

文章编号 1004-924X(2012)07-1619-07

复杂背景成像条件下运动点目标的轨迹提取

丛明煜, 何文家*, 逯力红, 鲍文卓, 张寅

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为改进空间目标天基实时监视能力,研究了美国在空间中段实验卫星上搭载的对空间目标进行在轨检测与跟踪的信号处理器的工作方案。针对该处理器在目标运动轨迹提取阶段采用的先二元速度滤波再能量累积判决的“筛选-确认”解决方案,提出了两点改进方法:一是在“筛选”阶段增加运动速度约束条件,二是在“确认”阶段增加样本均差约束条件,使其在降低虚警概率的同时提高检测概率,从而普遍适用于复杂背景成像条件下运动点目标轨迹的提取。最后,利用实际获取的云层背景图像数据库仿真生成了包含多运动目标的时序图像序列,并以此作为输入信号源分析比较了原算法与改进算法的性能差异。仿真实验结果表明:改进算法在二元速度滤波后候选条痕减少到原算法的 50% 以下,处理器运行时钟周期数从 8.0×10^6 次降低到 7.1×10^6 次;最终检测结果显示,改进算法判决门限的合理取值范围增加到 20 左右,可以实现对多运动目标的实时检测。

关键词:点目标检测;二元速度滤波;能量累积判决;运动目标;图像序列;轨迹提取

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1619

Trace extraction of moving point targets in complex background images

CONG Ming-yu, HE Wen-jia*, LU Li-hong, BAO Wen-zhuo, ZHANG Yin

(*Research Center for Space Optical Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

* *Corresponding author, E-mail: andyhe06@126.com*

Abstract: This paper investigated the working scheme of a spaceborn signal processor applied to the USA Midcourse Space Experiment (MSX) for target detection and tracking. The moving target indicator in the MSX performed the trace extraction in two stages, namely, “nominator-confirmer” procedure. the first stage used a binary matched filter to “nominate” streak paths which looked like they might actually contain signals and the second one did a energy accumulation decision to “confirm” the nomination of the first stage. Based on the study of above procedure, an improved method was proposed to detect moving targets. In “nominator” stage, the velocity restraint condition was introduced to binary matched filter for reducing the probability of false alarm. In “confirmer” stage, the criteria of “minimum sample mean difference” were added to that of “maximum sample mean” for improving the probability of detection. The improved method could be widely used in complex background ima-

收稿日期:2011-11-21;修订日期:2012-02-10.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA704215)

ges. Finally, an experimental method was designed to analyze the algorithm performance of two different methods. The experimental results show that the number of streak paths filtered by improved method is lower than 50% compared with that former method, and number of clock cycles is reduced from 8.0×10^6 to 7.1×10^6 . Improved method can effectively detect multi-moving targets in real time by expanding the reasonable range of threshold to nearly 20.

Key words: point target detection; binary matched filter; energy accumulation decision; moving target; image sequence; trace extraction

1 引言

天基红外成像的小目标检测是根据实时观测的图像序列对运动目标进行搜索与定位。如果相机视场在地球大气层临边之下,背景一般是云杂波场景,又因为相机作用距离很远,目标到达探测器的成像尺寸小于一个像素,且信杂比较低、机动性不强,所以这种条件下的实时小目标检测可以看作是云杂波成像背景条件下直线运动的微弱点目标检测^[1]。

针对这一类问题,同时兼顾检测性能与计算时间两方面的解决方案^[2-4]是首先将序列图像在时间维度上进行投影变换,得到一幅有效增强目标与抑制背景杂波的组合帧图像;然后,在组合帧图像上对所有疑似目标条痕进行轨迹搜索与门限判决,最终确认真实目标轨迹。

这种方案已经成功应用在美国空间中段实验卫星所搭载的运动目标指示器(Moving Target Indicator, MTI)上^[5]。它首先对序列图像进行时序标准化最大值投影,得到组合帧图像,然后在组合帧图像中采用二元速度滤波与能量累积判决相结合的方法进行目标轨迹的查找与确认。轨迹搜索的具体办法是首先利用灰度直方图对组合帧图像进行二值化分割,然后进行二元速度滤波,从所有条痕中查找出满足直线运动条件的候选目标条痕,最后以组合帧图像像素灰度值为基础,利用能量累积方法从候选目标条痕中选择平均能量最高的条痕,即为目标运动轨迹。

本文在对 MTI 的轨迹搜索方法进行仔细分析的基础上,发现在速度滤波搜索策略的优化与能量累积判决门限的设计方面仍有改进的余地:在使用二元速度滤波查找疑似目标轨迹的过程中,改进算法在原算法利用方向一致性的基础上增

加了速度一致性的判决条件,并引入了动态规划的基本思想,采用递推的方式遍历候选路径^[6-9],有效减少了条痕搜索数目与候选条痕数目,降低了计算量、节省了存储空间;在门限阈值的设计方面,改进算法在继承原算法基于能量累积的“最高平均能量”判决条件的基础上,又引入了基于目标灰度一致性的“最小能量波动”判决条件^[10-12],不仅进一步降低了虚警概率,而且实现了多运动目标检测的功能,拓展了原算法的适用范围。

2 MTI 算法的实现过程

由于论文篇幅有限,MTI 算法的基本原理在此不进行说明,只给出实现过程。该算法的流程框图如图 1 所示。假设序列图像中像素灰度表示为 $r(x, y, t)$, $x=1, \dots, m$; $y=1, \dots, n$; $t=1, \dots, N$, 其中 m, n 与 N 分别表示图像的高度、宽度与序列长度, MTI 算法进行目标检测的计算过程如下:

(1) 对于序列图像中的所有空间坐标位置 (x, y) , 沿时间轴寻找最大的 $r(x, y, t)$, 得到最大值投影:

$$z(x, y) = \max[r(x, y, t), t=1, \dots, N]. \quad (1)$$

(2) 得到去除最大值的均值图像:

$$\overline{mean}(x, y) = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{t=1}^N r(x, y, t) - z(x, y) \right]. \quad (2)$$

(3) 标准化:

$$z'(x, y) = \frac{z(x, y) - \overline{mean}(x, y)}{\sigma}, \quad (3)$$

式中: σ 为噪声标准差。

(4) 二元量化:

$$\begin{cases} b(x, y) = 1, & \text{if } z'(x, y) > T \\ b(x, y) = 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: T 为灰度直方图的阈值门限。

(5)利用错切技术对二值图像中的“1”样本进行旋转变换,每次旋转 4.5° ,旋转 40 次,覆盖 180° ,即所有可能的条痕角度范围。具体的错切表达式为:

$$\begin{cases} f = \tan \theta, & -45^\circ \leq \theta < 45^\circ \\ x_{\text{new}} = x_{\text{old}} + y_{\text{old}} \cdot f \\ y_{\text{new}} = y_{\text{old}} \\ f = \tan(\theta - 90^\circ), & 45^\circ \leq \theta < 135^\circ \\ x_{\text{new}} = x_{\text{old}} \\ y_{\text{new}} = y_{\text{old}} + x_{\text{old}} \cdot f \end{cases} \quad (5)$$

(6)每旋转一个角度,在横行或者纵列进行一维二元速度滤波:

$$\sum_{k=1}^L b(k) > T(L), \quad (6)$$

式中: L 为条纹长度, $T(L)$ 为阈值门限,是 L 的单增函数, $b(k)$ 是条纹路径上的二元样本。如果满足阈值条件,则把这条轨迹作为候选目标条痕,等待能量累积判决。

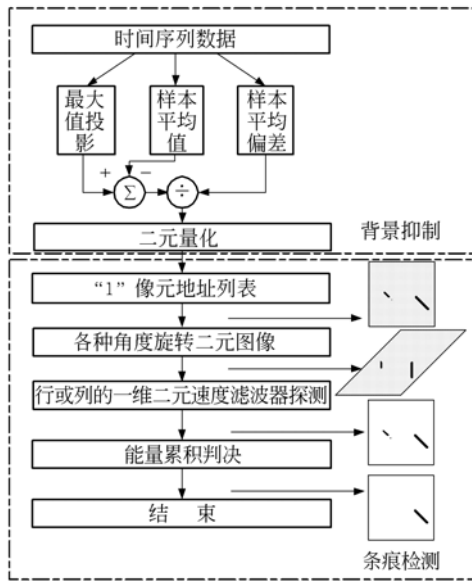


图 1 MTI 算法流程
Fig. 1 Flowchart of MTI algorithm

(7)对候选目标条痕进行能量累积判决:

$$S = \frac{1}{L} \sum_{k=K}^{K+L-1} (z'(k) - \mu), \quad (7)$$

式中: K, L 分别为候选条痕的起点坐标与条痕长度, $z'(k)$ 为该坐标点所对应的标准化灰度值, μ 为标准化结果图像的噪声平均灰度值。从所有候选条痕中选取 S 值最大的条痕,即为目标运动轨迹。

3 改进的 MTI 算法

本文对 MTI 算法的条痕检测部分进行了两点改进:一是在一维二元速度滤波阶段,假设目标运动满足匀变速条件的基础上,推导出目标的一维运动模型,并利用由该模型所建立的递推表达式作为候选目标条痕的基本判据;二是在能量累积判决阶段,考虑到对于不同强度的多目标检测,如果只依赖“最高平均能量”进行判决容易出现漏警的情况,而结合“最小能量波动”能够进一步增强判据的可靠性,有效减少漏警情况的发生。

3.1 改进的一维二元速度滤波算法

当小目标运动机动性不强时,在探测器焦平面上成的时序图像往往表现为匀变速直线运动轨迹,所以把包含运动小目标的图像序列进行时序投影变换后,真实目标轨迹在基于组合帧的二值化图像上可以看作是沿某一特定方向进行直线延伸的点状条痕。

在进行一维二元速度滤波时,假设小目标在某点的位置、速度、加速度分别为 $y(t), v(t)$ 与 $a(t)$,其中 t 表示当前时刻。如果进一步假设采样时间间隔 Δt 恒定,则得到如下的一维匀变速直线运动模型:

$$\begin{bmatrix} y(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y(t-\Delta t) \\ v(t-\Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.5\Delta t^2 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a(t-\Delta t) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

利用前一时刻获得的估计值来预报当前时刻的位置与速度信息。加速度大小利用式(9)进行实时估计:

$$a(t - \Delta t) = \frac{1}{M} \sum_{k=3}^M \frac{v(k \cdot \Delta t) - v((k-1) \cdot \Delta t)}{\Delta t}, \quad (9)$$

式中 $t = M \cdot \Delta t, M$ 表示目标在当前时刻的序号。

假设目标轨迹前 3 个点的位置坐标分别为 $y(\Delta t), y(2\Delta t)$ 与 $y(3\Delta t)$,则初始速度与加速度用如下的方程组求得:

$$\begin{cases} v(2\Delta t) = \frac{y(2\Delta t) - y(\Delta t)}{\Delta t} \\ v(3\Delta t) = \frac{y(3\Delta t) - y(2\Delta t)}{\Delta t} \\ a(3\Delta t) = \frac{v(3\Delta t) - v(2\Delta t)}{\Delta t} \end{cases} \quad (10)$$

这样通过前 3 个点的位置信息计算出了初始的速度与加速度,后面利用包括当前点在内的先验运动信息能够有效估计出目标在下一帧图像中可能出现的位置及其他运动状态信息。

如果参与滤波的条痕运动特性满足由式(8)、(9)组成的递推方程组及式(10)的初始化条件,则该条痕作为候选目标条痕参加后续的能量累积判决,否则直接判定该条痕为虚警。相比较于原来的滤波算法,本文改进算法由于结合了目标运动的加速度特性,因此不仅降低了虚警概率,而且减少了轨迹搜索的范围与数目,增加了系统的实时性。

3.2 改进的能量累积滤波算法

MTI 中的能量累积判决算法本质上是基于极大似然的路径搜索算法^[13],基本假设条件是目标信噪比恒定与背景噪声服从同一分布,然而卫星平台震动、光学系统像差以及探测器噪声等因素都会不同程度地破坏以上要求的基本假设条件,致使利用式(7)进行判决的稳健性比理想情况明显下降。改进算法在设计判决函数时只考虑候选轨迹上疑似目标点的灰度特性,摆脱了背景噪声非均匀性的影响,在一定程度上增加了检测性能的稳定性。

设 $z'(k_1), \dots, z'(k_N)$ 是当前候选目标轨迹上的 N 个疑似目标点所对应的标准化灰度值,下面分别利用样本均值与样本均差表示“最高平均能量”与“最小能量波动”:

$$s_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z'(k_i), \quad (11)$$

式中: s_0 表示样本均值。

$$s_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z'(k_i) - s_0|, \quad (12)$$

式中: s_1 表示样本均差。由此得到的候选目标条痕判决表达式为:

$$S = s_0 - \frac{1-\beta}{\beta} \cdot s_1, \quad (13)$$

式中: β 表示权重因子,取值范围为 $0 < \beta \leq 1$,对于不同系统,其取值大小根据实际应用情况而定。本文实验取 $\beta=0.5$,即两者等权重。

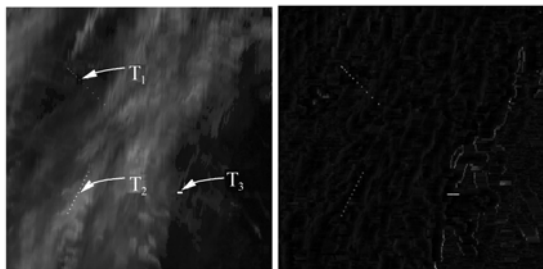
对于所有的候选目标条痕,利用式(13)计算出 S 值,并与某一阈值进行比较,把大于阈值的候选条痕判决为目标运动轨迹,而其他候选条痕则判决为虚警,由此完成多运动目标的计算机自动检测功能。需要注意的是在实际应用过程中,如果出现丢帧或者目标运动方向与错切角度不完

全重合的情况,查找到的轨迹可能只是目标完整运动轨迹的一部分,此时需要利用能量与运动信息的相关性进行进一步的轨迹融合计算。

4 仿真实验设计与结果分析

本文采用中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)天基遥感实拍的红外云层图像,利用实验室仿真生成包含运动点目标的图像序列进行算法性能分析。在实验过程中,图像序列包含 3 个连续运动点目标,分别表示为 T_1, T_2, T_3 。选取 11 帧连续图像,利用 MTI 的背景抑制算法进行处理,得到的最大值投影图像、组合帧图像以及灰度直方图分割门限为 200 pixel 与 400 pixel 的二值量化图像分别如图 2(a)、2(b)、2(c)与 2(d)所示。

然后,利用如图 2 所示的仿真结果作为条痕检测部分的输入信号源对 MTI 算法与本文的改进算法进行比较。在速度滤波阶段,重点分析两种不同算法完成滤波之后剩下的候选目标条痕数目的差异,数目越小意味着进行能量累积判决时系统的运算量越低,存储空间的开销越小。在能



(a) 最大值图像 (b) 组合帧图像
(a) Maximum-image (b) Combined-image



(c) 二值量化图像(1) (d) 二值量化图像(2)
(c) Binary-image (1) (d) Binary-image(2)

图 2 MTI 背景抑制结果图像

Fig. 2 Images processed by MTI method

量累积判决阶段,对两种不同算法判决结果 S 值的大小进行比较分析,只有当目标条痕比虚警条痕 S 值大的时候,才能被准确检测出来而不产生虚警,并且大的越多,说明该种算法门限阈值的选取条件越松弛,也意味着该算法的检测概率更高、虚警概率更低。

当灰度直方图分割门限在 200~400 pixel 间均匀变化、同时要求候选目标条痕包含疑似目标点个数 ≥ 5 时,原速度滤波算法与改进 MTI(Improved MTI, IMTI)算法的滤波结果如图 3 所示。通过对比两种算法滤波后候选目标条痕数目的差异不难发现,改进算法的滤波结果显著优于原算法,而且这种优势随着灰度直方图分割阈值的减小变得越来越大。当二值量化图像中“1”像素个数为 200 时,改进算法的处理结果比原算法少 372 条候选目标条痕;当“1”像素个数增加到 400 时,改进算法处理结果比原算法少了 1 842 条,差距拉大了近 5 倍。

令二值量化图像中“1”像素个数为 400,经过两种不同速度滤波算法处理后的仿真结果图像如图 4(a)与 4(b)所示。对比两幅图像不难发现,改

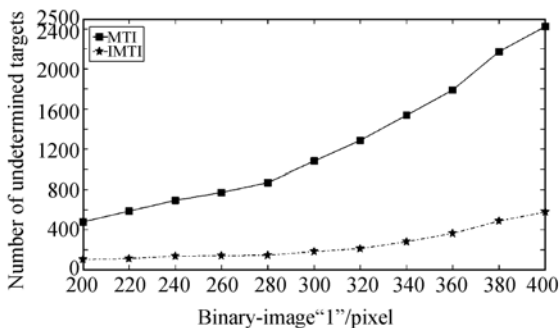
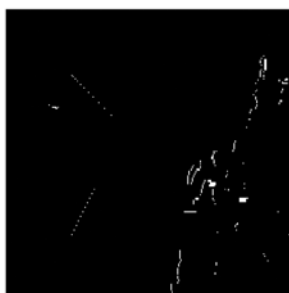
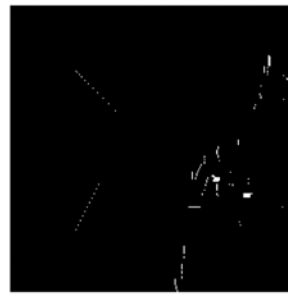


图 3 不同速度滤波算法的实验结果曲线

Fig. 3 Experimental result curves of different binary matched filters



(a) MTI 速度滤波图像
(a) Filtered by MTI



(b) IMTI 速度滤波图像
(b) Filtered by IMTI

图 4 不同速度滤波算法的实验结果图像

Fig. 4 Result images filtered by different binary matched filters

进算法在增加了匀变速运动的约束条件后,进一步减少了候选目标条痕数目,在检测概率几乎没有任何变化的条件下降低了虚警概率。

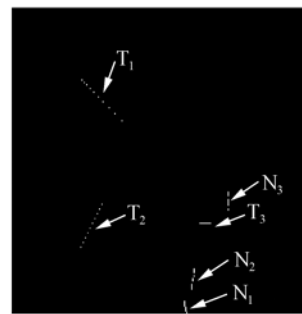


图 5 能量累积判决结果示意图

Fig. 5 Schematic image processed by energy accumulation decision

表 1 MTI 能量累积判决结果

Tab. 1 Results of energy accumulation decision with MTI

序号	T_1	N_1	N_2	T_2	N_3	T_3
S	58.94	54.25	53.10	50.06	47.33	46.96

表 2 IMTI 能量累积判决结果

Tab. 2 Results of energy accumulation decision with IMTI

序号	T_3	T_2	T_1	N_1	N_2	N_3
S	46.94	46.06	43.82	24.25	23.97	15.80

以 2(b)与 4(b)作为输入信号源,经过能量累积判决后最终的检测结果示意图如图 5 所示,它除了包含 3 条目标运动轨迹之外,还包含了对于原 MTI 算法能量累积判决 S 值最大的 3 条虚警

轨迹,分别表示为 N_1, N_2, N_3 。通过对比表 1、表 2 不难发现,如果不产生虚警,原算法只能检测出 T_1 目标,而采用本文改进算法,只要选取的门限阈值 T 合适,即 $24.25 < T < 43.82$,就可以完全检测出 3 条目标运动轨迹,并滤除了所有虚警条痕。实际上,应用目标灰度一致性作为判据并不局限于投影类算法,对于动态规划、假设检验等其他检测与跟踪算法同样适用。

最后利用 Matlab 编程对两种不同算法的实

表 3 运算量计算规则
Tab. 2 Rules of calculation

运算类型	加法	减法	乘法	除法	比较	绝对值	与运算
时钟周期	1	1	2	4	1	2	1

表 4 不同算法实时性能的对比

Tab. 4 Comparison of real-time performance between different methods

算法	CPU 处理时间比	总时钟周期数
MTI	1	7 980 905
IMTI	0.75	7 145 443

参考文献:

- [1] 王莹莹,张永顺,华永伟. 红外目标检测方法分析[J]. 红外技术, 2011, 33(3): 133-140.
WANG Y Y, ZHANG Y SH, HUA Y W. Analysis on infrared target detection methods [J]. *Infrared Technology* 2011, 33 (3): 133-140. (in Chinese)
- [2] CHU P L. Optimal projection for multidimensional signal detection[J]. *IEEE Trans. on ASSP*, 1988, 36(5): 775-786.
- [3] 陈颖,刘镰斧,李在铭. 一种微弱点运动目标的快速统计检测算法[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1707-11709.
CHEN Y, LIU L F, LI Z M. A fast detection algorithm of dim point moving target using statistical analysis [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(12): 1707-1709. (in Chinese).
- [4] 陈非,敬忠良,李建勋. 红外序列图像中缓动点目标

时性能进行比较分析,表 3 是进行硬件设计时算法运算量计算的一般规则^[14]。初始化条件:图像尺寸为 256 pixel×256 pixel,序列长度为 10 帧,二值量化图像中“1”像素个数为 400,候选目标条痕包含疑似目标点个数 ≥ 5 。预处理部分均采用 MTI 背景抑制算法、条痕检测部分分别采用两种不同算法的 CPU 处理时间对比结果与总运算量对比结果如表 4 所示。IMTI 算法的实时性能比原算法更为优越。

5 结 论

本文在 MTI 算法的基础上提出了改进的算法 IMTI,在保持原算法计算简便、易于硬件实现等优点的同时,改进速度滤波算法进一步降低了对系统存储空间的要求,减少了“确认”阶段的计算量;因为增加了目标灰度一致性的判决条件,所以改进能量累积算法相比于原算法能够显著区分开真实目标轨迹与虚假条痕。从仿真实验结果来看,改进算法能量累积判决阈值 T 的合理取值范围增大到 19.0 以上,并且扩展了对多运动目标进行在轨实时检测的能力。如何将整套算法成功移植到硬件平台将是后续研究工作的重点。

的投影检测算法及其改进[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(2): 96-100.

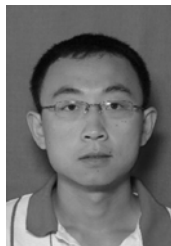
- CHEN F, JING ZH L, LI J X. Improvement to projection detection of slowly moving point target in infrared image sequences [J]. *J. Infrared Millim. Wave*, 2003, 22(2): 96-100. (in Chinese)
- [5] CHU P L. Efficient detection of small moving objects [R]. *Lexington, MA: Lincoln Laboratory, MIT*, 1989.
- [6] BARNIV Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets [J]. *IEEE Trans. on Aes*, 1985, 21(1): 144-156.
- [7] BARNIV Y, KELLA O. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets Part II [J]. *IEEE Trans. on Aes*, 1987, 23(6): 776-788.
- [8] 王学伟,王春歆,张玉叶,等. 空间小目标动态规划检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 477-484.
WANG X W, WANG CH X, ZHANG Y Y, et al. . Detection of space target by dynamic programming [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):

- 477-484. (in Chinese)
- [9] 曹琦,王德江,张齐,等. 红外点目标检测中的能量积累[J]. 光学精密工程,2010,18(3):741-747.
CAO Q, WANG D J, ZHANG Q, *et al.*. Energy accumulation in infrared point target detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 741-747. (in Chinese)
- [10] SUNGHO K, YUKYUNG Y, JOOHYONG L, *et al.*. Small target detection utilizing robust methods of the human visual system forIRST [J]. *Infrared Milli Terahz Waves*, 2009, 30(9): 994-1011.
- [11] MAO X, DIAO W H. Criterion to evaluate the quality of infrared small target images [J]. *Infrared Milli Terahz Waves*, 2009, 30(1): 56-64.
- [12] 刘岩俊,王永新,何昕,等. 多目标轨迹分离方法研究[J]. 光学精密工程,2008,16(8):1478-1482.
LIU Y J, WANG Y X, HE X, *et al.*. Research of track recognition method for multiple targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1478-1482. (in Chinese)
- [13] ZENG W J, LI X L. High-resolution multiple wideband nonstationary source localization with unknown number of source [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2010, 58(6): 3125-3136.
- [14] 孟祥龙,张伟,丛明煜,等. 天基红外图像的点目标检测[J]. 光学精密工程,2010,18(9):2094-2010.
MENG X L, ZHANG W, CONG M Y, *et al.*. Detection of point targets in space-based infrared image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2094-2010. (in Chinese)

作者简介:



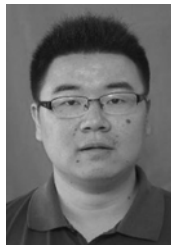
丛明煜(1964—),男,黑龙江双鸭山人,博士,教授,博士生导师,主要从事空间监视、计算机仿真技术方面的研究。E-mail: mycong@hit.edu.cn



鲍文卓(1983—),男,内蒙古兴安盟人,博士研究生,2004年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间目标特性与图像仿真方面的研究。E-mail: latermouse@126.com



何文家(1985—),男,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,61815部队研究实习员,2008年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事空间目标监视与仿真方面的研究。E-mail: andyhe06@126.com



张寅(1986—),男,江苏镇江人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间目标特性与战略场景仿真方面的研究。E-mail: 88240023@sina.com



逮力红(1980—),女,河北人,博士,讲师,助理研究员,主要从事合成孔径、光学系统的在轨检测与装调方面的研究。E-mail: lixin0311@gmail.com