

基于像素时域剖面分析的序列图像中 弱点目标检测算法

张兵 卢焕章

(国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 实验室,长沙 410073)

摘要 序列图像中弱点目标的实时检测算法,是光学精确制导信息处理系统中的关键算法之一。首先对现有基于像素时域剖面分析的检测算法进行了简要的综述,然后根据不同像素的时域剖面模型对其时域方差变化特性进行了详细分析,提出了一种基于自适应递归方差滤波器的检测算法。对仿真时序序列与真实图像数据进行实验,结果表明该算法可实现检测弱点目标。考虑到该算法可并行、递归计算,因此它在实时制导系统中有良好的应用潜力。

关键词 弱点目标 检测 时域剖面 自适应递归方差滤波器

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2005)10-1293-06

Temporal Profile Analysis for Dim Point Target Detection in Image Sequences

ZHANG Bing, LU Huan-zhang

(ATR Laboratory of School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Real-time detection algorithm for dim small moving target in image sequences is one of the key algorithms in optical image precise homing guidance systems. At first a brief introduction of current detection algorithms based on temporal profile analysis is addressed, and then noise and target's pixel temporal profile variance is thoroughly studied, finally a detection algorithm based on adaptive recursive variance filter (ARVF) is proposed. The designed algorithm can be used to improve the signal to noise ratio (SNR), so that the point target is easily segmented out. The results of simulated temporal sequences and real image data experiments show that the target detection's aim can be fully reached. The proposed algorithm can be implemented recursively and in parallel, which is practical for real-time homing guidance systems. The limitation of the algorithm and future work are also briefly discussed.

Keywords dim point target, detection, temporal profile, ARVF

1 引言

序列图像中慢速运动的低信噪比小(点)目标是指信噪比在2~3左右,帧间运动速度不超过一个像素的目标,针对此类目标的检测算法是光学精确制导系统中的关键算法之一。

通常,针对此类目标的检测算法由以下3个步骤组成^[1,2]:空域预处理,滤除原始图像的起伏背景杂波;多帧目标能量积累,即设法沿目标运动轨迹累加目标能量以提高信噪比;轨迹的预测-匹配关联处理,利用目标轨迹的连续性特征检测目标。根据光学精确制导任务的实时处理要求,希望所采用的检测算法具有如下特点^[3]:

基金项目:国家重点实验室基金项目(51483040101KJ0101);国家“863”基金项目(2003AA813031)

收稿日期:2004-10-26;改回日期:2005-03-04

第一作者简介:张兵(1976~),男,1998年于国防科技大学获电子学与信息系统专业学士学位,2001年于国防科技大学获信息与通信工程专业硕士学位,现为国防科技大学在读博士研究生。当前的研究方向为多波段红外成像导引头信息处理算法及其实现。E-mail: gfkdz@163.com

(1) 零均值特性, 即对幅度恒定的目标, 输出响应仍为近似幅度恒定的信号;

(2) 对图像序列中每个像素的处理应该一致, 或近似相同, 以便采用统一的硬件单元进行实时加速处理;

(3) 处理算法尽可能为递归方式;

(4) 能够检测低信噪比(2~3 左右)的运动小目标;

3 维空-时检测算法, 如 3 维匹配滤波处理^[4,5]、多级序贯假设检验^[6]等, 尽管在理论上具有很好的检测性能, 但是它们不能同时满足所希望具有的计算一致性、并行性和递归性等特点, 且计算量与存储量巨大, 在实际系统中难于实现。

像素时域剖面是在获得的图像序列中, 对应于成像平面中的每个像素, 在采样图像帧上获得的强度序列值。若直接对像素的时域剖面进行处理, 则等效于将序列图像中点目标的 3 维空-时检测问题转换为 1 维时域检测问题, 而 1 维时域滤波器可以采用并行递归计算的差分方程来实现, 因此基于像素时域剖面分析的处理算法可满足所希望检测算法具有的一致性、并行性和递归计算等特性。

文献[7]~[11]提出了采用三重时域衰减滤波(TTF)的方法, 对像素的时域剖面进行处理, 但在实际应用中需要使用大量的真实图像序列数据对滤波器进行训练才能获得合适的 6 个参数, 不具有对不同背景杂波的广泛适应性。文献[12]~[16]认为在像素时域剖面中点目标和云杂波边缘点等效于奇异波动点, 提出了基于连续小波变换分析(CWT)和广义似然比检验(GLRT)的算法检测候选目标点, 再使用后续的空域算法区分目标与虚警点。由于采用 CWT 和 GLRT 检测目标, 需要存储整个图像序列的数据, 因此这种算法不但存储量大, 而且运算复杂, 在对处理速度和存储量有严格要求的实时制导应用中该算法难于用硬件加速实现。文献[17]使用 4 阶 IIR 滤波器检测目标, 它首先分析云杂波边缘、目标与噪声时域剖面的频谱特性, 再根据它们在频谱特性上的差异, 设计出具有不同截断频率的 IIR 滤波器, 对像素的时域剖面进行滤波, 抑制背景和增强目标信号。IIR 滤波器的优点是可以采用差分方程递归实现, 大大缩小了存储量。但它的缺点仍然是需要大量的先验图像数据以确定滤波器参数, 并且设计出的 IIR 滤波器为高阶滤波器, 需存储多帧图像序列, 硬件开销大。文献[3]、[18]针对目

标、噪声、云杂波边缘点的时域剖面方差变化的不同, 提出采用时域方差滤波器的方法进行检测, 这种算法计算速度快、效率高, 所使用的计算参数易于设定。综上分析, 认为采用无需训练参数的自适应时域方差滤波器可满足精确制导处理机实时运算的要求。

根据噪声和目标的像素时域剖面的统计模型, 对目标和噪声的时域方差进行了详细分析, 随后对自适应时域方差滤波器进行了深入研究, 并提出了易于工程实现的运算流程。对仿真时域剖面序列和真实红外图像序列的滤波结果表明, 算法能够大幅度地提升目标的信噪比, 达到可靠分割检测目标的目的。

2 自适应方差滤波器 (ARVF) 算法

2.1 像素时域剖面模型与时域方差分析

当图像背景包含有起伏杂波时, 首先要对杂波进行抑制, 预处理算法可参考文献[19], 这里仅考虑干净背景图像的情况, 此时背景像素的信号可用高斯噪声来描述, 点目标像素的信号可看成是目标辐射强度与背景噪声的叠加, 使用数学方程描述如下:

背景像素的强度

$$I(k) = c + n(k) \quad (1)$$

其中, c 为背景均值, $n(k)$ 为服从 $N(0, \sigma_n^2)$ 的白噪声。

点目标像素的强度

$$I(k) = f(k) + c + n(k) \quad (2)$$

其中, $f(k)$ 为目标辐射能量, $k_1 \leq k \leq k_2$, 意味着目标从时刻 k_1 到 k_2 经过此像素。由假设可知, 点目标与背景的强度是不同的, 它比其周围像素强或弱。当目标经过此像素时, 将会引起该像素时域剖面的强度上升或下降。

定义时域方差为在给定的时间窗内序列强度的方差。以下各式中推导所用的 $E\{\cdot\}$ 表示在给定的时间窗内计算序列强度的平均值。

对背景像素时域剖面而言, 其时域方差为

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Background}}^2 &= E\{I^2(k)\} - E^2\{I(k)\} \\ &= E\{c^2 + n^2(k) + 2cn(k)\} - E^2\{c + n(k)\} \\ &= E\{n^2(k)\} - E^2\{n(k)\} \\ &= \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (3)$$

对目标像素时域剖面而言,其时域方差为

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Target}}^2 &= E\{I^2(k)\} - E^2\{I(k)\} \\ &= E\{f^2(k) + n^2(k) + 2f(k)n(k)\} - \\ &\quad E^2\{f(k) + n(k)\} \\ &= \begin{cases} \sigma_n^2 + \sigma_f^2 & k_1 \leq k \leq k_2 \\ \sigma_n^2 & \text{其他时刻} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

对上述方程分析可知,当目标出现时,有 $\sigma_{\text{Target}}^2 > \sigma_{\text{Background}}^2$, 否则有 $\sigma_{\text{Target}}^2 = \sigma_{\text{Background}}^2 = \sigma_n^2$ 。

如上分析,可利用像素时域剖面强度序列的时域方差变化来检测目标。当有目标通过或离开某个像素时,会引起其强度出现波动,时域方差增大,则可判别此像素点为可能的目标点。在计算时域方差之前,首先要根据目标在图像帧间运动速度的范围确定计算时域方差的时间窗的长度。若时间窗取得过长,则计算出的时域方差波动变化很小,无法反映目标对该像素的强度的影响,算法失效。

2.2 ARVF 的递归计算流程

N 点长的序列 $I(k)$, 时域方差为

$$\sigma^2(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (I(k) - \bar{I}(N))^2 \quad (5)$$

其中, $\bar{I}(N)$ 为 N 点长序列的均值。因为使用式(5)计算序列的时域方差需要存储全部序列强度值,在实际应用中存储量过大,不便于系统实现,将其改为近似递归计算式如下:

$$\begin{aligned} \bar{I}(N) &= \frac{\sum_{k=1}^N I(k)}{N} \\ &= \frac{\bar{I}(N-1) \cdot (N-1) + I(N)}{N} \\ &= \frac{\bar{I}(N-1) \cdot (N-1)}{N} + \frac{I(N)}{N} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $I(N)$ 为序列第 N 点的强度值。 $\bar{I}(N-1)$ 为序列前 $(N-1)$ 个点的均值。

同理推导其方差的递推计算公式为

$$\begin{aligned} \sigma^2(N) &= \frac{1}{N} \left[\sum_{k=1}^{N-1} (I(k) - \bar{I}(N))^2 + (I(N) - \bar{I}(N))^2 \right] \\ &= \frac{1}{N} [(N-1)\sigma^2(N-1) + (I(N) - \bar{I}(N))^2] \\ &= \frac{(N-1)}{N} \sigma^2(N-1) + \frac{1}{N} (I(N) - \bar{I}(N))^2 \end{aligned} \quad (7)$$

使用上述 N 点序列的均值和方差递归计算公式,分别计算在给定时间窗内像素时域剖面的均值、方差、方差的均值以及方差变化序列的均值,并根据

输入图像的序列性,将计算结果构成新的序列值,取方差变化序列的均值序列作为最终的滤波输出结果。令 M 表示计算均值的时间窗长度, N 表示计算方差的时间窗长度, $I(k)$ 表示第 k 帧时像素时域剖面序列的强度值, $\bar{I}_M(k)$ 表示时间窗为 M 点时的时域均值序列, $\sigma_N^2(k)$ 表示时间窗为 N 点时的时域方差序列,算法的计算流程如下:

(1) 输入新图像后,计算 $\bar{I}_M(k)$, $\sigma_N^2(k)$;

(2) 计算 $\sigma_N^2(k)$ 序列的 M 点均值序列 $(\sigma_N^2(k))_M$;

(3) 计算方差变化序列 $\sigma_N^2(k) - (\sigma_N^2(k))_M$;

(4) 计算方差变化序列的 M 点均值序列。

$R_1(k) \sim R_4(k)$ 分别表示上述 4 个步骤的计算结果,并使用符号 $\langle \cdot \rangle_M$ 表示取 M 点均值计算操作,则上述计算流程对应于下面 4 个方程式:

$$R_1(k) = \langle I(k) \rangle_M \quad (8)$$

$$R_2(k) = \langle (I(k) - R_1(k))^2 \rangle_N \quad (9)$$

$$R_3(k) = R_2(k) - \langle R_2(k) \rangle_M \quad (10)$$

$$R_4(k) = \langle R_3(k) \rangle_N \quad (11)$$

以计算 $R_1(k)$ 为例来说明递归计算 M 点均值序列的具体方法。定义积累和算子 S , 计算如下:

(1) 初始化

$$S(0) = M \times I(0) \quad (12)$$

(2) $k=1$

$$S(1) = I(1) + \left(S(0) - \frac{S(0)}{M} \right) \quad (13)$$

(3) 输入第 k 帧图像时

$$S(k) = I(k) + \left(S(k-1) - \frac{S(k-1)}{M} \right) \quad (14)$$

由以上定义,则在输入第 k 帧图像时有

$$R_1(k) = \frac{1}{M} S(k) \quad (15)$$

式(15)实际上就是式(6),只不过是引入积累和算子 S 作为中间函数。同理可计算 $R_2(k) \sim R_4(k)$ 。方程式(8)~式(11)中的参数 M 和 N 的取值与目标的帧间运动速度范围有关,应以最大程度突出像素时域剖面方差变化为准则进行选择。 M 和 N 的取值不能过大,否则将会导致候选目标像素时域方差序列的变化不明显,反映不出目标对像素强度的影响; M 和 N 的值也不能过小,否则计算出的时域方差序列波动过于剧烈,无法分辨噪声和目标之间引起的时域方差变化。因为在所研究的高帧频序列图像中,感兴趣目标的速度范围在 $0.02p/f$

至 $0.5p/f$ 之间,目标通过某个像素所需的图像帧数最多为 50,最少为 2。所以 M 和 N 的取值应在 2 和 50 之间。因为均值的计算需要大的样本数据,而计算方差变化时可相应缩小样本数据,所以 M 应大于 N ,在此令 $M = 2N$ 。综合考虑,且为便于硬件加速实现(乘除因子为 2 的幂次方时,乘法可采用移位操作实现),在此取 $M = 32, N = 16$ 。在后面的实验中看到它们能够满足分析问题的需要。

从式(8)~式(15)清楚地看到,ARVF 对输入图像中每个像素的时域剖面序列,递归计算其时域方差变化的序列,运算形式简单,存储量小,具有前面所分析的理想小目标检测算法的 4 个特点。

3 实验及结果分析

实验由两部分组成:第 1 个实验是模拟产生一个时域剖面强度序列,然后在其中嵌入一个强度为高斯衰减分布的小目标,使用上述 ARVF 进行计算,观察得到的时域方差变化曲线图,检验 ARVF 对仿真弱小目标序列的检测效果,并定量计算信噪比提升的程度;第 2 个实验是对获得的真实红外图像序列应用此检测算法,演示 ARVF 在真实图像序列中对弱小目标的检测能力。

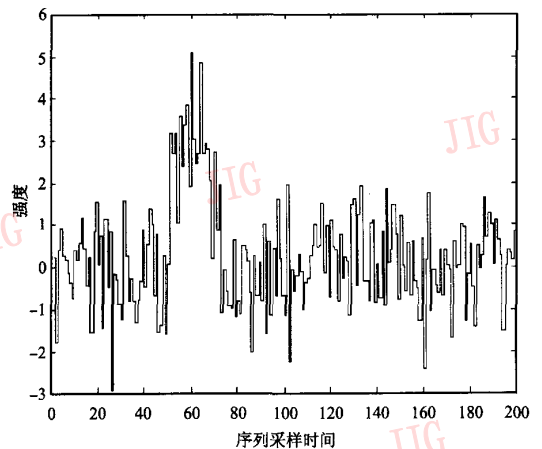
3.1 仿真时域剖面强度序列的滤波结果

时域剖面序列长度 $N = 200$,背景序列服从 $N(0, \sigma_{\text{Noise}}^2)$ 分布。此处取 $\sigma_{\text{Noise}} = 1$ 。目标信号为高斯脉冲形状,峰值位置于 $N = 60$ 处,峰值信噪比 $\frac{S_{\text{max}}}{\sigma_{\text{Noise}}} = 3$ 。目标运动速度 $v = 0.05p/f$ 。仿真的目标像素时域剖面序列如图 1(a)所示,滤波实验结果如图 1(b)所示。

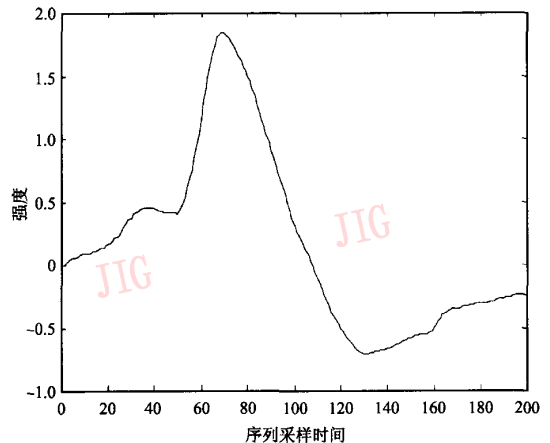
在仿真的目标像素时域剖面序列中,目标出现在 $N = 60$ 左右的位置。但是由于目标信噪比很低,很难直接将目标分割出来。在 ARVF 输出的 R4 序列中噪声得到了充分地抑制,目标强度得到了大幅度地提高。经过 1000 次的仿真实验,统计输出序列中信噪比的平均值为 13.821,较输入信噪比提升幅度为 6dB 左右,验证了 ARVF 增强目标信噪比的能力。

3.2 真实红外图像序列的检测

实验数据为从 AFRL 实验室获得的真实图像序列^[11]。图像尺寸为 320×244 ,帧频为 30fps,采样时间近似为 3s,帧长为 95。实验采用样本“m21f”图像



(a) 仿真的目标像素时域剖面序列



(b) 时域剖面的方差变化均值序列

图 1 仿真时域剖面强度序列的滤波结果

Fig. 1 Detection result of simulated target pixel temporal profile

序列。此图像样本数据记录的是处于干净夜晚天空中的包含慢速移动低信噪比小目标红外图像序列,小目标最终的位置大约在(153,133)处。对图像平面上的 $320 \times 244 = 78\,080$ 个像素的 95 帧图像进行递归计算 $R_1 \sim R_4$,并绘制输入图像、滤波输出的方差变化图像和滤波前后水平通过目标位置点的灰度强度序列,结果如图 2 所示。

观察原始红外图像可知,由于目标的信噪比很低,无法直接从图像中分割出来,而由滤波得到的时域方差变化图像和水平经过目标点位置的灰度强度序列可知,目标位置处(横坐标为 153)的灰度强度得到了充分的提升,采用门限分割的方法就可将目标准确分割出来。

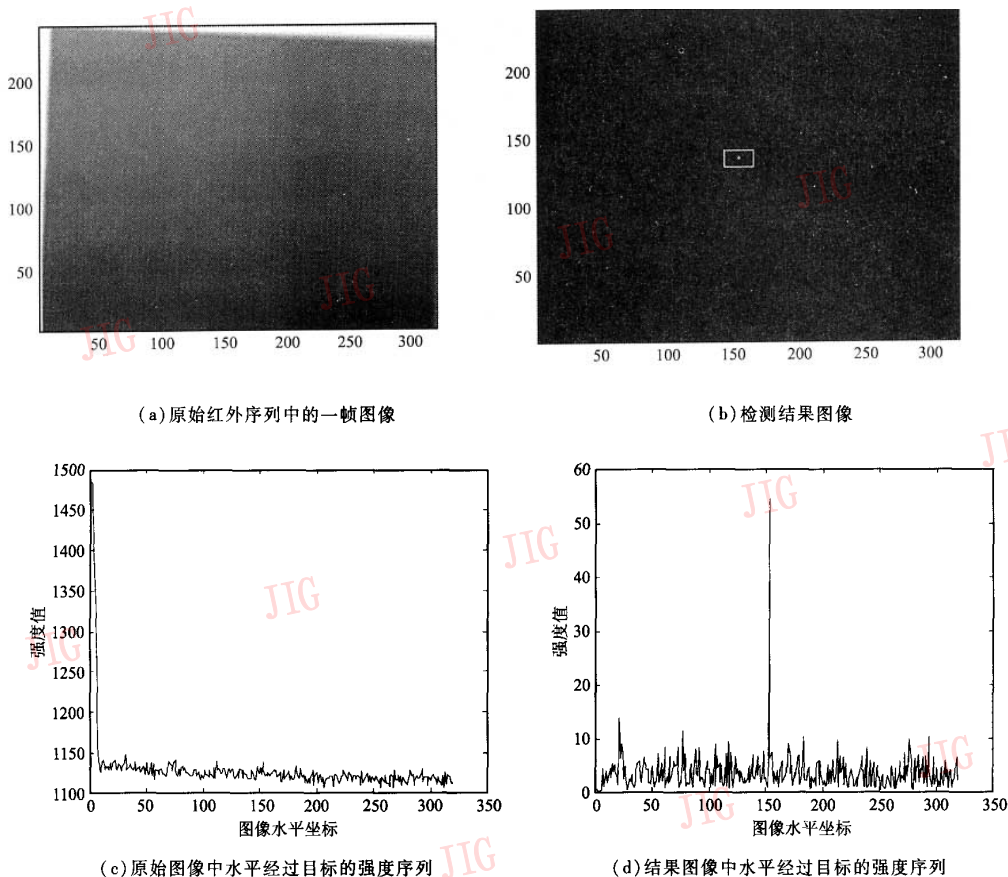


图 2 真实红外图像序列的检测结果

Fig. 2 Detection result of real IR image sequences

4 结 论

基于像素时域剖面分析的 ARVF 检测算法,不但结构简单,而且只需存储 4 帧计算结果图像和 1 帧输入图像,存储量少,具有前面提出的理想小目标检测算法应具有 4 个特点,为实时精确制导信息处理机提供了良好的算法支撑。

但应该注意的是,由于该算法仅仅利用了成像平面上每个像素的时域相关信息,而弱小目标在图像平面上慢速运动时,相邻像素之间还有轨迹的空间相关信息可资利用,可构造出在进行自适应方差滤波之前的空域预处理^[20]与对滤波结果图像的空域后处理算法。在具有缓慢移动的云杂波背景中,使用 ARVF 对序列图像进行滤波后,云杂波边缘点会在输出结果图像中形成虚警点,使用空域预处理和后处理算法可滤除杂波边缘虚警点。文献

[21]采用多模检测算法进行处理,综合了各种检测算法的优点,仿真实验结果表明多模检测算法稳健,且检测效果优于各单独检测算法,但这种多模算法性能的提升是以增加系统冗余处理模块来实现的,在实际应用受到系统软硬件规模的限制,但这种改进思路值得尝试。

参考文献 (References)

- 1 Kemper P J, Dimarco J S. Imaging infrared seeker processing overview: image processing, adaptive thresholding, and track processing [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing [C], Orlando, Florida, USA, 1999, 3701: 266 ~ 273.
- 2 Chen Hua-ming. Research on Point Targets Detection and Information Processing System Design for Infrared Homing Guidance [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. [陈华明. 图像末制导中弱小运动点目标检测算法与实现技术 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.]

- 3 Silverman J, Cafer C E, DiSalvo S, *et al.* Temporal filtering for point target detection in staring IR imagery: II. recursive variance filter [A]. In: Proceeding of the SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets [C], Orlando, Florida, USA, 1998, **3373**: 44 ~ 53.
- 4 Reed I, Gagliardi R, Stotts L. Optical moving target detection with 3D matched filtering [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, **24**(4): 327 ~ 335.
- 5 Reed I, Gagliardi R, Stotts L. A recursive moving-target-indication algorithm for optical image sequences [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1990, **26**(3): 434 ~ 439.
- 6 Blostein S D, Huang T S. Detecting small moving objects in image sequences using sequential hypothesis testing [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, **39**(7): 1611 ~ 1629.
- 7 Mooney J M, Silverman J, Cafer C E. Point target detection in consecutive frame staring infrared imagery with evolving cloud clutter [J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(9): 2772 ~ 2784.
- 8 Silverman J, Mooney J M, Cafer C E. Temporal filters for tracking weak slow point targets in evolving cloud clutter [J]. *Infrared Physics and Technology*, 1996, **37**(6): 695 ~ 710.
- 9 Cafer C E, Silverman J, Mooney J M, *et al.* Temporal filtering for point target detection in staring IR imagery: I. damped sinusoid filters [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets [C], Orlando, Florida, USA, 1998, **3373**: 111 ~ 122.
- 10 Cafer C E, Silverman J, Mooney J M. Optimization of point target tracking filters [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, **36**(1): 15 ~ 25.
- 11 IR Sensor Technology Branch. Moving Point Target Detection in Consecutive Frame IR Imagery [EB/OL]. http://www.sn.af.mil/pages/SNH/ir_sensor_branch, 2003-06-15.
- 12 Tzannes A P, Brooks D H. Temporal filters for point target detection in IR imagery [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference on Infrared Technology and Applications [C], Orlando, Florida, USA, 1997, **3061**: 508 ~ 520.
- 13 Tzannes A P, Brooks D H. Detection of point targets in image sequences by hypothesis testing: A temporal test first approach [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Phoenix, Arizona, USA, 1999, **6**: 3377 ~ 3380.
- 14 Tzannes A P, Brooks D H. Point target detection in IR image sequences: A hypothesis-testing approach based on target and clutter temporal profile modeling [J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**(8): 2270 ~ 2278.
- 15 Tzannes A P, Brooks D H. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(2): 570 ~ 586.
- 16 Tzannes A P. Detection of small targets in infrared image sequences containing evolving cloud clutter [D]. Boston, MA, USA: Northeastern University, 1998.
- 17 Lim E T, Deshpande S D, Chan C W, *et al.* Dim point target detection in IR imagery using multistage IIR filter [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference on Acquisition, Tracking, and Pointing [C], Orlando, Florida, USA, 2000, **4025**: 194 ~ 202.
- 18 Lim E T, Shue L, Ronda V. Adaptive mean and variance filter for detection of dim point-like targets [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets [C], Orlando, Florida, USA, 2002, **4728**: 492 ~ 502.
- 19 Deshpande S D, Er M H, Ronda V, *et al.* Max-mean and max-median filters for detection of small targets [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets [C], Denver, Colorado, USA, 1999, **3809**: 74 ~ 83.
- 20 Zhang Bing, Lu Huan-zhang. Detection algorithm for small target in cluttered cloud background image sequences [J]. *Infrared Technology*, 2004, **26**(6): 66 ~ 71. [张兵, 卢焕章. 云杂波背景图像序列中小目标检测算法研究 [J]. *红外技术*, 2004, **26**(6): 66 ~ 71.]
- 21 Lim E T, Shue L, Ronda V. Multimode fusion algorithm for robust dim point-like target detection [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference on Acquisition, Tracking, and Pointing [C], Orlando, Florida, USA, 2003, **5082**: 94 ~ 102.