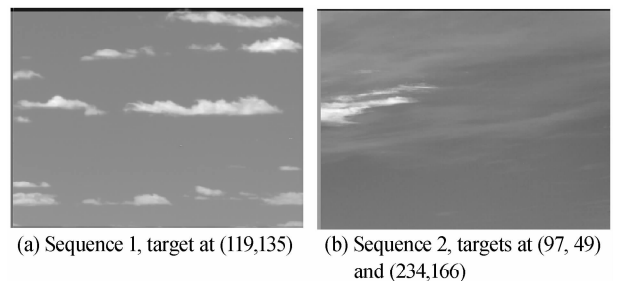


图 3 两个序列图像的第一帧

Fig. 3 The first frame of two images sequence

图 4 和图 5 所示为三重时域滤波处理结果, 本文选取的参量为  $P_1 = 40$ ,  $l_1 = 40$ ,  $P_2 = 35$ ,  $l_2 = 35$ ,  $l_3 = 11$ . 图 4 是包含一个目标的处理结果, 图 5 是包含两个目标的处理结果, 图中用白色框表示的是滤波后的目标轨迹. 从图中可以看出, 虽然三重时域滤波算法能够有效地抑制云层杂波, 但滤波过程受参量  $P$  和  $l$  的影响, 存在周期性, 不能有效地抑制每一

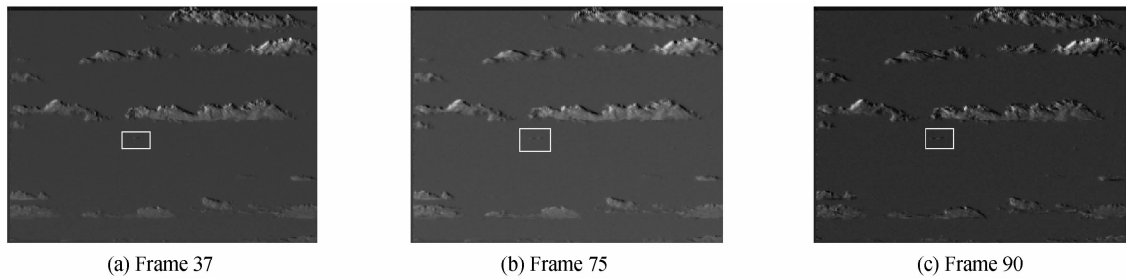


图4 序列1的三重时域滤波结果

Fig. 4 Image sequence 1, the results by TTF algorithm

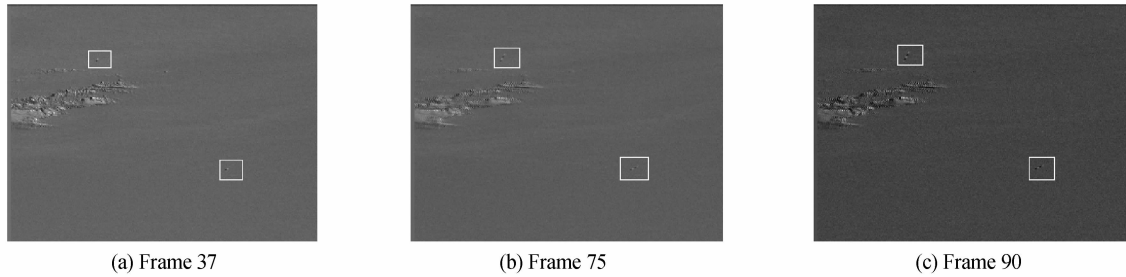


图5 序列2的三重时域滤波结果

Fig. 5 Image sequence 2, the results by TTF algorithm

帧图像的背景杂波,且残留云层边界,得到的目标轨迹也不够清晰.

图6和图7所示为基于标准化处理的时空域滤波优化算法的处理结果,选择的参量为 $P=35$ 、 $l=35$ .从图中可以明显的看出,优化算法有效地滤除了

云层杂波和噪音,而且随着滤波过程中帧数的不断增加,目标轨迹也不断增长.相对于三重时域滤波算法,优化算法进一步的滤除云层边界和噪音,得到更加明显的目标轨迹,从而有效地实现了目标的检测.

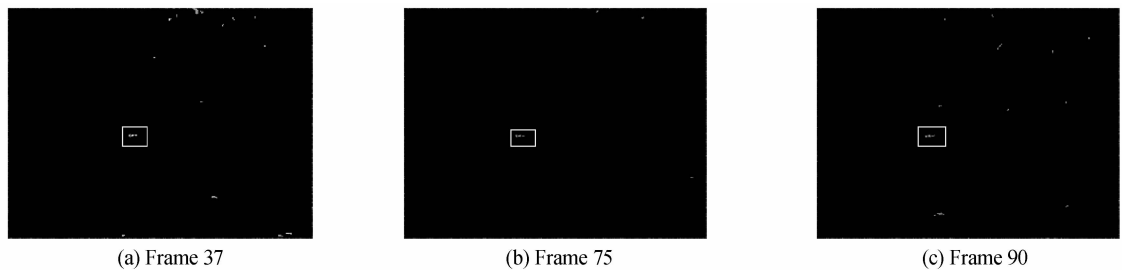


图6 序列1的时空域滤波结果

Fig. 6 Image sequence 1, the results by temporal and spatial filters algorithm

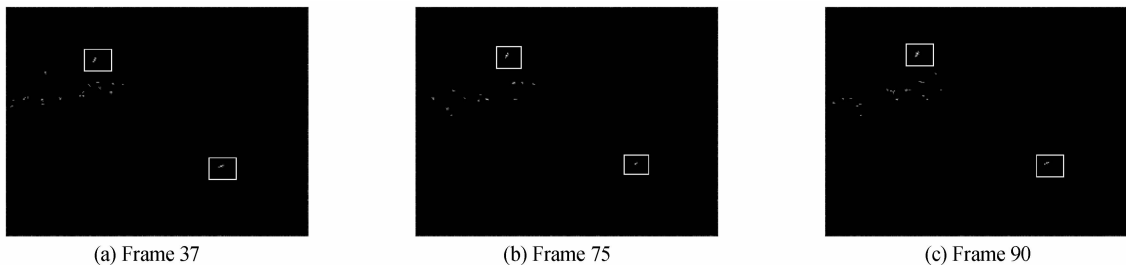


图7 序列2的改进时域滤波结果

Fig. 7 Image sequence 2, the results by temporal and spatial filters algorithm

## 7 结论

本文以缓慢移动的红外弱小目标为研究对象,在时域滤波的基础上,加入红外图像序列的标准化处理和目标增强方法,有效地抑制了云层杂波和噪音,清晰地检测出目标的运动轨迹,同时也降低了算

法的复杂度.尽管所提出算法取得了一定的效果,但是从仿真结果中可以看出,滤波得到的目标轨迹存在间断性,另外还残留有部分杂波点,所以有效地解决这些问题将是本课题组下一步研究的主要方向.

### 参考文献

- [1] GUAN Zhi-qiang, CHEN Qian, QIAN Wei-xian, et al. Infrared target tracking algorithm based on algorithm fusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5):860-865.

- 管制强,陈钱,钱惟贤,等.一种基于算法融红外目标跟踪方法[J].光学学报,2008,28(5):860-865.
- [2] MAADI A EI, MALDAGUE X. Outdoor infrared video surveillance: A novel dynamic technique for the subtraction of a changing background of IR images[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2007, 49(3): 261-265.
- [3] CHENG Lan, WANG Zhi-jie, JI Xiu-li. An novel algorithm for infrared small targets detection and tracking based on local image features[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(6): 324-326.
- 成兰,王志杰,姬秀荔.基于图像局部特征的红外弱小目标检测与跟踪算法[J].红外技术,2008,30(6):324-326.
- [4] BAL A, ALAM M S. Automatic target tracking in FLIR image sequences using intensity variation function and template modeling [ J ]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(5):1846-1852.
- [5] PARAVATI G, SANNA A, PRALIO B, et al. A genetic algorithm for target tracking in FLIR video sequences using intensity variation function [ J ]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(10): 3457-3467.
- [6] CHEN Bing, ZHAO Yi-gong, LI Xin. A new approach to target tracking during infrared image terminal guidance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 3034-3039.
- 陈冰,赵亦工,李欣.一种新的红外成像末制导目标跟踪方法[J].光子学报,2009,38(11):3034-3039.
- [7] ZHANG Tian-xu, LI Meng, ZUO Zheng-rong, et al. Moving dim point target detection with three-dimensional wide-to-exact search directional filtering[J]. *Pattern Recogn Lett*, 2007, 28(2): 246-253.
- [8] MIN Xiang-long, WANG Jiang-an, WU Rong-hua. Research on detection algorithm of point target in infrared image based on the operation of morphological filtering and frame- to-frame difference[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(7): 720-729.
- 闵祥龙,王江安,吴荣华.基于形态滤波与帧间差分的红外点目标检测算法[J].激光与红外,2008,38(7):720-729.
- [9] ZHANG Fei, LI Cheng-fang, SHI Li-na. Detecting and tracking dim moving point target in IR image sequence[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005,46(5): 323-328.
- [10] COMANICIU D, MEER P. Mean shift; a robust approach toward feature space analysis[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5):603-619.
- [11] XIANG Xiang, CHEN Wen-hui, ZENG Du. Intelligent target tracking and shooting system with mean shift [C]. *IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications*, 2008, 167: 417- 421.
- [12] COMANICIU D, RAMESH V, MEER P. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2000, 2: 142-149.
- [13] WEI Kun, ZHAO Yong-qiang, PAN Quan, et al. An improved similarity measure based IR target tracking algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(5): 987-991.
- 魏坤,赵永强,潘泉,等.一种改进相似度量的红外目标跟踪算法[J].光子学报,2008,37(5):987-991.
- [14] YANG Chang-jiang, DURAISWAMI R, DAVIS L. Efficient mean-shift tracking via a new similarity measure[C]. *In Proc IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, 1: 176-183.
- [15] SILVERMAN J, MOONEY M J, CAEFER E C. Temporal filters for tracking weak slow point targets in evolving cloud clutter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 37(1996):695-710.
- [16] ECAEFER C, SILVERMAN J, MOONEY M J. Optimization of point target tracking filters[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(1): 15-25.
- [17] WANG Lu-ping, YANG Wei-ping. Point target detecting algorithm based on temporal filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(9): 154- 157.
- 王鲁平,杨卫平.一种基于时域滤波的红外点目标检测算法[J].红外与激光工程,2007,36(9):154-157.
- [18] ZHAO Jing-yuan, WANG Li-ming, LIU Bin. The research of infrared image sequence enhancement based on SVD algorithm[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(1): 47-50.
- 赵璟媛,王黎明,刘宾.基于SVD算法的红外序列图像增强技术研究[J].红外技术,2009,31(1):47-50.

## An Algorithm Based on Temporal and Spatial Filters for Infrared Weak Slow Moving Point Target Detection

ZHANG Yuan, XIN Yun-hong, ZHANG Chun-qin

(College of Physics & Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, 710062, China)

**Abstract:** A temporal and spatial filter algorithm is presented to detect Infrared (IR) weak point targets moving slowly in the scenarios with cloud clutter and noise. Firstly, IR image sequence is processed by the normalization preprocess. Secondly, a filter is used to process the image sequence in the temporal domain, and then a target enhancement algorithm is constructed to suppress the residual dots which are attributed to the cloud clutter and noise. Finally, the computer simulations are made to verify the performance of the presented algorithm, and the results confirmed its effectiveness.

**Key words:** Infrared (IR) dim target; Temporal and spatial filter; Normalization preprocess



**ZHENG Yuan** was born in 1983. Now she is pursuing the M. S. degree at College of Physics & Information Technology, Shaanxi Normal University. Her research interests focus on the tracking and detecting of IR target.



**XIN Yun-hong** was born in 1967. Now he is a professor and deputy dean of College of Physics & Information Technology, Shaanxi Normal University. His research interests focus on image fusion, infrared location and multitarget-multisensor range and tracking.