

文章编号: 1001-0920(2009)02-0240-04

# 一种新的雷达和红外融合算法

曾宪伟, 方洋旺, 伍友利, 王洪强, 王 锋

(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

**摘 要:** 针对作机动飞行的空中目标, 利用目标多普勒信息和红外辐射信息, 建立具有 Markov 跳变参数的红外系统距离估计模型, 基于结构随机跳变系统最优滤波理论, 提出了一种红外系统距离估计算法. 基于交互式多模型算法 (IMM), 以红外测距为伪距离测, 提出了一种新的主动雷达和红外融合算法. 对一个高机动目标跟踪进行了仿真, 结果表明红外距离估计误差小, 融合算法跟踪精度高, 性能良好, 易于工程实现.

**关键词:** 多普勒; 距离估计; 结构随机跳变系统; 最佳线性无偏估计; 融合算法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

## New active radar and infrared seeker fusion algorithm

ZENG Xian-wei, FANG Yang-wang, WU You-li, WANG Hong-qiang, WANG Feng

(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China. Correspondent: ZENG Xian-wei, E-mail: marsforever2004@163.com)

**Abstract:** A distance estimation model with Markov jump parameters aiming at maneuvering targets is presented based on the infrared irradiation and the Doppler velocity. Then based on the optimal filtering theory of structure stochastic jump system, an algorithm for infrared system distance estimation is proposed. A new fusion algorithm of active radar and infrared seeker based on the IMM algorithm is presented, which regards the distance of infrared measuring the target as pseudo-range measurement. The simulation results through tracking a high-maneuvering target indicate that the error of infrared distance estimate is small, the fusion algorithm has highly precision and good performance, and is easily applied in engineering practice.

**Key words:** Doppler velocity; Distance estimation; Structure stochastic jump system; Best linear unbiased estimate; Fusion algorithm

### 1 引 言

目前,许多军事装备都安装有主动雷达传感器和红外传感器.主动雷达能够测距、测角和提供多普勒信息,能够远距离搜索目标,跟踪目标.但由于雷达在工作时,要向空中辐射大功率电磁波,因而易遭受电子干扰和反辐射导弹的攻击.红外传感器不向外辐射能量,能够高精度测角,对目标识别能力强,同时不易被侦察或定位,具有较强的抗干扰能力.但红外传感器不能提供目标距离信息,探测距离较近.把雷达传感器和红外传感器组合使用,利用雷达和红外的探测信息,通过信息融合技术,改善对目标的跟踪和识别.丁赤飏等<sup>[1]</sup>利用成像传感器对目标机动的观测和精确测量的视线角,利用融合技术,改善

了机动目标的跟踪性能.崔智社等<sup>[2,3]</sup>提出了基于量测融合的估计方法和基于航迹融合的估计方法,并将它们分别用于目标作等角速度运动和等角加速度运动情况,但系统动态模型比较简单,对于机动目标不适用.胡士强等<sup>[4]</sup>采用模糊推理信息融合和并行滤波结构,克服了单传感器观测时的局限性,对目标各种运动状态的良好自适应跟踪能力.王青等<sup>[5]</sup>利用神经网络的非线性逼近能力,将神经网络与卡尔曼滤波器相结合构成一个非线性估计器,提出一种基于雷达/红外传感器神经网络融合的机动目标跟踪算法,但在实际中无法得到目标先验的特征训练量.谢希权等<sup>[6]</sup>提出了基于模式相似性测度分析的航迹关联算法和基于极大似然的目标状态信息融

收稿日期: 2007-12-11; 修回日期: 2008-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674031); 国家 863 计划项目(2006AA701307); 总装预研重点基金项目(6140529).

作者简介: 曾宪伟(1980—),男,吉林德惠人,博士生,从事信息融合、导弹制导与仿真的研究; 方洋旺(1966—),男,安徽安庆人,教授,博士生导师,从事导弹制导与控制、随机最优控制理论与应用的研究.

合算法,并以实际装备为背景进行了仿真研究.

本文利用雷达探测的目标多普勒信息和红外测量目标的辐照度信息,建立具有 Markov 跳变参数的红外系统距离估计模型,基于结构随机跳变系统最优滤波理论,提出一种新的红外距离估计算法.基于交互式多模型算法(IMM),以红外估计距离为伪距离测,提出一种新的主动雷达和红外融合算法.

## 2 基于雷达多普勒信息的红外距离估计

### 2.1 模型描述

假设运动目标以红外波长向外辐射能量,红外传感器不动,用来测量目标的红外辐射,则红外距离估计的状态方程和观测方程可表示为<sup>[7,8]</sup>

$$\begin{cases} D_{k+1} = D_k - V_k \cdot t + \kappa, \\ E_k = I_k \cdot D_k + \eta_k. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $D_k$  为导弹与目标之间的相对距离; $V_k$  为雷达测得的目标多普勒速度,即相对速度; $E_k$  为红外传感器测量的辐射度; $I_k$  为红外辐射强度; $\eta_k$  为空气透过系数(2);误差 $\kappa$  是强度为 $Q_k$  的中心化高斯白噪声, $\eta_k$  是强度为 $G_k$  的中心高斯白噪声.

假定目标为具有恒定辐射强度的点源,当辐射源与红外传感器角度不一样时,红外传感器所接收到的目标辐射强度也不同,如飞机尾部朝向传感器和飞机头部朝向传感器时,红外传感器所接收到的目标辐射强度有很大的差别.为此将目标辐射源相对红外传感器的不同情形,分成几种不同的状态,建立结构随机跳变系统模型.当目标辐射源相对于红外传感器处于不同状态时,将目标光谱辐照度表示为 $I_k(s_k), s_k = 1, 2, \dots, n_s. s_k$  为 $n_s$  个状态的马尔可夫链,转移概率为 $q(s_{k+1} / s_k)$ .

将 $I_k(s_k)$  代入式(1)得到红外距离估计模型为

$$\begin{cases} D_{k+1} = D_k - V_k \cdot t + \kappa, \\ E_k = I_k(s_k) / D_k + \eta_k. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)为具有 Markov 随机跳变参数系统,应用结构随机跳变系统最优滤波理论可以给出 $D_k$  的最优估计.

### 2.2 基于结构随机跳变最优滤波理论的红外系统距离估计算法

将辐射强度 $I_k$  分为几种状态,即 $I_k(s_k), s_k = 1, 2, \dots, n_s. s_k$  为 $n_s$  个状态的马尔可夫链,转移概率为 $q(s_{k+1} / s_k)$ .将观测方程中的非线性函数 $\kappa(D_k, s_k) = I_k D_k$  在状态 $D_k$  的条件一步预测值 $\bar{D}_k(s)$  处进行 Taylor 展开,保留线性项,得

$$\kappa(D_k, s) = I_k(s) \bar{D}_k(s) - I_k(s) \bar{D}_k^{(+1)}(s) (D_k - \bar{D}_k(s)). \quad (3)$$

由结构随机跳变系统最优滤波理论<sup>[7,8]</sup>,得:

#### 辨别器

$$\hat{p}_{k+1}(s) = \prod_{s_k=1}^{n_s} p_{k+1}(s) / p_{k+1}(s_k), \quad (4)$$

$$\tilde{p}_{k+1}(s) = \prod_{s_k=1}^{n_s} \hat{p}_k(s) q(s_{k+1} / s_k); \quad (5)$$

#### 状态估计器

$$\begin{aligned} \bar{D}_{k+1}(s) &= \\ \bar{D}_{k+1}(s) &- I_{k+1}(s) \bar{D}_{k+1}^{(+1)}(s) \tilde{R}_{k+1}(s) \times \\ &\tilde{p}_{k+1}^{-1}(s) (E_{k+1} - I_{k+1}(s) \bar{D}_{k+1}(s)), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\bar{D}_{k+1}(s) = \prod_{s_k=1}^{n_s} \tilde{p}_{k+1}^{-1}(s) \hat{p}_k(s_k) \mathcal{D}_k(s); \quad (7)$$

#### 协方差估计器

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{k+1}(s) &= \\ \tilde{R}_{k+1}(s) &- \tilde{R}_{k+1}^2(s) \tilde{p}_{k+1}^{-1}(s) (I_{k+1}(s) \bar{D}_{k+1}^{(+1)}(s))^2, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{k+1}(s) &= \\ \tilde{p}_{k+1}^{-1}(s) &\{ \mathbf{R}_k(s) + G_k + (\bar{D}_{k+1}(s) - \\ &\mathcal{D}_k(s) + V_k \cdot t)^2 \} q(s / s_k) \hat{p}_k(s); \end{aligned} \quad (9)$$

#### 总的最佳状态估计

$$\mathcal{D}_{k+1} = \prod_{s=1}^{n_s} \tilde{p}_{k+1}(s) \mathcal{D}_{k+1}(s). \quad (10)$$

式中

$$\begin{aligned} p_{k+1}(s) &= \tilde{p}_{k+1}(s) \tilde{p}_{k+1}^{1/2}(s) \exp(-\tilde{h}_{k+1}(s)), \\ \tilde{h}_{k+1}(s) &= \frac{1}{2} (E_{k+1} - I_{k+1}(s) \bar{D}_{k+1}(s))^2 \tilde{p}_{k+1}^{-1}(s), \\ \tilde{p}_{k+1}^{-1}(s) &= (I_{k+1}(s) \bar{D}_{k+1}(s))^2 \tilde{R}_{k+1}(s) + Q_{k+1}, \\ s &= 1, 2, \dots, n_s. \end{aligned}$$

#### 初始条件

$$\begin{aligned} \hat{p}_0(s) &= \frac{1}{n_s}, \mathcal{D}_0(s) = \bar{D}_0(s) = D_0, \\ \mathbf{R}_0(s) &= \frac{2}{D}, I_0(s) = I_0. \end{aligned}$$

## 3 融合算法

### 3.1 运动模型

假设共有 $N$  个目标运动模型,在直角坐标系中,关于第 $i$  个模型 $M^{(i)}$  的目标运动模型可表示为

$$X_k^{(i)} = F^{(i)} X_{k-1}^{(i)} + v_k^{(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (11)$$

其中: $X_k^{(i)}$  为对应第 $i$  个模型时目标在 $k$  时刻的状态, $F^{(i)}$  为模型 $i$  的状态转移矩阵, $v_k^{(i)}$  为 $k$  时刻的过程噪声.考虑二维匀速运动模型和二维匀加速运动模型,其对应的各参数为

$$X^1 = [x \dot{x} \ y \ \dot{y}], \quad (12a)$$

$$X^2 = [x \dot{x} \ \ddot{x} \ y \ \dot{y} \ \ddot{y}]. \quad (12b)$$

设采样周期为 $T$ ,则对应参数的状态转移矩阵为

$$F^{(i)} = \text{diag}(F^{(i)}, F^{(i)}), \quad (13)$$

其中

$$^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad ^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$v_k^{(i)}$  是具有零均值和已知方差的高斯白噪声,其协方差矩阵为

$$E[v_k^{(i)} \cdot (v_k^{(i)})^T] = Q^{(i)}(k-j), \quad (14)$$

其中

$$Q^{(i)} = \begin{bmatrix} u^{(i)} & 0 \\ 0 & u^{(i)} \end{bmatrix}, \quad u^{(1)} = q_1 \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 \\ T^3/2 & T^2 \end{bmatrix},$$

$$u^{(2)} = q_2 \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 & T^2/2 \\ T^3/2 & T^2 & T \\ T^2/2 & T & 1 \end{bmatrix}.$$

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

### 3.2 量测模型

设雷达为传感器 1, 红外为传感器 2, 两个传感器同地配置, 同步采样且间隔相同. 传感器  $i$  的测量模型为

$$Z_k^i = H_k^i X_k + w_k^i, \quad i = 1, 2. \quad (15)$$

当  $i = 1$  时对应雷达的测量,  $Z_k^1 = [r_k \quad \alpha_k]^T + w_k^1$ , 其中  $r_k, \alpha_k$  分别表示距离和方位角; 当  $i = 2$  时对应红外的测量, 构造伪量测矢量  $Z_k^2 = [r_k \quad \alpha_k]^T + w_k^2$ . 其中:  $\alpha_k$  为方位角,  $r_k$  为通过红外距离估计算法得到的伪量测距离. 距离和方位角与状态变量的关系分别为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \alpha = \arctan(y/x). \quad (16)$$

$w_k^i$  为零均值和已知协方差阵  $R^i$  的高斯白噪声, 即  $R^i = \text{diag}(q^i, q_r^i)$ ,  $q^i, q_r^i$  分别为方位角和距离的测量噪声方差.

### 3.3 基于 IMM 的雷达和红外融合算法

设  $M_k^{(i)}$  表示模型  $M^{(i)}$  在第  $k$  个采样周期有效这一事件, 则  $M_{k-1}^{(s)}$  表示在第  $k-1$  个采样周期模型  $M^{(s)}$  有效的事件, 具有  $r$  个模型的基于 IMM 的雷达和红外融合算法<sup>[9,10]</sup> 步骤如下:

**Step1** 由上一时刻模型  $s$  的估计  $X_{k-1/k-1}^{(s)}$  及其协方差阵  $P_{k-1/k-1}^{(s)}$ , 计算匹配于模型  $M^{(i)}$  的滤波器的混合初始条件, 假定模型间转换符合 Markov 模型, 有

$$X_{k-1/k-1}^{(i)} = \sum_{j=1}^r X_{k-1/k-1}^{(j)} \cdot \mu_{k-1/k-1}^{(j/i)},$$

$$P_{k-1/k-1}^{(i)} = \sum_{j=1}^r [P_{k-1/k-1}^{(j)} + (X_{k-1/k-1}^{(j)} - X_{k-1/k-1}^{(i)}) \cdot (X_{k-1/k-1}^{(j)} - X_{k-1/k-1}^{(i)})^T] \cdot \mu_{k-1/k-1}^{(j/i)},$$

$$\mu_{k-1/k-1}^{(j/i)} = p(M_{k-1}^{(j)} / M_k^{(i)}, Z^{k-1}) = \frac{1}{\tilde{c}_i} \sum_{jt} \mu_{k-1}^{(j)},$$

$$j, t = 1, 2, \dots, r. \quad (17)$$

其中:  $\tilde{c}_i = \sum_{i=1}^r \mu_{k-1}^{(i)}$  是正则化常数;  $\mu_{k-1}^{(j)}$  是模型  $M^{(j)}$  的先验概率;  $j_t$  是模型  $M^{(j)}$  到模型  $M^{(i)}$  的转移概率.

**Step2** 使用雷达的量测, 进行基于模型  $M_i$  的卡尔曼滤波.

$$X_{k/k-1}^{(i)} = F^{(i)} \cdot X_{k-1/k-1}^{(i)},$$

$$P_{k/k-1}^{(i)} = F^{(i)} \cdot P_{k-1/k-1}^{(i)} (F^{(i)})^T + Q^{(i)},$$

$$\tilde{Z}_k^{(i)} = Z_k^i - H_k^{(i)} X_{k/k-1}^{(i)},$$

$$S_k^{(i)} = H_k^{(i)} P_{k/k-1}^{(i)} (H_k^{(i)})^T + R_k^{(i)},$$

$$K_k^{(i)} = P_{k/k-1}^{(i)} (H_k^{(i)})^T (S_k^{(i)})^{-1},$$

$$X_{k/k}^{(i)} = X_{k/k-1}^{(i)} + K_k^{(i)} \tilde{Z}_k^{(i)},$$

$$P_{k/k}^{(i)} = P_{k/k-1}^{(i)} - K_k^{(i)} S_k^{(i)} (K_k^{(i)})^T.$$

**Step3** 利用雷达的估计值  $X_{k/k}^{(i)}$  和  $P_{k/k}^{(i)}$  作为一步预测值, 使用红外的伪量测进行同上的卡尔曼滤波, 同时求其似然方程

$$p_k^{(i)} = p(Z_k^i / M_k^{(i)}, Z^{k-1}) = p(\tilde{Z}_k^{(i)} / M_k^{(i)}, Z^{k-1}) =$$

$$|2 S_k^{(i)}|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2} (\tilde{Z}_k^{(i)})^T (S_k^{(i)})^{-1} \tilde{Z}_k^{(i)}\right\}. \quad (18)$$

### Step4 模型概率的更新

$$\mu_k^{(i)} = P(M_k^{(i)} / Z^k) = \frac{1}{c} p_k^{(i)} \tilde{c}_i,$$

$$t = 1, 2, \dots, r. \quad (19)$$

其中

$$\tilde{c}_i = \sum_{j=1}^r \mu_{k-1}^{(j)}, \quad c = \sum_{j=1}^r p_k^{(j)} \tilde{c}_j.$$

### Step5 状态估计

$$X_{k/k} = \sum_{i=1}^r X_{k/k}^{(i)} \mu_k^{(i)},$$

$$P_{k/k} = \sum_{i=1}^r [P_{k/k}^{(i)} + (X_{k/k}^{(i)} - X_{k/k}) \cdot (X_{k/k}^{(i)} - X_{k/k})^T] \mu_k^{(i)}. \quad (20)$$

## 4 仿真分析

### 4.1 模型参数设置

仿真设计了 3 个目标运动模型, 模型 1 为匀速运动模型, 对应的过程噪声均方差为  $20 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ; 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  $5 \text{ m}^2/\text{s}^2$  和  $20 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . 模型之间的马尔科夫转移概率矩阵为

$$ij = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.05 & 0.05 \\ 0.05 & 0.9 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.9 \end{bmatrix},$$

各模型初始概率为  $\mu_1(0) = 0.6, \mu_2(0) = 0.2, \mu_3(0) = 0.2$ .

### 4.2 量测参数设置

设雷达方位角的测量误差为  $0.4 \text{ mrad}$ , 红外方位角的测量误差为  $0.2 \text{ mrad}$ , 目标的红外光谱辐射强度为  $J = 500 \text{ Wsr}^{-1}$ , 大气衰减系数  $\sigma = 5 \text{ km}^{-1}$ .

### 4.3 目标剧情设置

为了客观地评价本算法的性能, 用飞机的转弯状态方程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  $[2000, 2000]$ , 初始速度为  $[172, -246]$ , 扫描周期  $T = 0.1 \text{ s}$ , 在第  $1 \sim 20 \text{ s}$  内作匀速飞行; 之后作过载为  $3 \text{ g}$  的左转弯运动, 持续时间为  $30 \text{ s}$ ; 然后以  $5 \text{ m/s}^2$  的加速度作  $15 \text{ s}$  的匀加速直线运动; 最后, 以  $2 \text{ g}$  的过载作右转弯运动, 持续时间  $20 \text{ s}$ .

### 4.4 滤波器初始化

滤波器仿真初始条件:  $\hat{p}_0(s) = 0.333, D_0 = \overline{D_0}, R_0 = \overline{D_0}, I_k(1) = I_{\min}, I_k(2) = (I_{\min} + I_{\max})/2, I_k(3) = I_{\max}, s = 1, 2, 3, D_0 = 2830 \text{ m}, I_{\max} = 280, I_{\min} = 80, V_0 = 310 \text{ m/s}$ .

### 4.5 结果分析

在上述条件下, 对跟踪进行 100 次的 monte carlo 仿真, 仿真结果如图 1 ~ 图 5 所示. 图 1 是航迹估计曲线, 曲线基本重合, 对机动目标能进行很好的跟踪. 图 2 和图 3 给出了沿 X 轴和 Y 轴噪声均方误差, 整个跟踪过程量测噪声在  $100 \text{ m}$  以上, 而跟踪误差小于  $50 \text{ m}$ , 跟踪精度很高. 图 4 是红外对目标的距离跟踪, 估计距离曲线和真实距离曲线基本重合; 图

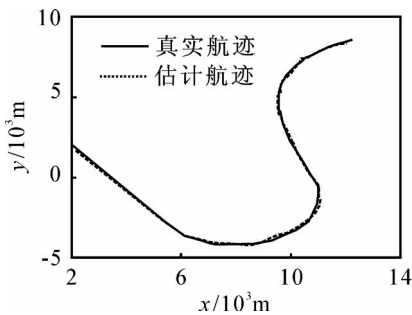


图 1 航迹估计曲线

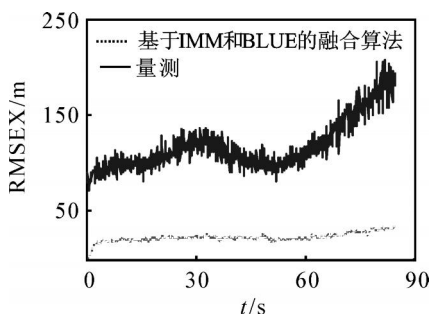


图 2 X轴方向的均方误差

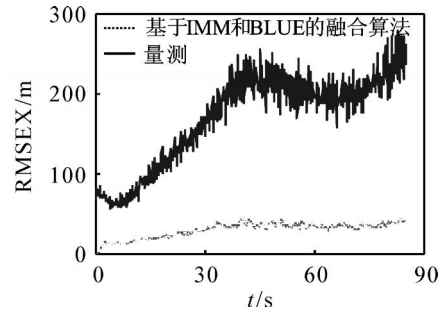


图 3 Y轴方向的均方误差

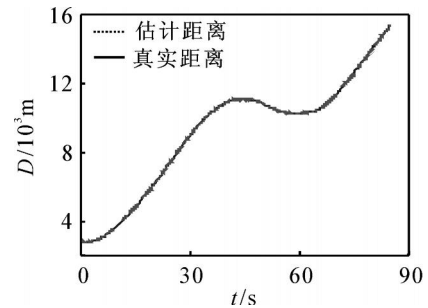


图 4 红外距离估计

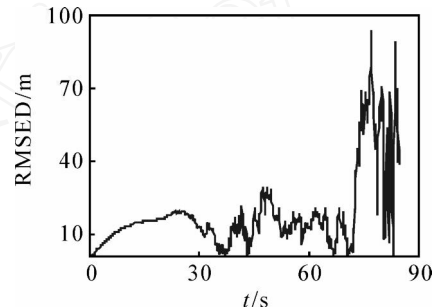


图 5 红外距离估计均方误差

5 是红外距离估计的均方误差曲线, 可以看出随着目标机动的加大和目标距离传感器的距离加大, 均方误差曲线跳动加大, 到目标第二次机动转弯时, 均方误差曲线迅速上升, 但都在误差允许范围之内.

## 5 结 论

本文利用雷达探测的目标多普勒信息和红外测量目标的辐照度信息, 建立了具有 Markov 跳变参数的红外系统距离估计模型; 基于结构随机跳变系统最优滤波理论, 提出了一种新的红外距离估计算法, 仿真验证跟踪效果好, 均方误差小. 基于交互式多模型算法 (IMM), 以红外估计距离为伪距离量测, 提出了一种新的主动雷达和红外融合算法, 通过仿真跟踪一个高机动的目标, 表明该算法能够有效跟踪高度机动目标, 均方误差小, 跟踪精度高. 本文算法假定目标辐射强度  $J$  为恒量, 如何进行  $J$  变化情况下的信息利用和对目标的有效跟踪将是下一步研究的课题.

(下转第 248 页)

- Automatic Control, 1999, 44(4): 984-989.
- [2] Su Juing-Huei, Fong F Kong, Tseng Chwan-Lu. Stability analysis of linear system with time delay[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(6): 1341-1343.
- [3] Hu GuangDa, Hu GuangDi, Zou Xingfu. Stability of linear neutral systems with multiple delays: Boundary criteria[J]. Applied Mathematics and Computation, 2004, 148(3): 707-715.
- [4] Hale J K. Strong stabilization of neutral functional differential equations[J]. IMA J of Mathematical Control and Information, 2002, 19(1): 5-23.
- [5] Wim Michiels, Tomas Vyhlidal. An eigenvalue based approach for the stabilization of linear time-delay systems of neutral type[J]. Automatica, 2005, 41(6): 991-998.
- [6] Liu Y K. Numerical solution of implicit neutral functional differential equations[J]. SIAM J of Numerical Analysis, 1999, 36(2): 516-528.
- [7] Jaan Kiusalaas. Numerical methods in engineering with MATLAB[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [8] Quarteroni A, Sacco R, Saleri F. Numerical mathematics[M]. New York: Springer-Verlag, 2000.
- [9] Hale J K, Verduyn Lunel S M. Introduction to functional differential equations[M]. New York: Springer-Verlag, 1993.
- [10] Hu GuangDa, Liu Mingzhu. Stability criteria of linear neutral systems with multiple delays[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(4): 720-724.

(上接第 243 页)

#### 参考文献(References)

- [1] 丁赤飏, 毛士艺. 基于雷达和成像传感器的融合跟踪[J]. 电子学报, 1998, 26(9): 134-138.  
(Ding C B, Mao S Y. High precision tracking based on radar and imaging sensor fusion[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(9): 134-138.)
- [2] 崔智社, 曾涛, 龙腾. 基于数据融合提高红外/毫米波复合导引头跟踪精度的新算法[J]. 兵工学报, 2003, 24(2): 199-203.  
(Cui Z S, Zeng T, Long T. Novel algorithms to improve the precision of tracking for IR/MMW combined seeker based on data fusion[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(2): 199-203.)
- [3] 崔智社, 曾涛, 龙腾. 采用信息融合技术的 IR/MMW 复合导引头的目标跟踪[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(6): 460-464.  
(Cui Z S, Zeng T, Long T. Target tracking for IR/MMW combined seeker based on data fusion[J]. J of Infrared Millim Waves, 2002, 21(6): 460-464.)
- [4] 胡士强, 张天桥. 基于雷达和光电传感器的融合跟踪[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(8): 31-33.  
(Hu S Q, Zhang T Q. Integrated tracking based on radar and photoelectric sensor[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(8): 31-33.)
- [5] 王青, 毕靖. 基于雷达/红外神经网络融合目标跟踪算法[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(4): 486-491.  
(Wang Q, Bi J. A maneuvering target tracking algorithm based on radar/infrared sensor neural network fusion[J]. J of System Simulation, 2003, 15(4): 486-491.)
- [6] 谢希权, 谢邦荣, 李伟仁. 机载雷达与红外搜索跟踪装置的航迹融合研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(4): 20-25.  
(Xie X Q, Xie B R, Li W R. Study on track fusion for airborne radar and infrared searching and track system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(4): 20-25.)
- [7] 方洋旺, 潘进. 随机系统分析及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.  
(Fang Y W, Pan J. Analysis and application of stochastic system[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006.)
- [8] 方洋旺. 随机系统最优控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
(Fang Y W. Optimal control for stochastic systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)
- [9] Mazor E, Averbuch A, Bar-Shalom Y, et al. Interacting multiple model methods in target tracking: A survey[J]. IEEE Trans on AES, 1998, 34(1): 103-123.
- [10] Blom H A P, Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with markovian switching coefficients[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 33(8): 780-783.