

红外单站多目标跟踪算法研究*

辛云宏^{1,2} 杨万海² 曹正文³

(1 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

(2 西安电子科技大学电子工程学院 210 室, 西安 710071)

(3 西北大学电子科学系, 西安 710069)

摘 要 利用IRST(红外搜索与跟踪)系统所获取的各目标的角度及其红外光谱辐射功率和信息,通过对红外光谱辐射功率和的相关处理,运用选优的JPDA(联合概率数据关联)算法与IMM(交互多模型)算法实现了IRST系统的单站多目标跟踪,并通过两个仿真场景对算法性能进行了检验.仿真结果表明:在跟踪开始阶段,两个场景中的每个目标都能获得高精度的跟踪;当目标编队飞行时,算法能对各目标进行有效的跟踪,而且跟踪精确度也是令人满意的;当目标交叉飞行时,跟踪的误差明显加大,随着时间的延续,对远距离目标会失去跟踪能力,但对近距离目标仍能进行有效的跟踪.

关键词 红外;红外光谱辐射功率;单站;联合概率数据关联;交互多模型;多目标跟踪

中图分类号 TN951 **文献标识码** A

0 引言

传统的IRST系统是一个基于角测量的无源跟踪系统,静止单站IRST系统对于三维目标来说是不可观察的.解决这一问题的有效方法是充分利用所有可获取的测量信息.实际上,除了角度信息外,IRST通常还可获得目标的角度变比率及红外辐射功率等信息.利用角度及红外光谱辐射功率信息可实现单个机动目标的有效跟踪^[1],但是,能否利用该信息进行多个机动目标的跟踪,仍然是一个需要继续研究的课题.

在多目标情况下,IRST系统可获取各目标的角度信息,以及各目标的红外光谱辐射功率和信息.事实上,利用角度及红外光谱辐射信息进行单目标跟踪时,IRST系统就是一个弱观察系统,此时,系统的可观性进一步减弱.因此,要在这种情况下实现多目标的有效跟踪,必须增加一些其它条件.本文所设定的条件为:1)各目标的初始状态:(位置、速度、红外辐射强度)已知,这可通过其它的主动雷达,结合IRST系统本身的测量联合求出;2)各目标的红外辐射强度在整个飞行过程中变化不大.下面的论述就是在以上两个条件下进行的.文中运用JPDA^[2,3]算法解决数据关联问题,用IMM^[4,5]算法处理目标的机动问题,从红外光谱辐射功率和信息中求出各目标的红外光谱辐射功率测量值则是问题的关键.

1 模型描述

1.1 运动模型

设目标的数目为 M , 并且假定该值已知. 下面在一个固定的笛卡尔坐标系中定义目标的运动方程, 设第 i 个目标的状态矢量为

$$X_k^i \triangleq [x_k^i, \dot{x}_k^i, \ddot{x}_k^i, y_k^i, \dot{y}_k^i, \ddot{y}_k^i, z_k^i, \dot{z}_k^i, \ddot{z}_k^i]', \\ i=1, \dots, M$$

式中, (x_k^i, y_k^i, z_k^i) 、 $(\dot{x}_k^i, \dot{y}_k^i, \dot{z}_k^i)$ 、 $(\ddot{x}_k^i, \ddot{y}_k^i, \ddot{z}_k^i)$ 分别表示目标 i 在 k 时刻的位置、速度和加速度. 本文运用IMM(交互多模型)算法实现机动目标的跟踪, 采用恒速率(更准确地为近似恒速率)转弯运动模型^[6], 设共有 r 个模型, 各模型的运动方程可表示为

$$X_k^i(k) = F^t X^i(k) + \Gamma^t \nu_{k-1}^i \quad (1)$$

式中, F^t 为模型 t 的状态转移矩阵, ν_{k-1}^i 为过程噪声, Γ^t 为模型 t 的过程噪声分布矩阵, 其表达式分别为

$$F^t = \begin{bmatrix} G^t & 0 & 0 \\ 0 & G^t & 0 \\ 0 & 0 & G^t \end{bmatrix} \quad \Gamma^t = \begin{bmatrix} B^t & 0 & 0 \\ 0 & B^t & 0 \\ 0 & 0 & B^t \end{bmatrix}$$
$$\nu_k = \begin{bmatrix} \nu_x \\ \nu_y \\ \nu_z \end{bmatrix} \quad G^t = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin \omega T}{\omega} & \frac{1 - \cos \omega T}{\omega^2} \\ 0 & \cos \omega T & \frac{\sin \omega T}{\omega} \\ 0 & -\omega \sin \omega T & \cos \omega T \end{bmatrix}$$
$$B^t = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\cos \omega T}{\omega^2} \\ \frac{\sin \omega T}{\omega} \\ \cos \omega T \end{bmatrix}$$

* 国防预研基金资助项目(41101050108)

Tel: 13060408271 Email: xyh_xian@263.net

收稿日期: 2004-07-21

式中的 t 表示模型类型, 分别对应于不同的 ω 值, 若取 $\omega=0$, 式中参数取 $\omega=0$ 的极限, 此时

$$G = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix}$$

1.2 测量模型

在不考虑杂波和检测概率为 1 的情况下, IRST 系统可探测到每一个目标的方位角 α^i , 俯仰角 β^i , 和各目标的红外光谱辐射功率之和 E_k , 这里假定: 目标在红外探测器的焦平面上是以点的形式出现的. 设 k 时刻与目标 i 相对应的方位角 α_k^i , 俯仰角 β_k^i 与目标 i 位置的关系为

$$\alpha_k^i = \text{atan} \left(\frac{y_k^i}{x_k^i} \right) + w_k^{i1} \quad (2)$$

$$\beta_k^i = \text{atan} \left(\frac{z_k^i}{\sqrt{(x_k^i)^2 + (y_k^i)^2}} \right) + w_k^{i2} \quad (3)$$

红外光谱辐射功率和 E_k 的表达式为

$$E_k = \sum_{i=1}^m E_k^i + w_k^3 \quad (4)$$

$$E_k^i = \frac{J^i A_0 K e^{-u r_k^i}}{(r_k^i)^2} \quad (5)$$

式中, E_k^i 为接收到的第 i 个目标的红外光谱辐射功率, J^i 为目标 i 在探测波段内的红外光谱辐射强度, u 为该波段的大气衰减系数, A_0 为光学系统接收面积, K 为光学系统透过率, r_k^i 为目标 i 到探测器之间的距离. 式(2)~(4)中, $w_k^{i1}, w_k^{i2}, w_k^3$ 分别为 $\alpha_k^i, \beta_k^i, E_k$ 的测量噪声, 假定它们为互不相关且具有恒定方差的高斯白噪声. 由于 E_k^i 不能直接从测量中得到, 必须通过一定的预处理才能得到其近似值, 近似程度与所采用的方法和各目标的运动形式有关, 具体的处理方法由下文给出.

令: $Z^i(k) = [\alpha_k^i, \beta_k^i, E_k^i]'$, 于是关于第 i 个目标的测量的方程可表示为

$$Z^i(k) = h(X^i(k)) + w^i(k) \quad (6)$$

式中, $h(X^i(k))$ 为三维的列向量函数, 表达式与式(2)、(3)、(5)相对应, $w^i(k) = [w_k^{i1}, w_k^{i2}, w_k^3]'$.

2 跟踪算法

一个循环的跟踪处理过程为: 首先, 由目标的运动模型和上一次的估计值计算出各目标当前的状态预测值, 然后, 通过状态预测值和当前测量的红外光谱辐射功率和求出单个目标的红外光谱辐射功率, 接着, 由 JPDA 关联算法确定测量与目标之间的对应关系, 最后, 计算各目标的状态估计和其他相关参数. 整个运算过程都通过 IMM 算法进行, 具体运算步骤如下:

步骤 1: 状态预测

1. 利用目标 i 于 $k-1$ 时刻基于模型 M_t^i 的状态估计 $\hat{X}_{0r}^i(k-1|k-1)$, 求出匹配于模型 M_t^i 的混合初始条件

$$\hat{X}_{0r}^i(k-1|k-1) = \sum_{s=1}^r \hat{X}_s^i(k-1|k-1) \times \mu_{s/t}^i(k-1|k-1) \quad i=1, \dots, M; t=1, \dots, r \quad (7)$$

式中

$$\mu_{s/t}^i(k-1|k-1) = P\{M_s^i(k-1)|M_t^i(k), Z^{i,k-1}\} = \frac{1}{\bar{C}_i} p_{s\mu}^i(k-1) \quad (8)$$

$\bar{C}_i = \sum_{s=1}^r p_{s\mu}^i(k-1)$ 为规范化常数, p_s^i 为目标 i 的 Markov 模型转移概率, 表示从 $k-1$ 时刻的模型 M_t^i 跳转到 k 时刻模型 M_s^i 的概率. $Z^{i,k-1} = [Z^i(1), Z^i(2), \dots, Z^i(k-1)]$ 为从跟踪开始直到 $k-1$ 时刻关于目标 i 的累积测量量, 匹配于模型 M_t^i 的初始协方差矩阵为

$$P_{0r}^i(k-1|k-1) = \sum_{s=1}^r \mu_{s/t}^i(k-1|k-1) \{ p_s^i(k-1|k-1) + [\hat{X}_s^i(k-1|k-1) - \hat{X}_{0r}^i(k-1|k-1)] \cdot [\hat{X}_s^i(k-1|k-1) - \hat{X}_{0r}^i(k-1|k-1)]' \} \quad (9)$$

2. 计算基于模型 M_t^i 的 EKF 预测值

$$\hat{X}_t^i(k|k-1) = F^t \hat{X}_{0r}^i(k-1|k-1) \quad (10)$$

$$P_t^i(k|k-1) = F^t P_{0r}^i(k-1|k-1) (F^t)' + Q^t \quad (11)$$

步骤 2: 单个目标的红外光谱辐射功率的计算:

1. 计算目标 i 基于模型 M_t^i 的红外光谱辐射功率的预测值

$$\hat{E}_t^i(k/k-1) = \frac{J^i A_0 k e^{-u \hat{r}_t^i(k/k-1)}}{(\hat{r}_t^i(k/k-1))^2} \quad (12)$$

式中

$$\hat{r}_t^i(k/k-1) = \sqrt{(\hat{x}_t^i(k/k-1))^2 + (\hat{y}_t^i(k/k-1))^2 + (\hat{z}_t^i(k/k-1))^2}$$

2. 求得目标 i 的红外光谱辐射功率的近似测量值

$$E_k^i \approx E_k - \sum_{j=1, j \neq i}^M \sum_{u=1}^r u_j^i(k-1) \hat{E}_t^i(k/k-1) \quad (13)$$

需要说明的是, 这种处理方式使得 E_k^i 的误差大小与其它目标预测状态的精确度密切相关, 因此这一误差反映的是所有目标状态的整体估计误差, 而不是单个目标误差.

步骤 3: 目标与测量的数据关联

由于不考虑杂波, M 个目标就有 M 个测量, 则有 $M!$ 个互联事件, 这里采用选取最优的 JPDA 关联方法. 首先用 JPDA 方法计算出每一个互联事件的关联概率, 然后选一个概率最大的事件作为实际的关联事件.

设 $\theta(k)$ 表示 k 时刻所有互联事件的集合, 令 $\theta(k) = \{\theta_m(k)\}_{m=1}^M, \theta_m(k)$ 表示其中的某个特定的互联事件, 其关联概率为

$$P\{\theta_m(k)\} = \prod_{i=1}^M P^{j_i t_i} \{\theta_m(k)\} \quad j_i \in \{1, 2, \dots, M\}$$

且

$$j_i \neq j_l (i \neq l), i, l = 1, 2, \dots, M, t_i = 1, 2, \dots, r(14)$$

$P^{j_i t_i} \{\theta_m(k)\}$ 表示在互联事件 $\theta_m(k)$ 中, 测量 j_i 与目标 i 相关且目标模型 M_i^j 有效的事件.

令 $P\{\theta_{m^*}(k)\} = \max_m P\{\theta_m(k)\}$, 则互联事件 $\theta_{m^*}(k)$ 被确定为最终的关联事件, 此时 $\{j_1^*, j_2^*, \dots, j_M^*\}$ 则表示了测量和目标的实际对应关系. $P^{j_i t_i} \{\theta_m(k)\}$ 的计算过程如下

1. 预测测量

$$\hat{Z}_i^j(k) = h(\hat{X}_i^j(k/k-1)) \quad (15)$$

2. 预测测量协方差

$$S_i^j(k) = H_i^j(k) P_i^j(k/k-1) (H_i^j(k))' + R^i \quad (16)$$

式中, $H_i^j(k)$ 为式(15)中 $h(\hat{X}_i^j(k/k-1))$ 的雅可比行列式, 表达式为

$$H_i^j(k) = \begin{bmatrix} -\frac{\sin \hat{\alpha}_i}{\hat{r}_i^i \cos \hat{\beta}_i} & 0 & 0 & \frac{\cos \hat{\alpha}_i}{\hat{r}_i^i \cos \hat{\beta}_i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\sin \hat{\beta}_i \cos \hat{\alpha}_i}{\hat{r}_i^i} & 0 & 0 & -\frac{\sin \hat{\beta}_i \sin \hat{\alpha}_i}{\hat{r}_i^i} & 0 & 0 & \frac{\cos \hat{\beta}_i}{\hat{r}_i^i} & 0 \\ dE_i^j x_i & 0 & 0 & dE_i^j y_i & 0 & 0 & dE_i^j z_i & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中

$$dE_i^j = -J^i A_0 K e^{-u_i} (u + 2/r_i^i) / (r_i^i)^3 \quad (18)$$

为了表述的简洁, 式(17)、(18)中省略了时间参数 $(k/k-1)$. 考虑到 E_i^j 的误差大小与其它目标预测状态的精确度密切相关, 上式并不能反映实际的情况, 因此, 算法实施过程中用下面的表达式代替上式, 这一替换显著提高了跟踪精确度.

$$d\tilde{E}_i^j = -E_k (u + 2/r_i^i) / r_i^i \quad (19)$$

式中, E_k 为实际测量的各目标红外光谱辐射功率的和.

3. $P^{j_i t_i} \{\theta_m(k)\}$ 的计算, 其定义式为

$$P_{m^*}^{j_i t_i}(k) = N(Z^j(k) - \hat{Z}_i^j(k), 0, S_i^j(k)) / B \quad (20)$$

式中, $B = \sum_{m=1}^M P^{j_i t_i} \{\theta_m(k)\}$, 为规范化常数.

步骤 4: 目标状态及协方差的融合估计

1. 新息及增益的计算

$$K_i^j(k) = P_i^j(k|k-1) (H_i^j(k))' (S_i^j(k))^{-1} \quad (21)$$

$$v_i^j(k) = Z^{j_i^*}(k) - \hat{Z}_i^j(k/k-1) \quad (22)$$

$$\hat{X}_i^j(k|k) = \hat{X}_i^j(k|k-1) + K_i^j(k) v_i^j(k) \quad (23)$$

$$P_i^j(k|k) = (I - K_i^j(k) H_i^j(k)) P_i^j(k|k-1) \quad (24)$$

2. 似然方程

$$\Lambda_i^j(k) = N[v_i^j(k), 0, S_i^j(k)] \quad (25)$$

3. 模型概率的更新

$$\mu_i^j(k) = \frac{1}{C^j} \Lambda_i^j(k) \sum_{s=1}^3 p_s^i \mu_i^j(k-1) = \frac{1}{C^j} \Lambda_i^j(k) \bar{C}_i^j \quad (26)$$

式中, $C^j = \sum_{i=1}^3 \Lambda_i^j(k) \bar{C}_i^j$ 为归一化常数.

4. 状态及协方差的融合估计

$$\hat{X}^i(k/k) = \sum_{i=1}^r \hat{X}_i^i(k|k) \mu_i^i(k) \quad (27)$$

$$P^i(k/k) = \sum_{i=1}^r \mu_i^i(k) \{ p_i^i(k/k) + [\hat{X}_i^i(k|k) - \hat{X}^i(k|k)] [\hat{X}_i^i(k|k) - \hat{X}^i(k|k)]' \} \quad (28)$$

3 仿真分析

3.1 参数设置

本文设计有 3 个目标运动模型, 分别对应于 $\omega = 0, 0.5g, 1g$ 三种参数, 模型之间的马尔科夫转移概率为 $P_{mm}^i = 0.9 (m=n), P_{mm}^i = 0.05 (m \neq n), m, n = 1, 2, 3; i = 1, 2, \dots, M$. 各模型的初始概率为: $\mu_1^i(0) = 0.9, \mu_2^i(0) = 0.05, \mu_3^i(0) = 0.05$. 各模型的初始状态 $X_i^j(0)$ 设定为实际的真实值, 初始协方差矩阵: $P_i^j(0) = \text{diag}(10^{-6} \times [400, 100, 25, 400, 100, 25, 400, 100, 25])$. 目标红外光谱辐射功率的测量误差均方差设置为: $\sigma_E = 10^{-7} W$, 角度的测量误差均方差设置为: $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 10^{-4} \text{rad}$. 设大气衰减系数 $u = 0.8 (\text{km}^{-1})$, 光学常数设定为 1, $T = 1 \text{ s}$.

3.2 仿真场景设计

在实际过程中, 曾对多种场景进行了仿真, 限于篇幅, 下面仅列出两种场景的仿真情况.

场景 1: 两个目标交叉飞行.

设两个目标在固定高度上做平行于水平面的机动飞行, 目标 1、2 的初始状态分别为 $[18 \text{ km}, -0.172 \text{ m/s}, 0, 13 \text{ km}, -0.246 \text{ m/s}, 0, 4 \text{ km}, 0]'$, $[1 \text{ km}, 0.172 \text{ m/s}, 0, 12 \text{ km}, -0.246 \text{ m/s}, 0, 4 \text{ km}, 0, 0]'$, 在第 1 到 20 个扫描周期内作匀速飞行; 之后目标 1、2 分别以 $[-0.005 \text{ m/s}^2, 0.005 \text{ m/s}^2, 0]'$, $[0.006 \text{ m/s}^2, 0.005 \text{ m/s}^2, 0]'$ 的加速度作转弯运动, 转弯速率为 $0.748^\circ/\text{s}$, 持续时间为 21 到 45 个扫描周期; 在第 46 到 60 个扫描周期内继续作转弯运动, 转弯速率为 $1.87^\circ/\text{s}$. 在 XY 平面内的飞行航迹如图 1(a). 两个目标的红外光谱辐射强度 J 都设定为 500 Wsr^{-1} .

场景 2: 四个目标平行编队飞行.

设四个目标在固定高度上做平行于水平面的机动飞行, 目标 1~4 的初始位置分别为 $[1 \text{ km},$

10 km, 4 km]、[1 km, 10.5 km, 4 km]、[1 km, 11 km, 4 km]、[1 km, 11.5 km, 4 km]，在第1到20个扫描周期内以相同的初速度[0.172 m/s, -0.246 m/s, 0]作匀速飞行；之后分别以相同的加速度[0.01 m/s², 0.01 m/s²]作转弯运动，转弯速率为0.748°/s，持续时间为21到45个扫描周期；在第

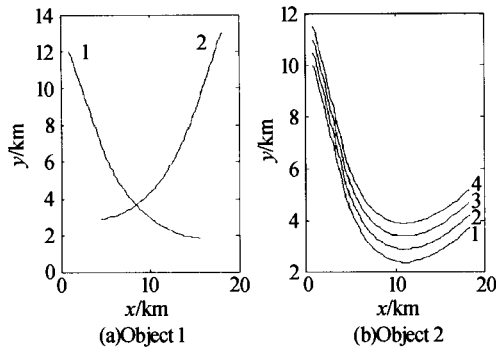


图1 目标在XY平面的飞行航迹
Fig. 1 Trajectory of the target in the XY plane

46到60个扫描周期内继续作转弯运动，转弯速率为1.87°/s。在XY平面内的飞行航迹如图1(b)。目标1、3的J设定为500 Wsr⁻¹，2、4为400 Wsr⁻¹。

3.3 仿真结果及分析

在上述仿真条件下，关于目标位置的跟踪误差分别如图2、3。

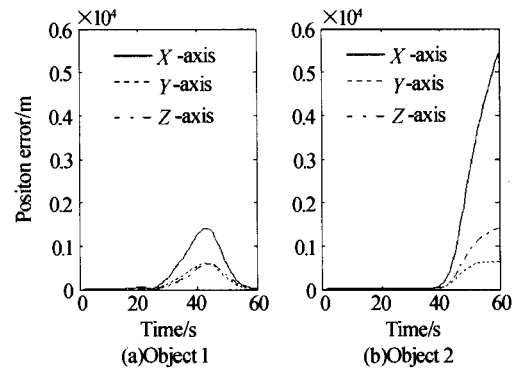


图2 场景1时位置估计的均方误差
Fig. 2 RMS position error

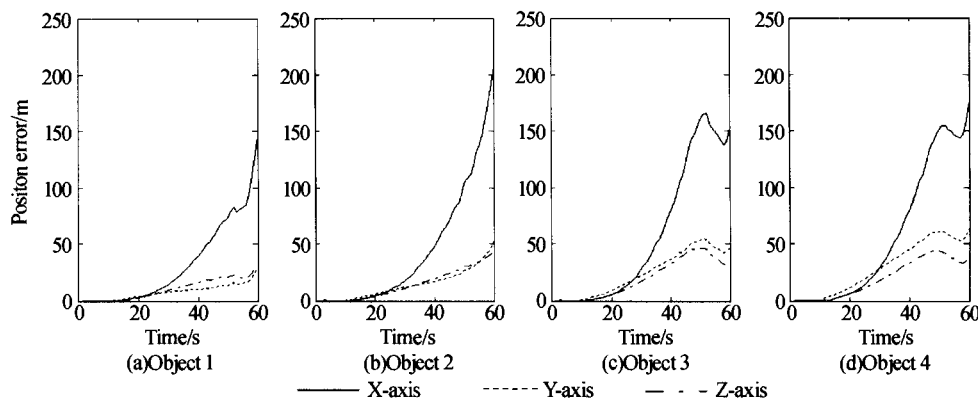


图3 场景2时位置估计的均方误差
Fig. 3 RMS speed error

从图2、3中可以看出，在跟踪的前段，尤其是目标作匀速飞行过程中，两种场景的跟踪精确度是非常高的，最大误差小于20 m，随着跟踪时间的延续及目标机动的出现，跟踪误差明显增大。在场景1交叉飞行的情况下，对于目标2在跟踪的后段已经失去跟踪能力，但对于目标1自始至终都能进行有效的跟踪。在场景2平行编队飞行的情况下，尽管跟踪误差随着跟踪时间的延续不断的累积增大，但是在整个仿真过程中对于四个目标都能进行有效的跟踪，而且其跟踪精确度还是比较高的。前面所强调的目标红外光谱辐射功率和正是导致这种现象的主要原因。目标交叉飞行时，辐射到探测器的两个目标红外光谱辐射功率的变化是相反的，飞向探测器的变大，远离探测器的变小，而功率和并不能反映这种情况，当两者之间的距离相差比较大时，功率和就近似等于近距离目标的辐射功率，因此，对远距离目标就会出现失跟现象，而对于近距离目标仍具有

有效的跟踪能力。当目标平行编队飞行时，由于各目标红外光谱辐射功率的变化是一致的，在功率和上都有一定程度的反映，因而具有较好的跟踪效果。

4 结论

本文对利用IRST系统所获取的目标红外光谱辐射功率和信息进行单站多目标跟踪问题进行了研究，提出了相关的跟踪算法，并通过两个不同的仿真场景对所提算法进行了检验，结果表明：本算法对于平行飞行的多个目标具有很好的跟踪效果，对于交叉飞行的目标也能进行一定程度的有效跟踪。在雷达网系统中，当主动雷达受到威胁或失效时，本方法可作为一个辅助手段，在短时间内实现多目标的有效跟踪，具有一定的实用价值。

参考文献

- 辛云宏, 杨万海. 红外搜索与跟踪系统的单站机动目标跟踪算法研究. 光子学报, 2004, 33(9): 1131~1135
Xin Y H, Yang W H. Acta Photonica Sinica, 2004, 33

- (9): 1131~1135
- 2 何友, 王国宏, 陆大金, 等. 多传感器信息融合及应用. 北京: 电子工业出版社, 2000. 11
He Y, Wang G H, Lu D J, *et al.* Multisensor Information Fusion With Applications. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 11
- 3 Blom H A P, Bloem E A. Probabilistic data association avoiding track coalescence. *IEEE Trans on Automatic and Control*, 2000, **45**(2): 247~259
- 4 Blom H A, Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with markovian switching coefficient. *IEEE Trans on AC*, 1988, **33**(8): 780~783
- 5 Mazor E, Averbuch A, Bar-Shalom Y, *et al.* Interacting multiple model methods in target tracking: a survey. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1998, **34**(1): 103~123
- 6 Li X R, Vesselin P J. Survey of maneuvering target tracking. Part I: Dynamic Models. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2003, **39**(4): 1333~1364

A Method for Tracking Multiple Maneuvering Targets with Single Observer of IRSTS

Xin Yunhong^{1,2}, Yang Wanhai², Cao Zhengwen³

¹ School of Physics and Information, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062

² School of Electronics and Engineering, Xidian University, Xi'an 710071

³ Department of Electronics Science, Northwest University, Xi'an 710069

Received date: 2004-07-21

Abstract A method for tracking multiple maneuvering targets with single observer of IRSTS is presented. It is set up by using the information of the bearing measurements and the sum of the infrared radiation power of the targets received by IRSTS and combining the IMM (Interacting Multiple Model) and the JPDA (Joint Probabilistic Data Association) algorithm. The performance of the algorithm is verified by two scenarios of multiple maneuvering targets tracking. The results show that at the beginning of the tracking, both the scenarios can be tracked effectively; when the targets fly at a forming columns, all the targets can be tracked effectively at the whole trajectory and the accuracy of the tracking is satisfied; when the targets fly crossly, the RMS position error changes large obviously and give a invalid track to the target at the distance at the end of the trajectory, but the near target can be tracked effectively at the whole trajectory.

Keywords IRSTS; Irradiance; Single observer; Multiple target tracking; IMM; JPDA



Xin Yunhong was born in 1967 in Shaanxi Province. He received the B. S. and M. S. degree from Xidian University in 1990 and 1999, respectively. Now he is pursuing his Ph. D. degree in the School of Electronics and Engineering, Xidian University. His research interests include image fusion, infrared location and multitarget-multisensor range and tracking.