

IRST 系统的单站机动目标跟踪算法研究*

辛云宏^{1,2} 杨万海¹

(1 西安电子科技大学电子工程学院 210 室, 西安 710071)

(2 渭南师范学院物理系, 陕西 渭南 714000)

摘 要 在传统的 IRST(红外搜索与跟踪)系统的角测量基础上,增加了红外探测器对目标红外辐射的响应信息这一测量项,且将相邻两次测量的目标红外光谱辐射功率之比作为伪测量,以消除目标红外光谱辐射强度不确定所产生的影响,并由此构造了机动目标跟踪的 IMM(交互多模型)算法.通过跟踪一个高机动目标的仿真过程,对算法性能进行了检验.仿真结果表明:当测量误差较小时,误差的变化对跟踪精度的影响不大,整个跟踪过程中,单个坐标轴上的均方差不超过 7 m,而且,大多数时刻上的均方误差不超过 3 m;当测量误差较大时,近距离(航迹前段和中段)的跟踪精度也是很高的,单个坐标轴上的均方差不超过 5 m,但是,远距离的跟踪精度下降很快,最大误差达到 110 m;速度误差与位置误差也有类似的结果.

关键词 红外搜索跟踪系统;红外光谱辐射功率;单站跟踪;IMM 算法

中图分类号 TN211 **文献标识码** A

0 引言

IRST(红外搜索与跟踪)系统是一个仅有角测量的系统,对于仅有角测量的被动式目标跟踪问题,许多研究者发表了大量的相关研究论文^[1-4,6,7,9,10].由于仅有角度测量,单站被动式跟踪系统有可能构成一个不可观测系统,将会导致跟踪滤波器的不稳定和发散.这一现象是由系统本身的弱观察性所决定的,解决这一问题的有效方法是增加系统的测量维数使被动跟踪系统变成一个可观察系统,同时选择一个鲁棒性较强的跟踪算法.

文献[6,7]提出了利用红外探测器对目标辐射的响应信息对目标进行定位的方法,尽管这些方法是对角度定位方法的一种发展,但其实用性仍然不强,因为它们都假设目标作匀速直线运动,当目标作匀加速或其它形式的运动时,该方法是无效的.但这是一种非常实用的想法,本文借鉴这一思想,将 IRST 系统所获取的目标红外光谱辐射信息应用于单站机动目标跟踪,提出基于目标红外辐射信息的 IMM^[5](交互多模型)跟踪算法.通过一个高度机动的目标飞行航迹,对其性能进行了计算机的仿真检验,仿真结果表明:本算法对机动目标能进行有效的跟踪,而且其跟踪的精度也是令人满意的.

1 跟踪算法

1.1 运动模型

假设共有 N_t 个目标运动模型,这里设模型数 $N_t = 3$,在直角坐标系中,关于第 t 个模型 M_t 的目标运动模型可表示为

$$X^t(k+1) = F^t X^t(k) + v^t(k) \quad (1)$$

式中 $X^t(k)$ 是对应第 t 个模型时目标在 k 时刻的状态,这里设定: $t = 1$ 时为匀速运动模型, $t = 2, 3$ 时为匀加速运动模型,其对应的各参数为

$$X^1 = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ z \ \dot{z}]' \quad (2a)$$

$$X^2 = X^3 = [x \ \dot{x} \ \ddot{x} \ y \ \dot{y} \ \ddot{y} \ z \ \dot{z}]' \quad (2b)$$

F^t 为模型 t 在采样周期 T 的状态转移矩阵

$$F^t = \text{diag}(G^t, G^t, G^t) \quad (3)$$

$$\text{其中: } G^1 = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, G^2 = G^3 = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$v^t(k)$ 为过程噪声,是具有零均值和已知方差的高斯白噪声,其协方差矩阵为

$$E[v^t(k)v^t(j)'] = Q^t \delta(k-j) \quad (4)$$

$$\text{其中: } Q^t = \begin{bmatrix} u^t & 0 & 0 \\ 0 & u^t & 0 \\ 0 & 0 & u^t \end{bmatrix}, u^1 = q_1 \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 \\ T^3/2 & T^2 \end{bmatrix}$$

$$u^t = q_t \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 & T^2/2 \\ T^3/2 & T^2 & T \\ T^2/2 & T & 1 \end{bmatrix}, t = 2, 3$$

q_1 表示模型 1 中模拟加速度的过程噪声方差, q_2 和 q_3 分别表示模型 2 和 3 中在采样间隔 T 内模拟加速度增量的过程噪声方差.

1.2 测量模型

IRST 系统可探测到目标的方位角 α 、俯仰角 β 及其在某一波长范围内的红外光谱辐射功率. 这里

* 国防预研基金资助项目(41101050108)

Tel: 029-88201997 Email: xyh_xian@263.net

收稿日期: 2004-01-05

假设:目标在红外探测器的焦平面上是以点的形式出现的.第 k 时刻,方位角 $\alpha(k)$ 、俯仰角 $\beta(k)$ 及红外探测器探测到的目标红外光谱辐射功率 $PI(k)$ 与目标位置之间的关系为

$$\alpha(k) = \arctan(y(k)/x(k)) \quad (5)$$

$$\beta(k) = \arctan(z(k)/\sqrt{x(k)^2 + y(k)^2}) \quad (6)$$

$$PI(k) = \frac{JA_0Ke^{-\mu r(k)}}{r(k)^2} \quad (7)$$

式中, J 为目标在探测波段内的红外光谱辐射强度, μ 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, $r(k)$ 为目标到探测器之间的距离.假设在相邻的两个采样周期内 J 为恒量,下面引入一个伪测量 $RP(k)$,定义

$$RP(k) = \frac{PI(k)}{PI(k-1)} = e^{-\mu(r(k)-r(k-1))} \cdot \frac{r(k-1)^2}{r(k)^2} \quad (8)$$

$RP(k)$ 即为探测到的相邻两次红外光谱功率之比,仅与目标与探测器之间的距离和大气透过率有关,由此构造伪测量矢量 $Z(k) = [\alpha(k), \beta(k), RP(k)]'$,于是,测量模型可表示为

$$Z(k) = h(X(k)) + w(k) \quad (9)$$

$w(k)$ 为具有零均值和已知方差的高斯白噪声,协方差矩阵为 $R = \text{diag}(q_\alpha, q_\beta, q_{RP})$, $q_\alpha, q_\beta, q_{RP}$ 分别为方位角、俯仰角及伪测量 $RP(k)$ 的测量噪声方差.

利用 $h(\cdot)$ 的雅可比矩阵 $H(k)$ 对测量方程(9)进行线性化处理,可得其近似线性化表示式

$$Z(k) \approx H^1(k)X^1(k) + w(k) \quad (10)$$

$$H^1(k) = \begin{bmatrix} -\frac{\sin \alpha}{r \cos \beta} & 0 & \frac{\cos \alpha}{r \cos \beta} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\sin \beta \cos \alpha}{r} & 0 & -\frac{\sin \beta \sin \alpha}{r} & 0 & \frac{\cos \beta}{r} & 0 \\ -U \frac{x}{r} & 0 & -U \frac{y}{r} & 0 & -U \frac{x}{r} & 0 \end{bmatrix}$$

$$H^2(k) = H^3(k) =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{\sin \alpha}{r \cos \beta} & 0 & 0 & \frac{\cos \alpha}{r \cos \beta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\sin \beta \cos \alpha}{r} & 0 & 0 & -\frac{\sin \beta \sin \alpha}{r} & 0 & 0 & \frac{\cos \beta}{r} & 0 & 0 \\ -U \frac{x}{r} & 0 & 0 & -U \frac{y}{r} & 0 & 0 & -U \frac{x}{r} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中: $U = 2RP(u + \frac{2}{r})$,为了表述简练,上面两个公式中各参数省略了时间标识 k .

1.3 IMM 算法

设 $M_i(k)$ 表示模型 M_i 在第 k 个采样周期有效这一事件,则 $M_i(k-1)$ 表示在第 $k-1$ 个采样周期模型 M_i 有效的事件,具有 r 个模型的IMM算法的基本方程可由全概率定理得到

$$P[X(k)|Z^k] \approx \sum_{i=1}^r \left\{ \sum_{s=1}^r P[X(k)|Z(k), M_i(k), M_s(k-1), Z^{k-1}] \mu_{s/i}(k-1|k-1) \right\} \mu_i(k) \quad (11)$$

其中, $Z^k = [Z(1) Z(2) \cdots Z(k)]$ 为直到 k 时刻的累积测量集合, $\mu_i(k) = p\{M_i(k)|Z^k\}$ 为时刻 k 模型 M_i 正确的概率,另外

$$\mu_{s/i}(k-1|k-1) = P\{M_s(k-1)|M_i(k), Z^{k-1}\} \quad (12)$$

一个循环的IMM算法由下列步骤组成

1) 利用 $\hat{x}^s(k-1|k-1)$ 求出匹配于模型 $M_i(k)$ 的混合初始条件

$$\hat{x}^{0i}(k-1|k-1) = \sum_{s=1}^3 \hat{x}^s(k-1|k-1) \times \mu_{s/i}(k-1|k-1) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mu_{s/i}(k-1|k-1) &= P\{M_s(k-1)|M_i(k), Z^{k-1}\} = \\ &= \frac{1}{C^i} P\{M_i(k)|M_s(k-1), Z^{k-1}\} \times P\{M_s(k-1)|Z^{k-1}\} = \\ &= \frac{1}{C^i} p_{si} \mu_s(k-1) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\bar{C}^i = \sum_{s=1}^3 p_{si} \mu_s(k-1) \quad (15)$$

p_{si} 为Markov模型转移概率,表示从 $k-1$ 时刻的模型 M_s 跳转到 k 时刻模型 M_i 的概率,匹配于模型 M_i 的初始协方差矩阵为

$$\begin{aligned} p^{0i}(k-1|k-1) &= \sum_{s=1}^3 \mu_{s/i}(k-1|k-1) \{p^s(k-1|k-1) + \\ &+ [\hat{x}^s(k-1|k-1) - \hat{x}^{0i}(k-1|k-1)] \hat{x}^s(k-1|k-1) - \hat{x}^{0i}(k-1|k-1)\}' \} \end{aligned} \quad (16)$$

2) 进行基于模型 M_i 的卡尔曼滤波,并求其似然方程

$$\begin{aligned} \Lambda_i(k) &= p[Z(k)|M_i(k), Z^{k-1}] = p[Z(k)|M_i(k), \\ &\hat{x}^{0i}(k-1|k-1), p^{0i}(k-1|k-1)] = N[\gamma^i(k), 0, S^i(k)] \end{aligned} \quad (17)$$

$\gamma^i(k)$ 和 $S^i(k)$ 为在模型 M_i 的条件下,由滤波过程计算得到的 k 时刻的新息及其协方差矩阵.

3) 模型概率的更新

$$\begin{aligned} \mu_i(k) &= P\{M_i(k)|Z^k\} = \frac{1}{C} p[Z(k)|M_i(k), \\ &Z^{k-1}] P\{M_i(k)|Z^{k-1}\} = \frac{1}{C} \Lambda_i(k) \sum_{s=1}^3 p_{si} \mu_s(k-1) = \\ &= \frac{1}{C} \Lambda_i(k) \bar{C}^i \end{aligned} \quad (18)$$

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

4) 状态及协方差的融合估计

$$\hat{x}(k/k) = \sum_{i=1}^3 \hat{x}^i(k/k) \mu_i(k) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} p(k/k) &= \sum_{i=1}^3 \mu_i(k) \{p^i(k/k) + [\hat{x}^i(k/k) - \\ &\hat{x}(k/k)] [\hat{x}^i(k/k) - \hat{x}(k/k)]\}' \} \end{aligned} \quad (20)$$

2 仿真分析

2.1 模型参数设置

本文设计的 3 个目标运动模型中,模型 1 为匀速运动模型,对应的过程噪声均方差为 20 m/s^2 ;模型 2 和 3 为匀加速运动模型,对应的过程噪声均方差分别为 5 m/s^2 、 20 m/s^2 . 模型之间的马尔科夫转移概率矩阵为 $P_{ii}=0.9 (s=t)$ 、 $P_{ij}=0.05 (s \neq t)$,各模型的初始概率为 $\mu_1(0)=0.6$ 、 $\mu_2(0)=0.2$ 、 $\mu_3(0)=0.2$.

2.2 测量参数设置

设方位角和俯仰角的测量误差都为 0.2 mrad ,目标的红外光谱辅射强度 $J=500 \text{ Wsr}^{-1}$,大气衰减系数 $\mu=0.8 \text{ km}^{-1}$. 设红外探测器的探测距离为 20 km ,分别以目标在 20 km 处探测器所接受到的红外光谱辅射功率的 10% ($1.4067\text{e-}008\text{W}$)、 20% ($2.8134\text{e-}008\text{W}$)和 50% ($7.0335\text{e-}008\text{W}$)为测量噪声均方差,对跟踪过程作三种不同误差的仿真,以便分析其对跟踪定位精度的影响.

2.3 仿真场景设计

为了客观地评价本算法的性能,我们用飞机的转弯状态方程^[8]产生目标的机动航迹,目标的运动航迹设置如下:目标的起始位置为 $[2 \text{ km}, 10 \text{ km}, 3 \text{ km}]$,初始速度为 $[172 \text{ m/s}, -246 \text{ m/s}, 0]$,扫描周期 $T=1 \text{ s}$. 在第 1 到 20 个扫描周期内作速度为 300 m/s 的匀速飞行;之后作左转弯运动,转弯速率为 $3.74^\circ/\text{s}$ (2 g 的加速度),持续时间为 21 到 45 个扫描周期;在第 46 到 60 个扫描周期内作匀加速飞行;接着作右转弯运动,转弯速率为 $3.74^\circ/\text{s}$ (2 g 的加速度),持续时间为 61 到 80 个扫描周期;然后以 0.8 g 的加速度继续右转弯飞行,持续时间为 81 到 90 个扫描周期;最后,在第 91 到 100 个扫描周期内

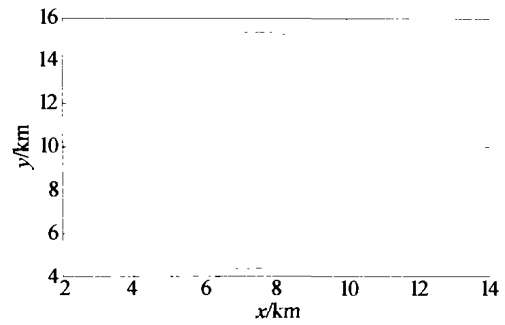


图 1 目标在 XY 平面的飞行航迹

Fig. 1 Trajectory of the target in the XY plane

作匀加速飞行. 在 XY 平面内的飞行航迹如图 1 所示.

2.4 滤波器初始化

目标的初始位置为 $(3 \text{ km}, 12 \text{ km}, 2 \text{ km})$,速度为 $(0.2 \text{ km/s}, -0.3 \text{ km/s}, 0)$,加速度为零.

模型 1 的初始协方差矩阵 $P^1(0) = \text{diag}(10^{-6} \times [400, 100, 400, 100, 400, 100])$,模型 2 与模型 3 的初始协方差矩阵是在 $P^1(0)$ 的基础上,增加一个数值分别为 25 和 100 的加速度项.

2.5 结果分析

在上述条件下,对飞行过程的 monte carlo 仿真结果如图 2、3、4 所示. 从图 2 中可以看出;本算法在三种不同的红外光谱辅射功率测量误差下,对所模拟的高机动目标都能进行很好的跟踪. 图 3 以曲线形式表示了跟踪过程中位置误差的均方差,曲线数据表明:在测量误差较小时,误差的变化对跟踪精度的影响不大,整个跟踪过程中,单个坐标轴上的均方差不超过 7 m ,而且,大多数时刻上的均方误差不超过 3 m ;在测量误差较大时,航迹前段和中段(从起始到时刻 80 s)的跟踪精度也是很高的,单个坐标轴上的均方差不超过 5 m ,但是,航迹后段的跟踪精度下降很快,最大误差达到 110 m . 图 4 则以曲线形式表示了跟踪过程中速度误差的均方差,与位置误差有类似的结果.

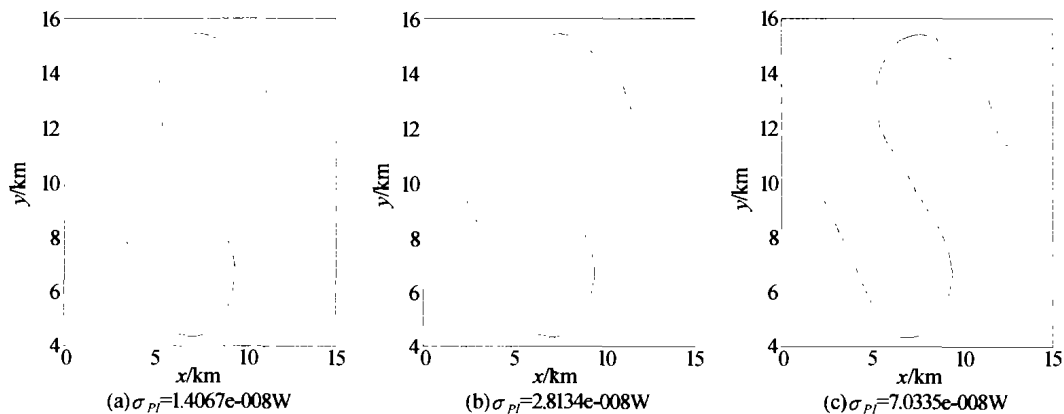


图 2 估计的目标航迹(XY 平面)

Fig. 2 The Estimated Trajectory of the Target in the XY plane

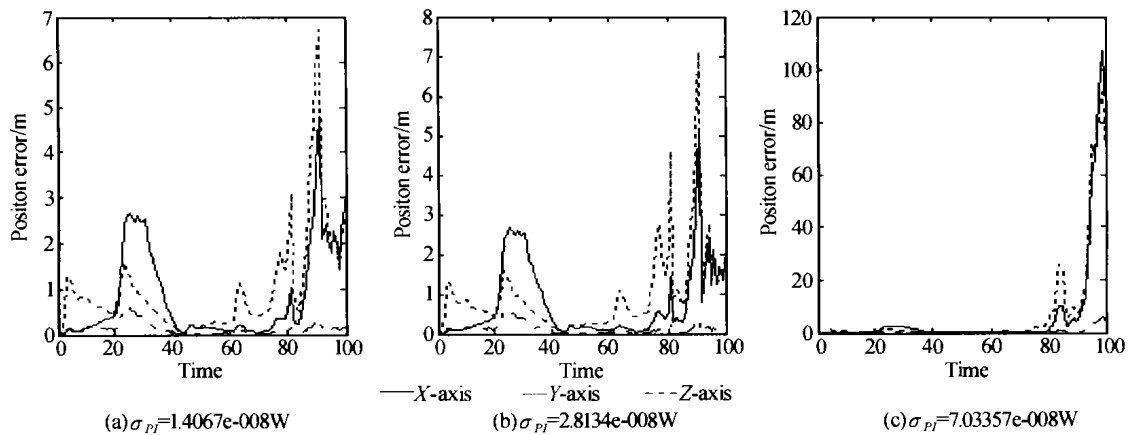


图3 位置估计的均方误差

Fig. 3 RMS position error

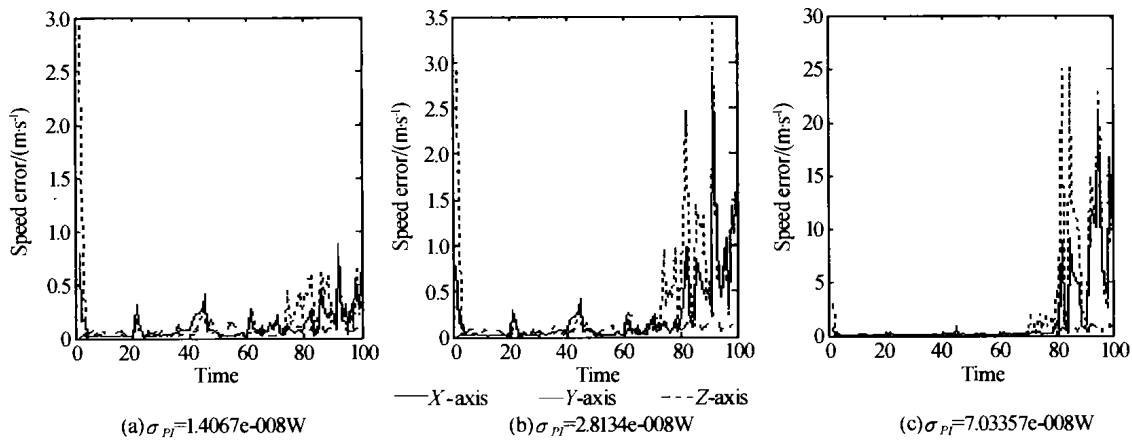


图4 速度估计的均方误差

Fig. 4 RMS speed error

将图3、4的仿真曲线与所设置的仿真场景作一比较就可发现:在目标机动比较大的时刻,相应的就会出现较大的位置误差和速度误差,这正是 IMM 算法的一个特点,因为这时前面的模型概率不能准确描述此刻的运动情况,算法处于模型概率转换时期,因而有较大的跟踪误差。

便于对比,仿真过程中运用文献[6,7]中的方法对仿真场景进行了跟踪,结果发现:在这种情况下,这两种方法都是无效的,根本不能提供有用信息。

最后,对运算的速度也进行了观察,在 CPU 为赛扬700M的计算机上,一个循环的计算时间为 0.9060 s,我们设定的采样周期为 1 s,因此基本可满足实时处理。当然,如果利用专门的数字信号处理机,对这一算法进行实时处理是很轻松的。

3 结束语

传统的IRST系统是一个仅有角测量的系统,本文增加了红外探测器对目标红外辐射的响应信息这一测量项,在此基础上,构造了机动目标跟踪的 IMM(交互多模型)跟踪算法。通过仿真一个高度机动的目标飞行航迹,对其性能进行了验证,仿真结果表明:本算法对机动目标能进行有效的跟踪,而且其

跟踪的精度也是令人满意。在论述过程中,我们假定相邻两个采样周期内目标在探测波段内的红外光谱辐射强度 J 近似为恒量,实际上,当目标发生强转弯机动时, J 可能会产生较大的变化,上述假设将不成立,由此会引起较大的误差,如何根据目标的运动状态及先验知识进行 J 变化情况下的有效跟踪将是需要进一步研究的课题。

参考文献

- 1 Aidala V J, Hammel S E. Utilization of modified polar coordinates for bearings only tracking. *IEEE Trans Autom Control*, 1983, **AC-28**(3): 283 ~ 294
- 2 Grossman W. Bearing only tracking: A hybrid coordinate system approach. *J Guid Control Dyn*, 1994, **17**(3): 451 ~ 457
- 3 Aidala V J, Nardone S C. Biased estimation properties of the pseudo linear tracking filter. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1982, **AES-18**(4): 432 ~ 441
- 4 Rao S K. Pseudo-linear estimator for bearings-only passive target tracking. *IEE Proc Radar Sonar Navig*, 2001, **148**(1): 16 ~ 22
- 5 Blom H A, Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with markovian switching coefficient. *IEEE Transactions on Autom Control*, 1988, **AC-33**(8): 780 ~ 783

- 6 姜宏滨.舰载红外警戒系统中的距离估算.红外与毫米波学报,1999,18(6):438~442
Jiang H B. *J Infrared and Millimeter Waves*, 1999, 18(6): 438~442
- 7 钱铮铁.一种用于红外警戒系统的被动测距方法.红外与毫米波学报,2001,20(4):311~314
Qian Z T. *J Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 20(4): 311~314
- 8 Efe M, Atherton D P. Maneuvering target tracking using adaptive turn rate models in the interacting multiple model algorithm. In Proceeding of the 35th Conference On Decision and Control. Kobe, Japan. December 1996. 3151~3156
- 9 王莲芬,何俊发.单、双站被动定位技术在军事探测中的应用.光子学报,2002,31(9):1135~1137
Wang L F, He J F. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(9): 1135~1137
- 10 殷世民,付小宁,刘上乾.红外单站被动定位技术速度更新算法研究.光子学报. 2003,32(3): 298~300
Yin S M, Fu X M, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(3): 298~300

A Method of Maneuvering Target Tracking with IRSTS

Xin Yunhong, Yang Wanhai

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

2 Department of Physics, Weinan Teachers School, Weinan 714000

Received date: 2004-01-05

Abstract The infrared radiation power of the target received by IRSTS is introduced to target tracking for this bearings-only measurements system. With the ratio of the two serial measurements of the infrared radiation power of the target, which eliminated the disadvantage of the uncertainty of the radiation intensity of the target, an IMM (interacting multiple model) algorithm is put forward. The performance of the algorithm is verified by simulating a highly maneuvering target tracking. The results show that when the measurement RMS error is small, it has little influence on the performance of the tracking in the whole trajectory of the tracking. The RMS position error of single coordinate axis is less than 7 m, furthermore, the most of it is less than 3 m; when the measurement RMS is large, the performance of the tracking is better at the near distance, where the RMS position error of single coordinate axis is less than 5 m, but it becomes worse rapidly at far distance. The largest RMS position error reaches 110 m. The RMS speed error has the similar results to the RMS position error.

Keywords IRSTS; Irradiance; Single observer; Target tracking; IMM



Xin Yunhong was born in 1967 in Shaanxi Province. He received the B. S. and M. S. degrees 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.