

基于改进 DPA 的空间小目标检测算法

张玉叶¹, 王春歆²

(1. 海军航空工程学院青岛分院, 山东青岛 266000; 2. 海军北海舰队指挥所, 山东青岛 266000)

摘要: 针对以往动态规划算法(Dynamic Programming Algorithm, DPA)单点能量累积效率低、不能有效检测中途入场目标的问题,从三方面对 DPA 改进并应用于空间小目标检测.第一,对递归方程进行修改,利用多点累积方法克服工程应用中人为增加光学散焦导致目标信息丢失的问题;第二,将各个速度平面分别计算修改为速度更新,减少计算量;第三,增加对入场目标的特殊处理,克服不能有效检测中途入场目标的问题.利用实摄序列图像对比实验,证明改进的有效性.

关键词: DPA; 小目标检测; 多点累积; 入场目标

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 03-0556-05

Space Small Targets Detection Based on Improved DPA

ZHANG Yu-ye¹, WANG Chun-xin²

(1. Qingdao Branch, Navy Aeronautical and Astronautical University, Qingdao, Shandong 266041, China;

2. Institute of Command and Control, North Sea Fleet, Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: Former DPA(Dynamic Programming Algorithm) has problems of low efficiency in energy accumulation with single point and could not detect entrance target in time. Focusing on the problems we improved the DPA in three aspects and applied it in space small target detection. First, the recursive equation was improved to avoid information loss, which caused by manual defocus in the project, by multi-point accumulation. Second, the calculation of multi-velocity plane was simplified as velocity update to reduce the computational complexity. Third, special process was used to solve the problem of entrance targets. The contrastive experiment with real space images proved the validity of our improvements.

Key words: DPA; small targets detection; multi-points accumulation; entrance target.

1 引言

动态规划法(Dynamic Programming Algorithm, DPA)是1985年 BARNIV^[1,2]提出的一种实用而有效的方法,它通过分段最优化过程完成序列图像轨迹的穷举搜索,以实现慢速运动弱小目标的检测.1993年 James^[3]对其改进,增加了非目标假设的约束;1996年 Tonissen^[4]又进行简化,省去了递归过程中复杂的转移函数和似然函数计算;2000年 Johnston^[5,6]利用极值理论分析了 Tonissen 的方法的性能.国内对 DPA 的研究也有很多^[7~12],主要是通过递归方程的改进来提高算法性能,例如文献[7, 8, 10, 11]以 Tonissen 的方法为基础,在递归方程中增加了方向系数来减小计算量和虚警点数.文献[9]提出用似然差代替 James 方法的似然比,相邻帧量测权值差作为转移函数.文献[12]将多个目标量测和作为评价函数增量,形成目标轨迹组的递归.

以往研究都是以单点进行能量累积,对散焦目标检测效率低,而且都没有考虑到中途入场目标的问题,在处理实际拍摄的图像时性能较差.针对这种情况,本文将 Tonissen 的方法应用于空间小目标图像检测,从递归方程、速度更新和入场目标处理三个方面进行了改进,用实摄图像对比实验证明改进的有效性.

2 DPA 原理

理想的小目标检测方法是搜索序列图像中全部可能的轨迹,根据连续性和一致性寻找真实目标.而 DPA 的本质是将不可行的穷举搜索视为马尔可夫过程,通过分段最优化解决小目标检测的穷举搜索问题.

2.1 目标运动模型

DPA 将整个图像序列的搜索过程分为 K 个阶段,假定目标匀速直线运动,目标运动模型为^[5]:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{X}_k \quad k = 1, \dots, K \quad (1)$$

其中 $\mathbf{X}_k = (x_k, y_k, u_k, v_k)^T$ 为位置和速度构成的第 k 阶段目标状态向量, 状态转移矩阵 \mathbf{F} 为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 T 为相邻两阶段的时间差. 量测模型表示为:

$$z_k(i, j) = \begin{cases} A_k + w_k(i, j) \\ w_k(i, j) \end{cases} \quad (2)$$

两种情况分别表示存在目标和只有噪声时的量测值, 其中 A_k 是目标灰度, $w_k(i, j) \sim N(\mu_w, \sigma_w^2)$ 假定为 IID 的加性高斯噪声.

2.2 评价函数递归和回溯

为了找到所有轨迹中的真实目标轨迹, 设定一个评价函数 I , 使得真实目标对应的评价函数值最大. 由于假定搜索过程为马尔可夫的, 因此 I 的最大值可通过递归求解各个阶段评价函数的最大值求得, 递归方程表示为^[6]:

$$I(X_k) = \max_{X_{k-1}} [I(X_{k-1})] + z_k(i, j) \quad (3)$$

$$\phi_k(X_k) = \arg \max_{X_{k-1}} [I(X_{k-1})] \quad (4)$$

$\phi_k(X_k)$ 用来记录各个阶段的最大化轨迹点. 对所有序列图像递归计算, 得到具有最大评价函数值的轨迹认为是目标轨迹, 最后根据 $\phi_k(X_k)$ 回溯各阶段轨迹点. 对于多目标情况, 可以通过预设虚警率计算评价函数阈值, 大于阈值的轨迹认为是目标^[3].

3 用于空间小目标检测的改进 DPA

为了将 DPA 应用于空间小目标图像, 首先分析目标图像特性. 由于相机与目标距离非常远, 在较短时间内, 空间小目标在图像中的运动可以认为是匀速直线运动且运动速度较慢. 序列图像经过配准帧差能够去除恒星干扰, 帧差后只有目标和噪声. 说明空间小目标图像能够满足 DPA 的基本前提, 下面详细分析应用中遇到的问题.

3.1 递归方程的改进

在工程应用中, 为了获得目标的亚像素坐标, 通常对光学系统进行散焦处理, 使大部分 (例如 80%) 目标能量集中于 2~5 像素, 这时, 目标量测模型表示为:

$$z_k(i, j) = \begin{cases} \omega_s A_k + w_k(i, j) \\ w_k(i, j) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\sum_R \omega_s = 1$, R' 为目标弥散圆区域, 即 $\sum_{R'} \omega_s A_k = A_k$, 表示目标能量被分散到弥散圆内的多个点.

Tonissen 的单点累积方法中, k 个阶段纯噪声累积能量为 kw , 目标累积能量为 $kw_s A_k + kw$, 目标与噪声轨

迹累积能量差为 $kw_s A_k$. 由于 $0 < \omega_s < 1$, 目标能量信息有一部分丢失, 而且算法对孤立高亮噪声点非常敏感, 容易产生虚警. 如果将弥散圆内目标的多个像素加和一起累积, 将提高目标能量累积效率. 假设多点累积区域 $r \times r$, 这时 k 个阶段纯噪声累积能量为 $kr^2 w$, 目标累积能量为 $kA_k + kr^2 w$, 目标与噪声轨迹累积能量差为 kA_k . 由于全部目标能量都参与累积, 增大了目标轨迹与噪声轨迹的累积能量差, 使目标与噪声更易区分. 据此, 将式(3)的递归方程修改为多点累积, 同时增加方向控制权重以减少能量扩散:

$$I(X_k) = \text{dir} \cdot \max_{X_{k-1}} [I(X_{k-1})] + \sum_R z_k(i, j) \quad (6)$$

其中, R 为多点累积区域, dir 为方向权重. 如果直接进行多点累积, 将会产生来自同一目标内不同点的多条高能量轨迹. 由于目标灰度分布通常可以假定为二维高斯模型^[13], 通常中心存在最大灰度点, 因此累积区域设计为 $r \times r$ 范围内灰度小于中心像素的点, 以保证同一目标只产生一条高能量轨迹:

$$R = \{(i, j) | i = i_0 - r, \dots, i_0 + r, \quad (7)$$

$$j = j_0 - r, \dots, j_0 + r, z_k(i, j) \leq z_k(i_0, j_0)\}$$

其中 $z_k(i_0, j_0)$ 为中心点量测值. 方向权重 dir 设计为:

$$\text{dir} = \cos\left(\frac{\theta_{\text{pd}} - \theta_0}{\alpha}\right) \quad (8)$$

其中 θ_{pd} 表示前 k 个阶段的历史平均速度方向; θ_0 为第 k 阶段实际目标方向, α 为比例调节参数. 注意, 与文献[12]的多个单点目标灰度求和不同的是, 这里的多点灰度和是指一个目标的多个像素点灰度求和.

3.2 入场目标的处理

当序列图像中存在中途入场目标时, 以往 DPA 算法最终得到的评价函数值将由部分目标能量和部分噪声能量组成. 假设 a, b 两个目标灰度相同且恒定, b 目标第 k_1 帧入场. 第 k 帧时, Tonissen 方法中, a 目标轨迹评价值为 $kw_s A_k + kw$, 而 b 目标轨迹评价值为 $(k - k_1)\omega_s A_k + kw$, 与 a 目标和纯噪声轨迹相比, 只有当 $k - k_1$ 足够大, 即入场后帧数足够多时, b 目标才能被可靠检测出来. 可见, 目标轨迹的评价函数值被噪声部分弱化, 降低了目标轨迹与纯噪声轨迹的差别.

为了解决这个问题, 提高目标轨迹能量的累积速度, 弥补入场目标在前 $k_1 - 1$ 帧中的能量, 设计为每帧图像中距离边缘 R_v 个像素宽度范围内的点人为增加一条“虚拟轨迹”, R_v 为目标速度范围, 轨迹由 k_1 个当前像素点构成, 这些新轨迹与其它已有轨迹一起参与下一帧的能量累积, 其历史平均速度由下一帧中的点决定. 这样如果是目标点在图像边缘出现, 将会使其累积能量大大高于纯噪声轨迹. 按照这一方法, 根据目标模型式(5), 假设多点累积时累积区域覆盖目标弥散

圆,第 k 帧时,上述 a 、 b 两条目标轨迹评价函数值都为 $ka_k + kr^2w$,说明 b 目标刚入场其评价函数值就达到了场中目标的水平.这时 b 目标与纯噪声轨迹累积能量差为 ka_k ,远远大于 Tonissen 方法的 $(k - k_1)\omega_s A_k$.

3.3 目标速度更新

已知的文献对初始状态和目标速度计算的描述都非常简略或未提及.在 Tonissen 方法中,目标速度分量假定为常量不进行更新,因此需要对不同速度平面进行计算.为了在不降低算法性能的前提下减小计算量,本文设计了速度初始化与更新机制.根据实际拍摄间隔,将每帧定义为一个阶段.设计从第二帧开始确定状态速度,在递归过程中对速度进行更新,构造历史平均速度为各阶段速度的均值.假设目标速度恒定,但存在随机扰动,历史平均速度将逐渐逼近真实速度,目标状态方程也使用历史平均速度更新.

原始算法计算的状态个数为 $MNKR_m R_v$,即图像长 \times 宽 \times 帧数 \times 目标机动范围 \times 速度范围,而修改后只需在第一帧考虑速度范围,计算的状态个数为 $MNR_m R_v + MNR_m(K - 1)$,是原来的 $\frac{R_v + K - 1}{(R_v K)}$.当速度范围为 3,帧数为 5 时,计算量大约只有原算法的一半.

DPA 计算完成后,评价函数值大于某阈值的轨迹认为真实轨迹.由于算法中考虑了目标机动范围,因此同一目标可能产生多条评价函数值较大的轨迹,这里

以是否与最大评价函数轨迹具有多个相同轨迹点为依据,合并来自相同目标的多条轨迹.

4 算法性能分析

算法的评价函数阈值可以根据预设虚警率来计算得到.假设最理想情况,噪声轨迹的方向权重 dir 全为 1,并且所有累积区域内噪声像素都参与累积,噪声服从正态分布 $N(\mu_w, \sigma_w^2)$ 且 IID,噪声轨迹在 k 帧图像中的 $k \times r \times r$ 个像素和服从正态分布 $N(kr^2\mu_w, kr^2\sigma_w^2)$,大于某阈值的概率(虚警率)可以通过查正态分布概率表得到.假设目标在图像上的弥散圆为 m 个像素,每个目标像素灰度服从正态分布 $N(A_i, \sigma_w^2)$, $i = 1, \dots, m$, k 帧图像每帧 m 个目标像素和 $r^2 - m$ 个噪声像素灰度和近似服从 $N(k \sum_{i=1}^m A_i + k(r^2 - m)\mu_w, kr^2\sigma_w^2)$,某条轨迹有

k' ($k' < k$) 个真实点的概率分布近似服从 $N(k' \sum_{i=1}^m A_i + (kr^2 - k'm)\mu_w, kr^2\sigma_w^2)$,可以根据预设阈值来确定检测概率.算法不同检测帧数下的虚警概率曲线如图 1,不同噪声标准差的检测概率如图 2,不同目标灰度的检测概率如图 3,计算参数为:噪声均值 100,噪声标准差 10,目标灰度 120,弥散圆面积 3×3 ,弥散圆内目标像素数 3,检测帧数 8.更精确、更具体的检测概率与虚警率分析请参考文献[6].

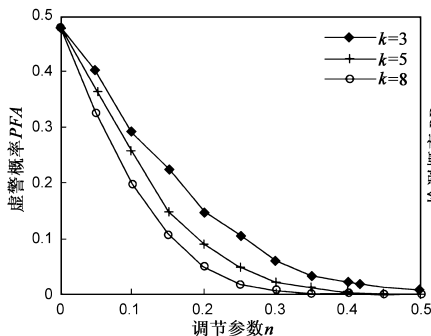


图1 虚警率曲线

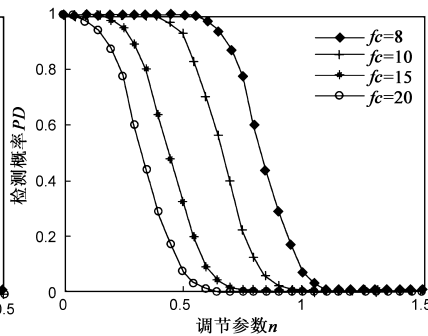


图2 不同标准差下的检测概率曲线

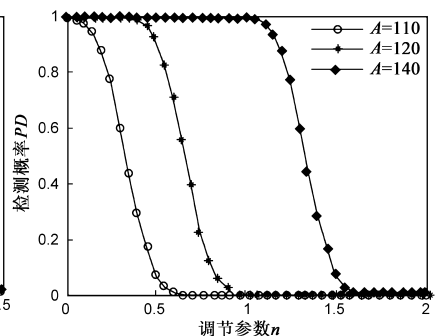


图3 不同目标灰度下的检测概率曲线

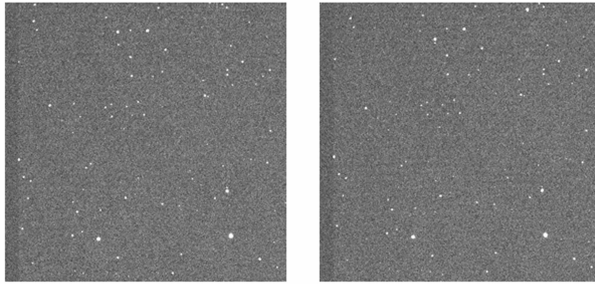
5 实验结果及分析

为了对比检验算法效果,利用地基实摄空间小目标序列图像进行实验,图像为 512×512 像素,共有三个目标,其中一个在第 5 帧入场.图像有 256 灰度级,灰度均值 21.5,标准差 32.0,根据公式 $SNR = 10 \lg \frac{I_{\max} - B}{\sigma_n}$ [14] 计算得到图像信噪比为 8.6.首先利用恒星三角形定位方法 [15] 帧差,得到只包含目标和噪声的序列图像.再以 1 帧为 1 个阶段,执行 DPA 递归,最后合并相同目标产生的轨迹.实验结果如图 4,其中图 4(a)为原始序列图像,图 4(b)为经过配准帧差后的序列图像,图 4(c)为本文方法在相应帧数的检测结果,已经经过了轨迹合

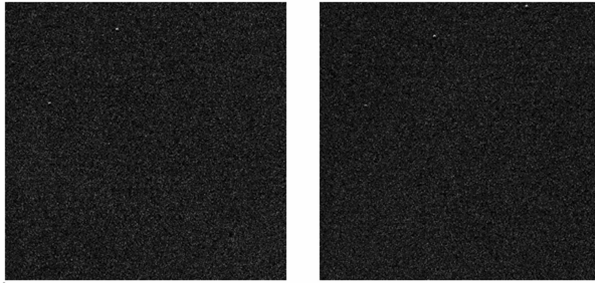
并处理,并标出了轨迹坐标.

表 1 是第 3、5、7、9 帧图像得到的目标轨迹,可以看出算法从第 3 帧开始就已经找到目标,但是由于帧数较少存在多条虚假轨迹.随着递归过程的进行,到第 5 帧时已经排除了虚警,检测出真实目标.由于对边缘入场目标的特殊处理,第三个目标在第 5 帧刚入场就被检测到,但是由于信息量很少,得到的轨迹的是一条经过目标点的虚假轨迹,到第 7 帧已经找到的目标的运动方向,第 9 帧时可以看出目标的真实轨迹已经完全检测出来.

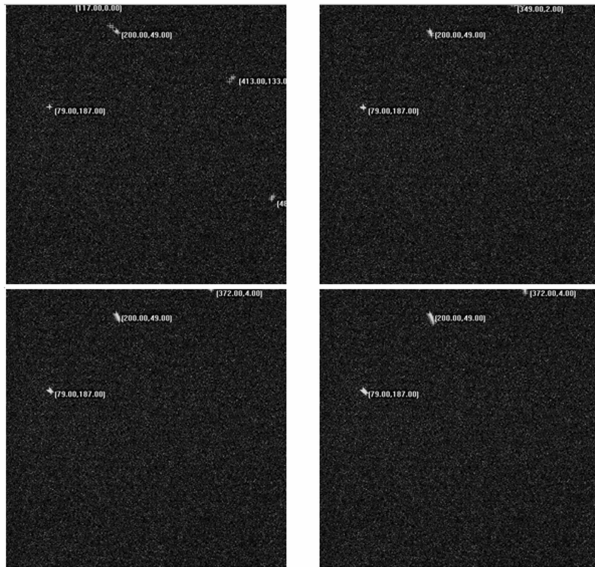
图 5 为 Tonissen 方法的单点能量累积结果,由于图



(a) 原始序列图像第3、9帧



(b) 原始图像相邻帧配准差分后的序列图像第3、9帧



(c) 算法第3、5、7、9帧检测结果

图4 算法实验图像及结果

中噪声较大,孤立高亮点较多,导致虚警点也较多,该图为同样的序列图像采用单点能量累积方法将阈值设置为 $Th_t = k\mu_w + 4k\sigma_w$ 时,递归到第7帧和第9帧的结果,分别检测出26和9条轨迹.图6为 Tonissen 方法和本文方法在递归到第9帧时,最大的20条轨迹评价对比图,左图为 Tonissen 方法,右图为本文方法.图中最左侧的三条线柱为真实目标评价价值,其余为虚假轨迹,从图中可以看出本文方法的目标评价价值与虚假轨迹差别更大.对于中途入场的目标本文方法在目标入场的第3帧(总第7帧)能可靠地检测出,而原始方法在目标入场的第5帧(总第9帧)时评价函数与噪声轨迹的差别才比较明显.

表 1 检测到的目标轨迹

帧	轨迹
3	轨迹 0: $- \rightarrow (462, 200) - \rightarrow (460, 202) - \rightarrow (458, 204)$ 得分:6403.0: 轨迹 1: $- \rightarrow (324, 79) - \rightarrow (324, 79) - \rightarrow (323, 80)$ 得分:4453.0: 轨迹 2: $- \rightarrow (462, 200) - \rightarrow (468, 194) - \rightarrow (471, 189)$ 得分:3513.0: 轨迹 3: $- \rightarrow (378, 413) - \rightarrow (375, 410) - \rightarrow (369, 406)$ 得分:2915.0: 轨迹 4: $- \rightarrow (511, 117) - \rightarrow (511, 123) - \rightarrow (511, 127)$ 得分:2872.0: 轨迹 5: $- \rightarrow (156, 482) - \rightarrow (159, 483) - \rightarrow (162, 486)$ 得分:2840.0:
5	轨迹 0: $- \rightarrow (462, 200) - \rightarrow (460, 201) - \rightarrow (458, 202) - \rightarrow (456, 203) - \rightarrow (453, 204)$ 得分:10357.0: 轨迹 1: $- \rightarrow (324, 79) - \rightarrow (324, 79) - \rightarrow (323, 80) - \rightarrow (322, 80) - \rightarrow (321, 81)$ 得分:6971.0: 轨迹 2: $- \rightarrow (509, 349) - \rightarrow (509, 354) - \rightarrow (508, 360) - \rightarrow (510, 365) - \rightarrow (509, 371)$ 得分:5218.0:
7	轨迹 0: $- \rightarrow (462, 200) - \rightarrow (460, 201) - \rightarrow (458, 202) - \rightarrow (456, 203) - \rightarrow (454, 204) - \rightarrow (452, 205) - \rightarrow (450, 206)$ 得分:14990.0: 轨迹 1: $- \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (505, 373)$ 得分:10804.5: 轨迹 2: $- \rightarrow (324, 79) - \rightarrow (324, 79) - \rightarrow (323, 80) - \rightarrow (323, 80) - \rightarrow (322, 81) - \rightarrow (321, 82) - \rightarrow (320, 83)$ 得分:9440.0:
9	0: $- \rightarrow (462, 200) - \rightarrow (460, 201) - \rightarrow (458, 202) - \rightarrow (456, 203) - \rightarrow (454, 204) - \rightarrow (452, 205) - \rightarrow (450, 206) - \rightarrow (448, 206) - \rightarrow (445, 207)$:19193: 1: $- \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (507, 372) - \rightarrow (505, 373) - \rightarrow (502, 374) - \rightarrow (499, 374)$:15555: 2: $- \rightarrow (324, 79) - \rightarrow (324, 79) - \rightarrow (323, 80) - \rightarrow (323, 80) - \rightarrow (322, 81) - \rightarrow (321, 82) - \rightarrow (320, 83) - \rightarrow (319, 84) - \rightarrow (318, 85)$:10789:

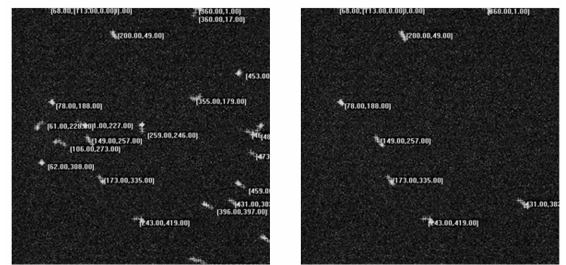


图5 Tonissen算法第7、9帧时检测结果

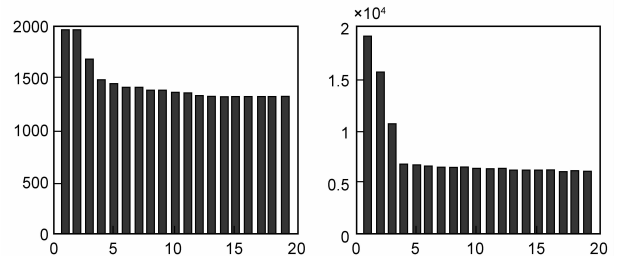


图6 Tonissen算法和本文算法第9帧时最大的20条轨迹值对比

6 结论

本文在 Tonissen 的动态规划算法基础上,针对根据工程应用中遇到的光学散焦以及入场目标检测能力弱等问题,对其进行改进.实摄空间小目标图像实验证明,本文的改进算法能够减少目标能量损失,增加目标轨迹与噪声轨迹的差别,使目标轨迹可靠地从噪声中分离出来,克服了以往算法对中途入场的目标检测能力弱的问题.

参考文献:

- [1] Barniv Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21(1): 144 – 156.
- [2] Barniv Y, Kella O. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets PART II: Analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23(6): 776 – 788.
- [3] James A, Scott S, Henry P. Efficient target tracking using dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1): 44 – 56.
- [4] Tonissen S M, Evans R J. Performance of dynamic programming techniques for track-before-detect[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1440 – 1451.
- [5] Johnston L A, Krishnamurthy V. Performance analysis of a track before detect dynamic programming algorithm[A]. Silver Anniversary IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. Istanbul, Turkey: IEEE Computer Society, 2000. 49 – 52.
- [6] Johnston L A, KRISHNAMURTHY V. Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1): 228 – 242.
- [7] 陈尚锋, 陈华明, 卢焕章. 基于加权动态规划和航迹关联的小目标检测技术[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(2): 46 – 50.
Chen Shang-feng, Chen Hua-ming, Lu Huan-zhang. Detection and tracking of dim targets based on dynamic programming and track matching[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(2): 46 – 50. (in Chinese)
- [8] 陈华明, 孙广富, 卢焕章等. 基于动态规划和置信度检验的小目标检测[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(4): 472 – 476.
Chen Huaming, Sun Guangfu, Lu Huazhang. A detection algorithm for small moving targets based on dynamic programming and confidence test[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(4): 472 – 476. (in Chinese)
- [9] 强勇, 焦李成, 保铮. 动态规划算法进行弱目标检测的机理研究[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(6): 721 – 727.

- Qiang Yong, Jiao Li-cheng, Bao Zheng. Study on mechanism of dynamic programming algorithm for dim target detection[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(6): 721 – 727. (in Chinese)
- [10] 张兵, 卢焕章. 动态规划算法在运动点目标检测中的应用研究[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(12): 1895 – 1900.
Zhang Bing, Lu Huan-zhang. Dynamic programming algorithm for detecting moving point targets[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2004, 26(12): 1895 – 1900. (in Chinese)
 - [11] 谭晓宇, 陈谋, 姜长生. 改进动态规划算法在小目标检测中的应用[J]. 光电工程, 2008, 35(5): 23 – 27, 84.
Tan Xiao-yu, Chen Mou, Jiang Chang-sheng. Applications of improved dynamic programming algorithm in small target detection[J]. Opto-electronic Engineering, 2008, 35(5): 23 – 27, 84. (in Chinese)
 - [12] 曲长文, 黄勇, 苏峰. 基于动态规划的多目标检测前跟踪算法[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2138 – 2141.
Qu Chang-wen, Huang Yong, Su Feng. Radar track-before-detect algorithm of multitarget based on the dynamic programming[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2138 – 2141. (in Chinese)
 - [13] Dekel B Z, Israelian S, Garber M, et al. Three axis star tracker [A]. 8th Meeting on Optical Engineering in Israel [C]. Israel: SPIE, 1992. 203 – 211.
 - [14] Y Bar-shalom. Tracking methods in a multi – target environment[J]. IEEE Transactions on Automat Control, 1978, 23(4): 618 – 626.
 - [15] 王春歆, 沈同圣, 张玉叶. 基于层次聚类的弱小目标检测算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(19): 24 – 27.
Wang Chun-xin, Shen Tong-sheng, Zhang Yu-ye. Small targets detection based on hierarchical clustering[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(19): 24 – 27. (in Chinese)

作者简介:



张玉叶 女. 1980年2月出生于山东五莲. 2002年于烟台师范学院获得学士学位, 分别在2005年和2009年于海军航空工程学院获得硕士学位和博士学位. 现为海军航空工程学院青岛分院教员, 主要从事图像处理、图像复原等方面的研究.

E-mail: amigo_yezi@sohu.com

王春歆 男. 1979年3月出生于吉林省吉林市. 2000年于海军工程大学获得学士学位, 分别在2005年和2009年于海军航空工程学院获得硕士学位和博士学位. 主要从事图像处理、小目标检测等方面的研究. E-mail: nsfcityhunter@sina.com