Radar Science and Technology

DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-2337. 2013. 02. 003

# 基于相控阵雷达的群目标准自适应 调度策略研究

#### 耿文东

(装备学院,北京 101416)

摘 要: 群目标是指空间间距、运动方向与速度基本一致的多目标集合,该集合内的目标具有平均电影特性。对这种特殊目标群的跟踪算法研究已经较为深入,但其调度策略研究尚存在很大欠缺。为此,根据相控阵雷达资源调度灵活的特点,针对群目标调度策略尚存在欠缺的问题,在分析了传统相控阵雷达调度策略的基础上,剖析了群目标的特性,提炼了群目标跟踪调度策略的要素。在此基础上,提出了相控阵雷达群目标跟踪准自适应调度策略,并进行了仿真分析。仿真结果表明,所提出的准自适应调度策略能够有效地提高相控阵雷达的跟踪能力。

关键词:相控阵雷达;群目标;调度策略;平均电影特性

中图分类号: TN958, 92; TN957 文献标识码: A 文章编号: 1672-2337(2013)02-0125-05

# Research on Quasi-Adaptive Scheduling Strategy for Tracking Group Target in Phased Array Radar

GENG Wen-dong

(The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Group target is a set of multiple targets with the same space gap, moving direction and speed, which has the feature of average film. Although the tracking algorithm of this special target group has been researched profoundly, there is vacancy for the scheduling strategy study of this group target. In order to solve the scheduling question, first, the traditional scheduling strategy of phased-array radar is analyzed according to its flexibility of resource scheduling and the shortage of group target scheduling. Then, the essential elements of the scheduling strategy for tracking group target are refined after analyzing the characteristic of the group target. Finally, quasi-adaptive scheduling strategy for tracking group target in phased-array radar is proposed on the basis of above analysis. The simulation result shows that the presented quasi-adaptive scheduling strategy can effectively improve the tracking ability of phase-array radar.

Key words: phased-array radar; formation target; scheduling strategy; average film feature

# 1 引言

相控阵体制雷达打破了机械扫描雷达波束驻留时间、扫描方式、发射功率以及数据率固定等限制,具有多波束指向、驻留时间、发射功率及时间资源分配可控等特点,能够同时实现对多目标的搜索与跟踪<sup>[1]</sup>。尽管如此,任何一部相控阵雷达的资源总是有限的,如何利用其有限的资源跟踪尽可能多的目标就成为了相控阵雷达目标跟踪的

重要问题之一。因此,设计师们对于具有间距、速度相对稳定的多目标集合提出了群目标跟踪的思想,以节省雷达资源。群目标作为一种彼此间距很小、运动方向基本一致的多目标集合,其跟踪的基本思想是放弃单目标跟踪而采用队形跟踪。队形跟踪利用了群目标的平均电影特性<sup>[2-3]</sup>,以队形中心等效量测为基础实现群目标的整体跟踪。

尽管相控阵雷达多目标跟踪调度策略已经比较成熟,但群目标跟踪的调度策略的研究尚待进一步深入。故此,在借鉴相控阵雷达多目标跟踪

调度策略的基础上,对影响群目标跟踪的主要因素和调度策略等问题进行了分析,提出了群目标跟踪的准自适应调度策略,并与固定模板调度策略进行了对比分析。

# 2 传统多目标跟踪调度策略分析

确定相控阵雷达多目标跟踪的调度策略,通 常主要考虑如下问题:

#### (1) 确定操作需求

根据操作的重要性和它们对雷达系统资源的依赖程度将所有操作进行分类。

#### (2) 确定工作方式与操作优先级

多目标环境下,根据操作需求调度程序会同时面临多种请求,并且这些请求很可能竞争同一时间槽。而由于受到雷达系统资源限制,这些请求显然无法同时满足。为此,必须事先规定各种工作方式的优先级。优先级数量越多雷达系统的作战效率越高,然而对系统资源的要求也越高。因此,是在作战效率与雷达系统资源之间的折衷。

#### (3) 确定调度间隔

调度间隔就是系统控制程序调用调度程序的时间间隔。调度间隔的大小主要取决于伺服系统回路最快的响应时间,即取决于最高频率跟踪伺服(跟踪采样率)的时间。

#### (4) 确定约束雷达操作的因素

一是时间资源的约束。任何一个雷达事件从 波束定位到该事件的完成均需要一定的时间开 销,自然选定的调度间隔内可能实现的雷达事件 也就限定了。二是能量资源的约束。获得任何一 个关于目标的信息雷达都需要消耗一定的能量, 而且不同的工作方式要求不同宽度和数量的脉冲 波形,即占空比不同,因此,设计调度策略时不仅 需要考虑瞬时占空比,还应该考虑一定时间隔 内(若干个调度间隔)的平均占空比。三是计算机 资源的约束。每一个雷达事件后,雷达回波经信 号处理送到雷达数据处理系统进行处理,因而需 要占用计算机的时间与存储资源。四是雷达硬件 选择的约束。包括电源的负载能力及稳定性、发 射管的性能、移相器的材料以及单位时间内的移 相次数等。

#### (5) 确定调度类型

经典调度方式一般分为四种:一是固定模板

策略,是指在每一个调度间隔内分配相同的时间 间隔,用于一组固定的雷达事件调度,仅限于单一 功能的雷达。这种方法的优点是设计简单,所用 的计算机资源最少;缺点是效率低、灵活性和适应 能力差、对雷达硬件依赖严重和不利于雷达波形 和能量调整。二是多模板策略,是指预先设定若 干个固定模板,不同的固定模板匹配于相应的雷 达使用环境,适用于有限功能的雷达。多模板策 略的优点除具有固定模板的优点外,还具有一定 的灵活性和适应能力;缺点基本与固定模板相同。 三是部分模板策略,是指在调度间隔内预先设定 一个或若干个雷达事件,以维持某种最小程度的 操作,同时,允许在剩余时间内按照操作优先级和 约束条件安排其他操作,这种策略实质上是一种 部分自适应策略,适用于多功能雷达。部分模板 策略的优点是效率高、有利于波形和能量调整、可 以自由地修改设计且对环境具有中等程度的灵活 性和适应性;缺点是要求中等程度的计算机时间 和存储器开销,难以设计与分析。四是自适应调 度策略,是指在不同工作方式优先级和操作约束 下,在雷达资源允许的范围内,为调度间隔确定最 佳雷达事件序列的调度方法。所谓最佳雷达事件 序列,就是满足:与动态的雷达环境相适应;与规 定的工作方式的优先级相适应;充分利用了雷达 系统资源且不超过它们的约束范围;各种事件请 求安排均匀,能够避免峰值资源请求的事件序列 就是最佳雷达事件序列。其优点是效率非常高、 具有与雷达工作环境匹配的适应能力、对雷达硬 件变化不敏感以及能够灵活地调度能量和波形: 缺点是设计复杂且计算机资源开销极高。

# 3 群目标跟踪调度策略的要素

#### 3.1 任务规划

任务规划是调度策略与雷达面临的战斗任务结合起来综合考虑的结果。按照防御的基本场景设定,雷达发现远距离处密集目标群若干,数量不详,实施单目标跟踪困难,需要采取中心等效量测跟踪工作方式;到达一定距离的空域后分离为更多的小规模群目标,经过分离检测仍然采用中心等效量测跟踪工作方式;每个小规模群目标进一步分离为单目标,出现了单目标与群目标混合的场景。因此,雷达群目标跟踪的任务确定为单目

标与群目标混合跟踪。远距离以群目标跟踪为主;中距离以群目标与单目标混合跟踪为主;近距 离以单目标跟踪为主,也就是相当于传统的多目 标跟踪工作方式了。

#### 3.2 优先级确定

由群目标跟踪面临的任务可知,调度程序会同时面临多种请求,并且这些请求很可能同时提出。为此,在有限雷达资源前提下,必须事先规定各种工作方式的优先级。按照上述任务规划,群目标跟踪的目的是尽可能实施单目标跟踪,并兼顾目标的密集程度以及雷达的多目标跟踪能力,将以群目标与单目标混合并存的工作方式为主。按照威胁程度,优先级分七级:

紧急工作方式。用于雷达系统的紧急启动, 以应付可能的突发事件。

专用工作方式。用于完成群目标分离检测所 必须执行的工作方式,以确定敌方的企图以及是 否发射了攻击武器,并及时捕获分离出来的目标。

关键工作方式。用于威胁级别高的单目标跟踪,以及在时间允许情况下,因为任务冲突而暂时搁置于较低级别的雷达事件优先级的临时提高等。

群目标工作方式。用于监视区域内密集点迹 群目标航迹起始,因为尽快形成群目标有利于节 省雷达资源,所以将其置于较高的优先级。

近距离工作方式。即中、近距离目标的搜索与跟踪,主要是因为近距离目标反应时间短、威胁程度大而赋予较高的优先级。

远距离工作方式。即远距离目标的搜索与跟踪,用于完成群目标航渡过程中群目标的跟踪以及其他小规模群目标、单目标的合并检测,或完成攻击任务后群目标返航时合并所需要执行的工作方式。

日常勤务工作方式。即日常的测试与维修维护,用于雷达开机前的检测与事后的状态恢复,一般给予最低的优先级。

当然,对于具体的雷达系统,优先级的设定需要视其作战任务而定。例如,对于主动式制导雷达,为拦截敌方攻击武器,需要把跟踪制导己方拦截导弹置于很高的优先级。总之,优先级数量是在调度效率、计算机处理时间、存储器占用量及目标分类方法之间的折衷。

#### 3.3 资源与设计条件约束

#### (1) 资源与条件约束

群目标跟踪资源约束因素与传统多目标跟踪资源约束是一致的,这些资源主要包括雷达的能量、时间、带宽,以及计算机的时间、存储量<sup>[2]</sup>等。一般在无干扰情况下,搜索状态耗费雷达的时间资源;存在干扰情况下,搜索耗费雷达的时间和能量资源;单位时间内多次远距离搜索可能使雷达饱和,单位时间内更新过多的航迹则会使计算机饱和,近距离目标因角度变化很快而给予更高的数据率时同样会使计算机饱和;跟踪状态耗费计算机时间资源(通常跟踪是搜索的 1.5 倍)<sup>[1-2,4]</sup>。因此,设计时需要在需求与可能之间折衷考虑。

设计条件约束除了雷达硬件水平约束外,由 于群目标自身的特点,还应该重点考虑波形设计、 驻留时间、搜索方式与跟踪方式等特殊要求。

#### (2) 变长度调度间隔设计

我们知道,传统多目标跟踪调度间隔是调用一次子程序所安排的执行雷达事件时间的长度。 作为计算机程序体系结构的基础,调度间隔决定 了雷达控制回路中主要子程序的执行频率,也就 相当于确定了支持调度间隔内工作方式处理能力 的极限。同时,调度间隔还决定了支持子程序和 其他内务处理子程序的执行频率,如果这些子程 序以调度执行频率的整数倍运行,那么处理的总 开销就会达到最小。

对于群目标跟踪而言,由于在每个调度间隔内计算机必须完成调度雷达在下一时间间隔内执行的事件、群目标形成以及对上一次执行时间间隔内采集到的数据进行检测与跟踪处理三项任务,因此,在跟踪频率一定的情况下,需要对群目标与单目标跟踪应采取变长度调度间隔,以达到高效、合理、综合的利用雷达系统资源的目的。

# 4 群目标准自适应调度策略研究

传统多目标跟踪雷达面临的动态环境是:

- (1) 新目标的出现与已跟踪目标的丢失;
- (2) 依据威胁严重程度对目标数据率的调整;
- (3) 临时赋予的其他任务。

对于群目标跟踪而言,还存在新目标的分群 检测与群起始、群目标的合并与分离检测等更多 的动态任务环境。正是这些相较于传统多目标跟 踪调度策略的特殊功能和步骤,要求我们在设计 群目标跟踪调度策略时除了考虑正常的约束外, 还应该重点考虑一些特殊需求。

- (1)波形与驻留时间的自适应捷变能力。由于雷达搜索状态下耗费雷达的时间和能量资源、跟踪状态耗费计算机时间资源,而群目标相较于单目标又占有更大的空间区域,所以,波形设计需要在雷达的目标容量、雷达威力、群目标的规模、单目标的数量以及跟踪精度(数据率)等因素之间折衷考虑。对远距离群目标,宜采用较宽的发射波形和相对长的驻留时间,以尽快形成群目标;同理,对中、近距离的群目标与单目标混合情况下,宜采用较窄的群目标发射波形与较长的驻留时间和更窄的单目标跟踪发射波形与较短的驻留时间。
- (2)相对较高的计算机配置。群目标跟踪能够减少需要跟踪的航迹数量,同时减少了计算机的辅助操作,但其代价是不减少雷达资源消耗的同时,增加了计算机的负担。这些负担主要体现在群目标稳定跟踪时的合并与分离检测上,因为这些操作是传统多目标跟踪调度策略所没有的。所以,必须适当提高计算机的配置以避免计算机发生饱和。
- (3)与波形捷变能力相适应的搜索方式。相控阵雷达拥有多种灵活的搜索方式,通常采用重点区域搜索、远区与近区同时搜索、多波束同时搜索等。对于雷达未发现目标时,宜采用重点区域搜索方式,以对重点区域分配更多的能量、增加驻留时间或大时宽脉冲来保证更远的作用距离,并增加搜索数据率以确保及时发现目标。一旦发现目标,就应该采用已知重点搜索区域的远区与近区同时搜索方式,保证群目标的尽快形成与跟踪。
- (4) 边搜索边跟踪与精密闭环跟踪相结合的 跟踪方式。采用边搜索边跟踪与单目标精密闭环 跟踪相结合的方式,用于满足群目标与单目标混 合的情况。对群目标采用边搜索边跟踪的跟踪方式,单目标采用闭环跟踪方式。同时,预留若干波 束保证其他区域新目标的搜索与跟踪。在目标数 量超过雷达负载能力的情况下,根据需要和资源 的使用情况,可以临时调整目标间距准则,以保证 雷达系统不饱和。

有人说有多少调度策略设计师就有多少调度 策略方法[5],这种说法虽有夸张,但也道出了调度 策略设计的多样性。群目标跟踪调度策略设计同 样具有这种多样性。在上节所述的四种经典调度 方式中,固定模板策略显然不仅效率低而且无法 适用于群目标跟踪的需要:多模板策略虽然具有 一定的可行性,但不能满足需要灵活波形设计等 需求,同时,改变工作模板时需要关闭发送机;自 适应策略倒是能够满足上述所有需求,但实现起 来过于复杂且资源消耗过大;部分模板策略具有 兼顾多模板策略与自适应策略优点的能力。因 此,在调度策略灵活性与相对简单易行之间折衷 考虑,设计一种同时具有多模板的简单与部分模 板灵活性的调度策略,即准自适应调度策略,也可 以称为多固定模板-多部分模板调度策略。这种调 度策略采用了多固定模板与多部分模板逐步逼近 自适应调度策略的方法,将多种单目标跟踪置于 多固定模板的调度策略下,而将群目标跟踪置于 多部分模板策略下,根据需要在若干个模板之间 切换。这种准自适应调度策略采用的方法,类似 于用若干个简单函数逐步逼近并近似表达某个复 杂函数的方法一样。

一般对中高空目标与低空目标的单目标跟踪 来说,单纯的中高空目标根本不需要脉冲串的波 形方式,而单纯的低空目标也仅需要脉冲串的方 式。但当中高空与低空目标并存的情况下,显然 波形设计要复杂得多,需要处理二者并存的情景。 同时,按照目标距离可以分为远、中、近目标,所 以,可以采用三模板策略满足单目标跟踪需求,三 个模板策略用于群目标跟踪,总计六个模板样式 即逼近了自适应调度策略,从而既达到了设计相 对简单,又不失灵活的目的。准自适应调度策略 实现的关键是不同工作方式之间人工或自动切换 及滤波器参数的及时调整。在模板切换功能设计 时,需要注意的是尽可能在切换时保持占空比基 本一致,以避免发射机打火而出现掉高压现象的 发生。当两种工作方式切换时占空比差别较大 时,采用发射若干过渡脉冲增加占空比的方法来 消除这种差别。鉴于目前国内尚没有采用群目标 跟踪调度策略的模板,因此,文中对群目标跟踪准 自适应调度策略以定性研究为主,准自适应调度 模板如表1所示。

#### 表 1 群目标跟踪准自适应调度策略模板

 単目标
 群目标

 腹踪
 搜索

 自由调度区域

## 5 仿真分析

Richard A. Baugh 给出的经验法则<sup>[5]</sup>认为,一个雷达系统的优先级一般不超过 12 个,并给出了典型战术防空系统按递减顺序的 10 个优先级排列:专用方式、拦截方式、关键时间方式、特殊请求、高优先级跟踪、低优先级跟踪、搜索方式、仿真、系统诊断与空操作。为此,下面将以固定模板等间隔时间调度方式为例,以跟踪目标数量多少为评价依据进行对比分析。

假设仿真条件为:某分时多波束相控阵雷达的硬件、能量、计算机资源、调度间隔等资源一定;目标总数 60 个,7 机组成群目标 3 个,均匀分布在20°×20°范围内。雷达等间隔时间调度情况下能够同时跟踪 10 个目标,分时多波束 10 个,波束宽度为 3°×2°,雷达电扫描范围为 30°×20°。按照跟踪目标数量最大和精跟踪数量最大准则,同时跟踪目标数量的仿真结果如表 2 所示。仿真结果表明,准自适应调度策略具有很大的灵活性,并且能够提高总体目标跟踪能力。

表 2 跟踪目标数对比表

调度策略	精跟踪 目标数量	跟踪 群目标数量	跟踪 目标总数	任务 完成率
固定模板	10	0 3	10 21	15 % 35 %
准自适应调度策略	10 7	0	10 28	15 % 46 %

## 6 结束语

分析了传统多目标跟踪调度策略的工作方式 与优先级的确定、调度间隔、雷达约束因素和经典 的调度类型等,针对群目标跟踪发生的雷达动态环境变化,确定了群目标跟踪优先级的七级划分、已知重点搜索区域的远区与近区同时搜索方式、边搜索边跟踪与单目标精密闭环跟踪相结合的跟踪方式等。在此基础上,提出了准自适应调度策略,并定性地研究了这种调度策略的实现方法。最后,以跟踪目标数量为依据,对比分析了同等条件下雷达的跟踪能力,结果证明了所提出调度策略的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 徐振来. 相控阵雷达数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,2009:153-169.
- [2] Wang Huai-li, Wang De-sheng, Tian Li-sheng, et al. A New Algorithm for Group Tracking[C] // 2001 CIE International Conference on Radar, Beijing: [s. n.], 2001;1159-1163.
- [3] Geng Wen-dong, Liu Hong-ya, Dong Zheng-hong, et al. A Study of Kalman-Based Algorithm for the Maneuvering Group-Target Tracking[C] // 2006 CIE International Conference on Radar, Shanghai: [s. n.], 2006:1-4.
- [4] 蔡庆宇,薛毅,张伯彦. 相控阵雷达数据处理及其发展技术[M]. 北京:国防工业出版社,1997:173-195.
- [5] 邓桂福,刘华林,胥雷. 远程相控阵搜索参数优化设计 [J]. 雷达科学与技术,2012,10(1):32-36. DENG Gui-fu, LIU Hua-lin, XU Lei. Optimization of Search Parameters of Long Range Phased Array Radar [J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(1):32-36. (in Chinese)

#### 作者简介.



**耿文东** 男,1966年11月出生,辽宁 人,博士,高级工程师,无线电定位技 术分会专业委员,北京市电子学会雷 达专委会委员,研究方向为信息融合、 雷达系统及数据处理。

E-mail:gwd1968@126.com