

## 目标动态威胁度驱动的分布式组网相控阵雷达资源优化分配算法

宋晓程<sup>①</sup> 李 陟<sup>①</sup> 任海伟<sup>②</sup> 易 伟<sup>\*②</sup>

<sup>①</sup>(北京电子工程总体研究所 北京 100854)

<sup>②</sup>(电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731)

**摘要:** 针对分布式组网相控阵雷达多目标跟踪(MTT)场景, 该文提出一种目标动态威胁度驱动的波束分配与驻留时间联合优化算法。首先, 在采用分布式组网架构的基础上, 推导包含波束和驻留时间分配的贝叶斯克拉美罗界(BCRLB)。其次, 基于目标实时运动状态构建综合威胁度评估尺度, 按照威胁度为不同目标设计基于跟踪精度参考门限和贡献度的效用函数, 以此衡量资源在多目标间的优先分配关系。随后, 将该效用函数结合组网相控阵雷达系统资源, 建立了目标动态威胁度驱动的波束分配与驻留时间联合优化模型。最后, 采用一种基于奖励的迭代下降搜索算法进行求解。仿真结果表明, 相较于平均资源分配方法, 所提算法具备对若干差异性目标的跟踪精度需求感知能力, 能够在基于多目标威胁度评估的基础上, 有针对性地分配跟踪资源, 从而有效提高组网相控阵雷达面对不同威胁度目标时的综合跟踪精度。

**关键词:** 组网相控阵雷达; 目标威胁度评估; 贝叶斯克拉美罗界; 多目标跟踪; 资源分配

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2023)03-0629-13

DOI: 10.12000/JR22240

**引用格式:** 宋晓程, 李陟, 任海伟, 等. 目标动态威胁度驱动的分布式组网相控阵雷达资源优化分配算法[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 629–641. doi: 10.12000/JR22240.

**Reference format:** SONG Xiaocheng, LI Zhi, REN Haiwei, *et al.* Threat-driven resource allocation algorithm for distributed netted phased array radars[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 629–641. doi: 10.12000/JR22240.

## Threat-driven Resource Allocation Algorithm for Distributed Netted Phased Array Radars

SONG Xiaocheng<sup>①</sup> LI Zhi<sup>①</sup> REN Haiwei<sup>②</sup> YI Wei<sup>\*②</sup>

<sup>①</sup>(Beijing Institute of Electronic Engineering, Beijing 100854, China)

<sup>②</sup>(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** For the Multi-Target Tracking (MTT) of distributed netted phased array radars, this paper proposes a joint beam and dwell time allocation algorithm driven by dynamic threats. First, a Bayesian Cramer-Rao Lower Bound (BCRLB), including beam and dwell time allocation, is derived. Then, a comprehensive threat evaluation scale is constructed based on the real-time motion state of the target, and a utility function based on the tracking accuracy reference threshold and contributed weights is designed for targets with different threats to measure the relationship of resource allocation prioritization among multiple targets. Afterward, an optimal distribution model of the joint beam and the dwell time driven by the dynamic threat of the target is established; the utility function is combined with the resources of the netted phased array radar system. Finally, the problem is solved using a reward-based iterative descent search algorithm, and the effectiveness of the algorithm is verified via simulation. The simulation results show that the proposed algorithm can determine the tracking accuracy requirements of different targets and allocate tracking resources based on the multi-target threat

收稿日期: 2022-12-22; 改回日期: 2023-02-09; 网络出版: 2023-02-22

\*通信作者: 易伟 kussoyi@gmail.com \*Corresponding Author: YI Wei, kussoyi@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(62231008, U19B2017), 中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2020ZB029)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62231008, U19B2017), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYGX2020ZB029)

责任主编: 严俊坤 Corresponding Editor: YAN Junkun

assessment results, thereby improving the comprehensive tracking accuracy of networked phased array radars.

**Key words:** Netted phased array radar; Threat assessment; Bayesian Cramer-Rao Lower Bound (BCRLB); Multi-Target Tracking (MTT); Resource allocation

## 1 引言

相控阵雷达即相位控制电子扫描阵列雷达, 是一种通过电子方法实现天线波束指向在空间中扫描的阵列天线雷达<sup>[1]</sup>。其具有天线波束快速扫描的特点, 能实现搜索、跟踪与多种雷达功能。相较于常规雷达波束扫描、目标分配、驻留时间等固定配置, 其具有波束捷变能力, 可以灵活地对波束和时间资源进行控制<sup>[2]</sup>。另外, 由于相控阵雷达通过分时多波束的工作模式, 采用搜索加跟踪(Track And Search, TAS)模式完成多目标跟踪(Multi-Target Tracking, MTT)任务, 其中每个跟踪任务持续一段特定时间分配安插在搜索任务的间隔中, 调整该段时间的跟踪目标和驻留时间的分配可以同时改善目标的总体跟踪精度<sup>[3-5]</sup>。

随着以电子干扰、低空入侵、反辐射导弹和隐身目标为首的“四大威胁”的出现, 单个雷达已经无法满足任务需求, 而组网雷达系统多视角探测目标的特点, 有效提高了防空系统的“四抗”能力<sup>[6,7]</sup>, 获得了空间分集增益、波形分集增益、目标探测威力、目标跟踪精度等指标的显著提升<sup>[8]</sup>。但组网雷达系统相较于单基地雷达, 其多节点、多资源、多维度的特性, 导致其任务执行能力严重依赖于多个雷达节点的资源协同管理方式。另外, 面对复杂多变的战场态势, 威胁评估作为关键的数据融合、决策和推理部分, 是实现资源分配的前提条件, 建立合理有效的威胁评估模型对提高指挥决策效能有重要意义。组网相控阵雷达在侦查过程中, 目标不仅包括战略轰炸机、战斗机、攻击卫星飞机、预警机、加油机、大型干扰飞机等, 还包括不同发射阵地、打击区域、射程、速度、预警时长的各类弹道导弹<sup>[9,10]</sup>。由于目标特性、战术特点、轨道特征等方面存在差异, 对雷达系统的威胁度不同, 正确合理评估差异化目标, 完成跟踪资源的优先级动态分配, 是围绕在组网相控阵雷达系统上的又一难题。因此, 急需一种在实时量化目标威胁度的基础上的行之有效的资源分配算法, 以提升组网雷达系统的全局MTT能力。

不同于单基地相控阵雷达, 组网相控阵雷达由于雷达节点间组织结构复杂, 不仅要考虑节点的跟踪资源, 还要考虑其信息融合架构, 为资源管理技术提出了更大的挑战。文献<sup>[11]</sup>针对组网相控阵雷达反导场景, 提出了一种目标分配联合驻留时间分配算法, 通过最小化归一化贝叶斯克拉美罗界

(Bayesian Cramer-Rao Lower Bound, BCRLB), 有效地将每个节点的有限时间资源分配给多个目标, 从而在过载情况下提高MTT性能。文献<sup>[12]</sup>对组网相控阵雷达多目标定位应用, 提出了孔径、功率和带宽资源的分配策略, 该策略旨在满足给定目标定位精度的同时, 通过分配一定约束下的孔径、发射功率和有效带宽, 降低组网相控阵雷达的总发射功率。目前针对组网相控阵雷达的工作大多针对闭环信息处理流程, 而对于组网多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达系统的研究成果则扩展到信息融合架构方面。文献<sup>[13]</sup>应用集中式架构的MIMO雷达网络进行功率资源的优化分配, 该架构下每个雷达节点向融合中心发送原始数据, 在数据传输过程中会消耗大量的能量和带宽。同样针对集中式架构, 文献<sup>[14]</sup>提出了MIMO组网雷达同时多波束(Simultaneous Multibeam, SM)工作模式下的波束选择联合功率分配问题, 该算法采用统一量纲的归一化BCRLB作为目标函数, 并通过引入辅助变量的方式进行优化问题求解, 有效提高了雷达系统多目标跟踪性能。同样针对工作在SM模式的集中式组网MIMO雷达系统, 文献<sup>[15]</sup>提出了一种自适应的时空资源与波形联合优化算法, 该算法对雷达子阵列数、系统采样周期、发射能量、多波束方向矢量和发射波形等参数进行联合优化, 达到了在提高整体跟踪精度的同时, 最大限度地减少资源消耗的目的。文献<sup>[16]</sup>则针对频谱共存环境下的MTT资源分配问题, 提出并实现了以组网雷达节点选择、发射功率和驻留时间为变量, 以最小化多目标跟踪BCRLB为目标, 以满足给定的组网雷达射频资源和通信基站最大可容忍干扰能量阈值为约束的联合优化算法。为了改进资源分配算法的鲁棒性, 文献<sup>[17]</sup>针对多目标跟踪问题, 提出一种基于服务质量框架(Quality of Service, QoS)的稳健功率分配算法, 该算法构建了任务效用函数量化不同功率分配下的跟踪性能, 从而解决了功率分配模型在某些资源严重缺少场景下, 无法产生可行方案的缺陷。

不同于集中式组网架构, 分布式组网架构中雷达节点共享本地估计信息, 在保持系统鲁棒性的同时, 具有显著降低通信需求的优势。同时由于网络构型组织连接去中心化的优势, 该架构在无人机、航天器、舰船编队等方面有广泛的应用<sup>[18]</sup>。针对分

布式MIMO雷达网络，文献[19]推导了理想检测条件下的预测条件克拉美罗下界，提出并解决了节点选择联合功率资源分配问题。在此基础上，文献[20]基于QoS准则，设计了一种基于精度的可缩放目标函数，可同时根据不同的目标优先次序保持高度的资源分配灵活性，实现了对分布式组网雷达系统的波束和发射功率联合分配。文献[21]针对分布式相控阵组网雷达的目标跟踪问题，提出了一种联合发射资源管理和波形选择策略，该策略通过联合调整若干工作参数，包括发射功率、驻留时间、波形带宽和脉冲长度，以预测BCRLB和拦截概率为性能评估尺度建立双目标优化模型，最终达到提升目标跟踪精度和低截获性能的目的。

上述研究成果为组网相控阵雷达资源分配问题奠定了坚实基础，但仍然存在一些不足之处。首先，针对多目标跟踪场景，已有研究大多集中于组网MIMO雷达，缺乏对分布式组网相控阵雷达的研究。其次，已有研究也没有考虑目标动态威胁度驱动的差异化资源分配。威胁评估作为信息融合技术中的关键决策部分，由于目标威胁评估的结果会直接影响到雷达资源控制，如何实时评估监视区域内的目标威胁度，优先控制雷达系统对威胁度更高目标分配资源进行高精度测量和准确识别，是提高多目标综合跟踪性能、实施有效拦截作战的关键因素。

本文的主要贡献是基于威胁度自适应评估的分布式组网相控阵雷达资源优化分配算法研究。首先，针对分布式组网相控阵雷达系统，提出了目标动态威胁度驱动的多目标认知跟踪闭环框架，该框架以每跟踪时刻的节点回波信号为输入，经性能评估和优化问题形成求解等环节，输出下一帧的系统资源分配方案，用于下一时刻的节点回波信号生成。其次，提出了以目标运动状态实时更新、以组网雷达为整体的综合威胁度，结合衡量单目标跟踪性能下界的BCRLB，提出了跟踪精度参考门限和贡献度根据目标威胁度实时可调的效用函数，建立了MTT场景下组网相控阵雷达的波束分配与驻留时间联合优化问题。最后，由于该问题属于混合整数非线性非凸优化问题，本文采用一种基于奖励的迭代下降搜索算法进行问题求解。仿真结果验证了提出算法在具备多目标威胁度评估能力的基础上，重点关注较高优先级目标在多个差异目标中的资源分配，从而显著提高全局多目标跟踪精度。

## 2 分布式组网相控阵雷达系统描述

### 2.1 分布式组网相控阵雷达系统资源及约束

考虑一个由 $N$ 个相控阵雷达节点组成的组网雷

达系统，每个相控阵雷达节点通过电子扫描产生分时多波束，对有效监视区域中的多个目标进行跟踪<sup>[4]</sup>。为了简化问题，合理假设建立如下：(1)目标总数已知，且各目标广泛地分布在组网相控阵雷达的监视区域内。(2)雷达节点在每一个扫描周期内对处在其监视区域的多个目标都各进行一次扫描。(3)每个节点由均匀天线阵构成，其阵列构型及天线孔径已知。

假设空间中有 $Q$ 个在空间中彼此分开的点目标，在 $k$ 时刻目标 $q$ 的位置为 $(x_q^k, y_q^k)$ ，速度为 $(\dot{x}_q^k, \dot{y}_q^k)$ 。假设雷达节点 $n(n=1, 2, \dots, N)$ 位于二维平面内，位置为 $(x_n, y_n)$ 。相控阵雷达节点发射波束与跟踪目标之间的选择关系以布尔变量 $u_{n,q}^k$ 表示，则雷达系统的波束分配矩阵可表示为

$$\mathbf{u}^k = \begin{bmatrix} u_{1,1}^k & u_{1,2}^k & \cdots & u_{1,Q}^k \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ u_{N,1}^k & u_{N,2}^k & \cdots & u_{N,Q}^k \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $u_{n,q}^k = 1(\forall n = 1, 2, \dots, N; \forall q = 1, 2, \dots, Q)$ 表示目标 $q$ 被雷达 $n$ 的发射波束照射；否则， $u_{n,q}^k = 0$ 。

由于相控阵雷达在波束扫描过程中波束资源有限，只能对至多 $B_n$ 个目标进行照射，可表示为

$$\sum_{q=1}^Q u_{n,q}^k \leq B_n \quad (2)$$

即波束分配矩阵第 $n$ 行的和小于 $B_n$ 。

同样，假设在同一个跟踪时刻，同一目标只能被至多 $L_{\max}$ 个节点照射，该约束可表示为

$$\sum_{n=1}^N u_{n,q}^k \leq L_{\max} \quad (3)$$

即波束分配矩阵每一列的和小于 $L_{\max}$ 。

组网相控阵雷达对多目标的驻留时间分配方案以矩阵形式记作

$$\mathbf{T}^k = \begin{bmatrix} T_{1,1}^k & T_{1,2}^k & \cdots & T_{1,Q}^k \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ T_{N,1}^k & T_{N,2}^k & \cdots & T_{N,Q}^k \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中， $T_{n,q}^k$ 代表雷达节点 $n$ 对目标 $q$ 的驻留时间，满足

$$\sum_{q=1}^Q T_{n,q}^k = T_n^{\text{total}} \quad (5)$$

$$T_n^{\min} \leq T_{n,q}^k \leq T_n^{\max} \quad (6)$$

其中， $T_n^{\text{total}}$ 、 $T_n^{\max}$ 和 $T_n^{\min}$ 为雷达参数，分别代表雷达节点 $n$ 用于跟踪的总时间上限、跟踪单一目标的时间上限和下限。



## 2.2 相控阵雷达节点信号模型

假设  $k$  时刻雷达节点  $n$  对目标  $q$  的发射波形为

$$s_{n,q}^k(t) = \sqrt{P_n} S_n(t) e^{-j2\pi f_c t} \quad (7)$$

其中,  $P_n$  为雷达节点  $n$  的发射功率,  $S_n(t)$  为雷达节点  $n$  的归一化发射信号复包络,  $f_c$  为载波频率。三者均为雷达参数, 假设不随时间改变以简化问题。

定义  $k$  时刻雷达节点  $n$  与目标  $q$  的距离为

$$R_{n,q}^k = \sqrt{(x_n - x_q^k)^2 + (y_n - y_q^k)^2} \quad (8)$$

因此,  $k$  时刻雷达接收目标  $q$  的反射信号可表示为<sup>[22,23]</sup>

$$r_{n,q}^k = h_{n,q} \sqrt{\alpha_{n,q}^k P_n} S_n(t - \tau_{n,q}^k) e^{-j2\pi f_{n,q}^k t} + n_{n,q}^k(t) \quad (9)$$

其中,  $h_{n,q}$  为目标散射截面积;  $\alpha_{n,q}^k \propto (R_{n,q}^k)^{-4}$  为信道损失;  $n_{n,q}^k(t)$  为零均值的复高斯白噪声;  $f_{n,q}^k$  表示因目标运动产生的多普勒频移;  $\tau_{n,q}^k$  表示回波时延, 计算式为

$$\tau_{n,q}^k = \frac{2R_{n,q}^k}{c} \quad (10)$$

其中,  $c$  表示光速。

## 2.3 相控阵雷达节点量测及目标运动模型

假设目标在二维空间中做匀速直线运动, 其状态向量可表示为  $\mathbf{x}_q^k = [x_q^k, \dot{x}_q^k, y_q^k, \dot{y}_q^k]^T$ 。因此, 目标状态方程可表示为<sup>[24]</sup>

$$\mathbf{x}_q^k = \mathbf{F} \mathbf{x}_q^{k-1} + \mathbf{u}_q^k \quad (11)$$

其中, 系统的状态转移矩阵  $\mathbf{F}$  具体为

$$\mathbf{F} = \mathbf{I}_2 \otimes \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{I}$  是  $2 \times 2$  的单位矩阵, 运算  $\otimes$  表示 Kronecker 积,  $T_s$  为采样时间间隔。在式(11)中,  $\mathbf{u}_q^k$  表示过程噪声向量, 服从零均值的高斯分布, 其协方差为

$$\mathbf{Q}_q^k = q_s \mathbf{I}_2 \otimes \begin{bmatrix} T_s^3/3 & T_s^2/2 \\ T_s^2/2 & T_s \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中,  $q_s$  表示过程噪声强度。

为了简化问题, 假设每个相控阵雷达节点独立工作在一定的频段, 与其他雷达节点工作频段错开, 由此雷达节点只接收目标反射的本雷达节点发射的回波信号, 组网雷达系统工作在自发自收模式。所有雷达节点按照特定的信号处理方法, 从回波信号中获取目标的径向距离和方位角信息。在不考虑虚警和漏检的影响下,  $k$  时刻雷达节点  $n$  对目标  $q$  的量测方程可表示为<sup>[5,25]</sup>

$$\mathbf{z}_{n,q}^k = \mathbf{h}_n(\mathbf{x}_q^k) + \mathbf{v}_{n,q}^k \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{h}_n(\mathbf{x}_q^k)$  为关于  $\mathbf{x}_q^k$  的非线性转移函数, 表示为

$$\mathbf{h}_n(\mathbf{x}_q^k) = [R_{n,q}^k \quad \theta_{n,q}^k]^T \quad (15)$$

其中,  $R_{n,q}^k$  由式(8)给出;  $\theta_{n,q}^k$  表示方位角, 计算式为

$$\theta_{n,q}^k = \arctan\left(\frac{y_q^k - y_n}{x_q^k - x_n}\right) \quad (16)$$

式(14)中量测噪声  $\mathbf{v}_{n,q}^k$  服从高斯分布, 其均值为 0, 协方差与雷达节点对目标的驻留时间有关, 其表达式为<sup>[26,27]</sup>

$$\mathbf{\Gamma}_{n,q}^k(T_{n,q}^k) = \text{diag}\left\{\sigma_{R_{n,q}^k}^2(T_{n,q}^k), \sigma_{\theta_{n,q}^k}^2(T_{n,q}^k)\right\} \quad (17)$$

其中,  $\text{diag}(\cdot)$  表示对角矩阵, 协方差对角线元素为  $k$  时刻目标  $q$  距离和方位角的估计均方误差 (Mean-Square Error, MSE) 的下界<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_{R_{n,q}^k}^2(T_{n,q}^k) \propto (|h_{n,q}|^2 \alpha_{n,q}^k P_n T_{n,q}^k \beta_n^2)^{-1} \\ \sigma_{\theta_{n,q}^k}^2(T_{n,q}^k) \propto (|h_{n,q}|^2 \alpha_{n,q}^k P_n T_{n,q}^k / B_{NN})^{-1} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $\beta_n$  为雷达发射信号的等效带宽;  $B_{NN}$  为雷达接收天线的波束宽度, 与接收天线的孔径有关, 为已知参数。由式(18)可知, 驻留时间显著影响测量误差大小, 随着驻留时间的提高, 对目标的量测精度得到改善。

## 3 分布式组网相控阵雷达闭环信息处理流程

组网相控阵系统通常广泛分布在一定的地理范围内。由于通信带宽和信息传输速率的限制, 采用集中式架构将严重导致实时性的降低。因此, 为了降低通信负载, 同时增强跟踪闭环流程的实时性, 本文考虑以分布式架构作为组网相控阵雷达的组织形式基础。同时, 考虑 MTT 场景中, 组网相控阵雷达感知目标运动状态差异, 进行威胁度实时评估, 以指导多目标认知跟踪闭环框架的能力生成。因此, 本节将给出目标动态威胁度驱动的多目标认知跟踪闭环框架的具体流程。

为简化问题, 合理假设组网雷达系统中各个雷达节点已通过搜索阶段生成目标局部航迹并进行局部量测与局部航迹数据关联<sup>[24]</sup>。在此基础上, 选择某个雷达节点作为融合中心, 中心将根据各节点的局部航迹完成航迹-航迹关联和航迹融合, 并生成全局航迹。进而, 融合中心评估全局航迹跟踪精度, 结合多目标威胁度评估结果, 生成组网相控阵雷达波束分配与驻留时间联合优化模型。最后, 通过求解该问题得到的资源分配方案反馈回雷达节点, 指导下一跟踪时刻对多目标的驻留时间分配,

从而实现多目标跟踪精度评估函数的最大化。如图1所示，该闭环信息处理流程按步骤可描述为：

步骤1 各个雷达节点完成本地MTT的航迹生成与数据关联，获得目标运动状态的1阶、2阶统计量  $\mathbf{x}_{n,q}^{k-1|k-1}$ ,  $\mathbf{R}_{n,q}^{k-1|k-1}$  (上标  $k-1|k-1$  表示根据  $1:k-1$  累计先验量测获得的  $k-1$  时刻的目标状态信息)，初始目标状态向量  $\mathbf{x}_{n,q}^{0|0}$  和协方差  $\mathbf{R}_{n,q}^{0|0}$  由初始的几个量测获得<sup>[24]</sup>。融合中心根据节点本地航迹融合获得全局航迹初始目标状态向量  $\mathbf{x}_q^{k-1|k-1}$  和协方差  $\mathbf{R}_q^{k-1|k-1}$ ，并根据该时刻目标估计运动状态1阶、2阶统计量进行递推预测：

$$\mathbf{x}_q^{k|k-1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_q^{k-1|k-1} \quad (19)$$

$$\mathbf{R}_q^{k|k-1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_q^{k-1|k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}_q^{k-1} \quad (20)$$

步骤2 根据多目标的预测运动状态进行实时威胁度评估。从直观上看，目标距离组网雷达中心越近，接近速度越快，航向越指向组网雷达中心，

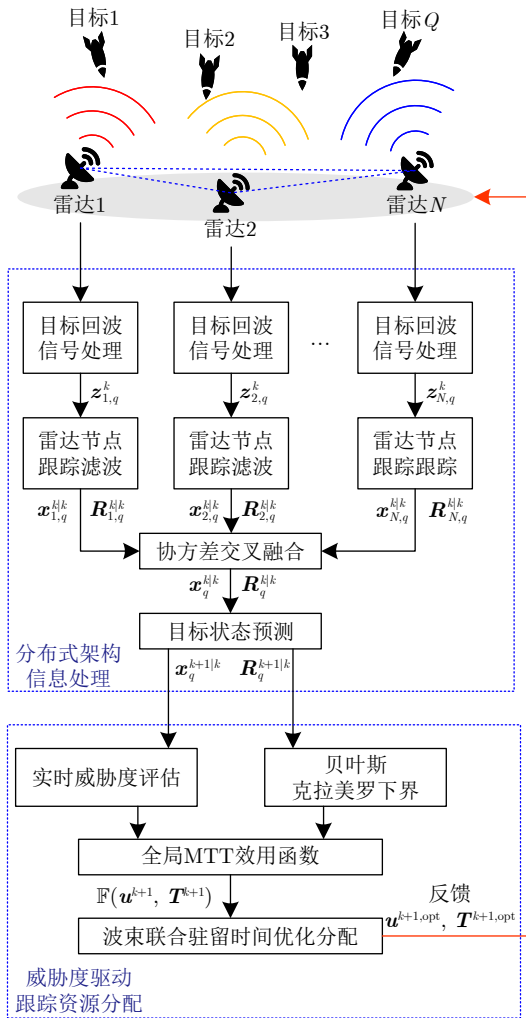


图1 组网相控阵雷达闭环信息处理流程图

Fig. 1 The flowchart of closed-loop information processing in netted phased array radars

该目标的威胁度越大。此外，由于目标在目标特性、战术特点方面存在差异，包括目标类型、杀伤能力、突防能力、命中精度、预警时长等，也会对威胁度评估指标产生影响<sup>[10]</sup>。

因此，假设目标  $q$  的影响威胁度评估的属性集合为

$$S_q^k = \{\mathbf{x}_q^{k|k-1}, \xi_q^k, \dots, \zeta_q^k\} \quad (21)$$

其中， $\xi_q^k, \dots, \zeta_q^k$  表示特定的目标属性。

威胁度由关于集合  $S_q^k$  的函数计算得出。评估函数通常分为两种：一种是对各属性进行加权平均<sup>[28]</sup>，其权值需要根据不同的跟踪场景和战场态势进行赋值，适应性较差；另一种是设定不同属性的非线性函数，综合衡量各因素对威胁水平贡献程度。此类威胁度定义方式主要包括接近最近点函数<sup>[29,30]</sup>和战术重要性标绘(Tactical Significance Map, TSM)函数<sup>[31]</sup>等。

步骤3 评估分布式架构下单目标跟踪性能，并结合实时威胁度，生成综合尺度量化全局MTT性能，用于指导下一帧的系统资源调度。具体为：基于式(19)和式(20)中的预测状态向量和协方差矩阵，在融合中心计算所有目标的BCRLB。然后，利用所有目标的BCRLB，结合目标实时威胁度，衡量全局MTT性能。分布式架构下BCRLB和目标动态威胁度驱动的MTT综合尺度将在第4节详细讨论。

步骤4 融合中心梳理组网相控阵雷达特定的系统资源变量，构建包含MTT综合尺度的最优化问题，形成符合实际物理意义和约束的优化问题。本文主要针对组网相控阵雷达的波束和驻留时间分配展开讨论，求解包含  $\mathbf{u}^k, \mathbf{T}^k$  的优化问题，得到最优解  $\mathbf{u}^{k,opt}, \mathbf{T}^{k,opt}$  分配给各个雷达节点，即  $\mathbf{u}_{n,q}^{k,opt}, \mathbf{T}_{n,q}^{k,opt}$ 。各个雷达节点又应用本节点的波束分配与驻留时间联合优化方案，即  $\mathbf{u}_{n,q}^{k,opt}, \mathbf{T}_{n,q}^{k,opt}$ ，选择性地对目标进行驻留时间的自适应分配。通过向目标发射信号，提取目标的径向距离和方位角信息，生成下一帧的目标局部量测点  $z_{n,q}^k$ 。

步骤5 在雷达节点  $n$  的本地以局部量测  $z_{n,q}^k$  完成对目标预测状态向量  $\mathbf{x}_{n,q}^{k|k-1}$  和协方差  $\mathbf{R}_{n,q}^{k|k-1}$  的更新。本文采用扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)完成雷达节点的目标跟踪<sup>[32]</sup>：

$$\mathbf{x}_{n,q}^{k|k}(\mathbf{T}_{n,q}^k) = \mathbf{x}_{n,q}^{k|k-1} + \mathbf{K}_{n,q}^k \left( z_{n,q}^k - \mathbf{H}_{n,q}^{k|k-1} \mathbf{x}_{n,q}^{k|k-1} \right) \quad (22)$$

$$\mathbf{R}_{n,q}^{k|k}(\mathbf{T}_{n,q}^k) = \left( \mathbf{I} - \mathbf{K}_{n,q}^k \mathbf{H}_{n,q}^{k|k-1} \right) \mathbf{R}_{n,q}^{k|k-1} \quad (23)$$

其中， $\mathbf{I}$  表示单位矩阵； $\mathbf{H}_{n,q}^{k|k-1}$  是式(15)中雷达节点的量测函数  $h_n(\cdot)$  在目标预测状态  $\mathbf{x}_{n,q}^{k|k-1}$  的雅可比矩阵； $\mathbf{K}_{n,q}^k$  是卡尔曼增益，计算式为

$$\mathbf{K}_{n,q}^k(T_{n,q}^k) = \mathbf{R}_{n,q}^{k|k-1} \left( \mathbf{H}_{n,q}^{k|k-1} \right)^T \left[ \mathbf{\Gamma}_{n,q}^k(T_{n,q}^k) + \mathbf{H}_{n,q}^{k|k-1} \mathbf{R}_{n,q}^{k|k-1} \left( \mathbf{H}_{n,q}^{k|k-1} \right)^T \right]^{-1} \quad (24)$$

雷达节点各自通过本地计算产生局部估计状态向量  $\mathbf{x}_{n,q}^{k|k}$  和协方差  $\mathbf{R}_{n,q}^{k|k}$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ), 通常情况下其本地信息与其他节点信息存在未知相关性。因此, 本文采用分布式架构下的协方差交叉(Covariance Intersection, CI)融合规则来融合局部雷达节点提供的1阶和2阶统计量。CI融合规则的关键特性是在不考虑雷达节点间的未知互协方差的情况下, 能够给出一致的融合估计, 同时从本质上避免了公共信息的重复计数。应用CI融合方法的目标估计状态向量和协方差矩阵为<sup>[33]</sup>

$$\mathbf{x}_q^{k|k}(\mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k) = \mathbf{R}_q^{k|k} \left\{ \sum_{n \in \mathbf{n}_q^k} \omega_n \left( \mathbf{R}_{n,q}^{k|k} \right)^{-1} \mathbf{x}_{n,q}^{k|k} \right\} \quad (25)$$

$$\mathbf{R}_q^{k|k}(\mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k) = \left( \sum_{n \in \mathbf{n}_q^k} \omega_n \left( \mathbf{R}_{n,q}^{k|k} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (26)$$

其中,  $\mathbf{n}_q^k = \{n | u_{n,q}^k = 1\}$  表示  $k$  时刻所有照射目标  $q$  的节点集合;  $\omega_n$  表示融合权重, 满足

$$\sum_{n \in \mathbf{n}_q^k} \omega_n = 1, \quad \omega_n \geq 0 \quad (27)$$

对于  $\omega_n$  如何取值的问题, 一般选择使式(26)表示的目标估计状态协方差矩阵的迹最小的优化问题进行求解。而在本文中, 为了保证算法的实时性, 并降低算法的复杂程度, 融合权重固定且已知。

从式(25)和式(26)可以看出, 资源分配方案  $\mathbf{u}_q^k$ ,  $\mathbf{T}_q^k$  将直接影响CI融合的结果。在闭环处理的下一次递归中, 将式(25)和式(26)中的目标估计状态向量和协方差矩阵按照式(19)和式(20)向前预测, 然后用于计算性能指标, 获得最优资源分配方案, 并指导下一帧的目标跟踪和数据融合。由此, 建立了完整的闭环信息处理框架。

#### 4 目标动态威胁度驱动的分布式组网相控阵雷达资源优化问题建模

一般来说, 用于提升性能的资源分配模型通常被表示为在系统资源受约束条件的情况下, 优化某一与任务效能相关的效用函数的数学问题<sup>[34]</sup>。因此, 效用函数是解决资源优化问题的关键。本文首先采用TSM函数量化多目标实时威胁度, 然后推导了分布式架构下的CI融合规则的目标估计精度下界BCRLB, 因为它提供了单目标跟踪性能的下界。

然后, 利用推导出的BCRLB, 设计了一个基于跟踪精度参考门限和贡献度的效用函数, 以量化MTT的全局性能, 同时保持针对不同威胁度目标的资源分配的高度灵活性。

##### 4.1 目标动态威胁度评估

TSM函数作为经典的威胁度评估函数, 其综合考虑了目标运动状态对威胁水平的非线性贡献度, 从数学上明确了特定时刻特定目标的战术意义<sup>[31,35]</sup>。在组网雷达多目标跟踪场景中, 每个目标对于每个雷达节点都存在特定的威胁度。根据式(19)中的目标预测状态向量  $\mathbf{x}_q^{k|k-1} = [x_q^{k|k-1}, \dot{x}_q^{k|k-1}, y_q^{k|k-1}, \dot{y}_q^{k|k-1}]^T$ , 则目标  $q$  到雷达节点  $n$  的相对距离、绝对速度和航向角为

$$\begin{cases} d_{n,q}^k = \sqrt{(x_n - x_q^{k|k-1})^2 + (y_n - y_q^{k|k-1})^2} \\ v_{n,q}^k = \sqrt{(\dot{x}_q^{k|k-1})^2 + (\dot{y}_q^{k|k-1})^2} \\ \theta_{n,q}^k = \arccos \left( \frac{\dot{x}_q^{k|k-1} (x_n - x_q^{k|k-1}) + \dot{y}_q^{k|k-1} (y_n - y_q^{k|k-1})}{d_{n,q}^k \cdot v_{n,q}^k} \right) \end{cases} \quad (28)$$

TSM函数根据目标预测状态进行实时评估, 定义目标  $q$  对雷达节点  $n$  的威胁度计算式为<sup>[31]</sup>

$$\rho_{n,q}^k = \exp \left( - \frac{(d_{n,q}^k)^2}{2 \left( 1 - \frac{\theta_{n,q}^k}{\pi} \right)^2 (k_0 v_{n,q}^k + m_0)^2} \right) \quad (29)$$

其中,  $k_0$  和  $m_0$  是预设常数。从式(29)可以看出, 目标与雷达节点的相对距离  $d_{n,q}^k$  越小, 目标绝对速度  $v_{n,q}^k$  越大, 目标的航向角  $\theta_{n,q}^k$  越小, 则  $k$  时刻目标  $q$  对雷达节点  $n$  的威胁度  $\rho_{n,q}^k$  越大。

在TSM函数评估单目标对单节点的威胁度基础上, 由于组网雷达系统中节点的重视程度不同, 引入每个节点的保护值  $p_n$  ( $p_n \in [0, 1]$ )。该保护值由节点属性、节点价值和先验信息决定, 对节点的重视程度越高, 其保护值相应越大。在此基础上, 单目标组网雷达威胁度可计算为

$$\rho_q^k = \frac{\sum_{n=1}^N p_n \rho_{n,q}^k}{\sum_{n=1}^N p_n} \quad (30)$$

从式(30)可知, 保护值与节点的重要性相关联, 并作为威胁度的权重进行加权平均, 进而综合



单目标对组网雷达内不同重要性的若干节点，形成单目标对组网雷达的综合威胁度。至此，该综合威胁度将组网雷达看作一个整体，后续的决策和调度中将根据该综合威胁度进行。

#### 4.2 分布式架构的克拉美罗下界推导

BCRLB提供了无偏估计量误差的下界。假设波束对目标 $q$ 运动状态 $\mathbf{x}_q^k$ 的无偏估计量为 $\hat{\mathbf{x}}_q^k$ ，始终满足<sup>[36]</sup>

$$\mathbb{E} \left[ \left( \hat{\mathbf{x}}_q^k - \mathbf{x}_q^k \right) \left( \hat{\mathbf{x}}_q^k - \mathbf{x}_q^k \right)^{\text{T}} \right] \succeq \mathbf{J}^{-1} \left( \mathbf{x}_q^k | \mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k \right) \quad (31)$$

其中， $\mathbf{J}(\mathbf{x}_q^k | \mathbf{T}_q^k)$ 是费希尔信息矩阵，可分解为两个矩阵之和：

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}_q^k | \mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k) = \mathbf{J}_P(\mathbf{x}_q^k) + \mathbf{J}_D(\mathbf{x}_q^k | \mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k) \quad (32)$$

其中， $\mathbf{J}_P(\mathbf{x}_q^k)$ 表示先验信息矩阵，可表示为<sup>[23]</sup>

$$\mathbf{J}_P(\mathbf{x}_q^k) = [\mathbf{Q} + \mathbf{F}\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_q^k) \mathbf{F}^{\text{T}}]^{-1} \quad (33)$$

$\mathbf{J}_D(\mathbf{x}_q^k | \mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k)$ 表示目标在所有雷达节点照射条件下的数据信息矩阵。分布式系统中通过CI融合得到的全局后验估计有如下形式<sup>[19]</sup>：

$$\mathbf{J}_D(\mathbf{x}_q^k | \mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k) = \sum_{n \in \mathbf{n}_q^k} \omega_n \left( \mathbf{H}_{n,q}^{k|k-1} \right)^{\text{T}} \cdot \left[ \mathbf{T}_{n,q}^k \left( T_{n,q}^k \right) \right]^{-1} \mathbf{H}_{n,q}^{k|k-1} \quad (34)$$

对式(32)求逆，求得BCRLB为

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_q^k | \mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k) = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_q^k | \mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k) \quad (35)$$

BCRLB的对角线元素提供了估计目标状态向量中各分量方差的下界。本文采用BCRLB矩阵估计位置分量之和的平方根作为单目标跟踪任务的性能指标，即

$$\mathbb{G}(\mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k) = \sqrt{\mathbf{C}(\mathbf{x}_q^k | \mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k)_{1,1} + \mathbf{C}(\mathbf{x}_q^k | \mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k)_{3,3}} \quad (36)$$

其中，关于 $\mathbf{C}(\mathbf{x}_q^k | \mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k)_{i,j}$ 的下标表示此矩阵中第 $i$ 行第 $j$ 列的特定元素。

由式(31)、式(32)、式(34)可知，目标跟踪精度下界即克拉美罗下界，与照射该目标的各个雷达节点分配的驻留时间具有一定函数关系。通过调整当前时刻照射该目标的驻留时间，优化克拉美罗下界，降低均方误差理论上达到的最小值，可提高该单一目标的跟踪精度。

但是，考虑实际情况，雷达时间资源有限，同一时刻分配给多个目标的时间资源相互约束。一个目标驻留时间的增加会导致其他目标驻留时间的减少，而一个目标跟踪精度随之得到提升，其他目标

跟踪精度却有所损失。为此，下一节主要基于目标威胁度评估，提供一种综合评估目标跟踪精度的方法，作为多目标跟踪性能尺度。

#### 4.3 全局MTT效用函数推导

全局MTT效用函数考虑目标的相对距离、速度和航向角以量化威胁度，并合理建模为目标的跟踪精度需求及函数增长率。首先，依据多目标威胁度对多目标跟踪精度进行预设，每个目标的跟踪精度需求以向量表示为

$$\boldsymbol{\eta}^k = [\eta_1^k, \eta_2^k, \dots, \eta_Q^k] \quad (37)$$

其中， $\eta_q^k \sim f(\rho_q^k)$ ， $f(\cdot)$ 为指定的非线性函数，可根据实际威胁度需求进行设置。

其次，将多目标威胁度进行归一化，作为其单个目标函数的权重，以此衡量不同目标对优化函数的不同贡献度，即

$$w_q^k = \rho_q^k / \sum_{q=1}^Q \rho_q^k \quad (38)$$

最后，在得到每个目标预设跟踪精度 $\eta_q^k$ 和权重 $w_q^k$ 的基础上，设计了如下形式的代价函数：

$$\mathbb{F}(\mathbf{u}^k, \mathbf{T}^k) = \max_q \{ w_q^k [\mathbb{G}(\mathbf{u}_q^k, \mathbf{T}_q^k) - \eta_q^k] \} \quad (39)$$

从式(39)数学形式可以看出，多个目标的威胁度不同，对代价函数的变化幅度也不同，威胁度越大的目标，其具有更大的权重，进而对代价函数的贡献明显；而通过设定精度需求 $\eta_q^k$ ，可以对不同威胁度目标进行跟踪精度门限预设，在资源一定的情况下，最终结果使每个目标都能逼近其跟踪精度需求，从而保证了跟踪资源不会过分倾向于某个目标，达到全局MTT精度的提高。

此外，式(39)描述了全局MTT综合性能与波束及驻留时间分配变量的函数关系，其中各个雷达节点都提供了调整波束及驻留时间分配的自由度。通过调整各个雷达节点的系统资源分配方案，以得到最大化的全局MTT综合尺度目的。因此，本文的优化问题可表示为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{u}^k, \mathbf{T}^k} \mathbb{F}(\mathbf{u}^k, \mathbf{T}^k) \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{q=1}^Q u_{n,q}^k \leq B_n, \forall n = 1, 2, \dots, N \\ & \quad \sum_{n=1}^N u_{n,q}^k \leq L_{\max}, \forall q = 1, 2, \dots, Q \\ & \quad T_n^{\min} \leq T_{n,q}^k \leq T_n^{\max}, \forall n = 1, 2, \dots, N, \forall q = 1, 2, \dots, Q \\ & \quad \sum_{q=1}^Q T_{n,q}^k = T_n^{\text{total}}, \forall n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (40)$$

具体来说, 式(40)的约束来自2.1节中式(2)、式(3)、式(5)、式(6)描述的组网相控阵雷达系统的实际跟踪模式约束。第1条约束表示一个雷达节点照射的目标数量是有限的, 第2条约束表示照射每个目标的雷达节点的最大数量是有限的, 第3条和第4条表示每个雷达节点产生波束对目标的驻留时间由于跟踪任务而受到限制。从式(40)可以看出, 制定的优化问题涉及对两个耦合变量进行优化, 即用于波束分配的布尔形式变量 $\mathbf{u}^k$ 和用于驻留时间分配的连续变量 $\mathbf{T}^k$ 。由于布尔形式变量的存在, 式(40)描述的优化问题是一个混合整数非线性非凸优化问题<sup>[37]</sup>。通过求解该优化问题, 得出最优解 $\mathbf{u}_{\text{opt}}^k, \mathbf{T}_{\text{opt}}^k$ 将指导该跟踪时刻的资源调度和量测生成。为了实时获取每个跟踪帧的资源分配方案, 高效的求解算法是至关重要的。因此, 第5节将给出针对此类问题的可行解决办法。

## 5 波束分配与驻留时间联合优化算法

对于式(40)描述的优化问题, 传统的穷尽搜索方法通过枚举 $\mathbf{u}^k$ 的所有组合, 在实现特定组合下的驻留时间分配问题。当 $\mathbf{u}^k$ 的维度很大时, 会出现组合爆炸的情况, 该算法比较复杂且计算量大, 工程实现困难。为了解决这一问题, 本文在避免进行枚举的基础上, 采用文献<sup>[20]</sup>中基于奖励的迭代下降算法实现波束分配和驻留时间的优化。

首先, 不同目标被波束照射与否, 其代价函数的变化幅度也不同。因此, 雷达节点应优先分配波束给代价函数易受影响的目标, 因此首先不考虑组网雷达物理结构, 每个节点均分配波束给各个目标, 且平均分配驻留时间, 其构建的波束分配向量 $\mathbf{u}^{k,0}$ 和驻留时间分配向量 $\mathbf{T}^{k,0}$ 为

$$\begin{cases} \mathbf{u}^{k,0} = \mathbf{1}_{N \times Q} \\ \mathbf{T}^{k,0} = \frac{1}{Q} \begin{bmatrix} T_1^{\text{total}} & \cdots & T_1^{\text{total}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_n^{\text{total}} & \cdots & T_n^{\text{total}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (41)$$

其中,  $\mathbf{1}_{N \times M}$ 表示维度 $N \times M$ 的全1矩阵。进而获得在此条件下每个目标的BCRLB与波束分配奖励矩阵<sup>[21]</sup>:

$$\Delta \mathbb{F}^{k,0} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbb{F}_{1,1}^{k,0} & \Delta \mathbb{F}_{1,2}^{k,0} & \cdots & \Delta \mathbb{F}_{1,Q}^{k,0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \Delta \mathbb{F}_{N,1}^{k,0} & \Delta \mathbb{F}_{N,2}^{k,0} & \cdots & \Delta \mathbb{F}_{N,Q}^{k,0} \end{bmatrix} \quad (42)$$

其中,  $\Delta \mathbb{F}_{n,q}^{k,0}$ 描述第 $n$ 个节点对第 $q$ 个目标的代价函数奖励程度, 计算式为

$$\Delta \mathbb{F}_{n,q}^{k,0} = w_q^k [\mathbb{G}(\mathbf{u}_q^{k,0}, \mathbf{T}_q^{k,0}) - \text{trace}(\mathbf{J}_P^{-1}(\mathbf{x}_q^k))] \quad (43)$$

其次, 在波束分配奖励矩阵 $\Delta \mathbb{F}^{k,0}$ 的基础上,

从少到多选择值越大的若干个值, 重新构造选择矩阵 $\mathbf{u}^{k,1}$ 并置1相应位置, 直到不满足布尔变量的约束条件, 选择目标数量由优化函数约束决定。在此基础上, 获得符合意义的可行解 $\mathbf{u}^{k,1}$ 。

最后, 由于该可行解在满足波束分配约束条件下, 尽量保持最多的波束目标分配。然而, 生成最多的波束目标分配并不一定确保最佳的资源分配解决方案。因此, 在这一步中, 我们根据更新的波束分配奖励矩阵, 通过消除波束目标分配, 迭代搜索更好的波束分配方案, 即基于奖励的迭代下降搜索。具体算法的程序流程如图2所示。

相比于枚举 $\mathbf{u}^k$ 所有组合下最优驻留时间分配的指数级迭代求解算法, 该算法中子优化问题的迭代次数, 最多为 $\min\{QL_{\max}, NB_n\}$ 次, 运算量大大减小。由于此类问题属于NP-hard问题, 因此找到最优解非常困难, 而该算法在满足所得结果是可行解的基础上, 具有更快的求解速度, 并且可行解考虑了波束照射与否对代价函数提升带来的影响, 是一种局部最优解, 其结果符合预期。

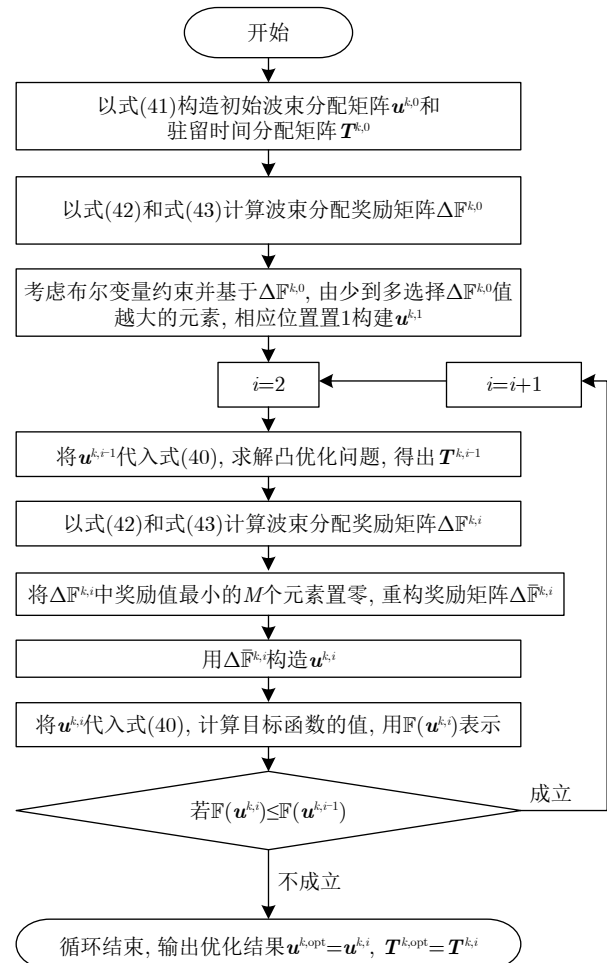


图 2 基于奖励的迭代下降算法程序流程图

Fig. 2 The flowchart of the reward-based iterative descending approach



## 6 仿真结果及分析

为了评估基于威胁度自适应评估目标实时威胁度驱动的组网相控阵雷达波束分配与驻留时间联合优化算法的有效性,本节用没有考虑目标威胁度的平均资源分配方法作为对比。平均资源分配方法表示了理想资源平均的条件下,组网雷达系统的多目标跟踪精度。

### 6.1 基本参数设置

假设组网雷达系统由 $N = 3$ 部位置固定且已知的相控阵雷达节点组成,分别为(10, 5) km, (20, 10) km和(30, 10) km。由于第2部雷达是组网雷达的地理位置中心,其作为融合中心,具有更高的保护优先度,因此设定组网雷达各节点保护值为 $p_1 = 0.2$ ,  $p_2 = 0.6$ ,  $p_3 = 0.2$ 。各节点的波束数量 $L_n = 3$ ,发射信号的载频和有效带宽分别为 $f_c = 1$  GHz和 $\beta_n = 1$  MHz,发射功率 $P_n = 1$  kW,其他参数均相同。组网雷达对监视区域中的 $Q = 4$ 个目标进行跟踪,目标初始运动状态及其相对组网雷达中心的运动参数如表1所示,过程噪声强度 $q_s = 10^{-6}$ , RCS =  $2 \text{ m}^2$ 。假设在跟踪时刻开始前,雷达已经完成对目标的航迹起始与数据关联,目标的航迹及其相对于组网相控阵雷达的分布如图3所示。雷达采样间隔 $T_s = 1$  s,跟踪持续40帧。波束及驻留时间资源约束为: $L_{\max} = 2$ ,  $T_{\min} = 0.01T_{\text{total}}$ ,  $T_{\max} = 0.90T_{\text{total}}$ 。

蒙特卡罗次数为100次,将目标的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)定义为

$$\text{RMSE}_q^k = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{mc}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{mc}}} \left[ \left( x_q^k - x_{q,j}^{k|k} \right)^2 + \left( y_q^k - y_{q,j}^{k|k} \right)^2 \right]} \quad (44)$$

其中, $N_{\text{mc}}$ 为蒙特卡罗次数, $(x_{q,j}^{k|k}, y_{q,j}^{k|k})$ 为第 $j$ 次试验目标 $q$ 的估计位置。

在TSM函数中取 $k_0 = 80$ ,  $m_0 = 10$ 计算威胁度,并按照威胁度合理设定跟踪精度门限为

$$\eta_q^k = \begin{cases} 0.4 \text{ km}, & \rho_q^k < 0.2 \\ 0.2 \text{ km}, & 0.2 \leq \rho_q^k < 0.5 \\ 0.1 \text{ km}, & \rho_q^k \geq 0.5 \end{cases} \quad (45)$$

### 6.2 算法性能验证

图4给出了目标运动过程中综合威胁度评估结果。相较于目标1,目标2距离组网雷达中心更近,并具有更高的威胁度;同样与目标1相比,虽然目标3距离组网雷达中心更远,但由于运动速度更大,而两个目标都近似径向靠近雷达中心运动,因此目标3威胁度更高,且威胁度增长速度更快;目标4则由于航向和组网雷达中心具有一定的夹角,导致其威胁度在所有目标中最低。可以看出,本文提出方法可以综合根据目标运动状态实时量化威胁程度。

表 1 目标初始运动状态及其相对组网雷达中心的运动参数

Tab. 1 Initial motion states of targets and their motion parameters relative to the center of the netted radar system

目标标号	目标位置(km)	目标速度(km/s)	相对距离(km)	绝对速度(km/s)	航向角( $^\circ$ )
1	(23, 50)	(-0.01, -0.17)	40.11	0.17	0.92
2	(2.5, 40.3)	(0.08, -0.14)	34.99	0.16	0.26
3	(17, 60)	(0.02, -0.34)	50.09	0.34	0.07
4	(30, 53)	(0.12, -0.16)	44.15	0.20	49.96

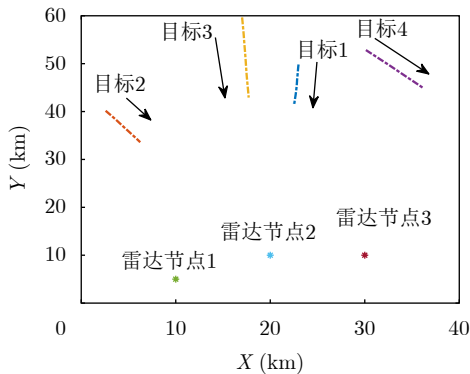


图 3 目标航迹与雷达节点位置分布图

Fig. 3 Deployment of targets with respect to radar nodes

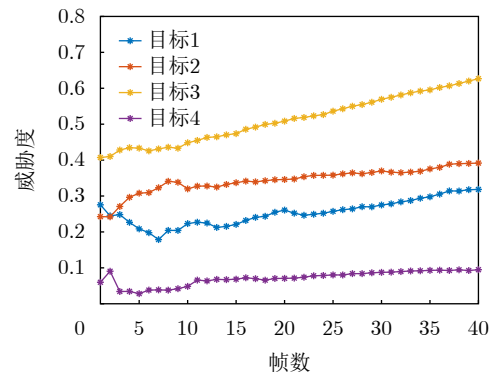


图 4 目标综合威胁度评估结果

Fig. 4 Target threat assessment results

图5展示了组网雷达多目标跟踪的节点选择和驻留时间优化分配结果，白色部分表示该雷达节点在相应帧未发射波束照射对应目标，即 $u_{n,q}^k = 0$ ；反之，则表示该雷达节点照射对应目标，且进行驻留时间分配，其颜色越深表示驻留时间分配比例越大。从图5可以看出，雷达节点1和节点3分配大部分时间资源给目标3，用于维持其高精度的跟踪需求；而雷达节点2主要分配时间资源给目标4，因为雷达节点1和节点3在整个跟踪时间内几乎不对目标4分配资源，图6为各目标持续时间内驻留时间分配结果，可以看出组网相控阵雷达对更高威胁度的目标3分配了大部分驻留时间。由此可知，本文提出的算法能根据目标运动状态变化、威胁度变化进行各雷达节点的波束及驻留时间的自适应分配。

同时，作为本文提出算法的对比，图7和图8对比了采用本文算法和采用平均资源分配方法的各目标BCRLB和RMSE，可以看出，本文算法通过为

不同威胁度的目标设定跟踪精度需求，更能衡量多目标的优先跟踪程度。在该场景中，目标2和目标3相较于目标1和目标4，具有更近的距离和运动速度，对组网雷达节点的威胁度更高，因此设定了更小的跟踪误差，而目标4由于航向角偏移组网雷达中心，因此其威胁度最低，跟踪精度需求比较宽松。随着时间的推移，目标3的威胁度逐渐上升，因此在第20帧以后，对其跟踪误差设定更小，该算法可以实时根据目标威胁度，自动调整跟踪误差需求。而从图8可以看出，平均资源分配方法下每个目标的跟踪精度只与到组网雷达的距离有关，其中距离最近的目标2具有最好的跟踪精度，但目标2相对于目标3，其威胁度不高；目标3作为威胁度最高的目标，其跟踪精度并没有获得比其他目标更好的跟踪效果。由此说明平均资源分配方法并没有综合考虑目标的威胁程度，对不同目标的差异性感知能力差，无法满足不同目标的差异化跟踪精度需求。

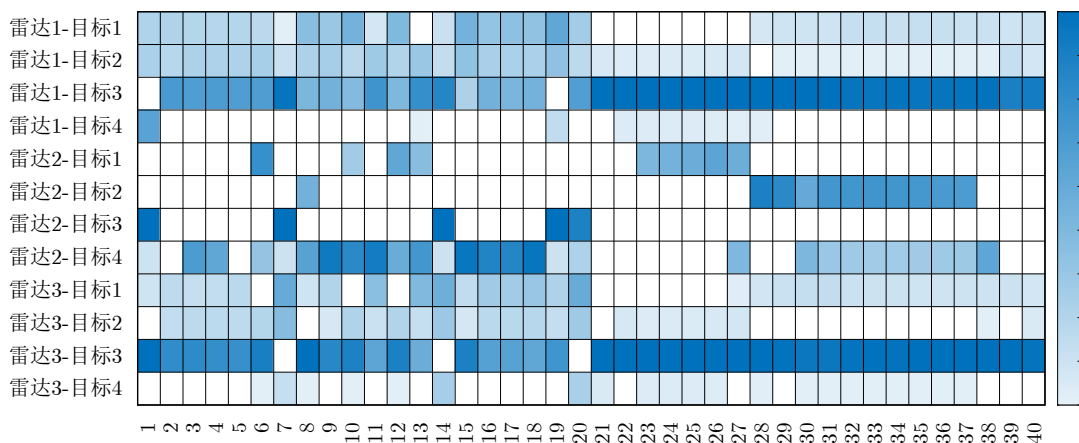


图 5 各雷达节点波束和驻留时间分配结果

Fig. 5 Beam and dwell time allocation results for each radar node

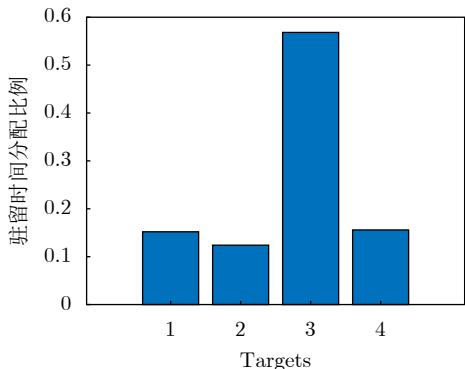


图 6 各目标持续时间内驻留时间分配结果

Fig. 6 The sum of dwell times of targets over all frames

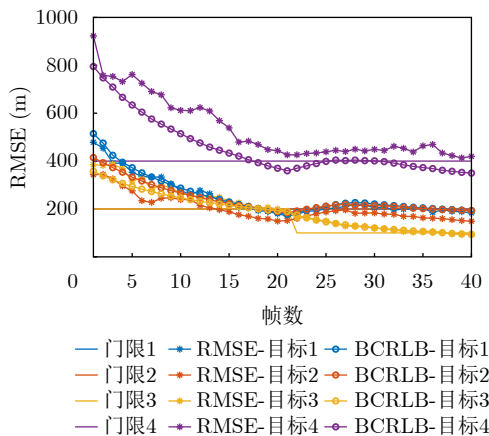


图 7 采用本文算法的各目标RMSE与BCRLB对比图

Fig. 7 Comparison of RMSE and BCRLB using the proposed algorithm

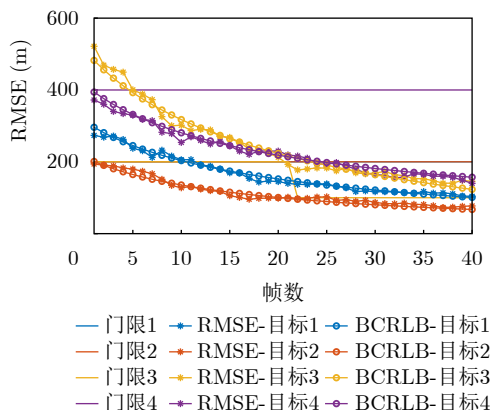


图8 采用平均资源分配方法的各目标RMSE与BCRLB对比图  
Fig. 8 Comparison of RMSE and BCRLB using the average resource allocation method

综上所述, 本文所提算法在不同威胁度的多目标跟踪场景中, 具有比固定分配方法更好的跟踪精度需求感知能力和多目标综合跟踪能力。

## 7 结语

本文基于分布式组网相控阵雷达系统, 提出了一种目标动态威胁度驱动的波束分配与驻留时间联合优化算法。该算法根据目标实时运动状态进行威胁度评估, 结合目标跟踪精度下界BCRLB, 建立了一定资源约束条件下, 最大化基于跟踪精度参考门限和贡献度的效用函数的优化问题。为提高模型的求解效率, 采用了一种基于奖励的迭代下降算法进行求解。仿真实验表明: (1)本算法能够合理根据目标运动状态, 量化目标距离、速度和航向角对威胁度的非线性影响, 合理评估目标对组网雷达的威胁程度。(2)随着目标运动状态变化, 目标威胁度也改变, 本文提出的算法能根据对目标威胁度进行实时感知, 进而指导各雷达节点的波束和驻留时间自适应分配。(3)相比于平均资源分配方法, 本算法能更好地感知威胁度差异从而动态调整跟踪精度需求, 资源调度方案有更强的威胁度针对性。

下一步的研究重点将考虑更多系统资源的联合优化, 将问题从具体某几种资源扩展到多种组网雷达系统资源, 以进一步提高优化模型的自由度, 达到提高多目标跟踪性能的目的。

## 参考文献

- [1] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 1-24.  
ZHANG Guangyi. Principles of Phased Array Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 1-24.
- [2] TAN Qianqian, CHENG Ting, and LI Xi. Online adaptive dwell scheduling based on dynamic template for PAR[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2021, 32(5): 1119-1129. doi: 10.23919/JSEE.2021.000096.
- [3] 卢建斌. 相控阵雷达资源优化管理的理论与方法[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2007.  
LU Jianbin. Theory and method of resource optimization and management for phased array radars[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
- [4] 王祥丽, 易伟, 孔令讲. 基于多目标跟踪的相控阵雷达波束和驻留时间联合分配方法[J]. 雷达学报, 2017, 6(6): 602-610. doi: 10.12000/JR17045.  
WANG Xiangli, YI Wei, and KONG Lingjiang. Joint beam selection and dwell time allocation for multi-target tracking in phased array radar system[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(6): 602-610. doi: 10.12000/JR17045.
- [5] 王祥丽. 相控阵雷达跟踪模式下波束和时间资源管理算法研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2018.  
WANG Xiangli. Research on beam and time resources management algorithm for target tracking in phased array radar[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [6] 花汉兵. 雷达组网的特点及其关键技术研究[J]. 现代电子技术, 2007, 30(23): 33-35. doi: 10.3969/j.issn.1004-373X.2007.23.012.  
HUA Hanbing. Study on characteristics and critical technologies of radar networking[J]. *Modern Electronics Technique*, 2007, 30(23): 33-35. doi: 10.3969/j.issn.1004-373X.2007.23.012.
- [7] 孙俊, 张大琳, 易伟. 多机协同干扰组网雷达的资源调度方法[J]. 雷达科学与技术, 2022, 20(3): 237-244, 254. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2022.03.001.  
SUN Jun, ZHANG Dalin, and YI Wei. Resource allocation for multi-jammer cooperatively jamming netted radar systems[J]. *Radar Science and Technology*, 2022, 20(3): 237-244, 254. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2022.03.001.
- [8] 郭冠斌, 方青. 雷达组网技术的现状与发展[J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(4): 193-197, 202. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2005.04.001.  
GUO Guanbin and FANG Qing. Current status and development of radar netting technique[J]. *Radar Science and Technology*, 2005, 3(4): 193-197, 202. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2005.04.001.
- [9] 刘鹏翔, 韩维, 史玮玮, 等. 复杂作战环境下空中目标威胁程度评估[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(4): 462-466. doi: 10.3969/j.issn.1673-1522.2010.04.023.  
LIU Pengxiang, HAN Wei, SHI Weiwei, et al. evaluation for the aerial targets' threat in the complicated environment[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2010, 25(4): 462-466. doi: 10.3969/j.issn.1673-1522.2010.04.023.
- [10] 吕江涛, 高秉亚, 王高飞. 弹道导弹威胁度评估及其在雷达中



- 的应用[J]. 现代雷达, 2017, 39(12): 20–23, 28. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.12.004](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.12.004).
- LÜ Jiangtao, GAO Bingya, and WANG Gaofei. Ballistic missile threat assessment and its application in radar[J]. *Modern Radar*, 2017, 39(12): 20–23, 28. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.12.004](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.12.004).
- [11] YAN Junkun, PU Wenqiang, LIU Hongwei, *et al.* Cooperative target assignment and dwell allocation for multiple target tracking in phased array radar network[J]. *Signal Process*, 2017, 141: 74–83. doi: [10.1016/j.sigpro.2017.05.014](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.05.014).
- [12] ZHANG Weiwei, SHI Chenguang, ZHOU Jianjiang, *et al.* Joint aperture and transmit resource allocation strategy for multi-target localization in phased array radar network[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022: 1–14. doi: [10.1109/TAES.2022.3203688](https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3203688).
- [13] GODRICH H, PETROPULU A P, and POOR H V. Power allocation strategies for target localization in distributed multiple-radar architectures[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(7): 3226–3240. doi: [10.1109/TSP.2011.2144976](https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2144976).
- [14] YAN Junkun, LIU Hongwei, PU Wenqiang, *et al.* Joint beam selection and power allocation for multiple target tracking in netted colocated MIMO radar system[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(24): 6417–6427. doi: [10.1109/TSP.2016.2607147](https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2607147).
- [15] CHENG Ting, LI Xi, TAN Qianqian, *et al.* Adaptive time-space resource and waveform control for colocated MIMO radar with simultaneous multi-beam[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2022, 33(1): 47–59. doi: [10.23919/JSEE.2022.000006](https://doi.org/10.23919/JSEE.2022.000006).
- [16] 时晨光, 董璟, 周建江. 频谱共存下面向多目标跟踪的组网雷达功率时间联合优化算法[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 590–601. doi: [10.12000/JR22146](https://doi.org/10.12000/JR22146).
- SHI Chenguang, DONG Jing, and ZHOU Jianjiang. Joint transmit power and dwell time allocation for multitarget tracking in radar networks under spectral coexistence[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 590–601. doi: [10.12000/JR22146](https://doi.org/10.12000/JR22146).
- [17] YUAN Ye, YI Wei, HOSEINNEZHAD R, *et al.* Robust power allocation for resource-aware multi-target tracking with colocated MIMO radars[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 443–458. doi: [10.1109/TSP.2020.3047519](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.3047519).
- [18] 许稼, 彭应宁, 夏香根, 等. 基于检测前聚焦的临近空间高动态飞行器雷达探测研究[J]. 雷达学报, 2017, 6(3): 229–238. doi: [10.12000/JR16148](https://doi.org/10.12000/JR16148).
- XU Jia, PENG Yingning, XIA Xianggen, *et al.* Focus-before-detection methods for radar detection of near space high-maneuvering aircrafts[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(3): 229–238. doi: [10.12000/JR16148](https://doi.org/10.12000/JR16148).
- [19] XIE Mingchi, YI Wei, KIRUBARAJAN T, *et al.* Joint node selection and power allocation strategy for multitarget tracking in decentralized radar networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(3): 729–743. doi: [10.1109/TSP.2017.2777394](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2777394).
- [20] YI Wei, YUAN Ye, HOSEINNEZHAD R, *et al.* Resource scheduling for distributed multi-target tracking in netted colocated MIMO radar systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 1602–1617. doi: [10.1109/TSP.2020.2976587](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2976587).
- [21] SHI Chenguang, WANG Yijie, SALOUS S, *et al.* Joint transmit resource management and waveform selection strategy for target tracking in distributed phased array radar network[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(4): 2762–2778. doi: [10.1109/TAES.2021.3138869](https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3138869).
- [22] ZHANG Haowei, LIU Weijian, ZONG Binfeng, *et al.* An efficient power allocation strategy for maneuvering target tracking in cognitive MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 1591–1602. doi: [10.1109/TSP.2020.3047227](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.3047227).
- [23] YAN Junkun, LIU Hongwei, JIU Bo, *et al.* Power allocation algorithm for target tracking in unmodulated continuous wave radar network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(2): 1098–1108. doi: [10.1109/JSEN.2014.2360039](https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2360039).
- [24] 何友, 修建娟, 关欣. 雷达数据处理及应用[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 36–38.
- HE You, XIU Jianjuan, and GUAN Xin. Radar Data Processing with Applications[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 36–38.
- [25] DONG Jing, SHI Chenguang, ZHOU Jianjiang, *et al.* Joint radar selection and resource allocation for multi-target tracking in radar network under communication interference[C]. 2021 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Xi'an, China, 2021: 73–77. doi: [10.1109/ICCAIS52680.2021.9624663](https://doi.org/10.1109/ICCAIS52680.2021.9624663).
- [26] VAN TREES H L. Detection, Estimation, and Modulation Theory: Radar-Sonar Processing and Gaussian Signals in Noise[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001: 275–351.
- [27] VAN TREES H L. Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory[M]. New York: John Wiley & Sons, 2004: 917–1317.
- [28] 张浩为, 谢军伟, 盛川. 综合优先级规划下的相控阵雷达自适应调度方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(11): 2163–2169. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2016.11.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2016.11.026).
- ZHANG Haowei, XIE Junwei, and SHENG Chuan. Adaptive scheduling algorithm over comprehensive priority for phased array radar[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(11):

- 2163–2169. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2016.11.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2016.11.026).
- [29] 张恺桐, 闫涛, 韩崇昭, 等. 基于威胁程度的目标跟踪传感器管理方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(1): 39–44. doi: [10.15908/j.cnki.cist.2022.01.007](https://doi.org/10.15908/j.cnki.cist.2022.01.007).
- ZHANG Kaitong, YAN Tao, HAN Chongzhao, *et al.* Target tracking sensor management method based on threat degree[J]. *Command Information System and Technology*, 2022, 13(1): 39–44. doi: [10.15908/j.cnki.cist.2022.01.007](https://doi.org/10.15908/j.cnki.cist.2022.01.007).
- [30] KATSILIERIS F, DRIESSEN H, and YAROVY A. Threat-based sensor management for target tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(4): 2772–2785. doi: [10.1109/TAES.2015.140052](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140052).
- [31] EL-FALLAH A, ZATEZALO A, MAHLER R, *et al.* Unified Bayesian situation assessment sensor management[C]. SPIE 5809, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XIV, Orlando, United States, 2005: 253–264. doi: [10.1117/12.605435](https://doi.org/10.1117/12.605435).
- [32] RIBEIRO M I. Kalman and extended Kalman filters: Concept, derivation and properties[J]. *Institute for Systems and Robotics*, 2004., 43(46): 3736–3741.
- [33] JULIER S J and UHLMANN J K. A non-divergent estimation algorithm in the presence of unknown correlations[C]. 1997 American Control Conference, Albuquerque, USA, 1997: 2369–2373. doi: [10.1109/ACC.1997.609105](https://doi.org/10.1109/ACC.1997.609105).
- [34] YAN Junkun, JIAO Hao, PU Wenqiang, *et al.* Radar sensor network resource allocation for fused target tracking: A brief review[J]. *Information Fusion*, 2022, 86/87: 104–115. doi: [10.1016/j.inffus.2022.06.009](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.06.009).
- [35] 陈辉, 贺忠良, 连峰, 等. 多目标跟踪中基于目标威胁度评估的传感器控制方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(12): 2861–2867. doi: [10.11999/JEIT180212](https://doi.org/10.11999/JEIT180212).
- CHEN Hui, HE Zhongliang, LIAN Feng, *et al.* Threat assessment based sensor control for multi-target tracking[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 2861–2867. doi: [10.11999/JEIT180212](https://doi.org/10.11999/JEIT180212).
- [36] TICHAVSKY P, MURAVCHIK C H, and NEHORAI A. Posterior Cramer-Rao bounds for discrete-time nonlinear filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(5): 1386–1396. doi: [10.1109/78.668800](https://doi.org/10.1109/78.668800).
- [37] BURER S and LETCHFORD A N. Non-convex mixed-integer nonlinear programming: A survey[J]. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 2012, 17(2): 97–106. doi: [10.1016/j.sorms.2012.08.001](https://doi.org/10.1016/j.sorms.2012.08.001).

### 作者简介

宋晓程, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为制导与控制、指挥控制与作战筹划设计。

李 陟, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要研究方向为武器系统总体与探测制导技术。

任海伟, 硕士生, 主要研究方向为雷达信号处理、雷达资源管理技术。

易 伟, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达协同探测、低可观测目标探测技术。

(责任编辑: 于青)