

基于跟踪状态信息协同射频隐身策略

刘宏强¹, 魏贤智¹, 廖俊², 欧建军¹

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 95148 部队, 湖南衡阳 421851)

摘要: 本文主要研究战斗机利用相控阵雷达参数可控的特性, 协同机载无源探测设备, 实现射频隐身跟踪目标的控制策略。首先, 建立了累积截获概率模型, 阐述了协同跟踪流程; 其次以射频隐身约束下辐射参数控制算法为基础, 采用序贯滤波算法, 得出了协同跟踪条件下射频隐身控制策略; 最后, 对雷达单目标跟踪策略与协同跟踪策略进行仿真比较, 仿真结果证明协同跟踪策略比雷达单目标跟踪策略在射频隐身效果有较大的提高。

关键词: 射频隐身; 协同跟踪; 辐射控制; 跟踪精度

0 引言

由于敌机上的无源告警系统对雷达跟踪辐射十分敏感, 敌机截获此种样式的辐射后就会采用机动脱离、电子战等方式破坏雷达的持续跟踪, 还可以推断出雷达位置, 进而使用 ARM 反辐射导弹攻击载机, 对载机构成极大威胁。因此, 在目标跟踪时有必要采用灵活的辐射控制方式, 降低被截获利用的可能性。¹

目前, 先进战斗机采用电子扫描雷达(相控阵雷达), 其特点是波束控制灵活可变、工作参数可控, 为在跟踪状态下实现射频隐身提供了可能。但是仅依靠雷达自身的低可探测性, 很难降低被截获概率, 因此, 采用无源探测系统与雷达协同使用共同完成射频隐身跟踪成为一个研究热点。

1 协同跟踪控制

1.1 跟踪状态下累积截获概率模型

假设目标上装备有截获接收机, 战斗机跟踪单目标时, 雷达第一次主动辐射时刻记 t_1 , 经过 T 跟踪结束, 在此过程中, 雷达共主动辐射 n 次, 设各次辐射对应时间为 t_k , $k=1, 2, \dots, n$, 为了研究方便, 不妨设 $t_1=0$ 。那么在每一次辐射 t_k , 雷达获得一个目标量测, 而目标上装备的截获接收机都有可能截获雷达辐射信息, 对应以一次截获概率 $p_i(k)$, 那么雷达在跟踪过程的累积截获概率 P_{ic} 为:

$$P_{ic} = 1 - \prod_{k=1}^n [1 - p_i(k)] \quad (1)$$

因此, 在目标跟踪状态下, 要提高战斗机的射频隐身能力, 就是要降低累积截获概率 P_{ic} 。可以通过减小雷达每次主动辐射的被截获概率 $p_i(k)$ 与减少总的辐射次数 n 来实现。而减小 $p_i(k)$ 可以通过抑制雷达辐射功率 P_T 和照射时间 $T_D(k)$ 来实现, 减少 n 可通过增大辐射间隔 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ 来实现。又由于机载红外探测设备 (IRST) 和电子对抗设备 (ESM) 等无源探测设备工作时, 不需要辐射电磁波 (即无线电静默), 拥有理想的射频隐身能力。但 IRST 易受天气影响, ESM 受制于敌方的电磁辐射, 两者均无法直接提供目标距离信息, 并且角度信息精度不高。因此, 在空战中可以将无源探测设备与有源探测设备协同使用, 将目标信息融合, 互相弥补不足, 完成射频隐身跟踪。

1.2 协同跟踪控制流程

雷达与无源传感器协同跟踪流程如图 1 所示[1-3]:

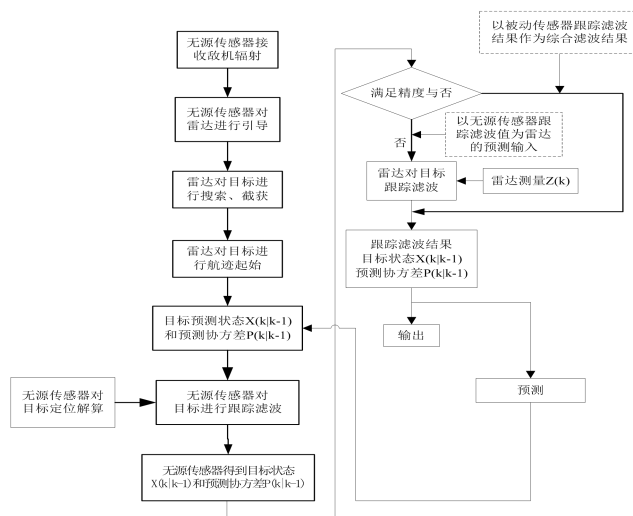


图 1 协同跟踪流程

无源传感器与雷达协同跟踪的过程中, 无源传感器一直开机。在无源传感器探测到敌方电磁辐射源或红外辐射源并测得目标的方位信息以后, 对雷达进行引导。雷达开机并在其指向视域进行搜索, 当探测到目标以后, 对目标航迹进行起始; 为了降低雷达辐射的截获概率, 在对目标航迹快速起始以后, 雷达停止辐射, 由无源传感器对目标继续进行跟踪。但是无源传感器在对目标进行跟踪滤波时要解决滤波发散和航迹断续(无辐射信号)的问题, 因此经过一段时间以后, 需要对跟踪效果进行评估, 预测目标状态, 在跟踪效果刚好达不到要求的时刻雷达再进行辐射, 以对目标跟踪进行修正, 当目标跟踪效果达到要求时雷达再次关机, 如此反复, 直到跟踪结束。

2 协同跟踪条件下射频隐身控制算法

2.1 射频隐身约束下辐射参数控制

首先, 对雷达辐射跟踪辐射过程进行控制, 使其达到雷达自身系统的低截获性。本文主要对雷达辐射间隔[4] Δt_k 、辐射功率 P_T 和驻留时间 $T_D(k)$ 进行控制, 以降低累积截获概率。具体控制方法如下所述:

步骤 1 设定检测概率为门限值 P_{dth} , 并据式(2)或(3)解算出信噪比 SNR_{th} :

$$p_d = \exp\left(-\frac{U_T}{1 + SNR}\right) \quad (2)$$

$$P_d = \left[1 + \frac{2SNR \cdot U_T}{(SNR + 2)^2}\right] \exp\left(-\frac{2U_T}{2 + SNR}\right) \quad (3)$$

其中: U_T 是检测门限; P_d 是检测概率; SNR 是信噪比。

步骤 2 依照 IMM 滤波算法, 根据模型:

$$\max \Delta t_k \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{pre}(k) \leq P_{ex} \\ P_d = P_{dth} \\ \Delta t_k \in [\Delta T_{min}, \Delta T_{max}] \end{cases} \quad (5)$$

其中： $P_{pre}(k)$ 是滤波协方差阵[5]的估计值，解算出 Δt_k 值。

P 和 P_{ex} 都是矩阵，可用矩阵度量的方法来比较。本文中求矩阵的迹 $tr\{\}$ 来度量跟踪精度是否满足要求。

步骤3 按照 IMM 滤波算法[6]，根据计算出的 Δt_k 值，可求出量测的预测值，再根据模型(6)、(7)解算出满足条件的 $P_T(k)$ 和 $T_D(k)$ 的值。

$$\min p_i(k) = \left(\frac{2C_1 P_T(k)}{\Delta_I \hat{R}_k^2} \right)^{C_0} \frac{T_D(k)}{T_I} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} C_2 [P_T(k) T_D(k) \sigma(k)] / \hat{R}_k^4 = SNR_{th} \\ \hat{R}_k = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ T_D(k) < \Delta R / v(k) \end{cases} \quad (7)$$

其中： $v(k)$ 为 t_k 时刻目标运动速度； C_1 、 C_2 视为常量； $\sigma(k)$ 为 t_k 时刻目标的 RCS； R_k 为 t_k 时刻截获接收机与雷达发射机之间的距离； T_I 为截获接收机扫描时间； Δ_I 为截获接收机信号检测所需功率。

2.2 序贯滤波算法

在雷达自身系统射频参数控制的基础上，利用无源探测信息，协同雷达跟踪目标，在精度需求不满足时，进行主动辐射探测，进一步减少主动辐射次数，提高整个战斗机跟踪状态的射频隐身能力。

协同探测条件下，各传感器所测的目标数据需要进行信息融合。考虑到无源传感器所得目标量测可能不连续，而且雷达辐射需要根据需要自适应调整，而序贯滤波具有结构灵活多变的特点，可适应传感器自由增减，满足战术控制要求，因此，雷达与无源传感器协同跟踪时，本文选择序贯滤波进行融合跟踪，其采用交互多模性算法 (IMM)。

由于无源传感器不能测距，难以单独获得目标状态的良好估计，因此，在滤波时应采用非线性滤波技术。扩展卡尔曼滤波 (EKF, Extend Kalman Filter) 是一种比较常用的非线性滤波方法，本文在此采用 EKF 在 IMM 算法中对各个模型进行滤波处理。具体计算流程为：

步骤1 跟踪起始，根据雷达建立的航迹，得到目标初始状态与协方差的值。

步骤2 进入序贯滤波。

首先进行输入交互，令 $\hat{x}^i(k-1)$ 为 t_{k-1} 时刻模型 i 的状态估计， $P^i(k-1)$ 为相应的状态协方差矩阵，

则 t_{k-1} 时刻 N 个模型交互计算后的输入为 $\hat{x}^{0i}(k-1)$ 、 $P^{0i}(k-1)$ ，具体计算公式为 (8)、(9)。

$$\hat{x}^{0i}(k-1) = \sum_{j=1}^N \hat{x}^j(k-1) \mu_{ji}(k-1) \quad (8)$$

$$P^{0i}(k-1) = \sum_{j=1}^N \mu_{ji}(k-1) \{ P^j(k-1) + [\hat{x}^j(k-1) - \hat{x}^{0i}(k-1)][\hat{x}^j(k-1) - \hat{x}^{0i}(k-1)]^T \} \quad (9)$$

再利用 EKF 算法对各个模型滤波更新

$$v^i(k) = z(k) - H^i [\hat{x}^i(k|k-1)] \quad (10)$$

$$\mathbf{S}^i(k) = \mathbf{h}_j^i \mathbf{P}^i(k|k-1) (\mathbf{h}_j^i)^T + \mathbf{R}_j^i(k) \quad (11)$$

$$\mathbf{K}^i(k) = \mathbf{P}^i(k|k-1) (\mathbf{h}_j^i)^T [\mathbf{S}^i(k)]^{-1} \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{x}}^i(k) = \hat{\mathbf{x}}^i(k|k-1) + \mathbf{K}^i(k) \mathbf{v}^i(k) \quad (13)$$

$$\mathbf{P}^i(k) = [\mathbf{I} - P_{d,j}(k) \mathbf{K}^i(k) \mathbf{h}_j^i] \mathbf{P}^i(k|k-1) \quad (14)$$

式中, $j=1$ 表示雷达; $j=2$ 表示无源传感器。 $\hat{\mathbf{x}}^i(k|k-1)$ 和 $\mathbf{P}^i(k|k-1)$ 分别由式 (15)、(16) 计算得到。此时, 假定 $P_{d,2}(k) = 1$ 。

$$\hat{\mathbf{x}}^i(k|k-1) = \Phi^i(\Delta t_k) \hat{\mathbf{x}}^{0i}(k-1) \quad (15)$$

$$\mathbf{P}^i(k|k-1) = \Phi^i(\Delta t_k) \mathbf{P}^{0i}(k-1) \Phi^i(\Delta t_k)^T + \mathbf{G}^i(\Delta t_k) \mathbf{Q}^i(k-1) [\mathbf{G}^i(\Delta t_k)]^T \quad (16)$$

当量测来自雷达时

$$\mathbf{R}_1^i = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{\sigma}_{\theta_a^R}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{\sigma}_{\theta_e^R}^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{z}_1^i = [r(k), \theta_a^R(k), \theta_e^R(k)]^T \quad (18)$$

$$\mathbf{h}_1^i = \begin{bmatrix} \frac{\hat{x}(k|k-1)}{r_h} & 0 & \frac{\hat{y}(k|k-1)}{r_h} & 0 & \frac{\hat{z}(k|k-1)}{r_h} & 0 \\ \frac{\hat{y}(k|k-1)}{r_h} & 0 & \frac{\hat{x}(k|k-1)}{r_h} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\hat{x}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{r_s^2 r_h} & 0 & \frac{\hat{y}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{r_s^2 r_h} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

当量测来自无源传感器时

$$\mathbf{R}_2^i = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{\theta_a^B}^2 & 0 \\ 0 & \hat{\sigma}_{\theta_e^B}^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{z}_2^i = [\theta_a^B(k), \theta_e^B(k)]^T$$

$$\mathbf{h}_2^i = \begin{bmatrix} \frac{\hat{y}(k|k-1)}{r_h^2} & 0 & \frac{\hat{x}(k|k-1)}{r_h^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\hat{x}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{r_s^2 r_h} & 0 & \frac{\hat{y}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{r_s^2 r_h} & 0 & \frac{r_h}{r_s^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, $r_h = \sqrt{[\hat{x}(k|k-1)]^2 + [\hat{y}(k|k-1)]^2}$, $r_s = \sqrt{r_h^2 + [\hat{z}(k|k-1)]^2}$ 。 r 、 θ_a^R 、 θ_e^R 分别是雷达测得的目标距离、方位

角、俯仰角, θ_e^B 、 θ_e^B 是无源传感器 IRST 和 ESM 能测得的目标方位角和俯仰角。

然后, 根据式 (21)、(22) 计算模型 i 的似然函数 $\Lambda_i(k)$ 和模型概率 $\mu_i(k)$; 最后利用式 (23)、(24) 得到整体的目标状态估计 $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 和协方差估计 $\mathbf{P}(k)$ 。

$$\mathcal{A}_k^i = |2\pi\mathbf{S}_k^j|^{-0.5} \exp\left[-0.5(\tilde{\mathbf{Z}}_k^j)^T (\mathbf{S}_k^j)^{-1} (\mathbf{S}_k^j)^{-1}\right] \quad (21)$$

$$\begin{cases} \mathbf{v}^i(k) = \mathbf{z}(k) - \mathbf{H}^i \hat{\mathbf{x}}^i(k | k-1) \\ \mathbf{S}^i(k) = \mathbf{H}^i \mathbf{P}^i(k | k-1) (\mathbf{H}^i)^T + \mathbf{R}^i(k) \end{cases}$$

$$\mu_i(k) = \frac{\mu_i(k | k-1) \Lambda_i(k)}{\sum_{j=1}^N \mu_j(k | k-1) \Lambda_j(k)} \quad (22)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{x}}^i(k) \mu_i(k) \quad (23)$$

$$\mathbf{P}(k) = \sum_{i=1}^N \mu_i(k) \{ \mathbf{p}^i(k) + [\hat{\mathbf{x}}^i(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)][\hat{\mathbf{x}}^i(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)]^T \} \quad (24)$$

2.3 协同跟踪条件下射频隐身控制策略

根据序贯滤波算法可得到 t_{k-1} 时刻对目标状态的预测和协方差预测, 再根据期望协方差 \mathbf{P}^{ex} 来决定下一次雷达辐射间隔。协同跟踪条件下的射频控制算法的具体步骤为:

步骤 1 初始化, 雷达进行航迹起始;

步骤 2 设定期望协方差矩阵 \mathbf{P}^{ex} , 根据序贯滤波算法, 更新 t_k 时刻目标的跟踪状态 $\{\hat{\mathbf{x}}(k), \mathbf{P}(k)\}$;

步骤 3 根据 2.1 节所提方法计算辐射间隔 Δt_k 和雷达波束驻留时间 $T_D(k)$ 、辐射功率 $P_T(k)$;

步骤 4 如果在预定的辐射间隔 $[\tau] \Delta t_k$ 内出现无源传感器的量测, 则转到步骤 5; 如果在预定的辐射间隔 Δt_k 内没有出现无源传感器的量测, 则按照所得参数控制雷达波束探测目标, 得到量测值;

步骤 5 令 $k = k + 1$, 返回步骤 2, 直到跟踪结束。

3 仿真分析

3.1 仿真参数设置

假设无源传感器的角度量测噪声标准差为 $\sigma_\theta = 0.01$ rad。雷达峰值功率为 25 kW, 信号检测虚警概率 $p_{fa} = 10^{-6}$, 所要求的检测概率 $p_{dth} = 90\%$, 脉冲宽度 $\tau = 2 \mu\text{s}$, 半功率波束宽度 $\theta_{0.5} = 3^\circ$, 距离波门 $G_d = 30$ m, 常数 $C_1 = 0.1$, $C_2 = 2.6 \times 10^{17}$, 目标为 Swerling I 型且 RCS 均值为 5 m², 截获接收机扫描

时间 $T_I = 2\text{ s}$ ，检测门限 $\Delta_I = -50\text{ dBm}$ ， $C_0 = 0.477$ 。

假设目标与载机处于同一水平面，目标初始状态 $(x_0, \dot{x}_0, y_0, \dot{y}_0)$ 为 $(50\text{ km}, -400\text{ m/s}, 40\text{ km}, -300\text{ m/s})$ ，目标在 40~60 s 和 80~90 s 以 $6^\circ/\text{s}$ 的转弯角速度作左转弯运动，其它时间做匀速直线运动，目标在两个方向上的噪声方差相同，标准差都为 90 m。

IMM 滤波模型中，采用 3 个模型进行交互对机动目标跟踪，模型 1 为匀速直线运动，模型 2 为左转弯运动，模型 3 为右转弯运动。各模型初始概率为 $[0.6, 0.3, 0.1]$ ，各模型之间的 Markov 转移概率矩阵取为：

$$P = \begin{bmatrix} 0.95 & 0.025 & 0.025 \\ 0.05 & 0.9 & 0.9 \\ 0.05 & 0.05 & 0.9 \end{bmatrix}$$

总仿真时间为 100 s，进行 100 次 Monte Carlo 仿真。

3.2 仿真结果

图 2 是无源传感器量测周期为 1s 时，按照式 (10) 计算出的平均辐射间隔，图 3 是各次 Monte Carlo 仿真得到的辐射次数，从图中可知，无论是平均辐射间隔还是每次仿真中的辐射次数，协同跟踪条件下的数值都明显低于雷达单独跟踪时的数值，这是因为协同跟踪时有无源传感器提供的目标角度信息，使得目标信息需求降低，从而减少了雷达辐射的次数。按照平均间隔的滤波结果如图 4 所示，图中可以看出，两种情况都较好地为目标进行跟踪。图 5 是以平均辐射间隔作为仿真条件时，协同跟踪与雷达单独跟踪条件下的累积概率，从图中可以看出，协同跟踪条件下，战斗机的射频隐身性能明显高于雷达单独跟踪时的情形，如果设定敌方截获概率门限为 50%，那么协同跟踪全过程时，载机就一直处于射频隐身状态。

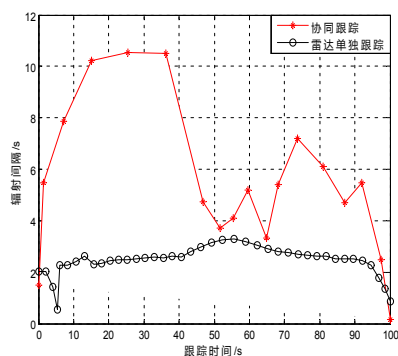


图2 辐射间隔

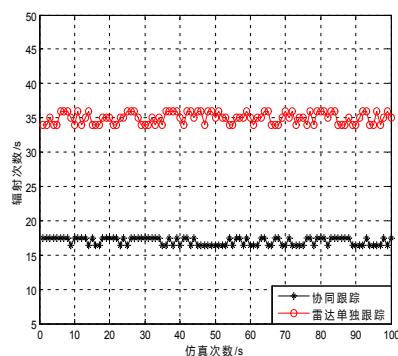


图3 辐射次数

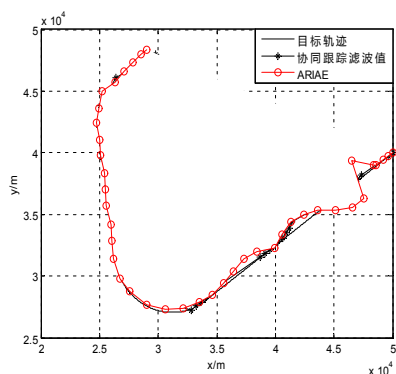


图4 滤波结果

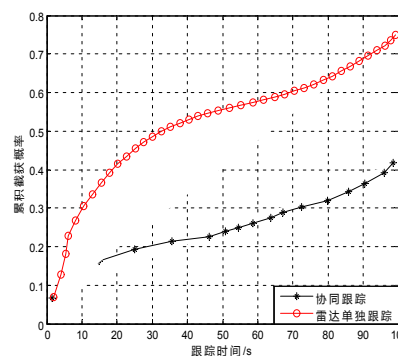


图5 累计截获概率

4 结语

本文由战斗机雷达射频隐身能力需求出发,立足于相控阵雷达性能参数可变,协同机载无源探测设备,提出了一种跟踪状态的射频隐身控制策略。通过仿真对雷达单目标跟踪策略与协同跟踪策略进行比较,证明该协同跟踪策略对射频隐身效果有较大提高。

参考文献

- [1].胡文龙,毛士芝.基于数据融合的多传感器系统有源特性抑制[J].电子学报,1998,26(3): 37~42.
- [2].钟晓军,王国宏.异类多传感器系统中基于跟踪质量的辐射控制研究[J].现代雷达,2004,26(2): 18~22.
- [3].贺有.红外、雷达协同探测跟踪模型[J].红外与激光工程,2006,36(增刊): 306~311.
- [4].Watson G A, Blair W D. Revisit calculation and waveform control for a multifunction radar[C]// Proceedings of the IEEE conference on decision and control. San Antonio: IEEE press, 1993, 1: 456-461.
- [5].Gilson W H. Minimum power requirements for tracking[C]// IEEE international radar conference. Lexington: IEEE press, 1990: 417-421.
- [6].Keuk G Van, Blackman S S. On phased-array radar tracking and parameter control[J]. IEEE Transaction on aerospace and electronic system, 1993, 29(1): 186-194.
- [7].程婷,何子述,唐婷.相控阵雷达自适应采样周期算法研究.西安电子科技大学学报,2007,34(7): 116~119.
- [8].张贞凯,周建江,田雨波,杨庆.基于射频隐身的采样间隔和功率设计.现代雷达,2012,34(4): 19~23.