

doi:10.3788/gzxb20134203.0336

# 光学扩展群目标多模检测与跟踪的算法研究

刘火平<sup>1,2,3</sup>, 吴钦章<sup>1</sup>, 季明根<sup>2</sup>, 雷涛<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国人民解放军 63610 部队, 新疆 库尔勒 841001)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为解决空间复杂光学多目标群检测与跟踪难题,提出了光学扩展群目标的概念及其多模检测与跟踪方法.分析了扩展群目标构成复杂、个体目标数量多、变化快、检测与跟踪难的特点及检测与跟踪需求,综合采用小目标检测算法、扩展目标检测算法、高对比度检测算法和多帧差分检测算法等完成全视场目标群的完整检测;然后在判断目标实际位置与预测位置的航迹重合性基础上实现目标的多特征航迹联合关联,结合以对比度跟踪为主、相关跟踪为辅的主辅式多模跟踪技术实现对群目标的跟踪.应用结果表明,扩展群目标多模检测与跟踪方法对复杂多目标群的检测效率、跟踪准确度均有较大幅度的提高,满足光学复杂目标群的完整检测和精确稳定跟踪要求.

**关键词:**图像处理;扩展群目标;多模跟踪;多模检测

中图分类号:TP391.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)03-0336-6

## Reentry Optics Extended Group-target's Multi-mode Detecting and Tracking

LIU Huo-ping<sup>1,2,3</sup>, WU Qin-zhang<sup>1</sup>, JI Ming-gen<sup>2</sup>, LEI Tao<sup>1,3</sup>

(1 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 63610 Army, Kuerle, Xinjiang 841001)

(3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of the complex optical multi objective group's detection and tracking, presented an extended group-target concepts and multimode detection and tracking method. Analysis of extended group-target's characteristics of complex form, many number of individual target, change quickly, detection and tracking difficult, and its requirement of detection and tracking. The detection algorithm of small target, extended target, high contrast and multi frame difference detection algorithm to complete the entire field-of-view target populations in the intact detection. Then based on the judgment of target's trajectory coincidence with its practical position and the predicted position to realize target's multi-feature track association, combined with contrast tracking, correlation tracking as a supplement to the main and auxiliary type multimode tracking technology to realize group-target's tracking. The application results show that, extended group-target multimode detection and tracking method for complex multi target group detection efficiency, tracking accuracy were greatly increased, to meet the requirements of complex optical target group's integrity detection and accurate tracking.

**Key words:** Image processing; Extending group-target; Multi-mode tracking; Multi-mode detection

## 0 引言

光学设备在跟踪空中某类特殊目标群时,目标

群内既有外形复杂、面积不断发生改变、高速运动的非点光源大面积扩展目标<sup>[1]</sup>,也有众多的小目标;而且群内个体目标在不断产生或分裂、消失或合并,导

基金项目:中国科学院知识创新工程项目资助

第一作者:刘火平(1968-),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为光学跟踪测量与图像处理. Email:huoping2010@sina.com

导师:吴钦章(1956-),男,研究员,博士,主要研究方向为计算机信号与信息处理、大型光学设备研制. Email:wuqinzhang@scsio.ac.cn

收稿日期:2012-08-13;录用日期:2012-11-23

致监控区域内目标的个体数目难以确定,探测器检测产生多个检测结果,输出多个脱靶量,且可能发生漏检个别目标的现象,数据处理对输出目标脱靶量进行编号时具有随机性,当跟踪器选择 1 号目标进行跟踪时,也具有较大的随机性,跟踪测量的稳定性和精确度均受到较大的限制。

虽然监控区域内目标总数难以确定,但在一定时间内,众多目标在空间距离上比较接近,所以引入群目标概念进行分析研究.群目标是指探测器探测到的目标数目众多且密集.由于探测器分辨率不够充分,使得探测到的密集目标群内个体目标是部分可分辨的(即每个群所产生的测量个数大于 1,但又小于群内的个体目标数).群(多)目标跟踪问题有着巨大的应用价值,从上世纪 50 年代以来就一直为国内外雷达专家学者所特别关注<sup>[2-6]</sup>.但在光学领域,却少见有公开文献利用群目标方法来处理多目标群的,大多使用多目标或扩展目标的方法对目标群进行检测与跟踪<sup>[1,7-10]</sup>,原因在于群目标内存在遮挡情况.而一般光学设备只能从角度值对群目标进行分辨,相较于雷达,光学设备对群目标内个体目标的分辨手段更少.为区别于一般外形等特性较固定的雷达群目标,将这里的高速扩展目标群称为光学扩展群目标.在探测器分辨率不够充分的情况下试图对扩展群目标内的所有个体目标进行跟踪显然是不现实的<sup>[11]</sup>,并且在很多应用中也是不必要的.这时可以直接对群的整体进行跟踪.由于扩展群目标特性复杂多变与不确定性,使用单一、固定的跟踪技术很难对目标进行稳定跟踪,这时最好的方法就是采用多模跟踪方式对目标进行跟踪。

多模图像跟踪技术是指采用多种图像跟踪技术的融合来实现目标的跟踪,主要可分为三类:主辅式多模式图像跟踪技术、分阶段的多模式图像跟踪技术和并行的独立多模式图像跟踪技术.目前国外对该技术的研究已经比较成熟,并得到了广泛的应用;国内关于该技术的很多研究则因硬件条件和实时性的限制,还停留在算法研究和实验阶段,而实际系统中使用较多的仍是单一的跟踪方式或简单的多模跟踪技术.该技术具有自适应能力强、抗干扰性能强和跟踪准确度高等优点,能适应各种不同背景与目标特性的情况,达到快速、可靠检测与稳定跟踪目标的要求<sup>[12]</sup>.

## 1 扩展群目标特点分析及跟踪需求

### 1.1 扩展群目标特点及其跟踪难度分析

综合扩展目标和群目标的概念,认为扩展群目标是指在探测器视场范围内,由至少一个扩展目标

和数量不等的一般目标构成,扩展目标和一般目标的总数众多且密集,并且由于探测器分辨率不够充分,使得群内的个体目标是部分可分辨的(可分辨出的群内扩展目标个数至少为 1)。

通过比较,可以知道扩展群目标具有以下不同于其它目标的特性:

1)组成群目标的个体目标可能数目较多,其数量可能随时发生变化;且群中扩展目标在视场中所占面积比例较大,使得扩展群目标在全视场中包含的个体目标数量较多、占比大;

2)在跟踪过程中,由于跟踪距离和角度的变化,及目标发生燃烧解体等系列变化,扩展群目标在观测视场中的形态、大小、尺寸等变化明显;

3)受到观测角度和跟踪设备视场的限制,有时对于一些显示面积大、且(或)个体目标数量众多的扩展群目标,视场中可能只能观测到目标的局部(或部分目标),难以全部观察到其整体特征;

4)在复杂目标背景条件下,目标与目标之间、以及目标与背景之间的出现灰度级交叉重叠或粘连,使得灰度级区分的复杂度大大增加。

在跟踪处于复杂背景中的扩展群目标时,因跟踪镜头在不断地转动,目标与背景都在运动,使得普通的目标检测提取和跟踪方法实现困难,扩展群目标的完整分割难以实现;而如对个体目标分割后再跟踪,则计算数据量大而且运算复杂,很难满足跟踪的实时性要求。

### 1.2 扩展群目标的跟踪需求分析

光学测量跟踪系统利用可见光和红外探测器实现对群目标的融合探测,希望得到的测量信息一般包括目标的运动学信息、属性、数目及获取观测信息的时间序列等.这需要对探测器输出的原始观测信息进行检测与跟踪处理得到,方法与所处理的具体问题有关.群目标中个体目标的大小、形状和类型具有多样性,包括弱小目标、扩展面目标等,且目标动态变化较大.为对具有多样性的群目标进行全视场检测搜索捕获和自动跟踪,要求实现的功能需求如下:

1)采用适应性强的多模并行检测算法,根据目标的不同特性自动调整检测算法,调节搜索帧数,能同时检测与跟踪低对比度弱小目标和扩展大面目标,并采取多探测器融合处理方式,加快目标检测搜索速度,提高目标检测概率;

2)能自动适应目标灰度变化不均匀情况,准确地从背景中检测出目标 and 选择稳定的跟踪部位,根据目标特性动态变化的表现形式不同自动选用不同的跟踪算法,使用多模跟踪融合修正跟踪提取点,跟

踪过程中能自动适应目标特征突变,提高跟踪准确度和稳定性;

3)对于群目标中能分辨出来的个体目标要求都能进行检测与跟踪;

4)单个目标相互间超出一定距离检测范围(如10个像素,可作为参量在实际应用中加以实时设置),作为单目标进行跟踪,如目标间没有超出此检测距离范围,作为群目标进行跟踪;

5)在复杂背景下,能解决目标被背景遮挡的问题,抗干扰能力强,跟踪具有高可靠性.

为实现这些功能需求,需要在检测和跟踪算法

上均采用多模算法.

## 2 多模检测与跟踪

### 2.1 全视场多模检测

为了在全视场中成功提取目标,需完成不同特性目标的自动检测,各目标检测算法同时进行.按照前文分析的扩展群目标可能的特点与跟踪需求,扩展群目标的多模检测算法包括四种不同的目标检测算法,即小目标检测算法、扩展目标检测算法、高对比度目标检测算法以及多帧差分检测算法,其复合检测流程如图1所示.

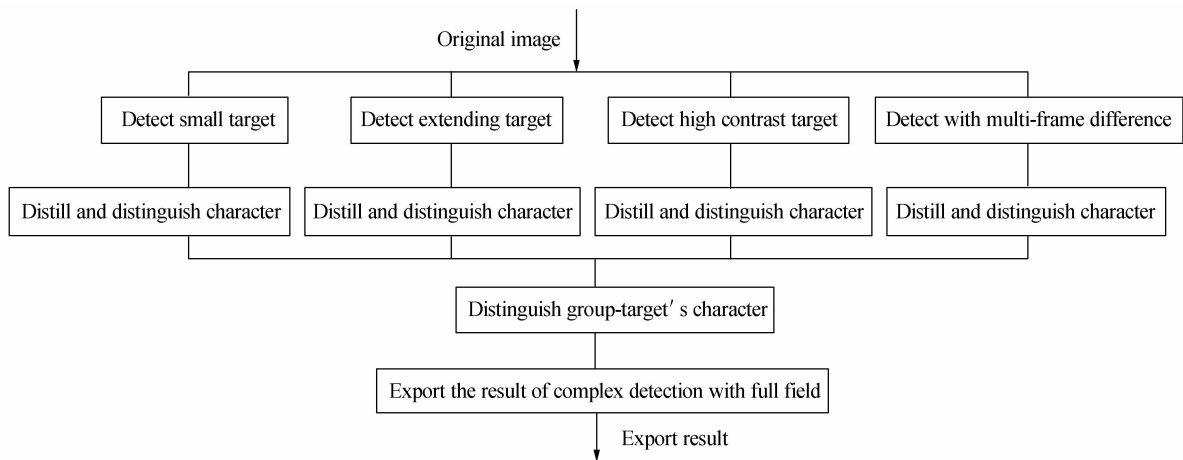


图1 扩展群目标的复合检测

Fig. 1 Composite detection of extending group-target

复合检测流程中每种不同的目标算法可以包含有不同的处理算法,如去噪预处理、图像增强、差分计算、分割、图像滤波等.以群目标中包含的小目标检测算法为例,主要需要进行中值滤波去噪、图像对比度增强、均值滤波、高通滤波、二值分割、极大中值滤波、二值统计滤波、连通判别与标记等处理,其处理算法流程如图2所示,所包含的各种不同处理算法可参见相关文献<sup>[13-17]</sup>.

扩展目标检测算法主要采用文献[7]提出的空中扩展目标检测方法进行检测;高对比度目标由于目标与背景灰度相差较大,本身具有一定抗噪能力,即可用边缘检测算法来进行检测,这里采用多尺度边缘测度融合加权 HD 算法<sup>[18]</sup>实现对高对比度目标的完整检测;多帧差分检测算法采用文献[8]提出的三帧差分结合逆分水岭方法来计算运动目标数目及其位置.

各个检测算法对各自检测出的候选目标进行特征提取和初步识别,从单算法的角度剔除杂波和虚警点.然后,通过各独立算法提取的目标特性间相关性进一步剔除虚假目标,提高检测性能.在对全视场目标标记结束后,进行目标特征提取和识别,最终通

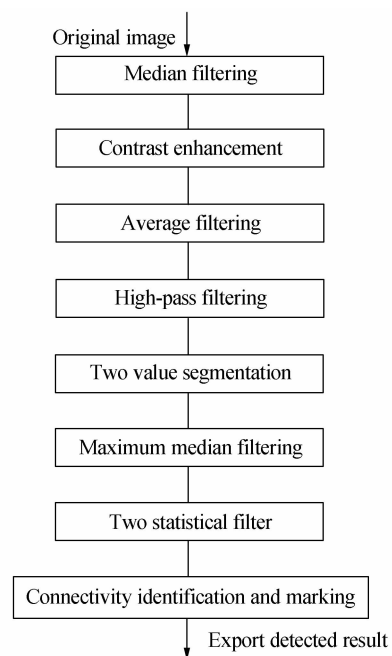


图2 小目标检测算法

Fig. 2 Small target detection algorithm

过进行目标的复合检测,判断是否符合群目标特性,并输出最后的全视场复合检测结果.

扩展群目标检测问题如图3所示.图3(a)中利

用简单矩形波门对单个目标进行检测,对一个扩展目标检测输出多个结果,得到目标的多个脱靶量,但难以判断那个脱靶量是实际需要的脱靶量,脱靶量输出到后续跟踪处理时将随机选择一个检测结果作为最终目标进行跟踪,使跟踪系统产生混乱.图3(b)中将检测出的扩展目标和众多小目标作为群目标处理,符合检测输出一个群目标复合检测结果,由于结果比较简单,这为后续处理打好了基础.

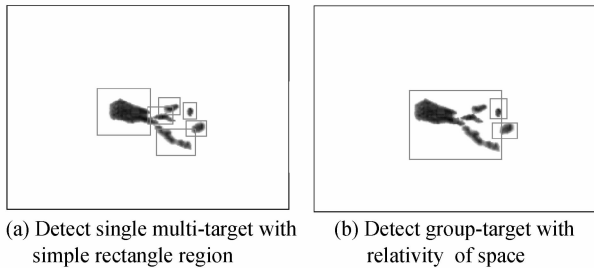


图3 群目标检测  
Fig. 3 Group-target detecting

## 2.2 多模跟踪

在对扩展群目标进行成功检测的基础上,再采用多模跟踪方式对群目标进行跟踪.多模跟踪方式的基本思想是让采用不同跟踪算法的几个跟踪器同时工作,按照各自的图像处理方法分离出目标与背景,提取目标的特征,进行目标多特性航迹关联,最终进行信息融合,依据各算法处理结果的置信度来协调选择跟踪目标.群目标跟踪过程中,各个体目标可能呈现不同的特性,使得群目标显示特性变化快、表现复杂,而且群目标中还随时可能分离出新的目标,所以需要针对不同目标采取不同的跟踪算法,如群目标跟踪、小目标跟踪、扩展目标跟踪、基于对比度的跟踪算法以及基于差分方式的目标跟踪算法等,各算法互不重叠、相互补充,且并行处理.最后系统依据跟踪决策选取最优处理方式,实现对不同特性目标的稳定跟踪,以适应群目标变化的特点及分离出来的单个目标.

实现稳定跟踪的关键在于可靠的目标航迹关联技术与复合跟踪的具体实现.

### 2.2.1 多特征航迹关联

通过对视场中提取出来的目标进行航迹处理,可迅速地对进入视场中的目标产生临时航迹,当此航迹的特性达到一定要求时,就可输出并产生跟踪航迹从而进入波门跟踪方式.然而,由于扩展群目标中个体目标较多,就可能输出多个跟踪航迹,这时再使用传统的航迹关联方式即单独采用目标的位置特征进行关联,当群目标特征变化较大时,很可能在目标间发生混乱,群目标跟踪位置点与个体目标的跟踪位置点会产生交错现象,多模输出的跟踪航迹将

不是目标的真实航迹.所以,在进行航迹关联的过程中,需要进行多特征联合关联<sup>[9]</sup>,以提高航迹关联的效率和降低产生虚假航迹的概率.

联合航迹关联采用基于多特征融合的联合概率数据关联(Joint Probabilistic Data Association, JPDA)算法实现,相比于传统概率数据关联(Probabilistic Data Association, PDA)算法,它综合考虑了目标的多特征信息,因此在计算关联概率时会除了考虑目标的位置量测外,还同时考虑到目标的灰度和面积等特征的变化特性,因此可以得到更为准确的关联概率.

首先,采用时间相关性进行航迹重合性判断,通过航迹点的重合判断和航迹的运动速度判断航迹是否重合,重合航迹优先(误差允许范围内).

由于扩展群目标的特殊性,需要综合考虑各个体目标关联时相互间对目标跟踪的影响,在利用JPDA算法搜索产生所有可能的联合事件之前,通过对在同一预测区域内的相似度函数来计算单个目标的关联概率<sup>[10]</sup>,则能有效减小计算量.

因目标跟踪系统采样频率较高,前后相邻帧时间间隔 $\Delta t$ 较小,由目标跟踪与运动的连续性,可知目标位置在 $\Delta t$ 时间内不可能发生太大变化,即目标质心位置变化应具有连续性,因而可利用位置相似性特征对扩展群目标中的个体目标进行关联.实际工作中,可计算某目标的当前帧空间位置与前一帧中待匹配各预测目标空间位置的欧氏距离,其值最小时认为是同一个目标的概率最大.扩展群目标中待匹配个体目标采用有限差分扩展卡尔曼滤波(Finite-Difference Extended Kalman Filtering, FDEKF)算法进行轨迹预测,计算目标质心空间位置,算法参见文献[1].

设 $(x_k^m, y_k^m)$ 为当前帧目标质心 $r_m$ 在 $f_k$ (即第 $k$ 帧图像)范围内的位置坐标, $(x_k^n, y_k^n)$ 为前一帧预测的 $f'_k$ (即在第 $k-1$ 帧实测图像基础上预测的第 $k$ 帧图像)范围内待匹配目标质心 $r_n$ 的坐标.则 $r_m$ 与 $r_n$ 的欧氏距离为

$$D(m, n) = \sqrt{(x_k^m - x_k^n)^2 + (y_k^m - y_k^n)^2} \quad (1)$$

对 $D(m, n)$ 作归一化处理,可以得到如下的相对相似度函数为

$$S(D(m, n)) = \frac{D(m, n)}{\sum_m (D(m, n))} \quad (2)$$

式中 $\sum_m (D)$ 表示属于 $f_k$ 中的 $r_m$ 与 $f'_k$ 中所有待匹配目标的距离之和.

以 $S(D(m, n))$ 作为评价目标间的运动相似性的标准,其值越小,其运动越相似.选择 $S(D(m, n))$

在某允许误差范围内的航迹作为重合航迹输出. 这样, 选择输出的航迹数量将是非常有限的.

其次, 从重合的多条航迹中选择航迹稳定性好, 准确度高的航迹. 采用二阶最小二乘拟合法计算目标特征(目标的形状、灰度、大小、纹理、亮度、紧凑度、面积及其在图像中所处位置等)变化大小, 并结合航迹的长度来评价航迹的稳定性, 通过加权的方式确定航迹的置信度, 并选择输出置信度最高的航迹.

在计算目标特征变化时, 跟踪系统提取目标的形状、灰度、大小、纹理、亮度、紧凑度、面积、及其在图像中所处位置等特征, 并通过计算特征的变化程度来判断对比度跟踪是否成功. 计算特征量变换的比率  $u_i$ , 其中,  $i$  表示各个目标特征的序号, 则目标特征总的变换率为

$$R = \sum_i k_i \mu_i \quad (3)$$

式中,  $k_i$  为加权系数, 当  $R < T_m$  时 ( $T_m$  为一预定阈值), 即确定此目标特征关联成功, 并认为该航迹置信度高, 选择输出进行跟踪.

### 2.2.2 主辅式多模跟踪

复合多模跟踪主要方式有主辅式多模图像跟踪复合技术、分阶段(分时)的多模图像跟踪复合技术、并行的独立多模图像跟踪复合技术. 对光学扩展群目标跟踪时采用主辅式多模图像跟踪方式, 主模式在对跟踪目标形成跟踪航迹后, 对上一帧预测的波门区域进行目标特征提取、识别, 获取到目标的跟踪点, 实现目标跟踪点的定位和置信度计算; 辅模式高准确度地提取目标跟踪点, 并将跟踪输出的跟踪位置作为主辅式跟踪的最终输出结果.

在对扩展群目标的跟踪中, 主跟踪方式采用对比度跟踪, 辅跟踪方式采用相关跟踪.

鉴于扩展群目标的特点, 这里基于对比度跟踪算法采用文献[1]提出的多边缘法进行跟踪.

相关跟踪具有可在低信噪比条件下正常工作, 能适应较复杂结构的目标和背景, 具有较强的局部抗干扰能力等优点. 在对扩展群目标跟踪系统中采用的是基于边缘提取后的灰度匹配方法, 配合合理的模板更新与修正, 达到了较好的跟踪效果.

## 3 试验应用结果

结合某大型光学设备的研制与实际应用, 试验对空中目标群采用群目标多模检测与跟踪方法处理.

首先对包含图 4 在内的某红外图像序列进行多模检测. 设定目标边缘距离在 20 个像素内判别为群目标, 显示最多产生不超过 5 个检测结果, 检测结果

与目标图像对应明确; 用普通单个目标检测方法进行检测, 可能得到多达 10 余个检测结果, 同时还有个别目标未能检测到, 而且各检测结果无序排列, 与目标图像对应较乱, 在检测时如显示波门, 则整个视场中显得杂乱无章, 严重影响视觉效果. 在一般情况下, 采用群目标多模检测计算, 运行效率提高了 60% 以上, 而且做到全视场完整检测, 无遗漏, 显示效果简洁明了.

然后进行航迹关联与多模跟踪计算. 为比较跟踪准确度, 采用主辅式多模跟踪方法分别结合传统 PDA 关联算法和基于多特征联合的 JPDA 关联算法, 对包含图 3 在内的某红外图像序列进行计算, 群目标特征选用运动速度、目标在图像中位置、目标面积、灰度、长度、紧凑度, 加权系数分别取 0.4、0.2、0.1、0.1、0.1、0.1, 得到如表 1 中所示的目标跟踪轨迹误差, 显示 JPDA 算法的跟踪误差远小于传统的 PDA 算法.

表 1 跟踪轨迹误差分析(单位: ")

Table 1 Error analysis of tracking trajectory(unit: ")

Association algorithm	Azimuth error		Elevation error	
	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation
PDA	10.429 9	4.322 2	7.550 0	2.587 7
JPDA	7.598 7	2.575 6	3.920 6	1.875 7

## 4 结论

由于光学设备对空中包含有扩展目标在内的目标群存在跟踪难题, 本文参考雷达跟踪群目标方法, 提出光学扩展群目标的概念, 并在剖析光学扩展群目标的多样性特点与跟踪难点基础上, 分析了光学群目标实现多模检测与跟踪的需求. 结合新研大视场、高分辨率光电成像跟踪测量系统的应用, 融合目前多种检测算法, 结合空间相关性判别处理, 完成了全视场图像中扩展群目标的不同目标特性复合检测, 实现群目标的完整检测, 检测效率比普通单目标检测效率提高 60% 以上, 检测无遗漏, 显示效果简洁明了.

随后通过计算某目标的当前帧空间位置与前一帧中待匹配各预测目标空间位置的欧氏距离, 判断在某允许误差范围内的多目标航迹重合性, 极大地减少了多目标处理过程中输出的航迹数量, 从而降低了多特征联合关联计算时的复杂性.

采用主辅式方式结合多特征航迹联合关联对群目标进行跟踪, 与传统方法比较, 方位跟踪误差均值提高 2", 高低角跟踪误差均值提高 3.5", 实现了对光学扩展群目标的多模跟踪. 外场应用试验表明, 扩展群目标的多模检测与跟踪方法实现了对目标特性

差异大、包括扩展目标和众多小目标的光学目标群的自动完整检测和稳定跟踪的要求。

#### 参考文献

- [1] LIU Huo-ping, WU Qin-zhang, LIU Yang, *et al.* Tracking the disaggregation of rapid expanding target based on weighted edge algorithm[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(11):8-13.  
刘火平, 吴钦章, 刘扬, 等. 多边缘法实现对高速扩展目标解体的自动跟踪[J]. *光电工程*, 2010, **37**(11):8-13.
- [2] WAXMANN M J, DRUMMOND O E. A bibliography of cluster(group) tracking[C]. *SPIE*, 2004, **5428**: 551-560.
- [3] VO B N, SINGH S, DOUCET A. Sequential monte carlo methods for Multi-target filtering with random finite sets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, **41**(4): 1224-1245.
- [4] VO B N, MA W K. The Gaussian mixture probabslity hypothesis density filter[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, **51**(11): 4091-4104.
- [5] LIAN Feng, HAN Chong-zhao, LIU Wei-feng, *et al.* Tracking party resolvable group targets using SMC-PHDF[J]. *Acta Automatic Sinica*, 2010, **36**(5): 731-741.  
连峰, 韩崇昭, 刘伟峰, 等. 基于 SMC-PHDF 的部分可分辨的群目标跟踪算法[J]. *自动化学报*, 2010, **36**(5):731-741.
- [6] WANG Sen, YANG Jian-jun, SUN Peng. Research on targets assignment of TBMs in ATBM battle based on proved TOPSIS and ant colony algorithms [J]. *Command Control & Simulation*, 2011, **33**(1): 23-26.  
王森, 杨建军, 孙鹏. 基于改进 TOPSIS 法和蚁群算法的反 TBM 目标群目标分配研究[J]. *指挥与控制*, 2011, **33**(1):23-26
- [7] PENG Zhen-ming, JIAN Biao, XIAO Jun. Aerial extended target detection based on unit-linking pulse coupled neural networks[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **19**(12): 2011-2016.  
彭真明, 蒋彪, 肖峻. 基于脉冲耦合神经网络的空中扩展目标检测[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(12):2011-2016.
- [8] ZENG Peng-xin. Research on the detection and tracking methods of moving multi-targets in dynamic scenes [D]. Shenyang: Doctoral Dissertation of Northeastern University, 2005:60-62.  
曾鹏鑫. 动态场景下多运动目标检测及跟踪方法研究[D]. 沈阳:东北大学, 2005:60-62.
- [9] TANG Zi-li, MA Cai-wen. Application of the complex target-identify technique based on flight path and character in tracking of multi-targets[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 375-379.  
唐自力, 马彩文. 基于航迹和特征的目标识别技术在多目标跟踪中的应用[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2):375-379.
- [10] NIE Xuan, CHEN Huai-ming. A method for multi target tracking feature correlation method [J]. *Application Research of Computers*, 2009, **26**(9): 3545-3547.  
聂焜, 陈怀民. 一种用于多目标跟踪的特征关联方法[J]. *计算机应用研究*, 2009, **26**(9):3545-3547.
- [11] KOCH W. Bayesian approach to extended object and cluster tracking using random matrices[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, **44**(3): 1042-1059.
- [12] AHMED J, JAFRI M N, SHAH M, *et al.* Real-time edge-enhanced dynamic correlation and predictive open-loop car-following control for robust tracking[J]. *Machine Vision and Applications*, 2008(19): 1-25.
- [13] ZHANG Jian-jun, HUANG Shan, ZHANG Hong-bin, *et al.* Moving object detection and recognition based on video[J]. *Modern Electronics Technique*, 2009, **32**(8): 87-91.  
张建军, 黄山, 张洪斌, 等. 基于视频的运动目标检测与识别[J]. *现代电子技术*, 2009, **32**(8):87-91.
- [14] LIN Zai-ping, ZHOU Yi-yu, AN Wei, *et al.* Track-before-detect algorithm based on probability hypothesis density smoother[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1012003.  
林再平, 周一宇, 安玮, 等. 基于概率假设密度滤波平滑器的检测前跟踪算法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(10):1012003.
- [15] GAO H Z, GREEN R. A robust moving object segmentation algorithm [C]. Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition Christchurch, 2007(1): 214-217.
- [16] JIN Yong-liang, WANG Yan-jie, LIU Yan-ying, *et al.* Pre-detection method for small infrared target[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(1): 171-178.  
靳永亮, 王延杰, 刘艳滢, 等. 红外弱小目标的分割预检测[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(1):171-178.
- [17] LI Fan, LIU Shang-qian, QIN Han-lin. Dim infrared targets detection based on adaptive bilateral filtering [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 1129-1131.  
李凡, 刘上乾, 秦翰林. 自适应双边滤波红外弱小目标检测方法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(6):1129-1131.
- [18] QU Sheng-jie, PAN Quan, CHENG Yong-mei, *et al.* A weighted hausdorff distance algorithm based on multi-scale edge measure fusion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1560-1565.  
曲圣杰, 潘泉, 程咏梅, 等. 一种多尺度边缘测度融合加权 HD 算法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(10):1560-1565.