

文章编号: 2095-4980(2013)01-0080-05

## 反辐射导弹抗目标雷达关机时效性分析

王庆欣, 王竹林, 史连艳

(军械工程学院 导弹工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘要:** 抗目标雷达关机是反辐射导弹的技术难题, 也是关键问题。针对基于目标状态估计的抗目标雷达关机方案, 将自适应无迹卡尔曼滤波(UKF)算法应用于抗雷达关机措施中。利用扩展卡尔曼滤波(EKF)、UKF 和自适应 UKF 算法, 对反辐射导弹抗关机性能进行了仿真实验。实验结果表明, 自适应 UKF 算法在对抗雷达短时关机方面具有明显的优越性, 对于目标雷达长时间的情况, 需考虑结合使用其他抗关机措施。

**关键词:** 自适应无迹卡尔曼滤波; 雷达关机; 反辐射导弹; 被动定位

**中图分类号:** TN974

**文献标识码:** A

## Timeliness analysis on antagonism against the radar stopping radiating of Anti-Radiation Missile

WANG Qing-xin, WANG Zhu-lin, SHI Lian-yan

(Department of Missile Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

**Abstract:** The antagonism against the radar stopping radiating is a key and tough problem to Anti-Radiation Missiles(ARM). Aiming at the scheme of antagonism against the radar stopping radiating based on target state estimation, the adaptive Unscented Kalman Filter(UKF) is applied to the measure against the radar stopping radiating. The EKF/UKF and the adaptive UKF algorithms are used in the simulation for anti-radiation missile against the switching-off. The results indicate that the adaptive UKF is obviously superior to other algorithms against short time switching-off of the radar. For the case of long time switching-off of the radar, other measures against the radar stopping radiating should be considered.

**Key words:** adaptive Unscented Kalman Filter; radar switching-off; Anti Radiation Missile; passive localization

反辐射导弹(ARM)又称为反雷达导弹, 是一种以雷达或其他电磁辐射源为攻击目标, 攻击和摧毁敌方雷达设施和电子干扰设施的强有力武器。由于反辐射导弹导引头以辐射源信号为制导信息, 因此必须有辐射源才能正常工作。没有辐射源信号, 反辐射导弹就会失去控制而失效。这个问题反映在反辐射导弹飞向目标的过程中, 若遇雷达突然关机, 导弹将失去目标信息而最终不能命中雷达<sup>[1]</sup>。如今, 是否具有抗击目标雷达关机的能力已经成为衡量反辐射导弹战术技术性能是否先进的一个重要标志。所谓抗雷达关机, 就是指当目标雷达停止工作, 导引头失去观测信息时, 反辐射导弹制导系统仍能保证导弹继续攻击目标并达到一定精确度。目前, 国内外科研机构及学者在抗目标雷达关机方面已做了许多研究, 主要集中在以下 2 个方面<sup>[2]</sup>: a) 基于多模导引头复合制导的抗关机方案。该方法是一种比较直接有效的抗关机手段; b) 基于被动雷达导引头与捷联惯导系统相结合的复合制导抗关机方案。这是一种在现有的技术储备基础上提出的切实可行的、具有较强抗关机能力的抗关机方案。它具有实现简单, 对硬件要求适中等优点。在已有的技术储备基础上, 结合武器系统自身的具体情况, 被动雷达导引头与卡尔曼滤波器<sup>[3]</sup>相结合的抗关机措施是一种切实可行的、又具有良好效费比的抗关机方案。该方案是一种基于目标状态估计的抗目标雷达关机措施, 需要采用卡尔曼滤波器实时估计目标的位置坐标。在改善 EKF 等非线性滤波器的基础上, Julier 等人提出了基于 Unscented 变换的 UKF 非线性滤波方法<sup>[4]</sup>, 但 UKF 对初始值的取值比较敏感, 系统噪声相关信息的不确定性 & 状态模型的扰动异常都会影响 UKF 滤波解的精确度。因而, 针对 UKF 存在的问题, 本文采用被动雷达与自适应 UKF 相结合的方案进行抗目标雷达短时关机的研究。

## 1 UKF 算法

UKF 以卡尔曼线性滤波为框架，采用确定性采样策略逼近非线性分布<sup>[5]</sup>。在 UKF 算法中，当不要求对噪声估计时，则该算法只对状态进行 Sigma 点采样，其算法的步骤如下：

1) Sigma 点采样，根据 UT 变换，计算状态向量矩阵。采用某种采样策略，得到  $k$  时刻状态估计的 Sigma 点集  $\{\chi_{k/k}(i)\}, (i=1, 2, \dots, 2n+1)$  和对应的权值  $W_i^n$ 、 $W_i^c$ ，其中  $2n+1$  为所采用的采样策略的采样 Sigma 点个数。

$$\chi_{k/k}(i) = \begin{bmatrix} \hat{x}_k & \hat{x}_k + \sqrt{(n+\lambda)P_k} & \hat{x}_k - \sqrt{(n+\lambda)P_k} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $\hat{x}_k$  是  $k$  时刻的系统状态； $P_k$  表示  $k$  时刻协方差矩阵； $n$  为状态向量的维数； $\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n$ ， $\alpha$  决定  $\sigma$  点的散布程度，通常取一小的正值(如 0.01)， $\kappa$  通常取 0。

$W_i^n, W_i^c$  的值如上所述。

2) 利用状态方程传递采样点。

$$\chi_{k+1/k}(i) = f(\chi_{k/k}(i)) \quad (2)$$

3) 利用预测采样点  $\chi_{k+1/k}(i)$ ，权值  $W_i^n$  和  $W_i^c$ ，计算预测均值  $\hat{x}_{k+1/k}$  和协方差矩阵  $P_{k+1/k}$ ：

$$\hat{x}_{k+1/k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^n \chi_{k+1/k}(i) \quad (3)$$

$$P_{k+1/k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\chi_{k+1/k}(i) - \hat{x}_{k+1/k})(\chi_{k+1/k}(i) - \hat{x}_{k+1/k})^T + Q_{k+1} \quad (4)$$

式中  $Q_{k+1}$  表示系统噪声协方差矩阵。

4) 利用 2) 预测量测采样点。

$$z_{k+1/k}(i) = h(\chi_{k/k}(i)) \quad (5)$$

5) 预测量测值和协方差。

$$\hat{z}_{k+1/k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^n z_{k+1/k}(i) \quad (6)$$

$$P_{zz} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (z_{k+1/k}(i) - \hat{z}_{k+1/k})(z_{k+1/k}(i) - \hat{z}_{k+1/k})^T + R_{k+1} \quad (7)$$

$$P_{xz} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\chi_{k+1/k}(i) - \hat{x}_{k+1/k})(z_{k+1/k}(i) - \hat{z}_{k+1/k})^T \quad (8)$$

式中： $P_{zz}$  是量测向量协方差矩阵； $P_{xz}$  是状态向量与量测向量的协方差矩阵； $R_{k+1}$  表示噪声协方差矩阵。

6) 计算 UKF 增益，更新状态向量和方差。

$$K_{k+1} = P_{xz} P_{zz}^{-1} \quad (9)$$

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (z_{k+1} - \hat{z}_{k+1/k}) \quad (10)$$

$$P_{k+1/k+1} = P_{k+1/k} - K_{k+1} P_{zz} K_{k+1}^T \quad (11)$$

该算法适用于任意非线性系统模型，它不需要估算雅克比矩阵，实现简单，且预测精确度比 EKF 高。

## 2 自适应 UKF 算法

尽管 UKF 算法相对 EKF 算法有了明显改进，但在实际应用中，该算法对初始值的取值比较敏感，系统噪声相关信息的不确定性及状态模型的扰动异常都会影响 UKF 滤波解的精确度。因此，可根据自适应估计原理对 UKF 算法进行针对性的改进<sup>[6]</sup>。

如果初始值取值存在偏差，则会影响  $\chi_{k+1/k}(i)$  和  $\hat{x}_{k+1/k}$  的计算，同时使  $\hat{z}_{k+1/k}$  存在一定的误差；另外，状态模型的扰动异常误差也会影响到  $\hat{x}_{k+1/k}$  和  $\hat{z}_{k+1/k}$  的构造。因此，为减小初始值取值偏差和状态模型扰动异常误差对滤

波过程带来的影响,可采用方差膨胀原则,将存在偏差的  $\hat{\mathbf{x}}_{k+1/k}$  和  $\hat{\mathbf{z}}_{k+1/k}$  的相应协方差矩阵进行自适应膨胀,以合理调整其在滤波解中的作用。此处引入自适应因子  $\alpha_k, 0 < \alpha_k \leq 1$ 。合理的自适应因子不仅能自适应平衡状态方程中预报信息与观测信息的比例,还可以控制状态模型扰动异常对滤波解的影响。 $\alpha_k$  构造为:

$$\alpha_k = \begin{cases} 1 & \text{tr}(\mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^T) \leq \text{tr}(\mathbf{P}_{xz} \mathbf{P}_{xz}^T) \\ \frac{\text{tr}(\mathbf{P}_{xz} \mathbf{P}_{xz}^T)}{\text{tr}(\mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^T)} & \text{tr}(\mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^T) > \text{tr}(\mathbf{P}_{xz} \mathbf{P}_{xz}^T) \end{cases} \quad (12)$$

式中预报误差为:

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{z}_k - \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^n \mathbf{z}_{k/k-1}(i) \quad (13)$$

则式(7)、式(8)、式(11)分别调整为:

$$\overline{\mathbf{P}}_z = \frac{1}{\alpha_k} \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^c (\mathbf{z}_{k+1/k}(i) - \hat{\mathbf{z}}_{k+1/k}) (\mathbf{z}_{k+1/k}(i) - \hat{\mathbf{z}}_{k+1/k})^T + \mathbf{R}_{k+1} \quad (14)$$

$$\overline{\mathbf{P}}_{xz} = \frac{1}{\alpha_k} \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^c (\mathbf{x}_{k+1/k}(i) - \hat{\mathbf{x}}_{k+1/k}) (\mathbf{z}_{k+1/k}(i) - \hat{\mathbf{z}}_{k+1/k})^T \quad (15)$$

$$\overline{\mathbf{P}}_{k+1/k+1} = \frac{1}{\alpha_k} \mathbf{P}_{k+1/k} - \mathbf{K}_{k+1} \overline{\mathbf{P}}_{xz} \mathbf{K}_{k+1}^T \quad (16)$$

当 UKF 初始值的选取存在偏差或状态模型存在异常扰动时,  $\alpha_k$  将小于 1, 即状态模型预报信息对最终滤波解的贡献将尽量小; 当状态模型预报信息出现较大的异常和误差时,  $\alpha_k$  将接近 0, 即动力学模型信息被完全弃用, 滤波器将会趋于发散。也就是说, 使用  $\alpha_k$  能够根据预报残差  $V_k$  并利用观测信息  $z_k$  来自适应调节  $\hat{\mathbf{x}}_{k+1/k}$  对更新状态的贡献, 从而减小状态模型误差对滤波解的贡献<sup>[6]</sup>。

### 3 抗目标关机措施

假设, 导弹在末制导攻击段突遇敌方雷达关机, 且燃料快耗尽或者导弹现时飞行高度低于拉起最低要求高度。此时导弹将被迫继续攻击目标。若不采取有效的抗关机措施, 导弹末制导攻击性能将在缺少测角信息的情况下大打折扣。

为克服这一点, 可采用被动雷达导引头与卡尔曼滤波器相结合的抗关机措施, 以提高无人机抗干扰性能。图 1 为该措施的方框图, 其基本思路是: 在制导过程中, 在敌方雷达关机前, 导弹通过被动雷达导引头获得视线角信号  $Z(X)$ , 实施精确制导。卡尔曼滤波器也同时工作, 通过滤波得到第  $k$  时刻目标与导弹相对运动状态量的估计值, 即  $X(k) \xrightarrow{\text{自适应UKF}} \hat{X}(k/k)$ , 当在第  $k+1$  时刻雷达关机后, 虽然导引头失去了观测信息, 但是通过次优卡尔曼滤波得到第  $k+i$  时刻观测量的估值, 即:  $\hat{X}(k/k) \xrightarrow{\text{自适应UKF}} \hat{X}(k+i/k) \rightarrow \hat{Z}(k+i/k), i=1, 2, 3, \dots$  从而继续引导导弹攻击目标, 达到抗关机性能要求。而且在雷达再次开机后可使导弹及时修正误差, 完成制导过程。

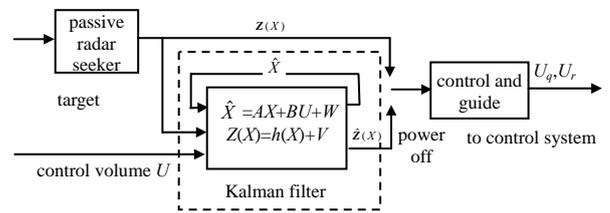


Fig.1 Antagonism against the radar stopping radiating  
图 1 抗目标雷达关机措施

### 4 被动定位系统模型

在反辐射导弹攻击对象为地面固定雷达的情况下, 针对对象为静止目标的 Bearing-Only(BO)系统进行分析, 静止目标雷达三维空间 BO 系统如图 2 所示。

在参考坐标系中反辐射导弹的坐标为  $\mathbf{X}_m = [x_m \ y_m \ z_m]^T$ , 静止目标雷达的坐标为  $\mathbf{X}_t = [x_t \ y_t \ z_t]^T$ , 状态变量为目标雷达和反辐射导弹的相对坐标  $\mathbf{X}_r = [x_r \ y_r \ z_r]^T$ , 其中,  $\mathbf{X}_r = \mathbf{X}_t - \mathbf{X}_m$ 。

被动定位系统的状态方程为:

$$\mathbf{X}_r(k+1) = \mathbf{X}_r(k) + \mathbf{U}(k) \quad (17)$$

$$\mathbf{U}(k) = [x_m(k) - x_m(k+1) \quad y_m(k) - y_m(k+1) \quad z_m(k) - z_m(k+1)]^T \quad (18)$$

观测方程为：

$$\theta_m(k+1) = \arctan \frac{y_r(k+1)}{\sqrt{x_r^2(k+1) + z_r^2(k+1)}} + v_1(k+1) \quad (19)$$

$$\varphi_m(k+1) = \arctan \frac{z_r(k+1)}{x_r(k+1)} + v_2(k+1) \quad (20)$$

式中  $v_1(k+1)$  和  $v_2(k+1)$  分别为反辐射导弹被动雷达导引头均值不相关高斯白噪声。

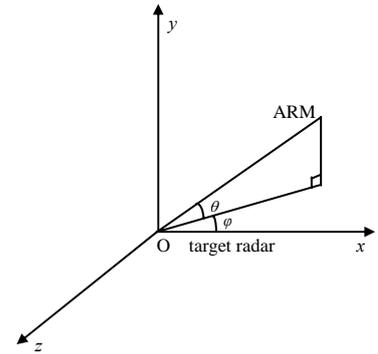


Fig.2 Diagram of three-dimensional space system for immobile radar  
图 2 静止目标雷达三位空间 BO 系统示意图

### 5 抗目标雷达关机能力仿真分析

假设反辐射导弹在其平飞段速度为 2.5 Mac，被动雷达导引头测角噪声均方差为 0.5°，量测噪声服从  $N(0, (0.1^\circ)^2)$  高斯分布，采样时间为 0.1 s，目标雷达在坐标系中坐标为 (50 000, -6 000, 0)，反辐射导弹坐标为 (0, 0, 0)。自适应 UKF 滤波器参数分别为： $\alpha = 0.6, \beta = 1.5, k = -0.5$ 。

在目标雷达不关机、 $t=5$  s 和  $t=10$  s 时刻关机这 3 种情况下，分别采用 3 种算法，在相同条件下进行 50 次随机仿真，应用蒙特卡罗方法进行精确度分析，仿真结果见表 1。

表 1 仿真结果  
Table1 Results of simulation

filter arithmetic	time of power off /s	undershoot of X way /m	undershoot of Y way /m	coordinate of location of target
EKF	un-power off	3.4	3.0	(0,0,0)
	5	22.1	19.3	
	10	18.3	15.5	
UKF	un-power off	2.6	2.5	(0,0,0)
	5	20.4	18.0	
	10	15.6	13.3	
adaptive UKF	un-power off	2.0	1.8	(0,0,0)
	5	18.1	16.2	
	10	12.9	11.8	

由表 1 的仿真结果可以看出，当攻击地面静止目标时，在目标不关机的情况下，导弹可以较为准确地命中目标；在 5 s 时刻关机的情况下，由于较早失去观测信息，导弹攻击精确度有所下降。通过对 3 种滤波算法的比较可看出，自适应 UKF 滤波算法表现较好；在 10 s 时刻关机的情况下，接近导弹制导末段，导弹整体攻击精确度要比 5 s 时关机情况好，同时，自适应 UKF 算法能取得较好的效果。

针对自适应 UKF 算法，进行目标雷达持续关机的仿真试验，得出其抗关机能力如图 3 所示。通过本实验可看出，在目标关机情况下，采用基于状态估计的抗关机措施，自适应 UKF 算法因为能克服系统噪声不确定性带来的影响，相对于 EKF，UKF 算法能取得较为理想的滤波效果，具体体现在关机后，导弹命中率有了明显提高，抗目标关机效果较为理想。由于反辐射导弹杀伤半径为 25 m~30 m，针对上述仿真试验，可知在目标雷达持续关机超过 17 s 后，卡尔曼滤波算法已不能保证导弹攻击的准确性，故此时需考虑其他抗关机措施。

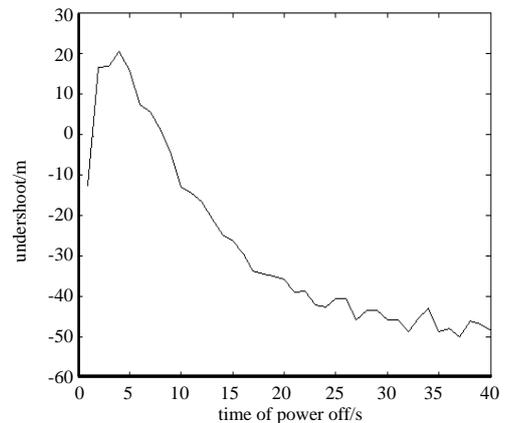


Fig.3 Analysis of the timeliness on antagonism against power off for UKF  
图 3 自适应 UKF 抗雷达关机时效性分析

### 6 结论

抗目标雷达关机是反辐射导弹所面临的主要难题之一，解决好抗雷达关机问题，对反辐射导弹的攻击准确性会带来较为明显的改善。本文针对地面静止雷达目标，建立了反辐射导弹-目标雷达被动定位模型；描述了自适应 UKF 算法的滤波过程，并基于自适应 UKF 滤波算法提出抗雷达关机措施。通过将 EKF, UKF 和自适应 UKF 应

用于仿真实验, 得出了 3 种算法的滤波结果。根据对比可看出, 自适应 UKF 算法能有效提高反辐射导弹抗目标雷达关机的能力, 说明该算法在抗雷达关机方面有较好的应用效果。并对卡尔曼滤波算法应用于抗雷达关机时效性做了分析, 得出较为准确的结论, 为抗关机措施的选择提供了依据。

#### 参考文献:

- [1] 杨林冲,张拥军,杨亚丽. 反辐射导弹抗关机能力研究[J]. 战术导弹控制技术, 2009,26(3):6-8.
- [2] 孙凡. 攻击型无人机抗目标雷达关机措施研究[D]. 西安:西北工业大学, 2001.
- [3] 齐晓慧,黄健群,董海瑞,等. 现代控制理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
- [4] Doucet A,Godsill S,Andrieu C. On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering[J]. Statistics and Computing, 2000,10(3):197-208.
- [5] 万莉,刘焰春,皮亦鸣. EKF,UKF,PF目标跟踪性能的比较[J]. 雷达科学与技术, 2007,5(1):13-16.
- [6] 高为广,何海波,陈金平. 自适应 UKF 算法及其在 GPS/INS 组合导航中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2008,28(6): 506-509.

#### 作者简介:



王庆欣(1986-), 男, 山东省临沂市人, 在读硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置.email:wangqingxin2005@163.com.

王竹林(1966-), 男, 山西省洪桐市人, 副教授, 主要研究方向为检测技术与自动化装置.

史连艳(1972-), 女, 吉林省辉南县人, 在读博士研究生, 研究方向为火箭弹制导系统设计.