# 基于多源数据多特征融合的弱小目标关联研究

刘 铮[1,2,3],毛宏霞[3],戴聪明[1],魏合理[1]

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室,安徽 合肥 230031;
2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 光学辐射重点实验室,北京 100854)

**摘 要**:异质传感器弱小群目标关联是传感器协同探测首先要解决的问题。即使在同视场下,由红外光电系统和雷达组成的异质传感器探测目标也不完全一致,特别是远距离探测时,雷达探测目标多而密集,红外光电系统探测目标相对较少,此时目标航迹关联结果具有很大不确定性。针对这一难题,采用基于多源数据多特征融合的弱小目标关联方法, 首先基于多模型估计方法筛选同类型目标作为潜在关联目标,再基于航迹关联算法对同类型目标粗关联,最后基于多特征最大联合概率分布对目标精细关联。经红外光电系统/雷达同站址探测仿真试验验证,相比于仅利用航迹进行目标关联,该方法有效提高了弱小目标关联的准确性。

**关键词**:目标关联; 异质传感器; 目标识别

**中图分类号**:TN215 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0526001

# Dim and small target association based on multi-source data and multi-feature fusion

Liu Zheng[1,2,3], Mao Hongxia[3], Dai Congming[1], Wei Heli[1]

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The dim and small target association of heterogeneous sensors is the first problem to be solved by cooperative detection of sensors. Even in the same field of view, the detection targets of heterogeneous sensors composed of infrared photoelectric systems and radar are not exactly the same, especially in the long-distance detection, the radar detection targets are many and dense, while the detection targets of infrared photoelectric systems are relatively few, so the target track association result has a great uncertainty. Aiming at this problem, the dim and small target association method based on multi-source data and multi-feature fusion was firstly proposed based on the multi-model estimation method, selecting the same type of targets as the potential association target, then making the rough association of the same type of targets based on the track association algorithm, and finally making fine association of targets based on the multi-feature maximum joint probability distribution. The simulation

**收稿日期**:2018-12-10; **修订日期**:2019-01-18

**作者简介**:刘铮(1981-),男,高级工程师,博士生,主要从事目标特性与识别方面的研究。Email: mchina@sina.com

**导师简介**:魏合理(1965-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事大气光学方面的研究。Email: hlwei@aiofm.ac.cn

tests of infrared photoelectric systems/radar are verified by the same station site detection that this method effectively improves the accuracy of the association of dim and small targets compared with only using track for target association.

**Key words:** data association; heterogeneous sensors; target recognition

## 0 引 言

目标远程探测时,距离远、信号特征微弱,雷达或红外光电系统难以独立完成目标监测。由于光/电探测机理不同,在复杂探测任务中可实现互补[1],因此雷达与红外光电系统异质传感器协同探测与识别是发展的必然趋势。异质传感器协同探测时,由于各传感器探测的目标信息匮乏且不完全一致,传感器间目标关联成为首要问题,也是一个难题。国内外学者从不同角度对这一问题进行研究。Singer 等率先提出了最近邻方法(NN),Y.Bar Shalom 提出并由后人推广的多传感器联合概率数据关联算法(MSJPDA);国内如何友、韩崇昭等很多学者在多源异质传感器融合研究中做了大量工作。经过多年的研究积累,先后形成最近邻关联、加权关联、航迹模糊关联、广义 S 维分配等经典方法[2-3]。但总的说来,目前研究基本上是基于航迹估计[4-5],很少考虑利用目标光/电特征。当异质传感器探测同一场景,由于传感器探测机理不同,导致雷达探测目标多而密集,光学探测目标相对较少时,通过航迹进行目标关联正确率会受影响。

针对这一问题,文中采用三个步骤逐步实现异质传感器目标关联。首先利用基于多模型估计方法进行目标类型辨识,筛选同类型目标作为潜在关联目标;在此基础上,对类型一致、空间航迹接近的目标,在航迹粗关联基础上,基于多特征最大联合概率分布实现异质传感器弱小目标精细关联。

文中主要研究雷达/红外光电系统同站址探测时目标关联问题,同站址探测是经常采用的一种协同探测模式,理论上通过适当的坐标变换,可以将文中算法推广到其他分布式协同探测模式。

## 1 基于多特征融合的目标关联算法

### 1.1 基于多模型估计的目标类型辨识

目标关联时,首先需要待关联目标类型一致。依据多模型估计理论,以不同类型目标特征模型作为量测映射,利用目标运动和姿态变化连续性特点,可基于包括文中[6-8]状态预估与滤波的方法,对每一传感器探测目标的红外或电磁特征进行估计。根据量测估计误差收敛性,判断选用的特征模型与探测目标匹配程度,进而判别探测目标类型以及待关联目标类型一致性。

基本算法流程如图 1 所示。

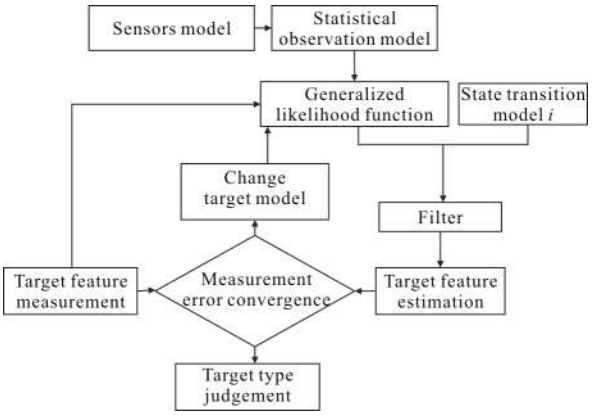


图 1 目标类型判断流程

Fig.1 Target type judgement flow

将目标相对探测器的方位角、俯仰角和视向角作为状态量,即 $k$ 时刻目标 $t$ 状态量为:

$$S_{k,t}=\left[A_{k,t}^{1},\dot{A}_{k,t}^{1},P_{k,t}^{1},\dot{P}_{k,t}^{1},A_{k,t}^{2},\dot{A}_{k,t}^{2},P_{k,t}^{2},\dot{P}_{k,t}^{2},\Theta_{k,t}^{1},\dot{\Theta}_{k,t}^{1},\Theta_{k,t}^{2},\dot{\Theta}_{k,t}^{2}\right] \quad (1)$$

式中:$A_{k,t}^{i}$、$\dot{A}_{k,t}^{i}$为目标 $t$ 在 $k$ 时刻相对传感器 $i$ 所在站址的方位角及其变化率;$P_{k,t}^{i}$、$\dot{P}_{k,t}^{i}$为目标 $t$ 在 $k$ 时刻相对传感器 $i$ 所在站址的俯仰角及其变化率;$\Theta_{k,t}^{i}$、$\dot{\Theta}_{k,t}^{i}$为目标 $t$ 在 $k$ 时刻对传感器 $i$ 的视向角及其变化率。

假设雷达和红外光电系统两个传感器组成同站址探测系统 (可推广到多传感器系统),$m_{k}^{i}$为 $k$ 时刻传感器 $i$ 确认的目标数量;$Z_{k,j}^{i}$为第 $i$ 个传感器 $k$ 时刻第 $j$ 个量测。

$$Z_{k,j}^{i}=\left[A_{k,j}^{i},P_{k,j}^{i},I_{k,j}^{i}\right] \quad i=1 \quad (2)$$

$$Z_{k,j'}^{i}=\left[A_{k,j'}^{i},P_{k,j'}^{i},HRRP_{k,j'}^{i}\right]\quad i=2 \tag{3}$$

式中：$A_{k,j}^{i}$ 为第 $i$ 个传感器 $k$ 时刻第 $j$ 个量测的方位角；$P_{k,j}^{i}$ 为第 $i$ 个传感器 $k$ 时刻第 $j$ 个量测的俯仰角；$I_{k,j}^{i}$ 为第 $i(i=1)$ 个传感器 $k$ 时刻第 $j$ 个量测的红外辐射强度；$HRRP_{k,j}^{i}$ 为第 $i$ $(i=1)$ 个传感器 $k$ 时刻第 $j'$ 个量测的一维距离像。

则目标特征估计误差如公式(4)~(6)所示。

$$\hat{s}_{k|k-1,j}^{i}=f_{k-1}\left(\hat{s}_{k-1|k-1,j}^{i}\right) \tag{4}$$

$$\hat{c}_{k|k-1,j}^{i}=h_{k-1}\left(\hat{s}_{k|k-1,j}^{i}\right) \tag{5}$$

$$\tilde{c}_{k|k-1,j}^{i}=c_{k-1}^{i}-\hat{c}_{k|k-1,j}^{i} \tag{6}$$

式中：$c$ 为目标量测 $Z$ 中红外辐射强度或一维距离像等特征；$f_k$ 为状态演化映射，与目标物理属性相关；$h_k$ 为量测映射，与目标特征模型相关。

根据参考文献[9]的研究，当估计误差满足收敛性要求，即经迭代计算公式(4)成立：

$$\left|\left|\tilde{c}_{k|k-1,j}^{i}\right|\right|<\varepsilon \tag{7}$$

式中：$\varepsilon$ 为先验阈值。从目标特性测量理论可知，外场测量情况下，一般为估计值的 0.3 倍。

当选用的目标特征模型与传感器探测目标都匹配时，量测估计误差是收敛的[9]，否则是发散的。当误差发散时，目标特征模型需要更新。

### 1.2 多特征融合的目标关联

判别目标类型后，一般通过空间航迹进行关联，如参考文献[10]所示方法。但对于目标紧密伴飞以至于航迹不易关联的情况，需要考虑其他辅助特征作为关联依据。针对这个问题，文中提出在目标航迹粗关联基础上，利用光/电特征联合概率分布最大进行目标精细关联。

文中以加权航迹关联方法为代表进行目标粗关联，该方法是多传感器目标关联的常用方法，实际应用中可根据需要用其他方法代替。

设传感器 $i$ 中目标 $j$ 的运动状态为 $x_k^{i,j}$，则传感器 $i$ 对目标 $j$ 状态估计量为 $\hat{x}_{k|k}^{i,j}$，估计误差为：

$$\tilde{x}_k^{i,j}=x_k^{i,j}-\hat{x}_{k|k}^{i,j} \tag{8}$$

同理，设传感器 $m$ 中目标 $l$ 运动状态估计参差为：

$$\tilde{x}_k^{m,l}=x_k^{m,l}-\hat{x}_{k|k}^{m,l} \tag{9}$$

同时为进行航迹关联，引入两个传感器目标状态估计量之差 $\hat{t}_{i,m}^{j,l}$：

$$\hat{t}_{i,m}^{j,l}=\hat{x}_{k|k}^{i,j}-\hat{x}_{k|k}^{m,l} \tag{10}$$

根据加权航迹关联假设，$\hat{t}_{i,m}^{j,l}$ 的估计协方差为：

$$C_{i,m}^{j,l}(k)=E\left(\tilde{t}_{i,m}^{j,l}(k)\left[\tilde{t}_{i,m}^{j,l}(k)\right]^{\mathrm{T}}\right) \tag{11}$$

$$\tilde{t}_{i,m}^{j,l}(k)=t_{i,m}^{j,l}(k)-\hat{t}_{i,m}^{j,l}(k) \tag{12}$$

描述传感器 $i$ 的航迹 $j$ 和传感器 $m$ 的航迹 $l$ 的相似性充分统计量为：

$$\alpha_{i,m}^{j,l}(k)=\left(\hat{t}_{i,m}^{j,l}\right)^{\mathrm{T}}C_{i,m}^{j,l}(k)^{-1}\hat{t}_{i,m}^{j,l} \tag{13}$$

若 $\alpha$ 低于 $\chi^2$ 分布下某一个门限，则 $j$ 与 $l$ 关联，否则不关联。

但是紧密伴飞情况下，满足关联条件不止两条航迹，因此，需要利用目标视向角(即姿态)是否一致对目标精细关联。目标视向角不可测量，但可以通过光/电特征关联程度来判断目标相对每个传感器视向角是否一致。光/电特征关联性通过联合概率分布进行度量。即：

$$e_{jl}=P(I_j,\ HRRP_l) \tag{14}$$

若异质传感器 $i$ 和 $m$ 的两个对应目标 $j$ 与 $l$ 关联，则应满足下式条件：

$$e_{jl}=\max_{l_m\in M}(e_{jl_m}) \tag{15}$$

## 2 典型目标光/电特征联合概率分布

上文利用光/电特征联合概率分布判断目标相对传感器视向角的一致性。本节将通过典型目标光/电特征理论分析，证明对于同站址探测情况，光/电联合概率分布最大时，目标相对各传感器视向角是一致的，目标特性计算方法可见文参考文献[11-14]。不同典型目标的形状具有明显的差异性，这里以锥形、柱形和球形目标为例，进行目标特征的联合概率分布分析。文中所阐述的方法可推广至更为广泛的情形。

### 2.1 锥形目标光/电特征联合概率分布

假设 $X$ 波段 2 GHz 带宽雷达和一个中波红外光电系统同站址探测锥形目标。其光/电特征(一维距离像与辐射强度) 随视向角度变化结果如图 2 所示(为了后继融合处理方便，对特征进行了归一化)。

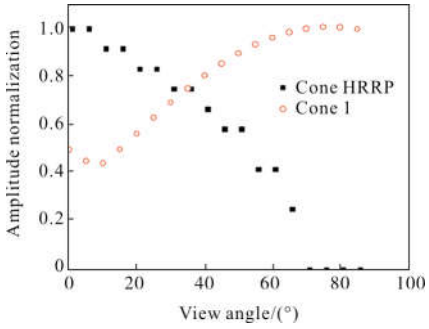


图 2 锥形目标光/电特征随角度变化分布

Fig.2 Taper target optical/electrical features distribution with view angle

通过随视向角变化的特征序列相关性计算，光/电特征的相关系数为−0.92。光/电特征联合概率分布如图 3 所示($X$,$Y$ 坐标分别为光/电传感器视向角，$Z$ 坐标为光/电特征联合概率分布)。

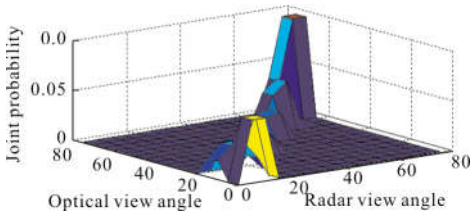


图 3 锥形目标光/电特征联合概率分布

Fig.3 Taper target optical/electrical features joint probability distribution

由图 3 可见，当异质传感器同站址探测时，光/电特征联合分布概率最高时，对应各传感器目标探测视向角一致。

### 2.2 圆柱形目标光/电特征联合概率分布

假设 $X$ 波段 2 GHz 带宽雷达和一个中波红外传感器同站址探测圆柱形目标，目标光/电特征随视向角度变化如图 4 所示。

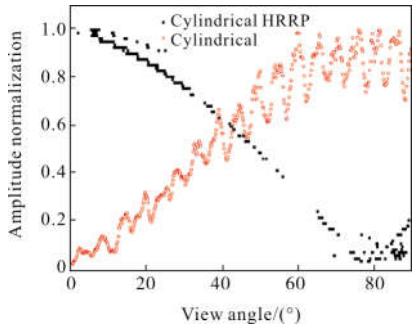


图 4 圆柱形目标光/电特征随角度变化分布

Fig.4 Cylindrical target optical/electrical features distribution with view angle

通过随视向角变化的特征序列相关性计算，光/电特征的相关系数为−0.97。光/电特征联合概率分布如图 5 所示 ($X$,$Y$ 坐标分别为目标对光/电传感器视向角，$Z$ 坐标为光/电特征联合概率分布)。

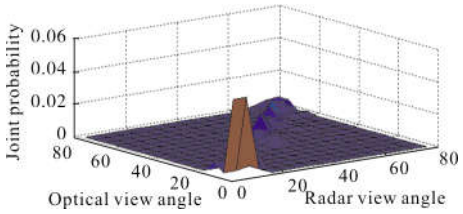


图 5 圆柱形目标光/电特征联合概率分布

Fig.5 Cylindrical target optical/electrical features joint probability distribution

由图 5 可见，当同站址探测圆柱形目标时，光/电特征联合概率分布最高时，目标对各传感器视向角也是一致的。

### 2.3 球形目标光/电特征相关性分析

球形目标辐射强度与 HRRP 归一化后，其值均在 1 左右，也就是其光/电特征周向均匀。

综上，同站址探测下各种典型形状目标光/电特征联合分布为：对于圆柱形、锥形等目标，当光/电特征联合概率分布最高时，目标对每一个传感器视向角一致；对于球形目标，其光/电特征周向均匀，联合概率分布也是均匀的。

## 3 异质传感器目标关联算法验证

典型异质传感器多目标探测试验仿真中，各传感器同站址探测。其中红外光电系统测角精度为 0.05°，探测到的目标为锥形，目标视向角 40°。雷达测角精度为 0.5°。雷达目标 1 为锥形，目标视向角 20°，雷达目标 2 为球形，目标视向角 40°，雷达目标3 为锥形，目标视向角 40°(仿真中与光学目标为同一目标)。各传感器探测目标在光学测量站坐标系下俯仰角和方位角如图 6 和图 7 所示。

综合图 6 和图 7，光学目标与三个雷达目标的俯仰角最多差 0.5°，方位角最多差 0.2°，因此所有目标在航迹上非常接近，在光、电测量都存在系统误差的情况下，利用航迹关联很容易出现错误。因此需要利用光、电特征联合概率分布进行目标精细关联。

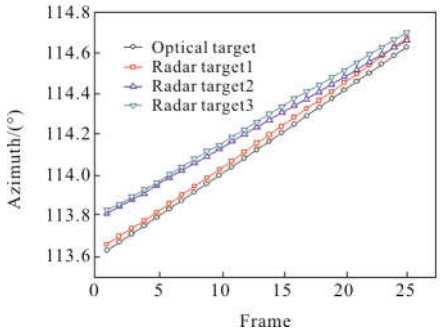


图 6 各传感器探测目标在光学探测坐标系下方位角变化

Fig.6 Target azimuth angle of each sensor in optical coordinate system

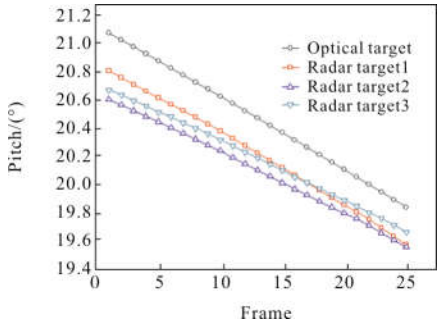


图 7 各传感器探测目标在光学探测坐标系下俯仰角变化

Fig.7 Target pitch angle of each sensor in optical coordinate system

利用公式(1)、(2)对目标进行多模型估计。量测映射 $h$ 为锥形目标模型。各目标量测估计误差如图8所示。

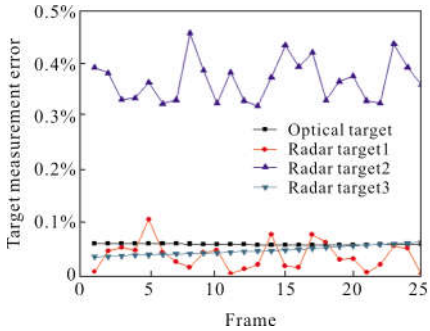


图 8 目标光/电特征测量误差

Fig.8 Target optical/electrical features measurement error

可见光学目标、雷达目标 1、雷达目标 3 量测估计误差很小,三个目标应为锥形目标。雷达目标 2 量测估计误差很大，也即锥形目标特征模型与其不匹配,因此雷达目标 2 不可能与光学目标关联。

光学目标与雷达目标 1 与雷达目标 3,利用航迹最近邻关联和加权关联，得到每帧关联结果如图 9 和图 10 所示。

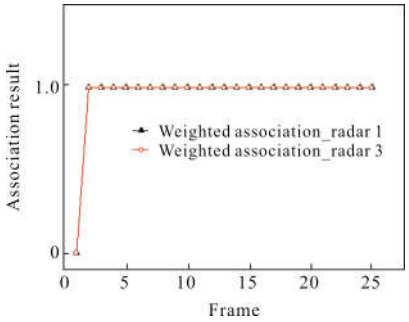


图 9 加权关联下雷达两个目标与光学目标关联结果

Fig.9 Weighted association result of two radar targets and one optical target

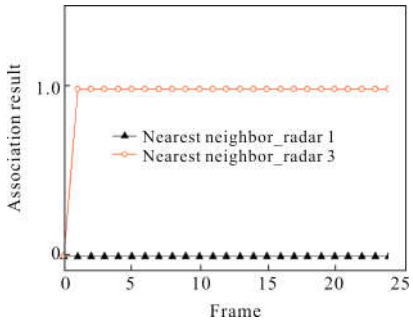


图 10 最近邻关联下雷达两个目标与光学目标关联结果

Fig.10 Nearest association result of two radar targets and one optical target

目标关联结果为0 代表两个目标不满足关联准则,结果为 1 则代表两个目标满足关联准则。从图 9 中可见,加权关联时,雷达目标 1、雷达目标 3 与光学目标都满足关联准则。从图 10 中可见,最近邻关联下,雷达目标 1、雷达目标 3 交替与光学目标满足关联准则。总之仅通过航迹,有可能无法完成异质传感器目标关联。

在航迹关联基础上,利用光/电特征最大联合概率分布进行目标精细关联,结果如图 11 所示。

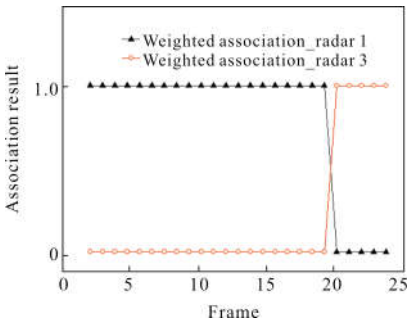


图 11 目标特征与航迹联合目标关联结果

Fig.11 Target association result with trajectory and optical/electrical features

由图 11 可见，考虑目标光/电特征联合概率分布后，只有雷达目标 3 可以与光学目标关联，这与仿真设定是一致的。

## 4 结 论

多传感器协同探测目标是当下发展的趋势，而多传感器目标关联，是协同探测的基础。但目标伴飞过程中目标航迹差异很小，仅利用航迹作为多目标关联的依据很容易出现错误。鉴于以上原因，文中将目标航迹与其光/电特征联合概率分布共同作为目标关联的依据，研究基于多特征融合的目标关联方法，即首先基于多模型估计理论对待关联目标类型同一性进行辨别，再基于航迹关联算法对同类型目标粗关联，最后基于多特征最大联合概率分布对目标精细关联。

该方法经过验证，在同站址多传感器协同探测时，取得良好的关联效果。仿真试验数据表明：仅通过航迹关联，紧密伴飞目标间有可能关联错误，而利用目标光/电特征联合概率分布进行辅助，会有效提升目标关联的准确性。当伴飞目标光/电特征较为接近时，还需要进一步挖掘和运用光/电变换特征差异。

**参考文献：**

[1] Fang Feng, Cai Yuanli. Multi-sensor space registration for maneuvering target tracking [J]. ***Journal of Solid Rocket Technology***, 2016, 39(4): 574-581. (in Chinese)

[2] Niu Xichen, Xiong Jiajun, Ding Xiao. Fuzzy data association based on multi-feature and multi-target [J]. ***Fire Control & Command Control***, 2015, 40(10): 46-52. (in Chinese)

[3] Han Hong, Liu Yuncai, Han Chongzhao, et al. Sequential track-association algorithm in multi-target tracking system by using the multi-sensor information fusion [J]. ***Signal Processing***, 2004, 20 (1): 30-34. (in Chinese)

[4] Keshavarz H, Tajeripour F, Faghihi R, et al. Developing a new approach for registering LWIR and MWIR images using local transformation function [J]. ***Signal, Image and Video Processing***, 2015, 9(1): 29-36.

[5] Sajjad Safari, Faridoon Shabani, Dan Simon. Multirate multisensor data fusion for linear systems using Kalman filters and a neural network [J]. ***Aerospace Science and Technology***, 2014, 39: 465-471.

[6] Bahador Khaleghi, Alaa Khamis, Fakhreddine O Karray, et al. Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art[J]. ***Information Fusion***, 2013, 14: 28-44.

[7] Lv Dechao, Fan Jiangtao, Han Gangweng, et al. A review of particle filters [J]. ***Astronomical Research & Technology***, 2013, 10(4): 397-409. (in Chinese)

[8] Qu Congshan, Xu Hualong, Tan Ying. A survey of nonlinear Bayesian filtering algorithms [J]. ***Electronics Optics & Control***, 2008, 15(8): 64-71. (in Chinese)

[9] Gao Yu, Zhang Jianqiu, Yin Jianjun. Polynomial prediction model and tracking algorithm of maneuver target [J]. ***Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica***, 2009, 30(8): 1479-1489. (in Chinese)

[10] Chen Zhifeng, Cai Yunze. Data fusion algorithm for multi-sensor dynamic system based on interacting multiple model [J]. ***Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)***, 2015, 20(3): 265-272. (in Chinese)

[11] Wang Mingkun, Zhang Chenxin, Zhang Xiaokuan. Research on typical maneuvering target dynamic RCS characteristics [J]. ***Bulletin of Science and Technology***, 2015, 31(7): 106-110. (in Chinese)

[12] Yao Peng, Wang Xueqi, Wang Haiyan. Aircraft and black body infrared radiation simulation and modeling [J]. ***Journal of Detection & Control***, 2016, 38(6): 109-114. (in Chinese)

[13] Ai Xiaofeng, Zou Xiaohai, Li Yongzhen. Bistatic scattering centres of cone-shaped targets and target length estimation [J]. ***Science China Information Sciences***, 2012, 55(12): 2888-2898. (in Chinese)

[14] Li Ni, Lv Zhenhua, Wang Shaodan, et al. A real-time infrared radiation imaging simulation method of aircraft skin with aerodynamic heating effect [J]. ***Infrared Physics & Technology***, 2015, 71: 533-541. (in Chinese)