

面向射频隐身的组网雷达多目标跟踪下射频辐射资源优化分配算法

时晨光* 丁琳涛 汪飞 周建江

(南京航空航天大学雷达成像与微波光子教育部重点实验室 南京 210016)

摘要: 针对组网雷达系统多目标跟踪场景, 该文提出一种面向射频(RF)隐身的组网雷达射频辐射资源优化分配算法。首先, 采用目标跟踪误差的贝叶斯克拉美-罗下界(BCRLB)作为目标跟踪性能指标。其次, 以各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权和为优化目标, 以BCRLB不大于给定目标跟踪精度阈值及系统射频辐射资源作为约束条件, 建立了包含雷达节点分配方式、驻留时间和辐射功率3个优化变量的优化模型。然后, 采用两步分解法对上述优化模型进行了求解, 即先固定雷达节点选择, 利用内点法对简化后的非凸非线性优化模型进行求解, 之后再通过匈牙利算法确定最佳雷达节点分配方式。仿真结果表明, 相较于辐射资源均匀分配算法, 所提算法可以有效降低组网雷达的射频资源消耗, 提升系统射频隐身性能。

关键词: 射频隐身; 组网雷达; 多目标跟踪; 资源优化分配

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)03-0539-08

DOI: [10.11999/JEIT200636](https://doi.org/10.11999/JEIT200636)

Radio Frequency Stealth-based Optimal Radio Frequency Resource Allocation Algorithm for Multiple-target Tracking in Radar Network

SHI Chenguang DING Lintao WANG Fei ZHOU Jianjiang

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In the scenario of multi-target tracking by a radar network system, a Radio Frequency (RF) stealth-based optimal RF resource allocation algorithm in radar network is proposed. Firstly, the Bayesian Cramer-Rao Lower Bound (BCRLB) of target tracking error is used as the target tracking performance index. Secondly, the optimization model is established which includes three optimization variables: radar node selection, dwell time and radiation power. In this model, the objective function is the weighted sum of the dwell time resources and radiation power resources of each radar, the constraint condition can be conclude that the BCRLB must be less than the given threshold and the system RF radiation resources must be between the upper and lower limits. Then, the two-step decomposition method is used to solve the above optimization model. The radar node selection is fixed first, then the interior point method is used to solve the simplified non-convex nonlinear optimization model, and then the Hungarian algorithm is used to determine the best radar node selection mode. The simulation results show that compared with uniform resource allocation algorithm, the proposed algorithm can effectively reduce the RF resource consumption of the radar network and improve the RF stealth performance of the system.

Key words: Radio Frequency (RF) stealth; Radar network; Multi-target tracking; Optimal resource allocation

收稿日期: 2020-07-30; 改回日期: 2020-12-09; 网络出版: 2020-12-22

*通信作者: 时晨光 scg_space@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61801212), 国防科技创新特区资助, 中国博士后科学基金面上项目(2019M650113), 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20180423)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61801212), The National Defense Science and Technology Innovation Special Zones, China Postdoctoral Science Foundation (2019M650113), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20180423)

1 引言

近年来,分布式组网雷达系统引起了学术界的广泛关注^[1-3]。与传统单基地雷达相比,组网雷达系统具有诸多潜在优势,如优越的波形分集增益^[4]、空间分集增益^[5,6]和更好的目标检测跟踪性能^[7-9]等。对于组网雷达系统在目标跟踪下的资源分配问题,国内外学者提出了一系列相关算法^[10-19],目的是充分利用系统潜力,提升系统性能。根据优化目标,这些算法可以分为两类。

第1类是在组网雷达系统有限的发射资源约束下,尽可能地提高目标跟踪精度。文献^[10]在多基地雷达系统跟踪多目标场景下,提出了一种雷达聚类方式与功率联合分配算法,文章推导了表征目标跟踪精度的贝叶斯克拉美-罗下界(Bayesian Cramer-Rao Lower Bound, BCRLB),并通过自适应控制雷达节点选择和功率辐射,最小化多目标总体跟踪误差的BCRLB。与之类似,文献^[11]提出了一种集中式多输入多输出雷达多目标跟踪功率优化分配算法,并采用半正定规划算法求解该优化问题,该算法相比于传统的功率均匀分配算法有效减少了求解时间,并提升了目标跟踪精度。在此基础上,文献^[12]将发射信号带宽考虑进来,提出了一种功率和带宽联合优化分配算法,以所有目标跟踪误差的后验克拉美-罗下界和为代价函数并建立优化模型,采用凸松弛技术和循环最小法对该问题进行求解。

第2类是在满足目标跟踪精度要求的条件下,最小化组网雷达辐射资源消耗。在现代作战环境中,随着无源探测系统的广泛应用,射频隐身是组网雷达系统必须着重考虑的问题。而通过辐射能量控制^[19],自适应波束形成和归零^[20]以及雷达发射信号波形设计^[21]等技术可以有效提升组网雷达的射频隐身性能。文献^[17]在相控阵雷达组网跟踪多目标场景下,提出了一种驻留时间资源优化分配算法,在达到预定目标跟踪精度的前提下,该算法可以有效减少系统总驻留时间。文献^[18]提出了一种基于低截获概率的驻留时间和带宽联合优化分配算法,该算法的核心是通过雷达组网的驻留时间和信号带宽进行联合管控,在每个目标跟踪误差均不大于某一阈值的情况下,最小化系统总驻留时间消耗。类似地,文献^[19]提出了一种基于低截获概率的功率和带宽联合优化分配算法,并通过基于非线性规划的遗传算法对优化问题进行求解,结果表明,该算法能够进一步减少组网雷达系统的总辐射功率。

总之,上述研究成果为提升组网雷达系统中目

标跟踪的性能或射频隐身性能奠定了基础。但是,在组网雷达系统中,同时考虑驻留时间资源和发射功率资源分配,以提升多目标跟踪时的射频隐身问题还未受到关注,需要对其进行详细研究。本文针对组网雷达多目标跟踪场景,提出一种面向射频隐身的射频辐射资源优化分配算法,本算法以各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权为优化目标,以目标跟踪精度满足要求和辐射资源的预算为约束条件,建立面向射频隐身的组网雷达射频辐射资源优化分配模型,采用两步分解法和内点法求解该优化问题,得到最优的雷达节点分配方式和驻留时间资源、辐射功率资源分配方式。仿真结果验证了本算法的可行性和优越性。

2 系统建模

假设组网雷达系统由 N_{rad} 部单基地雷达组成,这些雷达分散部署于2维直角坐标系中并保持时间、空间、频率同步,其中,第 i ($i = 1, 2, \dots, N_{\text{rad}}$)部雷达的位置为 (x_i, y_i) 。另外,假设在组网雷达监视区域中有 S 个做匀速直线运动的目标,第 s ($s = 1, 2, \dots, S$)个目标在 k 时刻的状态为 $\mathbf{X}_k^s = [x_k^s, y_k^s, v_{x,k}^s, v_{y,k}^s]^T$,其中 $[\cdot]^T$ 表示转置运算, $[x_k^s, y_k^s]$ 和 $[v_{x,k}^s, v_{y,k}^s]$ 分别表示目标位置和速度。

2.1 目标运动模型

目标 s 的状态方程^[18]可以描述为 $\mathbf{X}_k^s = \mathbf{F}\mathbf{X}_{k-1}^s + \mathbf{U}^s$,其中, \mathbf{F} 为目标状态转移矩阵,可以表示为 $\mathbf{F} = \mathbf{I}_2 \otimes \begin{bmatrix} 1 & \Delta T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,其中, ΔT_0 为采样间隔, \otimes 表示矩阵直积运算, \mathbf{I}_2 为2阶单位矩阵。 \mathbf{U}^s 为0均值白高斯过程噪声,其协方差矩阵可表示为 $\mathbf{Q}^s = r^s \mathbf{I}_2 \otimes \begin{bmatrix} \frac{(\Delta T_0)^3}{3} & \frac{(\Delta T_0)^2}{2} \\ \frac{(\Delta T_0)^2}{2} & \Delta T_0 \end{bmatrix}$,其中, r^s 为过程噪声强度。

2.2 量测模型

为简化起见,本文假设每个时刻单部雷达最多跟踪1个目标(适用于观测区域中雷达数目多于目标数目的场景,如敌方侦察机闯入我方组网雷达观测区域),且每部雷达只能接收和处理自身发射并经目标散射的回波信号。同时,定义如式(1)的2元变量

$$\omega_{i,k}^s = \begin{cases} 1, & k \text{时刻雷达} i \text{对目标} s \text{进行照射} \\ 0, & k \text{时刻雷达} i \text{不对目标} s \text{进行照射} \end{cases} \quad (1)$$

因此,雷达 i 在 k 时刻对目标 s 的量测方程可以表示为

$$\mathbf{Z}_{i,k}^s = \begin{cases} g(\mathbf{X}_k^s) + \mathbf{V}_{i,k}^s, & \omega_{i,k}^s = 1 \\ 0, & \omega_{i,k}^s = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{Z}_{i,k}^s$ 表示量测矢量, 它由 k 时刻雷达 i 对第 s 个目标距离和方位角量测值组成, $g(\mathbf{X}_k^s)$ 表示非线性观测函数, 可以表示为

$$g(\mathbf{X}_k^s) = \begin{bmatrix} R_{i,k}^s \\ \varphi_{i,k}^s \\ \sqrt{(x_k^s - x_i)^2 + (y_k^s - y_i)^2} \\ \arctan\left(\frac{y_k^s - y_i}{x_k^s - x_i}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $R_{i,k}^s$ 为 k 时刻目标 s 到雷达 i 的距离, $\varphi_{i,k}^s$ 为目标 s 在 k 时刻相较于雷达 i 的方位角, $\mathbf{V}_{i,k}^s$ 为 0 均值白高斯量测噪声, 可以写为 $\mathbf{V}_{i,k}^s = [\Delta R_{i,k}^s, \Delta \varphi_{i,k}^s]^T$, 其中, $\Delta R_{i,k}^s$ 和 $\Delta \varphi_{i,k}^s$ 分别表示距离和方位角量测误差。根据文献[18]可知, 距离和方位角量测误差与该时刻回波信噪比有关, 并且它们都存在下界 $\sigma_{R_{i,k}^s}^2$ 和 $\sigma_{\varphi_{i,k}^s}^2$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{R_{i,k}^s}^2 &= c^2 / \left((4\pi)^2 \beta \text{SNR}_{i,k}^s \right) \\ \sigma_{\varphi_{i,k}^s}^2 &= 3\lambda^2 / \pi^2 \gamma^2 \text{SNR}_{i,k}^s \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $c = 3 \times 10^8$ m/s, β 为雷达发射信号有效带宽, λ 为雷达波长, γ 为天线孔径。 $\text{SNR}_{i,k}^s$ 为 k 时刻雷达 i 对目标 s 照射的回波信噪比[19], 可表示为 $\text{SNR}_{i,k}^s =$

$$\frac{T_{d,i,k}^s}{T_r} \cdot \frac{P_{i,k}^s G_t G_r \sigma_{si} \lambda^2 G_{RP}}{(4\pi)^3 k_0 T_0 B_r F_r (R_{i,k}^s)^4} \cdot \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(\tilde{\alpha}_i^s)^2}{\theta_{3\text{dB}}^2}\right],$$

式中, $T_{d,i,k}^s$ 和 $P_{i,k}^s$ 分别为 k 时刻雷达 i 照射目标 s 的驻留时间和平均辐射功率, T_r 为雷达的脉冲重复周期, G_t 和 G_r 分别为雷达发射天线增益和接收天线增益, σ_{si} 为目标 s 相对雷达 i 的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS), G_{RP} 为雷达接收机处理增益, k_0 和 T_0 分别为玻尔兹曼常数和雷达接收机噪声温度, B_r 为雷达接收机匹配滤波器带宽, F_r 为雷达接收机噪声系数, $\tilde{\alpha}_i^s$ 为目标 s 的真实方位角与雷达 i 发射波束之间的角度差, $\theta_{3\text{dB}}$ 为雷达天线 3 dB 波束宽度。另外, 由于 $\mathbf{V}_{i,k}^s$ 在距离和方位角上相互独立,

则其协方差矩阵为 $\boldsymbol{\psi}_{i,k}^s = \begin{bmatrix} \sigma_{R_{i,k}^s}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varphi_{i,k}^s}^2 \end{bmatrix}$ 。

2.3 融合中心

每个时刻, 各部雷达将观测得到的距离和角度信息经数据链路传送到系统融合中心进行处理。给定 k 时刻分配给目标 s 的雷达节点集合 $\boldsymbol{\omega}_k^s = [\omega_{1,k}^s, \omega_{2,k}^s, \dots, \omega_{N_{\text{rad}},k}^s]^T$, 则 k 时刻融合中心接收到的关于

该目标的信息可以描述为 $\mathbf{Z}_k^s = [1, 1]^T \otimes \boldsymbol{\omega}_k^s \odot \left[\left[(\mathbf{R}_k^s)^T, (\boldsymbol{\varphi}_k^s)^T \right]^T + \left[(\Delta \mathbf{R}_k^s)^T, (\Delta \boldsymbol{\varphi}_k^s)^T \right]^T \right]$, 式中, $\mathbf{R}_k^s = [R_{1,k}^s, R_{2,k}^s, \dots, R_{N_{\text{rad}},k}^s]^T$ 和 $\boldsymbol{\varphi}_k^s = [\varphi_{1,k}^s, \varphi_{2,k}^s, \dots, \varphi_{N_{\text{rad}},k}^s]^T$ 分别表示 k 时刻目标 s 的距离和角度观测信息矢量, $\Delta \mathbf{R}_k^s$ 和 $\Delta \boldsymbol{\varphi}_k^s$ 分别表示距离和角度的量测误差集合, \odot 表示矩阵的点乘。

假设各雷达的量测噪声相互独立, 那么, k 时刻目标 s 的量测误差协方差矩阵可以表示为 $\boldsymbol{\psi}_k^s = \text{diag} \left\{ \omega_{1,k}^s \sigma_{R_{1,k}^s}^2, \omega_{2,k}^s \sigma_{R_{2,k}^s}^2, \dots, \omega_{N_{\text{rad}},k}^s \sigma_{R_{N_{\text{rad}},k}^s}^2, \omega_{1,k}^s \sigma_{\varphi_{1,k}^s}^2, \omega_{2,k}^s \sigma_{\varphi_{2,k}^s}^2, \dots, \omega_{N_{\text{rad}},k}^s \sigma_{\varphi_{N_{\text{rad}},k}^s}^2 \right\}$, 式中, $\text{diag}\{\cdot\}$ 表示对角矩阵。

3 辐射资源优化分配算法

3.1 优化模型建立

从雷达辐射能量控制角度出发, 减少雷达对目标照射的驻留时间和辐射功率资源, 可以有效提高组网雷达系统的射频隐身性能。然而, 驻留时间和辐射功率资源的减小必然会降低目标回波信噪比, 从而导致目标跟踪性能下降。因此辐射资源的自适应优化配置必须以满足预先设定的目标跟踪性能要求为前提。文献[19]指出, BCRLB 为目标跟踪的均方误差(Mean Square Error, MSE)提供了一个下界, 被众多学者用作衡量目标跟踪精度的指标, 而 BCRLB 是通过目标的贝叶斯信息矩阵(Bayesian Information Matrix, BIM)求出的, 其计算公式为

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1}^s) &= [\mathbf{Q}^s + \mathbf{F} \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{X}_{k-1}^s) \mathbf{F}^T]^{-1} \\ &+ \sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \left[\omega_{i,k}^s (\mathbf{G}_{i,k}^s)^T (\boldsymbol{\psi}_{i,k}^s)^{-1} (\mathbf{G}_{i,k}^s) \right] \Big|_{\mathbf{X}_{k|k-1}^s} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k-1}^s)$ 为 $k-1$ 时刻目标 s 的 BIM, $\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1}^s)$ 为目标 s 在 $k-1$ 时刻的预测 BIM, $\mathbf{G}_{i,k}^s = \left[\nabla_{\mathbf{X}_{k|k-1}^s} \left(g(\mathbf{X}_{k|k-1}^s) \right)^T \right]^T$ 为观测函数 $g(\mathbf{X}_k^s)$ 的雅可比矩阵。

对式(5)求逆, 即可得到相应目标状态估计误差的 BCRLB 矩阵, 即 $\mathbf{C}_{k|k-1}^s = \left[\mathbf{J}(\mathbf{X}_{k|k-1}^s) \right]^{-1}$ 。于是, 本文采用矩阵 $\mathbf{C}_{k|k-1}^s$ 的迹来作为目标跟踪精度的衡量指标, 即 $F_{k|k-1}^s \triangleq \text{Tr}(\mathbf{C}_{k|k-1}^s)$ 。

面向射频隐身的组网雷达辐射资源优化分配算法旨在保证多目标跟踪精度的条件下, 最小化各雷达照射目标的驻留时间资源和辐射功率资源加权, 其优化模型可建立为

$$\min_{\omega_{i,k}^s, T_{d,i,k}^s, P_{i,k}^s} \sum_{s=1}^S \omega_{i,k}^s \left[\alpha_1 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (T_{d,i,k}^s - T_{d,\min})}{M \cdot (T_{d,\max} - T_{d,\min})} + \alpha_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} (P_{i,k}^s - P_{\min})}{M \cdot (P_{\max} - P_{\min})} \right] \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} F_{k|k-1}^s \leq F_{\max}, \quad \forall s \\ \left\{ \begin{array}{l} T_{d,\min} \leq T_{d,i,k}^s \leq T_{d,\max}, \quad \omega_{i,k}^s = 1 \\ T_{d,i,k}^s = 0, \quad \omega_{i,k}^s = 0 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} P_{\min} \leq P_{i,k}^s \leq P_{\max}, \quad \omega_{i,k}^s = 1 \\ P_{i,k}^s = 0, \quad \omega_{i,k}^s = 0 \end{array} \right. \\ \sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \omega_{i,k}^s = M, \quad \sum_{s=1}^S \omega_{i,k}^s \leq 1, \omega_{i,k}^s \in \{0, 1\} \end{array} \right.$$

式中, α_1 和 α_2 分别为驻留时间和辐射功率的权重系数, F_{\max} 为给定的目标跟踪误差阈值, $T_{d,\min}$ 和 $T_{d,\max}$ 分别为雷达驻留时间的下限和上限, P_{\min} 和 P_{\max} 分别为辐射功率的下限和上限, $\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \omega_{i,k}^s = M$ 表示 k 时刻每个目标由 M 部雷达进行跟踪, $\sum_{s=1}^S \omega_{i,k}^s \leq 1$ 表示 k 时刻每部雷达最多跟踪1个目标。

3.2 优化模型求解

由于 $\omega_{i,k}^s \in \{0, 1\}$ 是二元变量, 故式(6)的优化模型是含有3个变量的非凸优化问题, 可通过两步分解法将变量分别进行优化: 首先雷达组网系统分配满足条件 $\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \omega_{i,k}^s = M$ 的确定雷达节点组合方式对目标进行照射, 则对于第 s 个目标式(6)可以简化为只含有驻留时间和辐射功率的函数, 如式(7)所示

$$\min_{T_{d,m,k}^s, P_{m,k}^s} \alpha_1 \cdot \frac{\sum_{m=1}^M (T_{d,m,k}^s - T_{d,\min})}{M \cdot (T_{d,\max} - T_{d,\min})} + \alpha_2 \cdot \frac{\sum_{m=1}^M (P_{m,k}^s - P_{\min})}{M \cdot (P_{\max} - P_{\min})} \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} F_{k|k-1}^s \leq F_{\max} \\ \left\{ \begin{array}{l} T_{d,\min} \leq T_{d,m,k}^s \leq T_{d,\max} \\ T_{d,m,k}^s = 0 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} P_{\min} \leq P_{m,k}^s \leq P_{\max} \\ P_{m,k}^s = 0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

式(7)的优化模型是一个非凸、非线性约束优化问题^[22], 可通过粒子群算法、遗传算法等智能算法来求解, 但这些智能算法的运算时间很长, 难以满足实时性要求。于是, 本文采用内点法对式(7)进行求解, 具体算法步骤如表1所示。

通过上述算法求解 $S \cdot C_{N_{\text{rad}}}^M$ 次式(7), 可以得到所有满足约束条件 $\sum_{i=1}^{N_{\text{rad}}} \omega_{i,k}^s = M$ 的雷达分配方式

照射 S 个目标时分别对应的辐射资源优化分配最优解。在此基础上, 可以通过匈牙利算法获得满足条件 $\sum_{s=1}^S \omega_{i,k}^s \leq 1$ 下使得雷达组网系统总辐射资源最小的雷达节点-目标分配方式最优解, 其具体步骤如下:

- (1) 比较 $S \cdot C_{N_{\text{rad}}}^M$ 次式(7)的解, 选择使优化目标函数值最小时的解, 则可得该解对应的组网系统中的雷达节点选择方式以及照射的目标, 按该解指导雷达节点的驻留时间资源分配和辐射功率资源分配;
- (2) 移除雷达组网系统中已经被选取的雷达节点, 同时移除已经被分配的雷达节点照射的目标;
- (3) 比较剩余雷达节点组合对剩余目标照射时的优化目标函数值, 选择使优化目标函数值最小的解, 按该解对应的雷达节点选择方式以相应的资源分配方案对该解对应的目标进行照射;
- (4) 重复(2)和(3), 直到所有的目标都被分配, 得到雷达组网系统中雷达节点最优的分配方式。

总的来说, 面向射频隐身的组网雷达多目标跟踪下射频辐射资源优化分配算法的过程可以描述为: 在 $k-1$ 时刻, 融合中心获得各部雷达经数据链路传送来的观测信息, 在满足预测BCRLB不大于阈值的情况下, 通过两步分解法结合内点法以及匈牙利算法计算出 k 时刻系统中雷达节点、驻留时间和辐射功率最优分配情况, 同时对系统中的各部雷达进行反馈, 各雷达再根据反馈信息在 k 时刻自适应地选择雷达节点对目标进行跟踪, 并自适应地调节其驻留时间和辐射功率。

4 仿真结果分析

为了验证本文所提算法的正确性和有效性, 本节进行了如下仿真: 考虑由 $N_{\text{rad}} = 6$ 部雷达组成的分布式雷达组网系统跟踪 $S = 2$ 个目标的场景, 系统中每部雷达的发射参数均相同, 有效带宽为 $\beta =$

表1 固定雷达分配方式的辐射资源优化控制算法

<p>步骤1 令 $g_1 = F_{k k-1}^s - F_{\max}$, $g_2 = T_{d,\min} - T_{d,1,k}^s$, $g_3 = T_{d,\min} - T_{d,2,k}^s, \dots$, $g_{M+1} = T_{d,\min} - T_{d,M,k}^s$, $g_{M+2} = T_{d,1,k}^s - T_{d,\max}$, $g_{M+3} = T_{d,2,k}^s - T_{d,\max}, \dots$, $g_{2M+1} = T_{d,M,k}^s - T_{d,\max}$, $g_{2M+2} = P_{\min} - P_{1,k}^s$, $g_{2M+3} = P_{\min} - P_{2,k}^s, \dots$, $g_{3M+1} = P_{\min} - P_{M,k}^s$, $g_{3M+2} = P_{1,k}^s - P_{\max}, \dots$, $g_{4M+1} = P_{M,k}^s - P_{\max}$, 设置可行域: $D = \left\{ T_{d,m,k}^s, P_{m,k}^s \mid g_a \left(T_{d,m,k}^s, P_{m,k}^s \right) \leq 0, a = 1, 2, \dots, 4M+1, 1 \leq m \leq M \right\}$ 其中, $g_a \left(T_{d,m,k}^s, P_{m,k}^s \right) = g_a, a = 1, 2, \dots, 4M+1$, 取 $\left(T_{d,m,k}^s, P_{m,k}^s \right)^{(0)} \in D (1 \leq m \leq M)$ 为初始点, $\varepsilon > 0$ 为算法终止指标, $\xi_1 > 0, c \geq 2$, 令 $l = 1$;</p> <p>步骤2 以 $\left(T_{d,m,k}^s, P_{m,k}^s \right)^{(l-1)}$ 为初始点求解如下子问题: $\min F_1 - \xi_l \left[\frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \dots + \frac{1}{g_{2M+2}} \right]$, s.t. $T_{d,m,k}^s, P_{m,k}^s \in D$, 其中, F_1 表示式(7)中的优化目标函数, 令上述问题的极小值点为 $\left(T_{d,m,k}^s, P_{m,k}^s \right)^{(l)}$;</p> <p>步骤3 检验终止条件, 若 $-\xi_l \left[\frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \dots + \frac{1}{g_{4M+1}} \right] < \varepsilon$, 算法终止; 否则, 令 $\xi_{l+1} \leftarrow \frac{\xi_l}{c}, l \leftarrow l+1$, 转入步骤2。</p>
--

1 MHz, 工作波长为 $\lambda = 0.03$ m, 采样间隔为 $\Delta T_0 = 3$ s, 每个时刻, 每个目标固定由 $M = 2$ 部雷达进行跟踪。雷达照射目标的驻留时间上、下限分别为 $T_{d,\max} = 0.1$ s 和 $T_{d,\min} = 0.0005$ s, 雷达辐射功率上、下限分别为 $P_{\max} = 2800$ W 和 $P_{\min} = 50$ W。根据均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和BCRLB的关系并经过仿真验证, 随着设定的跟踪精度阈值 F_{\max} 的减小, 组网雷达系统需要消耗更多的资源对目标进行辐射。本文根据目标实际跟踪精度要求, 将目标跟踪精度阈值设为 $F_{\max} = 1000$ m²。

为了更好地展现本文所提算法对组网雷达系统射频隐身性能的提升, 针对目标RCS起伏模型进行仿真, 同时将驻留时间资源和辐射功率资源均匀分配算法作为基准, 比较并分析两种算法的射频隐身性能。

图1给出了目标运动轨迹与组网雷达空间位置关系。假设目标跟踪过程持续时间为150 s, 两个目标的过程噪声强度均为15。从中可以看出, 本文所提算法能够较好地为目标进行跟踪。

图2给出了目标RCS时变模型。如图所示, 组网雷达系统中的雷达4和雷达5的反射系数较大, 尤其是目标1对雷达4和目标2对雷达5的反射系数, 而系统中除雷达4和雷达5外的目标对雷达的反射系数均为1 m²。在这种情况下, 目标对雷达的选择以及雷达资源的分配结果不仅和目标到雷达的距离以及相对位置有关, 而且与目标相对各雷达的RCS有关。

本文采用扩展卡尔曼滤波方法来实现多目标跟踪, 并采用RMSE来表征 k 时刻所有目标的总跟踪精度, 其计算公式为

$$\text{RMSE}(k) = \sqrt{\sum_{s=1}^S \frac{1}{N_{\text{MC}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{MC}}} \left\{ \left[x_k^s - \hat{x}_{n,k|k}^s \right]^2 + \left[y_k^s - \hat{y}_{n,k|k}^s \right]^2 \right\}}$$

式中, N_{MC} 为蒙特卡罗实验次数, 本文设为100。

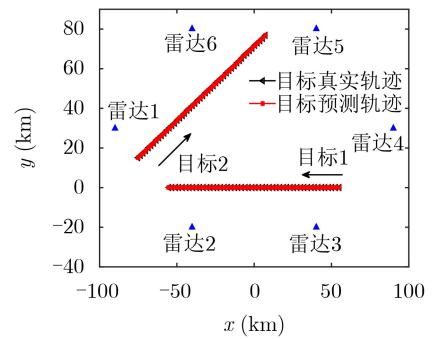


图1 目标轨迹与雷达组网分布图

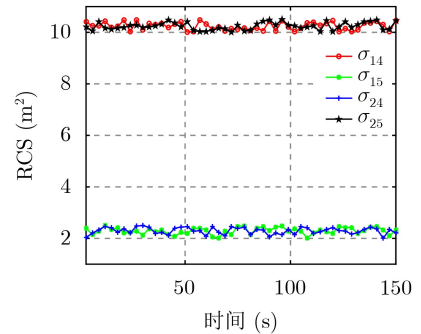


图2 目标RCS时变模型

$\left(\hat{x}_{n,k|k}^s, \hat{y}_{n,k|k}^s \right)$ 为第 n 次蒙特卡罗实验得到的 k 时刻目标估计位置。图3给出了在RCS起伏场景下两种算法目标跟踪的RMSE。由图3可知, 两种算法的目标跟踪精度相差不大且均满足要求。

为了更好地了解本文算法中的雷达节点选择规律以及辐射资源的分配规律, 图4给出了本文算法在RCS起伏场景下目标1和目标2的雷达选择及驻留时间资源分配结果, 图5给出了本文算法在RCS起伏场景下目标1和目标2的雷达选择及辐射功率资源分配结果。从图5可以看出, 对于目标1, 在0~63 s, 组网雷达系统选择雷达3和雷达4对其进行照射, 并且分配给雷达4更多的驻留时间资源和辐射功率资源, 在111~141 s, 系统选择雷达1和雷达

2, 且分配给雷达1更多的驻留时间资源和辐射功率资源; 对于目标2, 在15~33 s, 组网雷达系统选择雷达1和雷达2对其进行照射, 并且分配给雷达2更多的驻留时间资源和辐射功率资源, 在108~141 s, 系统选择雷达5和雷达6, 且分配给雷达5更多的驻留时间和辐射功率资源。由此可知, 组网雷达将优先选择与目标距离较近、相对位置较好且目标反射系数较大的雷达对该目标进行照射; 同时, 更多的驻留时间资源和辐射功率资源会分配给距离目标较远、相对位置较差且目标反射系数较小的雷达, 从而保证组网雷达系统的总辐射资源消耗最少。

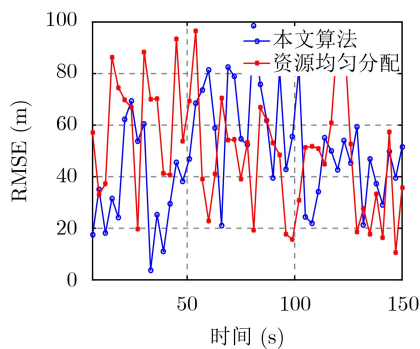


图3 RCS起伏场景下两种算法目标跟踪RMSE对比

图6和图7分别给出了两种算法在RCS起伏场景下组网雷达系统总驻留时间资源和总辐射功率资源消耗对比图。由此可知, 在跟踪性能相近的条件下, 本文所提算法可有效减少驻留时间和辐射功率资源消耗。

为了更直观地显示本文所提算法相较于资源均匀分配算法对驻留时间资源和辐射功率资源的节省程度, 分别定义组网雷达系统总驻留时间节省率 $\rho_{t_k} = 1 - \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^M T_{s,i,k}^{opt}}{\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^M T_{s,i,k}^{uni}}$ 和总辐射功率节省率 $\rho_{p_k} = 1 - \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^M P_{s,i,k}^{opt}}{\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^M P_{s,i,k}^{uni}}$, 式中, $T_{s,i,k}^{opt}$ 和 $P_{s,i,k}^{opt}$ 分别为本文所提算法在 k 时刻第 i 部雷达对目标 s 照射的驻留时间和辐射功率, $T_{s,i,k}^{uni}$ 和 $P_{s,i,k}^{uni}$ 分别为辐射资源均匀分配算法下的驻留时间和辐射功率。图8和图9分别示出了RCS起伏场景下每个时刻驻留时间节省率和辐射功率节省率。从中可以看出, 在0~20 s和100~150 s时间段内, 本文所提算法明显减少了组网雷达系统的驻留时间资源和辐射功率资源消耗, 资源节省率能够达到20%以上, 而在20~100 s时间段内, 所提算法对减少资源消耗的效果并不明显, 这是因为在这段时间内, 目标与组网雷达系统中选定的两部雷达之间的距离

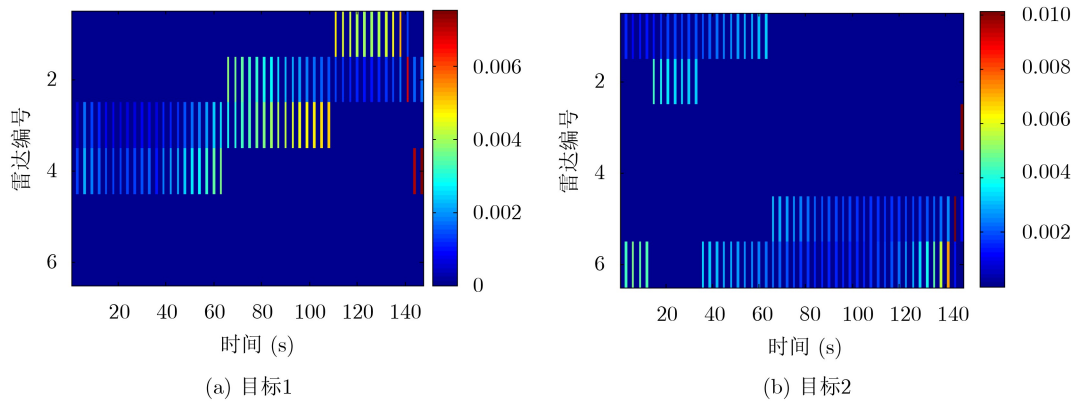


图4 RCS起伏场景下各目标的雷达选择及驻留时间优化分配结果

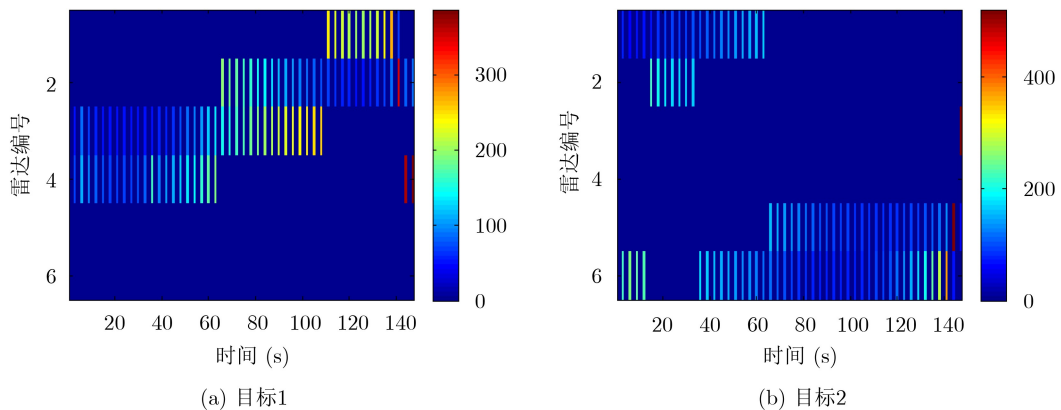


图5 RCS起伏场景下各目标的雷达选择及辐射功率优化分配结果

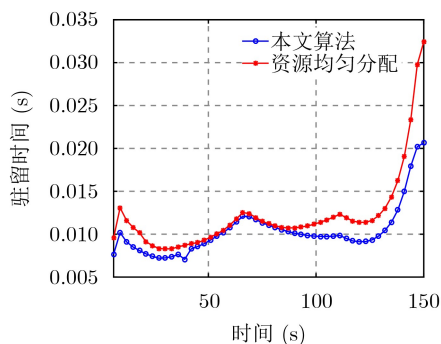


图6 RCS起伏场景下两种算法的总驻留时间对比

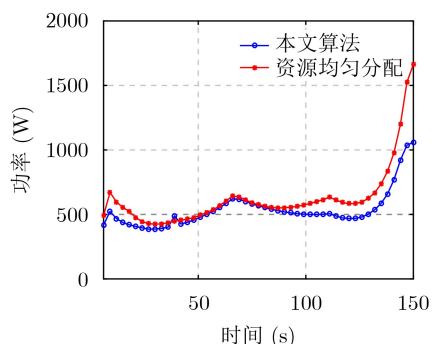


图7 RCS起伏场景下两种算法的总辐射功率对比

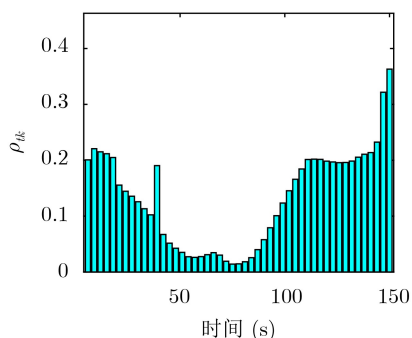


图8 RCS起伏场景下驻留时间资源节省率

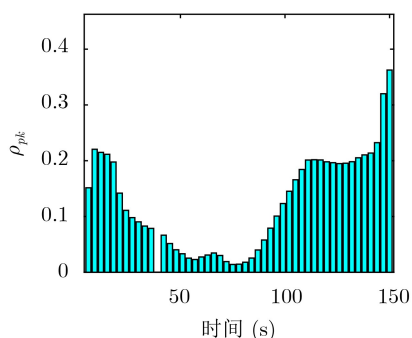


图9 RCS起伏场景下辐射功率资源节省率

相差不大，雷达的驻留时间和辐射功率分配较为平均。总体来说，本文所提算法有效减少了组网雷达系统的辐射资源消耗，提升了其射频隐身性能。

定义优化目标函数值的减小率为

$$\rho_k = 1 - F_k^{\text{opt}} / F_k^{\text{uni}}$$

式中， F_k^{opt} 表示本文所提算法在 k 时刻的目标函数值， F_k^{uni} 表示资源均匀分配算法在 k 时刻的目标函数值。如图10所示，在RCS起伏场景下，本文所提算法相比于资源均匀分配算法有效减小了目标函数值，验证了算法的有效性。

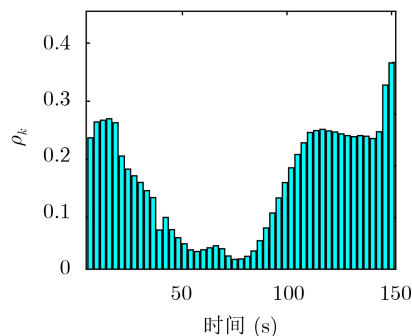


图10 RCS起伏场景下目标函数值减小率

5 结束语

本文针对组网雷达多目标跟踪场景，提出了一种面向射频隐身的射频辐射资源优化分配算法，在满足给定目标跟踪性能的条件下，通过优化配置各部雷达辐射参数，最小化各雷达的驻留时间与辐射功率的加权和。之后，采用两步分解法对上述优化问题进行了求解，并通过匈牙利算法确定最佳雷达节点分配方式。仿真结果表明，组网雷达将优先选择与目标距离较近、相对位置较好且反射系数较大的雷达对该目标进行照射；同时，更多的驻留时间和辐射功率资源会分配给距离目标较远、相对位置较差且反射系数较小的雷达，从而保证组网雷达系统的射频总辐射资源消耗最少。与均匀分配算法相比，本文所提算法能够在满足给定跟踪精度的条件下，显著减少组网雷达的驻留时间资源和辐射功率资源消耗，提升其射频隐身性能。下一步工作将考虑采样间隔和信号带宽等与本文辐射参数联合优化，以进一步提升系统射频隐身性能。

参考文献

- [1] 时晨光, 周建江, 汪飞, 等. 机载雷达组网射频隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 3-23.
SHI Chenguang, ZHOU Jianjiang, WANG Fei, *et al.* Radio Frequency Stealth Technology for Airborne Radar Network[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 3-23.
- [2] 严俊坤, 戴奉周, 秦童, 等. 一种针对目标三维跟踪的多基地雷达系统功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 901-907.
YAN Junkun, DAI Fengzhou, QIN Tong, *et al.* A power allocation approach for 3D target tracking in multistatic radar systems[J]. *Journal of Electronics & Information*

- Technology*, 2013, 35(4): 901–907.
- [3] 胡捍英, 孙扬, 郑娜娥. 多目标速度估计的分布式MIMO雷达资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(10): 2453–2460. doi: [10.11999/JEIT151452](https://doi.org/10.11999/JEIT151452).
HU Hanying, SUN Yang, and ZHENG Nae. Resource allocation approach in distributed MIMO radar with multiple targets for velocity estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(10): 2453–2460. doi: [10.11999/JEIT151452](https://doi.org/10.11999/JEIT151452).
- [4] LI Jian and STOICA P. MIMO radar with colocated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 106–114. doi: [10.1109/MSP.2007.904812](https://doi.org/10.1109/MSP.2007.904812).
- [5] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R S, *et al.* Spatial diversity in radars—models and detection performance[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823–838. doi: [10.1109/TSP.2005.862813](https://doi.org/10.1109/TSP.2005.862813).
- [6] ZHANG Haowei, XIE Junwei, SHI Junpeng, *et al.* Sensor scheduling and resource allocation in distributed MIMO radar for joint target tracking and detection[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 62387–62400. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2916334](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2916334).
- [7] CHAVALI P and NEHORAI A. Scheduling and power allocation in a cognitive radar network for multiple-target tracking[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(2): 715–729. doi: [10.1109/TSP.2011.2174989](https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2174989).
- [8] CHEN Haowen, TA Shiyang, and SUN Bin. Cooperative game approach to power allocation for target tracking in distributed MIMO radar sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5423–5432. doi: [10.1109/JSEN.2015.2431261](https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2431261).
- [9] 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).
- [10] 严俊坤, 纠博, 刘宏伟, 等. 一种针对多目标跟踪的多基雷达系统聚类与功率联合分配算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8): 1875–1881.
YAN Junkun, JIU Bo, LIU Hongwei, *et al.* Joint cluster and power allocation algorithm for multiple targets tracking in multistatic radar systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(8): 1875–1881.
- [11] 李正杰, 谢军伟, 张浩为, 等. 基于集中式MIMO雷达的多目标跟踪功率分配优化算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(5): 76–82.
LI Zhengjie, XIE Junwei, ZHANG Haowei, *et al.* Multiple targets tracking power allocation optimization algorithm based on colocated MIMO radar[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2019, 20(5): 76–82.
- [12] ZHANG Haowei, ZONG Binfeng, and XIE Junwei. Power and bandwidth allocation for multi-target tracking in colocated MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(9): 9795–9806. doi: [10.1109/TVT.2020.3002899](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3002899).
- [13] LI Zhengjie, XIE Junwei, ZHANG Haowei, *et al.* Adaptive sensor scheduling and resource allocation in netted colocated MIMO radar system for multi-target tracking[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 109976–109988. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3001358](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001358).
- [14] YAN Junkun, PU Wenqiang, ZHOU Shenghua, *et al.* Optimal resource allocation for asynchronous multiple targets tracking in heterogeneous radar networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 4055–4068. doi: [10.1109/TSP.2020.3007313](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.3007313).
- [15] 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).
- [16] YUAN Ye, YI Wei, KIRUBARAJAN T, *et al.* Scaled accuracy based power allocation for multi-target tracking with colocated MIMO radars[J]. *Signal Processing*, 2019, 158: 227–240.
- [17] DAI Jinhui, YAN Junkun, WANG Penghui, *et al.* Optimal resource allocation for multiple target tracking in phased array radar network[C]. 2019 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Chengdu, China, 2019: 1–4. doi: [10.1109/ICCAIS46528.2019.9074602](https://doi.org/10.1109/ICCAIS46528.2019.9074602).
- [18] DING Lintao, SHI Chenguang, QIU Wei, *et al.* Joint dwell time and bandwidth optimization for multi-target tracking in radar network based on low probability of intercept[J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1269. doi: [10.3390/s20051269](https://doi.org/10.3390/s20051269).
- [19] SHI Chenguang, DING Lintao, WANG Fei, *et al.* Low probability of intercept-based collaborative power and bandwidth allocation strategy for multi-target tracking in distributed radar network system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(12): 6367–6377. doi: [10.1109/JSEN.2020.2977328](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2977328).
- [20] LAWRENCE D E. Low probability of intercept antenna array beamforming[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(9): 2858–2865. doi: [10.1109/TAP.2010.2052573](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2052573).
- [21] SHI Chenguang, WANG Fei, SELLATHURAI M, *et al.* Power minimization-based robust OFDM radar waveform design for radar and communication systems in coexistence[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(5): 1316–1330. doi: [10.1109/TSP.2017.2770086](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2770086).
- [22] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 297–301.
- 时晨光: 男, 1989年生, 副教授, 博士, 研究方向为飞行器射频隐身技术, 组网雷达资源管理, 多平台传感器协同等。
丁琳涛: 男, 1997年生, 硕士生, 研究方向为组网雷达资源管理。
汪飞: 男, 1976年生, 副教授, 博士, 研究方向为飞行器射频隐身技术、雷达信号处理、阵列信号处理等。
周建江: 男, 1962年生, 教授, 博士, 研究方向为飞行器射频隐身技术、雷达目标特性分析、航空电子信息系统设计等。