

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802426

电子侦察系统自适应跟踪数据率算法

胡进 孙泽林

(中国船舶重工集团公司第七二四研究所 南京 211106)

摘要: 数据率是电子侦察系统跟踪任务管理中的一个重要参数,数据率的大小决定着跟踪精度的高低,同时也影响着系统资源消耗量,为平衡跟踪精度和资源消耗的矛盾,需要一种自适应数据率算法。因为在时域上辐射源照射侦察天线的非连续性,当前主动雷达的自适应数据率算法不适用于电子侦察系统。针对以上问题引入辐射源天线扫描周期作为约束条件,改进预测协方差门限算法应用于电子侦察系统。在改进的算法中,将辐射源天线扫描周期的整数倍作为采样间隔,通过纯角度跟踪算法得到预测协方差,当预测协方差大于设定的门限时即采样。仿真结果表明,该方法可根据设定的跟踪精度,自适应采样周期,节省系统资源。

关键词: 侦察系统;纯角度;协方差控制;数据率;资源调度

中图分类号: TN971 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Adaptive tracking data rate algorithm for electronic reconnaissance system

Hu Jin Sun Zelin

(No. 724 Research Institute of CSIC, Nanjing 211106, China)

Abstract: The data rate is an important parameter in the tracking management of the electronic reconnaissance system. The size of the data rate determines the tracking accuracy, and also affects the system resource consumption. In order to balance the tracking accuracy and resource consumption, an adaptive data rate algorithm is needed. However, the current adaptive data rate algorithm of the active radar is not suitable for the electronic reconnaissance system because of the discontinuity of the radiation source in the time domain. In order to address these issues, the radiation source antenna scanning period as a constraint is introduced, and predictive covariance threshold algorithm is improved to be applied to electronic reconnaissance system. In the improved algorithm, the integer multiple of the scanning period of the radiation source antenna is used as the sampling interval, and the prediction covariance is obtained by the bearing-only tracking algorithm. When the prediction covariance is greater than the set threshold, the sampling is performed. The simulation results show that the method can adaptively get the sampling period according to the set tracking accuracy, save system resources.

Keywords: reconnaissance system; bearing-only; covariance control; data rate; resource scheduling

0 引言

相控阵雷达天线波束指向和扫描方式具有很大的灵活性,能同时完成搜索和对多个目标的精密跟踪^[1]。在系统资源有限的情况下,为使电子侦察系统^[2]尽可能追踪多的目标,就需对跟踪调度策略进行研究,充分发挥系统性能。

跟踪目标涉及到滤波算法,被动探测时仅能获得辐射源目标角度信息,无距离信息,应采用纯角度跟踪算法^[3-5]。时间资源优化主要通过控制跟踪任务的采样周期实现的,需要一种采样周期优化策略,使目标维持一定跟踪精度的同时,尽可能增大采样周期,减少跟踪单个目标的资源消

耗。文献[6-7]基于协方差门限法,构建了相控阵资源最优分配模型,使得目标跟踪精度维持在期望状态;文献[8]将协方差与信息论的思想相结合,对有特殊需求的目标设定期望协方差,而对其他目标以信息增量为跟踪指标;文献[9]在改进交互多模型-概率数据关联跟踪算法的基础上,提出了基于灰色关联度和粒子群优化理论的自适应多目标跟踪的时间资源调度算法。以上算法都是基于主动相控阵雷达的跟踪调度方法,而由于被动跟踪目标的非合作性质,主动雷达的跟踪调度算法不能很好地完成电子侦察系统跟踪任务。

雷达型号不同其天线扫描周期一般不同,在工作模式

不变的情况下,更改天线扫描周期的可能性很低^[10],天线扫描周期参数通常具有较长的生命周期。因此基于协方差门限法,结合目标天线扫描的周期性,提出一种面向电子侦察系统改进的预测协方差门限法。

1 协方差门限算法及改进的数学模型

在资源有限的条件下,电子侦察系统首要目的是完成所要求的任务而不仅是追求跟踪精度。对于一般目标只需要维持其航迹即可,而重点目标则需要高精度跟踪才能达到任务要求。从资源管理的角度看,侦察系统跟踪精度和跟踪目标数量是一对矛盾,对不同目标采用不同的精度控制是一种必然的也是合理的解决方法。对于涉及跟踪精度的问题,通常采用基于协方差控制的资源调度方法来分配系统资源^[11],利用 Kalman、IMM 等滤波算法的预测协方差计算下一次侦察系统量测的采样时间 T 。在预测协方差门限法中通过设定门限值的方法,当预测协方差大于设定的门限时进行下一次采样:

$$\bar{P}_{k+T|k} \leq \bar{P}_{th} \quad (1)$$

协方差矩阵的主对角元素分别反映了目标方位角度和角速度误差协方差,非主对角元素则反映了两者间的相关性,可忽略。为计算方便可以将量测误差协方差 R 的线性函数作为协方差门限^[12],式(1)改写为:

$$Tr[\bar{P}_{k+T|k}] \leq \lambda Tr[R] \quad (2)$$

机扫是常规雷达常用的扫描方式^[13],如图 1 所示,给出了雷达天线照射时间 T_s 与扫描周期 T_a 的示意图。从图中可以看出,照射时间 T_s 就是天线扫描的波束宽度,而两组相邻脉冲序列到达时间的差值为天线扫描周期 T_a 。

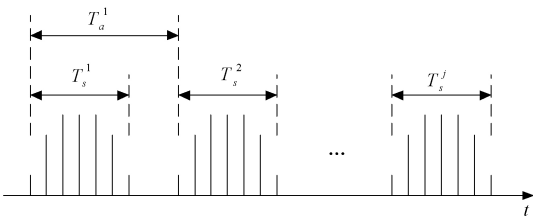


图 1 侦察系统截获的雷达脉冲序列

根据以上讨论,将目标天线扫描周期作为约束条件引入协方差门限算法优化模型:

$$\max f(T(t_k)) \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \bar{P}(t_{k+T|k}) \leq \bar{P}_{th} \\ T = i \cdot T_a \end{cases}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

优化模型表明,在采样周期为 T_a 整数倍和预测协方差小于门限值的约束条件下,选取最大的采样周期。

2 改进预测协方差门限算法流程

侦察系统接收到目标信号,是时域、频域、空域多维空

间内发生的信号截获,只有当目标雷达照射到侦收天线的特定时间才发生截获。考虑雷达目标天线扫描的周期性和较长的生命周期,利用扫描周期 T_a 对预测协方差门限法进行改进,使其适用于被动跟踪任务,算法流程如图 2 所示。

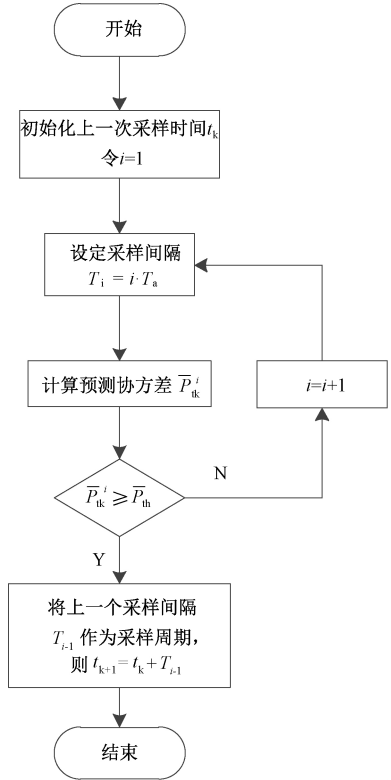


图 2 算法流程

- 1) 初始化,令 $i=1$, $T_i = i \cdot T_a$ ($i=1, 2, 3, \dots$);
- 2) 由滤波算法先得到预测协方差为 $\bar{P}_{k|k}^i$, 下一次的采样时间可表示为 $t_k = t_{k-1} + T_i$ ($i=1, 2, \dots$);
- 3) 判断 $\bar{P}_{k|k}^i \geq \bar{P}_{th}$, 若成立,将上一次的采样间隔作为采样周期,若不成立,令 $i=i+1$,返回步骤 2)。

3 纯角度跟踪算法选取

在单站纯角度二维跟踪场景中,观测站仅接收辐射源信号,只能获取目标角度信息,跟踪精度较低,维持稳定的跟踪较为困难。常用的纯角度跟踪算法有直角坐标系下的扩展卡尔曼滤波(EKF)、无损卡尔量滤波(UKF)算法、伪线性滤波算法等。但因为观测站不能接收距离信息,状态估计误差较大,甚至产生发散,所以预测协方差有很大的动态范围,协方差门限很难设定。传感器的观测是在极坐标系中进行的,由此产生了修正极坐标系、对数极坐标下的跟踪算法^[14],实现了可观测与不可观测部分的解耦。本文采用修正极坐标系下的 EKF 算法,可根据量测误差协方差 R 选取协方差门限 λR ($0 < \lambda < 1$),十分便捷。

修正极坐标系下的 EKF 算法仅适用于匀速直线运动的目标,目标发生机动时不能无偏收敛,且不能根据目标的机动性自适应采样周期。为克服以上缺陷,加入机动检测^[15],通过观察新息的变化探测机动的产生与结束:

$$v(k) = Z(k) - \hat{Z}(k | k - 1) \quad (5)$$

$$e(k) = v'(k)S^{-1}(k)v(k) \quad (6)$$

式中: $v(k)$ 为新息; $Z(k)$ 、 $\hat{Z}(k | k - 1)$ 分别为量测值和量测值的预测; S 为新息协方差; $e(k)$ 为归一化的新息平方。若 $e(k)$ 大于给定的阈值 U ,则认为目标机动,重置协方差矩阵 $P(k|k)$ 为初始协方差矩阵 $P(0|0)$ 。

4 仿真设计

假定某个海平面上的雷达目标初始位置为(1 000, 2 000) m,在 0~200 s 做匀速直线运动,速度为 40 m/s,航向为 30°;200~350 s 做转弯运动,转弯率为 0.02 rad/s;300~450 s 沿 X 轴负方向做匀速直线运动,速度为 20 m/s。雷达目标天线扫描周期 T_a 为 1 s,其运行轨迹如图 3 所示。观测站起始位置为原点,沿 Y 轴方向匀速移动,速度为 5 m/s。

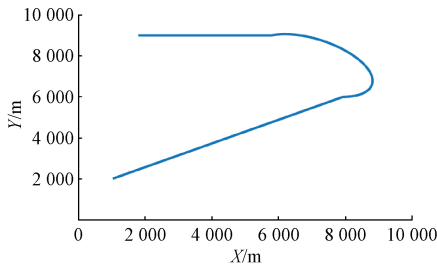


图 3 目标运行轨迹

过程噪声是零均值的高斯白噪声,方差为 $Q=0.001 2$;测量误差 $\sigma=0.025$ rad。令 $\lambda=0.25, 0.30, 0.35$,根据式(2)得到协方差门限值。最后,进行 100 次 Monte Carlo 仿真,将不同门限值下的改进协方差门限法与固定采样周期为 T_a 算法进行对比。设定评价指标如下。

平均采样周期:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M T_j \quad (7)$$

均方根误差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (x_j - \hat{x}_j)^2} \quad (8)$$

式中: T_j 表示第滤波采样间隔; x_j 表示每次滤波角度值; \hat{x}_j 表示真实值; M 表示滤波次数; N 表示 Monte Carlo 次数。仿真结果如图 4~6 所示。

图 4~6 分别为 $\lambda=0.25, 0.3, 0.35$ 时的采样周期变化情况,可以看出采样周期曲线与目标的机动性有关。随着 λ 值的增加,即协方差门限的提高,出现了越来越大的采样周期。

从表 1 所示可以看出,改进算法的采样周期均大于固

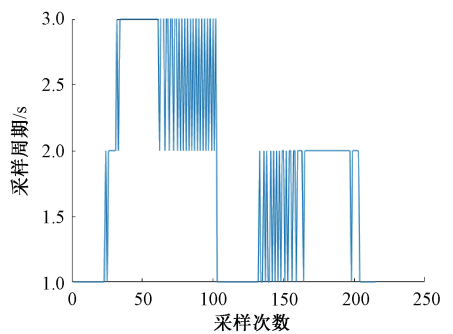


图 4 $\lambda=0.25$ 时的采样周期

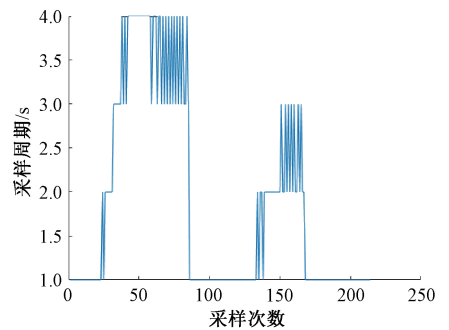


图 5 $\lambda=0.30$ 时的采样周期

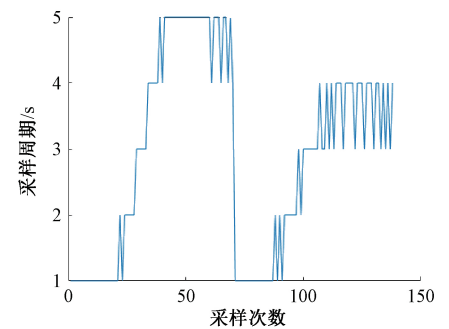


图 6 $\lambda=0.35$ 时的采样周期

定采样周期,一段时间内减少了采样次数,达到了节省系统资源的目的。随着 λ 的增大,采样周期随之增加。但采样周期增加其代价为跟踪精度降低,因此可以通过设定适当的 λ 值,使不同目标有维持一定跟踪精度的同时增加采样周期。

表 1 算法性能对比

采样算法	平均采样周期/s	角度均方根误差/rad
固定采样周期	1	0.0101
$\lambda=0.25$	1.706	0.012 0
改进算法 $\lambda=0.30$	2.267	0.012 4
$\lambda=0.35$	2.720	0.013 8

5 结 论

本文针对当前自适应数据率算法的不足,提出一种基于电子侦察系统的改进预测协方差门限法。首先,分析了一些常用的纯角度跟踪滤波算法,指出了滤波效果和协方差门限选取上的缺陷,选定了修正极坐标系下的 EKF 算法,并加入机动性检测。然后,利用雷达目标的扫描周期对预测协方差门限法进行改进,使其适用于电子侦察系统。根据目标设定期望协方差,在保证一定跟踪精度的基础上,增大采样周期,以减少用于追踪单个目标的波束资源和计算机资源,节省资源以完成其他任务。

参考文献

- [1] 卢建斌.相控阵雷达资源优化的理论与方法[D].长沙:国防科学技术大学,2007.
- [2] 胡满玲.机载电子侦察设备测向性能评估[J].电子测量技术,2010,33(8):25-27.
- [3] 任波,闫向远.纯角度跟踪非线性预测滤波算法研究[J].弹箭与制导学报,2014,34(2):6-8.
- [4] FARDAD M, GHORASHI S A, SHAHBAZIAN R. A novel maximum likelihood based estimator for bearing-only target localization [C]. Electrical Engineering, IEEE, 2015:1522-1527.
- [5] 杨威.基于非合作雷达目标跟踪技术的研究[D].成都:电子科技大学,2017.
- [6] 卢建斌,胡卫东,郁文贤.基于协方差控制的相控阵雷达资源管理算法[J].电子学报,2007,35(3):402-408.
- [7] 李明地,左燕,赵猛,等.改进预测协方差门限法的采样周期自适应选择算法[J].火力与指挥控制,2017(5):19-22.
- [8] 朱志勇.相控阵雷达多目标跟踪下的资源优化与资源管理方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [9] 贞凯,汪飞,周建江,等.多目标跟踪中自适应时间资源调度[J].航空学报,2011,32(3):522-530.
- [10] 康志勇,李仙茂,张范军.雷达天线扫描周期精确测量技术研究[J].航天电子对抗,2015,31(1):62-64.
- [11] 姚菲.基于自适应数据率控制的相控阵雷达实时任务调度技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2015.
- [12] 王峰,张洪才,潘泉.相控阵雷达采样周期自适应策略研究[J].系统仿真学报,2003,15(9):1230-1233.
- [13] 贾颖焘.雷达信号分选和天线扫描周期估计算法的研究与实现[D].长沙:国防科学技术大学,2015.
- [14] 田俊林,付承毓,唐涛.仅有角度观测信息情况下目标机动自适应跟踪算法研究[J].光电工程,2011,38(10):57-65.
- [15] 魏高乐,蒋宏,任章.修正极坐标系纯方位跟踪算法分析与改进[J].弹箭与制导学报,2009,29(3):51-54.

作者简介

胡进,博士,研究员,主要从事雷达与电子侦察技术研究。

孙泽林(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为电子侦察系统资源调度。

E-mail: sunzelin2010@163.com