

雷达单目标跟踪射频隐身控制策略

刘宏强¹, 魏贤智¹, 黄俊², 廖俊³

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038;
2. 95899 部队, 北京, 100076; 3. 95148 部队, 湖南衡阳, 421851)

摘要 战斗机跟踪状态下实现雷达射频隐身是隐身作战的重要方面。介绍了射频隐身概念; 对于单目标跟踪问题以截获概率建立了跟踪优化模型, 并给出了跟踪精度约束条件; 对模型进行求解, 得到了自适应雷达辐射间隔与辐射功率的控制策略; 与其它 2 种雷达辐射控制方式进行仿真比较, 仿真结果证明: 跟踪时间超过 30 s 后, 质量和截获概率低 40% 左右, 取得了较好的射频隐身效果。

关键词 射频隐身; 跟踪策略; 辐射控制; 截获概率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.008

中图分类号 V243.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)04-0032-04

Research on Radar Tracking Single Target RF Stealth Control Strategy

LIU Hong-qiang¹, WEI Xian-zhi¹, HUANG Jun², LIAO Jun³

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 95899, Beijing 100076, China; 3. Unit 95148, Hengyang 421851, Hunan, China)

Abstract: Radar radio frequency (RF) stealth of fighter plane is the important side of stealth fight at fight plane tracking model. First, the RF stealth concept is introduced. Secondly, an optimization control model restricted by tracking precision and accumulation intercept probability is constructed for single target tracking problem. Thirdly, the control strategy of the radar adaptive emission interval and emission power is put forward through solving the model. Finally, by comparison with two other control models FRIAF, FRIFE by computer simulating, the RF stealth ability of the fighter plane is improved.

Key words: RF stealth; tracking strategy; emission control; intercepting probability

战斗机实现威胁估计、火力控制是以雷达稳定跟踪目标为基础的。以往的机载火控雷达跟踪目标时大多采用固定参数(如固定辐射功率、固定辐射间隔)来控制辐射^[1], 目标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。目前, 具有雷达工作参数可控特

性的有源相控阵雷达, 让自适应控制跟踪辐射间隔和辐射能量成为可能。Van Keuk、Cohen、Watson 和 Blair 等人分别建立了在满足一定精度条件下, 辐射间隔与目标机动参数^[2]、滤波位置残差^[3]、协方差矩阵^[4]之间的关系, 使得辐射间隔可以根据目标运动特性自适应进行调整。Gilson^[5]研究了机动目标跟踪下的雷达资源消耗问题, 给出了雷达跟踪目标所消耗功率与跟踪精度、采样周期和信噪比的计算方法。Keuk^[6]、Jung^[7]等人研究了以最小化工作负

收稿日期: 2012-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172083); 航空科学基金资助项目(20095196012)

基金项目: 刘宏强(1988—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士生, 主要从事武器系统与运用工程研究。E-mail: 944636554@qq.com

载为目标的相控阵雷达的波束指向以及信噪比、检测门限等雷达参数的最佳选择方法。王峰、周文辉、陈婷^[8]等人从提高跟踪精度和降低计算量角度对采样间隔策略进行了改进。但都很少直接从提高雷达跟踪状态射频隐身能力的角度来开展研究。本文对战斗机跟踪状态的射频隐身控制策略进行研究。

1 雷达单目标跟踪模型

1.1 目标函数

假设目标上装备有截获接收机,雷达从目标搜索状态转入目标跟踪状态时间为 t_1 ,经过时间 T 跟踪结束,在此过程中,雷达共辐射 n 次,设各次辐射对应时间为 $t_k, k=1,2,\dots,n$,为研究方便,不妨设 $t_1=0$ 。那么在每一次辐射 t_k 时刻,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,对应一个截获概率 $p_i(k)$,那么雷达在跟踪全过程的累积截获概率 p_{ic} 为:

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

由式(1)可知,减小 p_{ic} 有2条途径:一是减小每一次探测时被截获的概率 $p_i(k)$;二是减少总的辐射次数 n 。减小 $p_i(k)$ 可通过抑制雷达辐射功率 p_T 和照射目标时间 T_{OT} 来实现。另外,在跟踪总时间一定的情况下,减少 n 可通过增大辐射间隔 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ 来实现。

1.2 优化控制模型

跟踪状态下,跟踪精度是衡量雷达工作性能的重要标志。跟踪精度反映了滤波器的估计值逼近目标真实值的程度,状态协方差矩阵的主对角元素反映了目标状态的误差方差。但 t_k 时刻的目标状态协方差矩阵 $\mathbf{P}(\mathbf{K})$ 与量测噪声协方差 $\mathbf{R}(k)$ 、辐射间隔 Δt_k 和滤波算法(POF)有关。无论是抑制辐射功率 p_T 和照射目标时间 T_{OT} ,还是增大辐射间隔 Δt_k ,都会降低跟踪精度。

雷达单目标跟踪状态的优化控制模型为:

$$\begin{cases} \min p_i(k) = p_i[P_T(k), T_{OT}(k)] \\ \max \Delta t_k \end{cases} \quad (2)$$

s. t. $\mathbf{P}(k) = f\{\Delta t_k, \mathbf{R}[P_T(k), T_{OT}(k)], \text{POF}\} \leq \mathbf{P}_{ex}$

式中: \mathbf{P}_{ex} 是给定的期望协方差矩阵。

2 射频隐身的单目标跟踪策略

2.1 模型求解

辐射间隔 Δt_k 的大小受 \mathbf{P}_{ex} 以及检测概率的影响。减小截获概率可将检测信噪比固定在检测门限的基础上进行。在解算模型(2)时,可将2个目标函数分别进行解算。其解算步骤为:

步骤1 设定检测概率为门限值 P_{dh} ,并据式(3)或式(4)解算出信噪比 SNR_{dh} :

$$p_d = \exp\left[-\frac{U_T}{1 + \text{SNR}}\right] \quad (3)$$

$$p_d = \left[1 + \frac{2\text{SNR} \cdot U_T}{(\text{SNR} + 2)^2}\right] \exp\left[-\frac{2U_T}{2 + \text{SNR}}\right] \quad (4)$$

式中: U_T 为检测门限; p_d 为检测概率; SNR 为信噪比。

步骤2 依照 IMM 滤波算法,根据模型(5)~(6),解算出 Δt_k 值:

$$\max \Delta t_k \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \mathbf{P}_{pre}(k) \leq \mathbf{p}_{ex} \\ p_d = P_{dh} \\ \Delta t_k \in [\Delta T_{min}, \Delta T_{max}] \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{P}_{pre}(k)$ 为滤波协方差阵的估计值。

\mathbf{P}_{pre} 和 \mathbf{P}_{ex} 可用矩阵度量的方法来比较。本文用求矩阵的迹来度量跟踪精度是否满足要求。

步骤3 按照 IMM 滤波算法,根据计算出的 Δt_k 值,可求出量测的预测值,再根据式(7~8)解算出满足条件的 $P_T(k)$ 和 $T_D(k)$ 的值:

$$\min p_i(k) = \left[\frac{2C_1}{\Delta_I} \frac{P_T(k)}{\hat{R}_k^2}\right]^{C_0} \frac{T_D(k)}{T_I} \quad (7)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} C_2 [P_T(k) T_D(k) \sigma(k)] / \hat{R}_k^4 = \text{SNR}_{dh} \\ \hat{R}_k = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ T_D(k) < \Delta R / v(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $v(k)$ 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 基于射频隐身的雷达单目标跟踪策略

综合以上分析,可以得到基于射频隐身的单目标跟踪策略的具体实施步骤为:

步骤1 设定期望协方差矩阵、检测概率门限;

步骤2 根据 IMM 目标跟踪算法,更新 t_k 时刻目标的跟踪状态 $\{\mathbf{x}(k), \mathbf{P}(k)\}$;

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 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1直到跟踪结束。

3 仿真分析

3.1 仿真目的

仿真的主要目的是验证本文所提辐射间隔自适应和辐射能量自适应(Adaptive Radiation Interval and Adaptive Energy, ARIAE)方法的有效性,并与等辐射间隔自适应辐射能量(Fixed Radiation In-

interval and Adaptive Energy, FRIAE)、等辐射间隔等辐射能量(Fixed Radiation Interval and Fixed Energy, FRIFE)这2种方法在跟踪效果和射频隐身效果2个方面进行评估。

射频隐身效果通过平均辐射间隔 $\overline{\Delta t_k}$ 、辐射次数 C^i 、单次截获概率 $p_i(k)$ 和累计截获概率 p_i 的比较来说明。单次辐射的截获概率和累积截获概率的计算是在确定平均辐射间隔的基础上进行。其中:

$$\overline{\Delta t_k} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta t_k^i \quad (9)$$

$$C^i = \sum_{k=1}^{N_k} C_k^i \quad (10)$$

式中: M 为Monte Carlo仿真次数; N_k 为第 k 次Monte Carlo仿真时的采样点数; Δt_k^i 为第 i 次仿真时采样点 k 的辐射间隔; C_k^i 为第 i 次仿真时采样点 k 的辐射次数。

跟踪效果除检测概率指标外,还利用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和相对均方根误差(Relative Root Mean Square Error, RRMSE)来作为评价标准,其定义分别为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (x_i - \hat{x}_i^k)^2} \quad (11)$$

$$\text{RRMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \left(\frac{x_i - \hat{x}_i^k}{x_i} \right)^2} \quad (12)$$

式中: x_i 为第 i 点的真实位置; \hat{x}_i^k 为第 k 次仿真中第 i 点的估计位置。

3.2 仿真参数设置

假设雷达峰值功率为25 kW,信号检测虚警概率 $p_{fa} = 10^{-6}$,所要求的检测概率 $p_{dh} = 90\%$,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 $G_d = 30 \text{ m}$,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 m^2 ,截获接收机扫描时间 $T_1 = 2 \text{ s}$,检测门限 $\Delta_1 = -50 \text{ dBm}$, $C_0 = 0.477$ 。

假设目标与载机处于同一水平面,目标初始状态 (x_0, x'_0) 为 $(50 \text{ km}, 40 \text{ km}, -400 \text{ km/s}, -300 \text{ km/s})$,目标在 $40 \sim 60 \text{ s}$ 和 $80 \sim 90 \text{ s}$ 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2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转移概率矩阵为:

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

假设固定辐射间隔为 2 s ,总仿真时间为 100 s ,进行100次Monte Carlo仿真。仿真中选用的期望协方差为FRIFE算法中的平均误差协方差,仿真开始后前4次跟踪滤波3种方法辐射间隔相同。

3.3 仿真结果

图1~图6给出了仿真结果。在图1中3种算法都可以进行跟踪。在图2中,3种算法的迹变化趋势基本相同。在图3中ARIAE方法的辐射间隔值围绕FRIFE和ARIFE方法所给的间隔值上下波动,总体上大于固定间隔,从图4中可以看出ARIAE方法能够减少辐射次数。

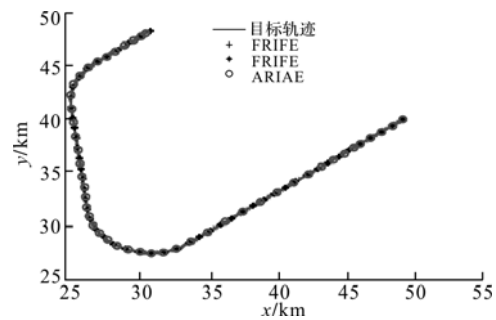


图1 目标估计及滤波结果

Fig. 1 Result of target computing and filter

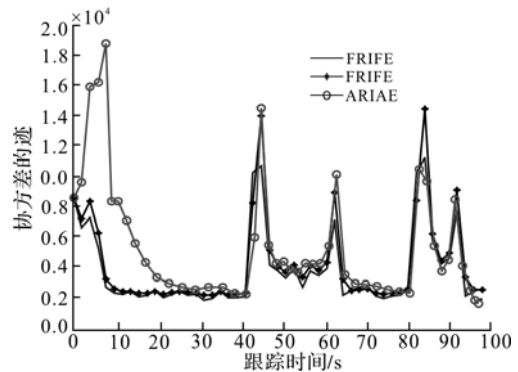


图2 目标状态协方差的迹

Fig. 2 Trace of target state covariance

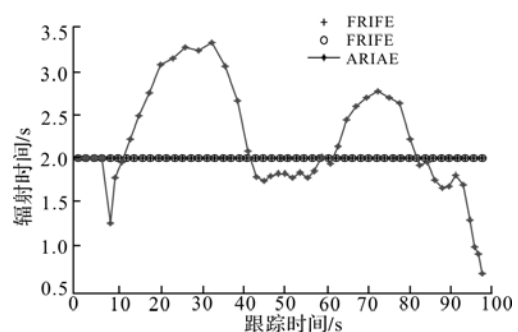


图3 平均辐射间隔

Fig. 3 Average emission interval

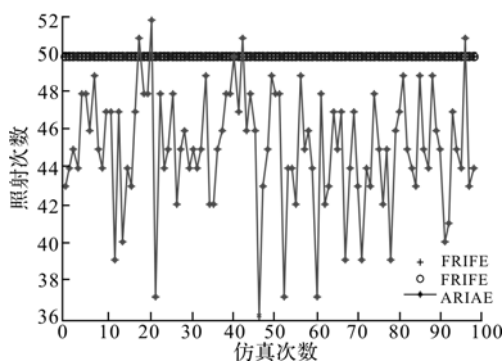


图4 照射次数

Fig. 4 Irradiation time

在图5中,ARIAE与FRIAE由于对辐射能量进行了自适应控制,辐射能量随距离变化,使得截获概率也逐渐减小,而FRIFE方法由于辐射能量一直不变,目标近时,截获概率会变大。在图6中,ARIAE与FRIAE都较FRIFE方法能提升射频隐身性能,但是ARIAE所得结果最优,当跟踪时间超过30s以后,ARIAE较FRIFE方法的累积截获概率低40%,说明本文所提方法改善目标跟踪状态射频性能的有效性。

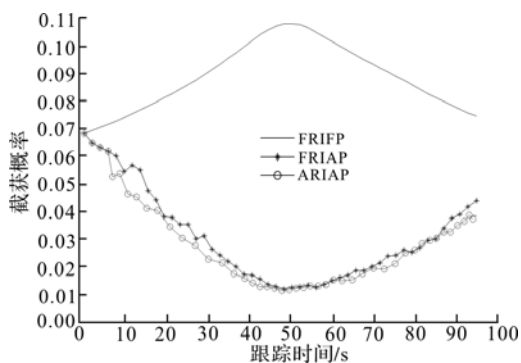


图5 单次辐射截获概率

Fig. 5 Single emission intercept probability

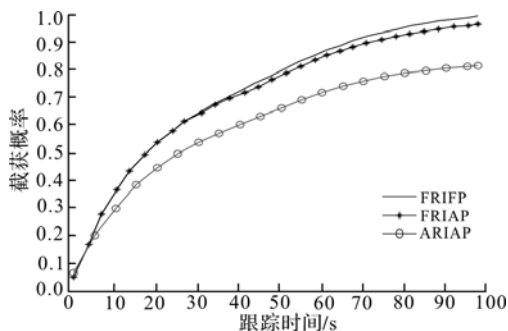


图6 累积截获概率

Fig. 6 Accumulation intercept probability

射间隔工作参数出发,分析雷达单目标跟踪时的射频隐身策略,建立优化模型,进行了模型的求解与仿真,表明了本文所提方法的有效性。

参考文献(References):

- [1] 王德纯,丁家会,程望东,等.精密跟踪测量雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2006.
WANG Dechun,DING Jiahui,CHENG Wangdong, et al. Precise track measure radar technique[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2006. (in Chinses)
- [2] 张锡熊.低截获概率(LPI)雷达的发展[J].现代雷达,2003,25(12):1-4.
ZHANG Xixiong. The development of LPI radar[J]. Modern radar,2003,25(12):1-4. (in Chinses)
- [3] Liu Guosui,Gu Hong,Zhu Xiaohua,et al. A contrast experiment of ECCM of raydom to pseudorandom binary phase coded CW radar[C]//International conference on signal processing. Shanghai: IEEE press, 1996:1621-1624.
- [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, 1993:456-461.
- [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] Hong S M, Jung Y H. Optimal scheduling of track updates in phased array radars[J]. IEEE transaction on aerospace and electronic system,1998,34(3):1016-1022.
- [8] 程婷,何子述,唐婷.相控阵雷达自适应采样周期算法研究[J].西安电子科技大学学报,2007,34(7):116-119.
CHENG Ting,HE Zishu,TANG Ting. Research on adaptive update interval algorithms in phased array radars[J]. Journal of Xidian university,2007,34(7):116-119. (in Chinses)

(编辑:田新华)

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,提出了一种跟踪状态的射频隐身控制策略。从控制雷达辐射能量与辐