

机载相控阵雷达 TAS 方式的实现

曹正林^① 杨向忠^② 刘卫华^②

^①(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

^②(北京经纬恒润科技有限公司 北京 100101)

摘要: 相控阵雷达具有灵活的波束指向、驻留时间、可控的空间功率及时间资源分配等特点,使相控阵雷达具有支持跟踪加搜索(TAS)的能力,即能同时完成搜索和对多个目标的精密跟踪。该文从任务调度机制和跟踪滤波两项关键技术论述了机载相控阵雷达 TAS 方式的算法。通过计算机仿真验证,表明这种方法能够使相控阵雷达具有很好的跟踪加搜索(TAS)能力。

关键词: 相控阵雷达;跟踪加搜索(TAS);任务调度;跟踪滤波;交互多模型概率数据关联(IMM-PDA)

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)05-1136-04

Implementation of TAS Method for Airborne ESA Radar

Cao Zheng-lin^① Yang Xiang-zhong^② Liu Wei-hua^②

^①(College of Information Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

^②(Beijing Jingwei Hirain Technologies Co., Ltd. Beijing 100101, China)

Abstract: ESA radar can distribute space power and time as required by flexibly controlling the direction and stare time of the beam, which enables the ESA radar to provide the capability of implementing multiple targets Tracking And Searching (TAS). Two critical techniques to implement TAS method—task scheduling and tracking filtering are discussed in this paper. It can be seen from the simulation results that ESA radar can provide high TAS capability using this algorithm.

Key words: ESA Radar; Tracking And Searching (TAS); Task schedule; Tracking filtering; IMM-PDA(Interacting Multiple Model-Probabilistic Data Association)

1 引言

相控阵雷达是雷达体系的一个重要发展,它突破了传统机械扫描雷达波束驻留时间、扫描方式、发射功率和数据率较为固定的限制,雷达天线波束在空间的扫描是无惯性的,具有灵活的波束指向及驻留时间、可控的空间功率分配及时间资源分配等特点。根据雷达当前态势,灵活精确控制波束指向及驻留时间,实现最佳的空间功率分配及时间资源分配,使相控阵雷达具有支持跟踪加搜索(TAS)的能力,即能同时完成搜索和对多个目标的精密跟踪^[1]。相控阵雷达 TAS 方式关键在于任务调度机制和跟踪滤波技术,通过对资源进行合理调度和对雷达参数的有效控制,在保证对已实现跟踪目标的稳定跟踪,对重点空域进行搜索的前提下,最大限度地发挥雷达的效能,尽可能多地跟踪目标。相控阵雷达可通过采用一种自适应的任务调度机制和 IMM-PDA (Interacting Multiple Model-Probabilistic Data Association) 滤波器对跟踪目标进行更新和维持,实现对复杂机动目标的稳定跟踪,试验结果表明该方法跟踪性能良好。

2 任务调度

2.1 雷达任务的分类

在雷达实际工作的多目标环境中,系统调度程序经常面临着多种雷达任务请求,这些请求可能竞争同一个时间片。但不可能同时都得到满足。因此,必须为相控阵雷达规定各种任务的相对优先级。通过时分方式下的任务分配和调度,使雷达的跟踪和搜索工作模式灵活转换。由于雷达的每一种任务都是相对于特定的目标(或空域)而采取的,所以其相对优先级主要取决于相应目标(或空域)的相对重要性和时间紧迫程度,且与系统设计师的经验和主观判断有关。确定任务的优先级就是根据任务的重要性的它对时间的依赖性将其分为若干类。对最重要且时间响应要求最紧迫的任务给以最高的优先级。以此类推,直到确定出最低优先级的那一类任务为止。

在 TAS 方式下,雷达的任务可以分为以下 4 种,按递减顺序为

(1)验证 在搜索检测到目标后,采用搜索加确认模式,发射验证波束,确认搜索发现的目标,确定回波是来自有效目标还是虚警,以减少虚警概率;

(2)跟踪 对已经建立跟踪的目标维持稳定跟踪。雷达按照任务需要进行时空分配, 根据目标威胁程度大小和机动的情况改变数据更新率;

(3)小搜 由于目标机动、干扰影响和雷达资源有限等原因, 目标在跟踪过程中可能会出现目标失跟的情况。小搜的目的就是为了尽快发现失跟的目标, 对失跟目标进行再次搜索和截获, 尽快重新建立此目标的跟踪航迹。

(4)搜索 对指定空域按照规定的波位编排表进行照射以检测目标。

显然, 优先级个数越多, 系统的作战效率越高, 但同时也增加了雷达处理机的处理与存储要求。一般情况下使用的任务优先级个数是在调度效率、处理机处理时间、存储器占用量以及目标分类方法之间进行折衷的结果^[2]。

2.2 自适应任务调度机制

机载相控阵雷达任务调度模块接受送来的各类任务请求, 将它们划分到不同的队列, 根据雷达当前的时间资源, 分析各队列任务的优先级和截止期是否满足, 从而决定可以调度执行的雷达任务, 并将调度执行的雷达任务序列送给相应的雷达各分系统。相控阵雷达实时任务调度模块的工作流程见示意图 1, 调度模块内部要进行队列的选择、优先级的设定、时间配额的分配等。

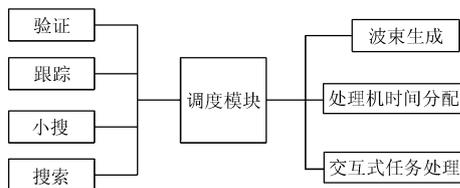


图 1 调度模块工作示意图

相控阵雷达的自适应任务调度机制应满足以下几条准则^[3-5]:

- (1)与动态的雷达环境即变化的波束请求环境相适应;
- (2)与规定的不同工作方式的相对优先级相适应;
- (3)使时间、能量和处理机资源得到尽可能充分的利用, 同时又不超出它们的能力范围;
- (4)在雷达设计条件的规定范围内;
- (5)波束请求在时间上尽可能均匀, 以免出现峰值资源要求。

2.3 自适应跟踪数据率

雷达对其监视区域内所有被跟踪的目标并不是同等对待处理, 如对非敌方目标可能采用粗跟踪方式即可, 而对敌方危险大的目标则需要进行精密跟踪, 当需要对某些目标进行打击时则需要对这些目标采用高精度跟踪等。这些需求本质上就是对不同目标采用不同的跟踪精度等级, 而不同的跟踪精度等级对应不同的跟踪误差协方差水平, 因此可以采用协方差控制跟踪目标的数据更新率。对粗跟踪目标取较大的

协方差跟踪门限, 对精跟踪目标取较小的跟踪协方差门限, 当位置预测误差超出给定跟踪门限时, 则判决该目标需要采样更新。

$$\bar{P}_{k+T|k} \leq \bar{P}_{th} \tag{1}$$

其中 $\bar{P}_{k+T|k}$ 为位置预测的协方差, \bar{P}_{th} 表示门限。因为 $\bar{P}_{k+T|k}$ 是一个矩阵, 而 T 是一个标量, 所以可以通过预测协方差的迹来计算 T 。

$$\text{Tr}[\bar{P}_{k+T|k}] \leq \text{Tr}[\bar{P}_{th}] \tag{2}$$

定义门限 \bar{P}_{th} :

$$\text{Tr}[\bar{P}_{th}] = \lambda \text{Tr}[R_k] \tag{3}$$

其中 λ 是一个正的系数, R_k 是测量误差的方差。

设 TAS 方式下的 4 种任务下一次处理时间间隔为 T_s , 通常情况下, 优先级高的任务时间间隔较短, 而优先级低的任务时间间隔较长, 其中跟踪任务根据设定的预测误差协方差门限计算下一次采样的时间间隔 T_s , 但不能超出给定的范围。当某个任务的时间 T_s 到期时, 雷达对该任务进行处理, 如果同时有多个任务到期, 则雷达根据各任务的优先级对各到期任务进行依次处理。

3 跟踪滤波

相控阵雷达跟踪滤波处理可采用 IMM-PDA 算法实现对机动目标的跟踪维持。

3.1 交互多模型(IMM)

在对目标的跟踪处理中, 由于被跟踪目标运动的复杂性和不确定性, 使得目标的建模始终没有得到很好的解决。目标运动特性变化很大, 有时机动, 有时不机动; 有时大机动, 有时小机动, 我们难以确定目标在某一期间内以何种模型运动。IMM 算法假设目标在某一扫描周期内, 其运动服从有限模型集合中的某个模型, 并且用马尔可夫过程来描述模型间的转换。利用概率的思想, 通过一定的方法计算出该周期内目标以各个模型运动的概率值。目标状态估计值即为各个模型对应滤波器估计目标状态的概率加权之和。模型的选择与目标的机动性有关, 如当目标做匀速或匀加速直线运动时, 分别采用 CV 模型和 CA 模型比较合理, 当目标做匀速转弯运动时, 采用 CT 模型能得到最佳的跟踪效果, 所以采用包含 CV、CA、CT 三个模型的 IMM 算法可以满足对具有这三种典型运动状态的目标的跟踪。

IMM 算法主要包括以下 4 个方面:

- (1)与模型相匹配的滤波器是并行运行的。
- (2)每个模型当前的概率权值是实时修正的。
- (3)每一次循环开始时, 各个滤波器的交互权值反映对应模型的当前概率值和模型的转移概率值。
- (4)状态及方差的融合作为跟踪算法的输出, 其融合过程应用了当前模型的概率。

3.2 概率数据相关(PDA)

PDA 方法的主要思想是对每一个落入波门的确定量测,

计算其来源于目标的概率,用这个值来进行状态的更新。与标准的跟踪滤波器相比,它用概率的思想全面考虑了所有的确定量测,使得量测值能够正确地与目标航迹相关联。PDA算法对于多回波情况下的单目标跟踪,或多回波情况下不密集的多目标跟踪很有效。

PDA算法主要包括以下内容:

(1)利用上一拍的状态估计和状态误差协方差阵进行本拍的一步预测。

(2)从得到的量测计算统计距离,找出确定量测。

(3)计算每一确定量测源于目标的概率,以及量测不源于目标的概率,这是PDA算法的关键,用这一关联概率,对量测进行正确的目标航迹关联。

(4)将关联概率用于滤波方程,得到滤波输出。

3.3 IMM-PDA 滤波器

将IMM算法和PDA算法结合起来,便得到交互式多模型概率数据关联滤波算法(IMM-PDA),它适合于杂波环境下单机动目标及不密集多机动目标的跟踪问题^[6-8]。其结合点是以PDA滤波器作为IMM算法中的滤波器,IMM算法中的模型概率的计算是通过计算PDA滤波器的似然函数值获得的。

假设 r 是用到的匹配滤波器模型的个数, $M(t_k)$ 是 (t_{k-1}, t_k) 时对应的模型, $\mu_j(t_k)$ 是模型 j 时的概率:

$$\mu_j(t_k) = P\{M(t_k) = j | Z^k\} \quad (4)$$

模型转换概率:

$$p_{ij} = P\{M(t_k) = j | M(t_{k-1}) = i\} \quad (5)$$

其中 $i, j = \{1, 2, \dots, r\}$ 表示模型序号, k 为跟踪时间序号,下同。 t_k 时刻第 j 个模型状态估计值是 $\hat{x}_j(t_k)$,协方差矩阵是 $P_j(t_k)$ 。

IMM-PDA滤波器的计算步骤如下:

步骤1 模型输入交互

$$\hat{x}_{0j}(t_{k-1}) = \sum_{i=1}^r \hat{x}_i(t_{k-1}) \mu_{ij}(t_{k-1}) \quad (6)$$

$$P_{0j}(t_{k-1})$$

$$= \sum_{i=1}^r \mu_{ij}(t_{k-1}) \{P_i(t_{k-1}) + [\hat{x}_i(t_k) - \hat{x}_0(t_{k-1})][\hat{x}_i(t_k) - \hat{x}_0(t_{k-1})]'\} \quad (7)$$

其中

$$\mu_{ij} = P\{M(t_{k-1}) = i | M(t_k) = j, Z^{k-1}\} = \frac{p_{ij} \mu_i(t_{k-1})}{\sum_{l=1}^r p_{lj} \mu_l(t_{k-1})} \quad (8)$$

步骤2 条件模型滤波器

用一个PDA滤波器来计算条件模型的状态估计和协方差。另外 t_k 时刻每个模型的似然函数 $\Lambda_j(t_k)$ 的计算如下所示:

$$\Lambda_j(t_k) = P\{Z(t_k) | M(t_k) = j, Z^{k-1}\} \quad (9)$$

步骤3 模型更新

$$\mu_j(t_k) = \frac{\Lambda_j(t_k) \sum_{l=1}^r p_{lj} \mu_l(t_{k-1})}{\sum_{i=1}^r \sum_{l=1}^r \Lambda_i(t_k) p_{il} \mu_l(t_{k-1})} \quad (10)$$

步骤4 输出交互

$$\hat{x}(t_k) = \sum_{j=1}^r \mu_j(t_k) \hat{x}_j(t_k) \quad (11)$$

$$P_j(t_k)$$

$$= \sum_{j=1}^r \mu_j(t_k) (P_j(t_k) + [\hat{x}_j(t_k) - \hat{x}(t_k)][\hat{x}_j(t_k) - \hat{x}(t_k)]') \quad (12)$$

当目标角度估计误差超过角度跟踪门限,或者距离误差超过一个距离波门,则宣布目标丢失,终止跟踪。

4 仿真实验

本文采用自适应任务调度机制和IMM-PDA滤波器技术实现机载相控阵雷达的TAS功能,在兼顾搜索的同时能对多个目标稳定、精密跟踪。并搭建了包括雷达探测模型、载机运动模型和目标运动模型的仿真环境对算法进行仿真验证。在IMM-PDA算法中采用了CV, CA, CT三种模型的卡尔曼滤波器,模型间概率转移矩阵取值为

$$\begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.05 & 0.1 & 0.85 \end{bmatrix}$$

仿真条件为

(1)载机匀速直线运动,速度135m/s,高度5000m。

(2)三个空中目标,目标1蛇形机动,初始速度175m/s,机动段法向加速度15m/s;目标2匀速直线运动,速度180m/s;目标3水平圆周运动,初始速度235m/s,机动段法向加速度20m/s,初始状态目标与载机相向运动,高度比载机分别低2000m、3000m、4000m。

(3)雷达测量数据的帧周期为30ms,距离测量误差为10m,径向速度测量误差为0.5m/s,角度测量误差为6mrad(0.344度)。

跟踪仿真试验如图2所示。由于采用自适应的任务调度机制,使各跟踪目标获得了较高且稳定的数据更新率,IMM-PDA滤波算法保证了高效的数据相关及对目标机动过程的稳定跟踪,通过对目标距离、径向速度以及角度的联合滤波,在惯性直角坐标系下对目标进行估值,最终取得良好的跟踪效果。对其中机动较大的目标3的跟踪误差进行了统计,如图3和图4所示。表1对各目标的跟踪误差进行了统计,可以看出对三个目标都具有较高的跟踪精度。

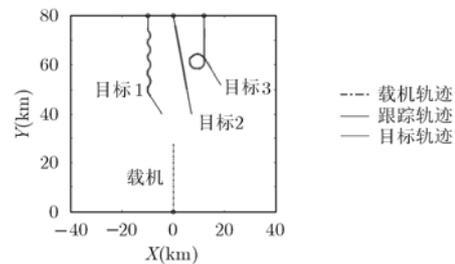


图2 仿真中载机和目标的水平运动态势

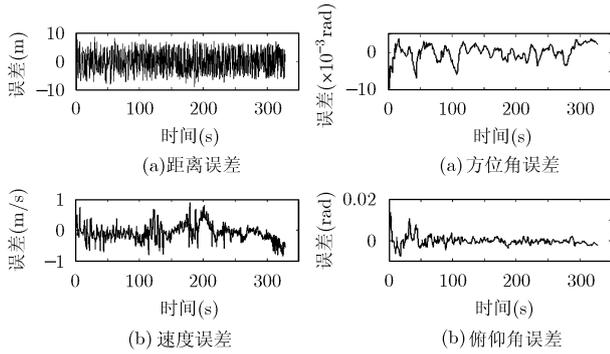


图 3 对目标 3 的距离和径向速度跟踪误差

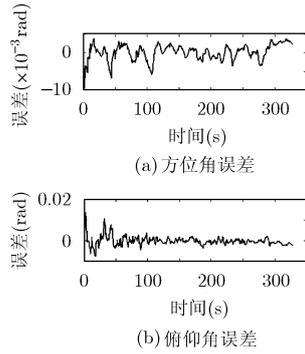


图 4 对目标 3 的方位角和俯仰角跟踪误差

表 1 各目标跟踪误差统计

序号	距离(m)	径向速度(m/s)	方位角(mrad)	俯仰角(mrad)
目标 1	2.17	0.20	2.11	2.05
目标 2	1.98	0.19	1.87	1.69
目标 3	2.15	0.21	2.07	1.96

5 结束语

本文提出了相控阵雷达通过采用一种基于自适应的任务调度机制和 IMM-PDA 滤波器技术, 通过对目标距离、径向速度以及角度的联合滤波, 在惯性直角坐标系下对机动目标进行估计, 对多目标跟踪进行更新和维持, 实现了进行搜索的同时, 又能对复杂机动多目标稳定精密跟踪。仿真试验的验证结果表明, 本文算法具有对机动目标跟踪稳定, 跟踪

精度高, 工程上易于实现等特点。

参考文献

- [1] 张光义. 相控阵雷达系统. 北京: 国防工业出版社, 1994: 26-35.
- [2] 何友等. 雷达数据处理及应用. 北京: 电子工业出版社, 2006: 186-196.
- [3] 曾光. 多功能相控阵雷达自适应调度算法研究及应用. [硕士学位论文], 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- [4] 王峰. 相控阵雷达资源自适应调度研究. [硕士学位论文], 西安: 西北工业大学, 2002.
- [5] Anderson J and Hong Lang. Sensor resource management driven by threat projection and priorities. *Information Sciences*, 2008, 178(8): 2007-2021.
- [6] 蔡庆宇, 薛毅, 张伯彦著. 相控阵雷达数据处理及其仿真技术. 北京: 国防工业出版社, 1997: 156-168.
- [7] 赵艳丽. ECM 下基于相控阵雷达的跟踪算法研究. [硕士学位论文], 长沙: 国防科学技术大学, 2002.
- [8] Wintenby J and Krishnamurthy V. Hierarchical resource management in adaptive airborne surveillance radars. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2): 401-420.

曹正林: 男, 1958 年生, 研究员, 长期从事机载雷达系统方面研究。
 杨向忠: 男, 1965 年生, 博士, 从事机载雷达跟踪方面研究。
 刘卫华: 男, 1977 年生, 博士, 从事机载雷达多目标跟踪方面研究。