

文章编号: 1671-7449(2024)05-0552-07

基于GPDA-IMM和时间管理的相控阵 雷达多目标跟踪算法

张利平, 赵俊梅, 刘丹, 陈昌鑫, 孙传猛

(中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 多功能相控阵雷达具有灵活性强、跟踪能力强的优势。为了提高相控阵雷达目标跟踪器精确度, 进行相控阵雷达能量调节和任务执行的科学管理, 通过合理调整机动目标和非机动目标的回访率, 进而实现搜索、跟踪时间资源管理。设计了广义概率数据关联-交互式多模型(Generalized Probability Data Association-Interacting Multiple Model, GPDA-IMM)算法, GPDA运算量小, IMM综合了无迹和容积卡尔曼滤波和粒子滤波多模型滤波的特点, 且优化权重因子, 达到了较好跟踪性能。最后, 通过仿真平台模拟8个运动目标的现实场景, 结合时间管理和目标跟踪调整回访率, 进行大量的仿真实验, 证明了算法对不同目标类型和机动状态的有效性和实用性。

关键词: 相控阵雷达; 广义概率数据关联(GPDA); 交互式多模型(IMM); 目标跟踪; 时间管理

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024064

引用格式: 张利平, 赵俊梅, 刘丹, 等. 基于GPDA-IMM和时间管理的相控阵雷达多目标跟踪算法[J]. 测试技术学报, 2024, 38(5): 552-558.

ZHANG Liping, ZHAO Junmei, LIU Dan, et al. Multi-target tracking algorithm of phased array radar based on GPDA-IMM and time management[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(5): 552-558.

Multi-Target Tracking Algorithm of Phased Array Radar Based on GPDA-IMM and Time Management

ZHANG Liping, ZHAO Junmei, LIU Dan, CHEN Changxin, SUN Chuanmeng

(School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Multifunctional phased array radar has the advantages of strong flexibility and tracking ability. In order to improve the accuracy of the phased array radar target tracker, the scientific management of energy regulation and task execution of the phased array radar is carried out. The time and resource management of searching and tracking is realized by adjusting the return rate of maneuvering targets and non-maneuvering targets reasonably. In this paper, a generalized probability data association(GPDA-IMM) algorithm is designed with a small computational load. IMM combines the features of untracked and volumetric Kalman filter and particle filter multi-model filter, and optimizes the weight factor to achieve better tracking performance. Finally, through the simulation platform, the realistic scenes of eight moving targets were simulated, and a large number of simulation experiments were carried out combining time management and target tracking to adjust the return rate, proving the effectiveness and practicability of the algorithm for different target types and maneuvering states.

Key words: phased array radar; generalized probability data association(GPDA); interacting multiple model(IMM); target tracking; time management

收稿日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(62001428); 国家自然科学基金资助项目(62003315)

作者简介: 张利平(1980-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事目标跟踪和机器学习研究。E-mail: zhangliping@nuc.edu.cn。

0 引言

相对传统的机械式扫描雷达,多功能相控阵雷达解决了大型天线物理尺寸和机械转动之间的矛盾,利用电子方法实现了波束无惯性快速扫描,能较好地完成机动目标的搜索感知、识别确认和精确跟踪等任务,具有较强的波束快速扫描、抑制杂波、抗干扰、探测识别、目标跟踪和分类能力^[1]。随着电子信息技术、数字信号技术和新型材料等的迅猛进步,相控阵雷达不断朝着多功能、自适应、数字化、智能化、轻型化方向深度发展,不仅被广泛应用到防空火控、反导预警、舰载预警、远程预警、空军目标监视电子对抗和航天测控等军事领域,而且在天气气象、智能汽车、航空交通、能源勘测、水利防洪、海洋监测等民用领域广泛应用^[2]。相控阵雷达是多功能、多模式、多资源管理与任务调度的软硬件综合系统,无机机械惯性扫描为其灵活性带来了便利,也使其执行任务时依赖资源管理^[3]。资源管理贯穿于相控阵雷达的各项任务之中,是发挥其优越性的核心之处,影响着雷达任务执行能力、运行的灵活性和效率、探测和跟踪能力等方面^[4-5]。

裴忠钎^[6]针对杂波环境下的多机动目标跟踪,将快速数据关联和交互式多模型结合。喻晨龙等^[7]在跟踪加搜索工作模式下,研究了波束调度策略。卢建斌等^[8]基于协方差控制的资源管理方法,最有效地分配雷达资源。胡子军等^[9]研究自适应搜索加跟踪方法,解决了雷达资源分配问题。

防空作战中,火控系统要对空中目标精确定位并进行精准打击。相控阵雷达在多目标跟踪和跟踪精度具有明显优势,为了对空袭态势进行综合分析,适应空中目标的多样性、环境变化的多样性,充分发挥相控阵雷达的资源管理潜能,高质量地完成作战要求,本文主要利用时间资源管理、广义概率数据关联-交互式多模型(Generalized Probability Data Association, Interacting Multiple Model, GPDA-IMM)算法进行目标跟踪,提高多功能相控阵雷达的跟踪效果,进而提高防空系统的整体性能。

1 多功能相控阵雷达

多功能相控阵雷达可以搜索目标,确认新的轨迹,并重新访问轨迹以更新状态。为了执行这

些功能,多功能雷达通常由资源管理器管理,该资源管理器创建用于搜索、确认和跟踪的任务。这些任务是根据优先级和时间安排的,因此在每个时间步长,多功能雷达都可以将其波束指向所需的方向。

多功能雷达必须在提供足够的以被跟踪目标为中心的波束和留出足够的时间搜索新目标之间取得平衡。其中一种雷达管理方法为主动跟踪,它可以定义每个被跟踪目标的重访率,而不管其机动状态如何,并将剩余时间留给新目标搜索。随着更多的目标被跟踪,雷达可以执行更少的搜索任务,也可以不频繁地跟踪每个目标。显然,如果目标数量很大,雷达可能会不堪重负。主动跟踪以相同的方式处理所有轨迹,这使其成为一种基于模式的资源管理算法。管理雷达的另一种更复杂的方法是基于每个轨迹的特性,例如,使用轨迹属性,如状态不确定性协方差的大小、轨迹是否机动等。当使用这些属性时,雷达资源管理被称为自适应跟踪。本文将利用轨迹是否机动进行自适应跟踪。

2 GPDA-IMM 跟踪器

雷达探测到目标后,将探测结果反馈给目标跟踪器,跟踪器需执行多项操作。跟踪器需要维护一个目标轨迹列表,这些轨迹是对感兴趣区域中目标状态的估计。如果不能将检测分配给跟踪器已经维护的任何轨迹,则跟踪器启动新的轨迹。在大多数情况下,新轨迹代表的是真目标还是假目标尚不清楚。首先,创建一个具有暂定状态的轨迹,如果获得了足够的检测,则轨迹被确认。同样地,如果没有检测被分配给轨迹,则该轨迹被放弃。如果轨迹有一些错过的更新,跟踪器会删除该轨迹。本文选择 GPDA-IMM 跟踪器,充分发挥二者算法的优势和综合性能。

2.1 IMM 和 JPDA

交互式多模型(Interacting Multiple Model, IMM)是比较常用的一种滤波算法,其在跟踪精度、自适应能力、灵活性等方面具有独特的优势,目标运动模型可以在多种模型之间切换,适合目标特性随时间变化系统的状态估计。在 IMM 方法中,假设存在有限多个目标模型,每一个模型对应不同机动输入水平。在计算好每个模型为正确的后验概率后,便可以利用每个模型正确时的状

态估计加权求和,获取最后的状态估计,加权因子便是正确模型的后验概率。

IMM算法可以在计算精确度和运算开销之间做好折中,扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)是一种解析逼近的次优算法,其利用线性化逐步逼近非线性函数。无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)是Sigma点卡尔曼滤波,其可提高估计精确度和减少非线性滤波的复杂度。容积卡尔曼滤波(Cubature Kalman Filter, CKF)算法简单,计算量小,滤波精度高,采用容积点集解决贝叶斯滤波的积分问题。粒子滤波(Particle Filter, PF)是非参数的滤波方法,通过序贯蒙特卡罗方法来实现递归贝叶斯滤波,可以有效地处理非线性、非高斯问题。为了应对环境的复杂性和各种噪声不确定性,经过EKF、UKF、CKF、PF不同组合,多次仿真实验,IMM算法最终采用3个模型集,分别为基于恒定速度模型的UKF、基于恒定加速度模型的CKF和PF,通过3个模型的交互融合,输出最终的状态估计值。

联合概率数据关联(Joint Probabilistic Data Association, JPDA)是基于贝叶斯理论的数据关联方法,其通过概率加权的方法关联当前运动目标的全部确定量测,非常适合杂波环境下的多目标跟踪。JPDA的最大优势是良好的多目标性,在算法中,一般按照多目标跟踪门之间的几何关系划分为多个聚。在每个聚中,其中任何一个跟踪门与其他至少存在一个目标的跟踪门之间的交集是非空。算法需要依次处理每个聚中量测和目标。

现代战场环境复杂多变,对空中目标跟踪需求高,要求算法在密集多回波环境下实时跟踪多个目标,对于机动目标跟踪性能、跟踪自适应能力要求非常高。IMM作为经典的滤波算法,鲁棒性强;JPDA作为多目标的回波关联算法,精度高。结合IMM和JPDA二者的优势和特点,可以满足大部分目标跟踪的需求。但是,JPDA算法处理数据时,联合事件是全部候选旧波函数的指数函数,随着回波密度逐步增加,计算量会同时增大。

2.2 GPDA-IMM算法

为了弥补JPDA算法计算量大的劣势,采用广义概率数据关联算法(Generalized Probability Data Association, GPDA),它是全局最优的数据关联算法,同时结合IMM的优势,充分利用构造统一波门的思想,将GPDA和IMM有机结合,不

仅可以降低运算量,而且可以改善机动目标系统跟踪性能。GPDA-IMM算法对每个子滤波器均利用统一的波门进行回波确认,进而使子滤波器采样同样的回波集合,从而保证预测波门全局最优,计算量增加不大。算法流程如下^[10]:

初始条件:模型集中模型的初始状态为 $P_j(0|0)$,协方差为 $\hat{x}_j(0|0)$,模型切换矩阵为 P_{ij} ,初始模型概率向量 $\mathbf{u}_j(0)$, $i, j \in [1, 2, 3, \dots, M]$, M 为模型中的集中模型数量。 F 为量测与目标统计距离的聚概率矩阵。 $\mathbf{x}(k)$ 为 k 时刻状态, $F(k)$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{z}(k)$ 为 k 时刻量测, $H(k)$ 为观测矩阵, $\nu(k)$ 为量测噪声, $\mathbf{s}(k)$ 为协方差, $\mathbf{K}(k)$ 为增益阵, $L(k)$ 为模型似然, γ 是门限值。

(1) 输入交互

对于第 j 个模型,有

$$\hat{\mathbf{x}}_j^o(k|k) = \sum_{i=1}^M \mathbf{u}_{ij}(k) \hat{\mathbf{x}}_i(k|k), \quad (1)$$

$$P_j^o(k|k) = \sum_{i=1}^M \mathbf{u}_{ij}(k) [P_i(k|k) + (\hat{\mathbf{x}}_i(k|k) - \hat{\mathbf{x}}_j^o(k|k))(\hat{\mathbf{x}}_i(k|k) - \hat{\mathbf{x}}_j^o(k|k))^T], \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_j^o(k) = \sum_{i=1}^M P_{ij} \mathbf{u}_i(k), \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_{ij}(k) = \frac{P_{ij} \mathbf{u}_i(k)}{\mathbf{u}_j^o(k|k)}. \quad (4)$$

(2) 一步预测

对于第 j 个模型,有

$$\hat{\mathbf{x}}_j(k+1|k) = F_j(k+1, k) \hat{\mathbf{x}}_j^o(k|k), \quad (5)$$

$$P_j(k+1|k) = F_j(k+1, k) P_j^o(k|k) \cdot \quad (6)$$

$$F_j^T(k+1, k) + Q_j(k),$$

$$\hat{\mathbf{z}}_j(k+1) = H_j(k+1) \hat{\mathbf{x}}_j(k+1|k), \quad (7)$$

$$\mathbf{s}_j(k+1) = H_j(k+1) P_j(k+1|k) \cdot$$

$$H_j^T(k+1) + R_j(k+1). \quad (8)$$

(3) 预测综合

$$\hat{\mathbf{x}}_j(k+1|k) = \sum_{j=1}^M \mathbf{u}_j^o(k+1|k) \hat{\mathbf{x}}_j(k+1|k), \quad (9)$$

$$P(k+1|k) = \sum_{j=1}^M \mathbf{u}_j^o(k+1|k) P_j(k+1|k), \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{z}}(k+1) = \sum_{j=1}^M \mathbf{u}_j^o(k+1|k) \hat{\mathbf{z}}_j(k+1), \quad (11)$$

$$\mathbf{S}(k+1) = \sum_{j=1}^M \mathbf{u}_j^o(k+1) \{ \mathbf{S}_j(k+1) + [\hat{\mathbf{z}}_j(k+1) - \hat{\mathbf{z}}(k+1)] \cdot [\hat{\mathbf{z}}_j(k+1) - \hat{\mathbf{z}}(k+1)]^T \}. \quad (12)$$

(4) 回波确认

对任意回波 $z_k(k+1)$, 构造统计距离, 即

$$d^2(k+1) = (z_k(k+1) - \hat{z}(k+1))^T, \quad (13)$$

$$S^{-1}(k+1)(z_k(k+1) - \hat{z}(k+1)) \leq \gamma. \quad (14)$$

(5) 互属概率计算

对于 m 个量测数量, T 个目标数量, 构造聚概率矩阵 $F \triangleq [f_{it}]$, 互属概率为

$$\beta_{it}(k+1) = \frac{1}{c} \left(\rho \epsilon_{it} \prod_{\substack{tr=0 \\ tr \neq i}}^T \sum_{r=0}^{m_k} \epsilon_{tr} + (1-\rho) \xi_{it} \prod_{\substack{r=0 \\ r \neq i}}^{m_k} \sum_{tr=0}^T \xi_{tr} \right), \quad (15)$$

$$\epsilon_{it} = \frac{f_{it}}{\sum_{i=0}^m f_{it}}, \quad \xi_{it} = \frac{f_{it}}{\sum_{i=0}^T f_{it}}, \quad (16)$$

式中: 下标 tr 为目标标号; r 为量测标号; c 为归一化参数; ρ 为权重因子。

(6) 状态更新和模型概率更新

$$\hat{x}_j(k+1|k+1) = \hat{x}_j(k+1|k) +$$

$$K_j(k+1) \sum_{i=1}^m \beta_{it}(z_i(k+1) - \hat{z}(k+1)), \quad (17)$$

$$K_j(k+1) = P_j(k+1|k) H_j^T(k+1) S_j^{-1}(k+1), \quad (18)$$

$$P_j(k+1|k+1) = P_j(k+1|k) - [1 - (\alpha+1)\beta_{0r}(k+1)].$$

$$K_j(k+1) S_j(k+1) K_j^T(k+1) + \tilde{P}_j(k+1), \quad (19)$$

$$\tilde{P}_j(k+1) = K_j(k+1) \{ \beta_{0r}(k+1) [\tilde{z}_j(k+1) \cdot z_j^T(k+1) - \bar{v}(k+1)\bar{v}^T(k+1) + \sum_{i=1}^m \beta_{it}(k+1) v_{ij}(k+1) v_{ij}^T - \bar{v}(k+1)\bar{v}^T(k+1)] \} K_j^T(k+1). \quad (20)$$

各模型发生的概率为

$$u_j(k+1) = \frac{L_j(k+1) \sum_{i=1}^m u_i^0(k) p_{mi}}{\sum_{i=1}^m L_j(k+1) \sum_{i=1}^m u_i^0(k) p_{mi}}, \quad (21)$$

$$\frac{\exp(-1/2 \tilde{z}_j^T(k+1) S_j^{-1}(k+1) \tilde{z}_j(k+1))}{\sqrt{|2\pi S_j(k+1)|}}. \quad (22)$$

(7) 输出交互

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \sum_{j=1}^M u_j(k+1) \hat{x}_j(k+1|k+1), \quad (23)$$

$$P(k+1|k+1) = \sum_{j=1}^M u_j(k+1) [P_j(k+1|k+1) + (\hat{x}_j(k+1|k+1) - \hat{x}(k+1|k+1)) \cdot (\hat{x}_j(k+1|k+1) - \hat{x}(k+1|k+1))^T]. \quad (24)$$

2.3 优化权重因子

权重因子 ρ 影响互属概率, $\rho=0$, 说明只有目标复用; $\rho=1$, 说明只有量测复用; $0 < \rho < 1$, 说明目标、量测均复用。利用线性规划函数进行优化权重因子, 满足 $F \cdot \rho \leq P_{ij}, 0 \leq \rho \leq 1$, 最后需要满足 $\rho = \frac{\max(\rho) + \min(\rho)}{2}$ 。

3 相控阵资源管理

多功能相控阵雷达有执行多项任务的优点, 但也有更高的成本和更复杂的逻辑。一般来说, 雷达用于执行任务的资源是有限的。如果资源用于跟踪任务, 则在跟踪任务完成之前, 这些资源不可用于搜索任务。由于这种资源分配, 使用多功能相控阵雷达时的一个关键部分是资源管理。

相控阵雷达可以发挥波速扫描的灵活机动性实现搜索加跟踪(Track and Search, TAS)的工作方式, 即搜索任务和跟踪任务完全可以利用时间分隔原理独立的完成工作^[11]。TAS的工作模式是基于时间交替的方式调整搜索波速和跟踪波速的任务安排, 解决雷达搜索、目标确认、目标跟踪、跟踪丢失处理等情况, 进而实现相控阵雷达搜索与跟踪的功能。基于TAS模式的相控阵雷达时间资源管理主要是搜索时间管理和跟踪时间管理两个方面。工作模式帧周期为搜索执行时间和跟踪执行时间二者之和。通过搜索和跟踪时间的资源配置, 便于目标检测和跟踪的事件调度与雷达控制^[12-14]。针对目标出现的随机性、多样性和复杂性, 本文没有采取固定搜索数据率和跟踪数据率, 而是对非机动目标和机动目标分别设置不同的回访率, 进而实现目标跟踪的自适应控制, 提高跟踪效果。目标机动时, 通过不同的回访率满足每种类型的跟踪任务, 资源管理器实时调整搜索和分配的时间, 自适应地增加跟踪任务和分配时间。

图 1 为相控阵雷达资源管理流程图。本文中相控阵雷达管理器重点完成搜索、检测确认、跟踪 3 个环节的工作, 一般轨迹确认时间比较短, 具

体步骤为：① 模拟仿真一般从雷达资源管理器开始，雷达资源管理器开始工作，雷达便传输波形，模拟回波，并应用信号处理器生成目标检测；② 跟踪器对目标检测进行处理，为目标创建轨迹，然后这些轨迹便返回雷达资源管理器；③ 基于运动轨迹和模拟场景的知识，雷达资源管理器不断更新轨迹作业，并为下一次停留选择作业任务；④ 雷达资源管理器不断发送回波进行目标检测和确认工作，进而与跟踪器不断交互信息完成目标跟踪工作。

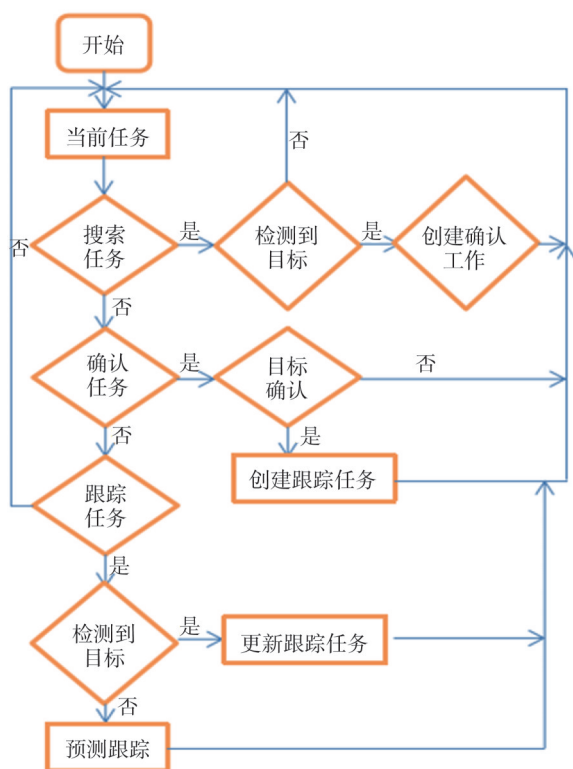


图1 雷达资源管理流程图

Fig. 1 Flow chart of radar resource management

4 仿真分析

为了证明算法的有效性和鲁棒性，仿真实验分别设置多个机动目标的几种场景，每个目标有对应的运动轨迹，均设置坐标系中的位置、到达航路点的时间、航路点的速度、航路点的方向等参数。雷达每秒有30束波束用于搜索、确认、跟踪任务，方位分辨率和高度分辨率分别为2 m和10 m，目标的雷达截面积(RCS)为2 m²，空域方向扫描范围 $[-90^\circ, 90^\circ]$ ，仰角扫描范围 $[-9.9^\circ, 2^\circ]$ 。

对于仿真实验，作以下假设：

1) 目标的数量及其初始位置通常是事先未知

的，因此，雷达必须持续搜索感兴趣的区域以便找到目标。另外，雷达需要在每个目标进入雷达覆盖区后立即对其进行检测并建立跟踪。

2) 目标机动的周期是预先未知的。如果知道目标没有机动，雷达可以不频繁地重新访问目标。然而，由于机动的开始和结束时间是未知的，雷达必须足够频繁地重新访问每个轨迹，以便能够识别机动何时开始和结束。

相控阵雷达首先从搜索工作开始。如果检测中存在目标，雷达会在同一方向上安排确认作业，以确保该目标的存在而不是误报。跟踪任务优先级设置为最高，确认任务具有比搜索任务更高的优先级。如果检测得到确认，则建立跟踪，并创建跟踪作业以在给定的重新访问时间之后执行。如果检测未得到确认，则原始检测被视为假警或者虚警，并且不创建轨迹。如果当前作业是跟踪作业，则雷达执行检测、更新跟踪并创建未来的跟踪作业。根据优先级和时间分配参数，继续执行下一个工作任务。

为了验证算法运行时间的特点，设定3个机动目标跟踪，JPDA-IMM使用357.233 s，GPDA-IMM使用265.476 s；设定6个机动目标跟踪，JPDA-IMM使用784.085 s，GPDA-IMM使用571.156 s。比较不同目标个数的运行时间，说明GPDA-IMM运行时间比较短。表1列出了2种算法的跟踪率和失跟率。

表1 2种算法的跟踪率和失跟率

Tab. 1 Tracking rate and loss tracking rate of two algorithms

算法	跟踪率/%	失跟率/%
JPDA-IMM	97.2	2.8
GPDA-IMM	99.6	0.4

为了进一步验证GPDA-IMM算法的有效性，设置8个不同目标运动轨迹，其中包括相近目标，便于考察算法是否可以区分远近目标。8个目标运动灵活，且均不完全保持匀速运动，故可以认为某个时间是机动目标，另外一个时间是非机动目标。图2和图3分别为第1种回访率模式下目标跟踪图和时间分配图，其机动目标回访率设置为3 Hz，非机动目标回访率设置为1 Hz。图4和图5分别是第2种回访率模式下目标跟踪图和时间分配图，其机动目标回访率设置为1 Hz，非机动目标回访率设置为3 Hz。图6和图7分别是第3种回访率模式下目标跟踪图和时间分配图，其机动目标回访率设置为2 Hz，非机动目标回访

率设置为 2 Hz。

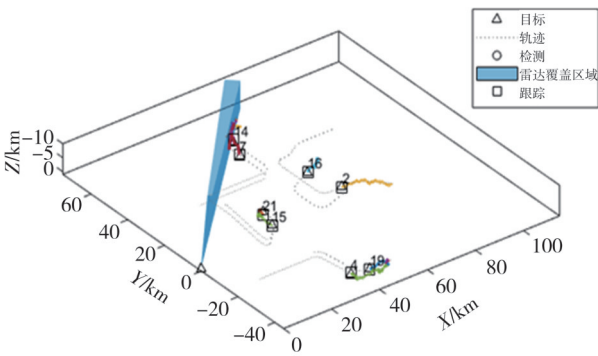


图 2 模式 1 下的目标轨迹跟踪图

Fig. 2 Target trajectory tracking diagram in mode one

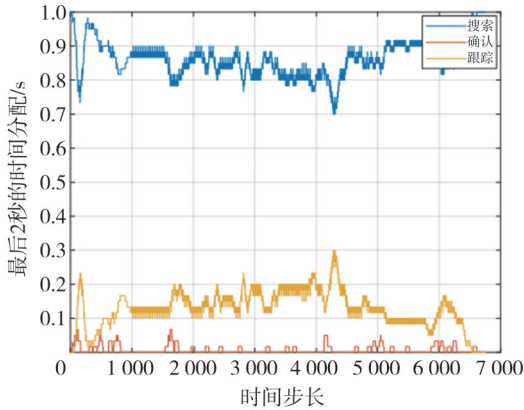


图 3 模式 1 下的搜索和跟踪时间分配图

Fig. 3 Time allocation diagram of search and tracking in mode two

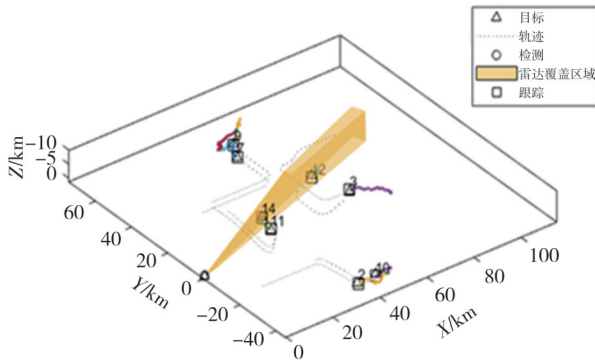


图 4 模式 2 下的目标轨迹跟踪图

Fig. 4 Target trajectory tracking diagram in mode two

图 2、图 4、图 6 均表示对 8 个目标进行了准确跟踪。图 3、图 5、图 7 为 3 个不同模式下的搜索和跟踪时间分配图, 从图中可以看到刚开始搜索占用整个时间, 而检测确认占用雷达的时间非常短。实验中, 雷达更新频率为 30 Hz, 对于模式 1 来说, 在含有 8 个目标的情况下, 全部目标均为机动, 雷达管理器在 1.25 次更新中进行 1 次目标更新, 大约 70% 时间用于搜索和 30% 时间用于跟踪; 模式 2 的搜索和跟踪时间大约各占 50%; 模式 3 的搜索和跟踪时

间大约分别为 50%~60% 和 40%~50%。通过设置和调整机动目标的回访率, 对目标运动的航迹进行波速重照, 可以根据目标数量及目标运动状态自适应地跟踪目标。在调整机动目标回访率时, 需要综合考虑实际环境, 如果过大, 雷达将在跟踪任务上占用资源, 降低搜索时间; 如果过小, 会对目标确认跟踪增加漏检与失跟的概率。在仿真实验过程中, 也有失跟情况, 但是通过调整回访率也会及时重新搜索捕获目标并维持跟踪。

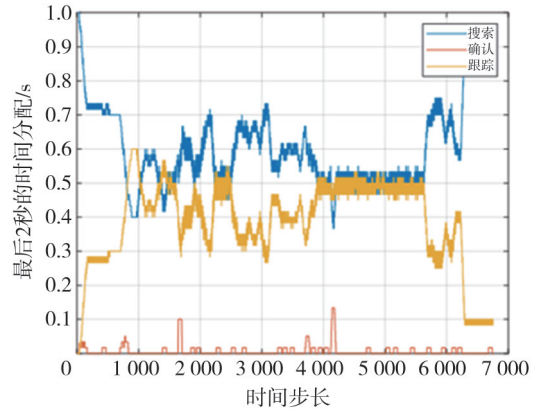


图 5 模式 2 下的搜索和跟踪时间分配图

Fig. 5 Search and tracking time allocation diagram in mode two

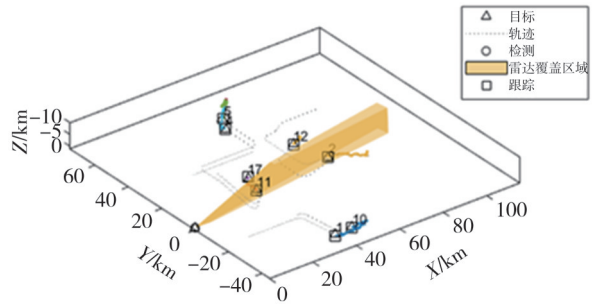


图 6 模式 3 下的目标轨迹跟踪图

Fig. 6 Target trajectory tracking diagram in mode three

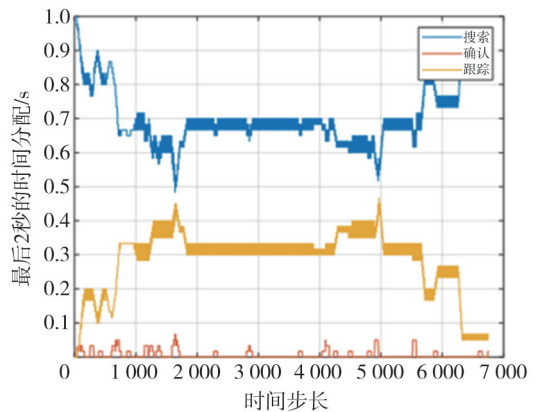


图 7 模式 3 下的搜索和跟踪时间分配图

Fig. 7 Search and tracking time allocation diagram in mode three

表2为不同回访率模式下的跟踪准确率和失跟踪率,失跟踪率包括虚警、假警或误跟等情况。总得来说,在GPDA-IMM跟踪算法下可以合理调整机动目标、非机动目标的回访率,较好地完成目标跟踪。

表2 3种模式的跟踪率和失跟踪率

Tab. 2 Tracking rate and loss tracking rate of three models

模式	跟踪率/%	失跟踪率/%
模式1	98.9	1.1
模式2	99.3	0.7
模式3	99.5	0.5

5 结论

IMM滤波器在贝叶斯框架中处理多个运动模型,该方法通过对机动目标一次使用多个模型来解决目标运动的不确定性。IMM算法同时处理UKF、CKF、PF所有模型,并根据它们更新的权重在模型之间切换。JPDA算法对于多目标有效,但其计算量较大,故进行算法改进,采用GPDA算法。最终融合GPDA和IMM的各自优势进行目标跟踪。同时,利用相控阵雷达的时间资源管理调整回访率,不论机动目标还是非机动目标,都可以高效地完成搜索和跟踪任务。通过大量的仿真实验,证明了算法的鲁棒性和有效性。而面对环境多样性、随机性,目标运动的不确定性,针对不同数量的目标数量以及跟踪精度要求,还有跟踪提升空间,可以将回访率智能灵活调整,适应现场环境多变性。

参考文献:

- [1] 赵士璋. 舰载多功能相控阵雷达的建模与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [2] 刘代. 雷达资源分配与目标跟踪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [3] 陈智伶. 相控阵雷达自适应资源优化管理[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [4] 卢建斌. 相控阵雷达资源优化管理的理论与方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [5] 牟升. 多功能相控阵雷达的数字仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [6] 裴忠轩. 基于交互式多模型快速数据关联的多机动目标跟踪算法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [7] 喻晨龙, 李凡, 谭贤四, 等. 基于TAS模式的多目标跟踪波束调度策略[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1445-1450.
YU Chenlong, LI Fan, TAN Xiansi, et al. Beam schedule strategy for multiple target tracking in TAS mode [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(7): 1445-1450. (in Chinese)
- [8] 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.
LU Jianbin, HU Weidong, YU Wenxian. Resource management algorithm based on covariance control for phased array radars [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 402-408. (in Chinese)
- [9] 胡子军, 翟海涛. 基于任务驱动的机载相控阵雷达TAS调度算法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(3): 536-541.
HU Zijun, ZHAI Haitao. Task-driven TAS scheduling algorithm for airborne phased array radar [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(3): 536-541. (in Chinese)
- [10] 潘泉. 现代目标跟踪与信息融合 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [11] 刘宏伟, 严俊坤, 张鹏, 等. 一种面向多任务调度的相控阵雷达资源管理方法[J]. 现代雷达, 2023, 45(6): 8-16.
LIU Hongwei, YAN Junkun, ZHANG Peng, et al. A resource management method for phased array radar for multi task scheduling [J]. Modern Radar, 2023, 45(6): 8-16. (in Chinese)
- [12] 丁海婷, 周琳, 刁伟峰. 基于背包问题的多相控阵雷达多目标跟踪时间资源管理算法[J]. 兵工学报, 2021, 42(5): 997-1003.
DING Haiting, ZHOU Lin, DIAO Weifeng. Knapsack problem-based algorithm for time resource management of multiple phased array radars for multiple targets tracking [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(5): 997-1003. (in Chinese)
- [13] 郭宇华, 夏正欢, 张涛, 等. 空间目标小型相控阵雷达探测技术[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(4): 446-452.
GUO Yuhua, XIA Zhenghuan, ZHANG Tao, et al. Miniaturized phased array radar technology for detection of space target [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(4): 446-452. (in Chinese)
- [14] 郝孝智, 付亚平, 李芳, 等. 垂直大气湍流影响下的天气雷达回波信号优化检测方法[J]. 测试技术学报, 2024, 38(1): 60-65.
HAO Xiaozhi, FU Yaping, LI Fang, et al. Optimal detection method of weather radar echo signal under the influence of vertical atmospheric turbulence [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(1): 60-65. (in Chinese)