

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

时晨光* 董璟 周建江

(南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室 南京 210016)

摘要: 该文针对频谱共存环境下多目标跟踪资源分配问题, 提出了组网雷达功率时间联合优化算法。首先, 推导了包含雷达节点选择、发射功率和驻留时间等射频辐射参数的预测贝叶斯克拉默-拉奥下界(BCRLB), 以此作为多目标跟踪精度的衡量指标; 在此基础上, 以最小化多目标跟踪BCRLB为优化目标, 以满足给定的组网雷达射频资源和预先设定的通信基站最大可容忍干扰能量阈值为约束条件, 建立了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分配模型, 对雷达节点选择、发射功率和驻留时间进行自适应联合优化配置; 然后, 针对上述优化问题, 采用两步分解法将其分解为多个子凸问题, 并结合半正定规划(SDP)算法和循环最小化算法进行求解。仿真结果表明, 与现有算法相比, 所提算法能够在保证通信基站正常工作的条件下, 有效提高组网雷达的多目标跟踪精度。

关键词: 资源分配; 组网雷达; 多目标跟踪; 频谱共存

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2023)03-0590-12

DOI: 10.12000/JR22146

引用格式: 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.

Reference format: 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.

Joint Transmit Power and Dwell Time Allocation for Multitarget Tracking in Radar Networks under Spectral Coexistence

SHI Chenguang* DONG Jing ZHOU Jianjiang

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

Abstract: For the resource allocation problem of multitarget tracking in a spectral coexistence environment, this study proposes a joint transmit power and dwell time allocation algorithm for radar networks. First, the predicted Bayesian Cramér-Rao Lower Bound (BCRLB) with the variables of radar node selection, transmit power and dwell time is derived as the performance metric for multi-target tracking accuracy. On this basis, a joint optimization model of transmit power and dwell time allocation for multitarget tracking in radar networks under spectral coexistence is built to collaboratively optimize the radar node selection, transmit power and dwell time of radar networks, This joint optimization model aims to minimize the multitarget tracking BCRLB while satisfying the given transmit resources of radar networks and the predetermined maximum allowable interference energy threshold of the communication base station. Subsequently, for the aforementioned optimization problem, a two-step decomposition method is used to decompose it into multiple subconvex

收稿日期: 2022-07-13; 改回日期: 2022-08-24; 网络出版: 2022-09-01

*通信作者: 时晨光 scg_space@163.com *Corresponding Author: SHI Chenguang, scg_space@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(62271247, 61801212), 国家部委基金, 航空科学基金(20200020052005, 20200020052002), 南京航空航天大学前瞻布局科研专项资金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62271247, 61801212), The National Ministries Foundation, The National Aerospace Science Foundation of China (20200020052005, 20200020052002), The Fund of Prospective Layout of Scientific Research for Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

责任编辑: 严俊坤 Corresponding Editor: YAN Junkun

problems, which are solved by combining the Semi-Definite Programming (SDP) and cyclic minimization algorithms. The simulation results showed that, compared with the existing algorithms, the proposed algorithm can effectively improve the multitarget tracking accuracy of radar networks while ensuring that the communication base station works properly.

Key words: Resource allocation; Radar networks; Multitarget tracking; Spectral coexistence

1 引言

当前, 空战逐渐由信息化向智能化过渡, 通过多雷达协同能够提高空天目标的预警探测能力与情报保障能力, 特别是能够提高复杂战场条件下对非合作特种军用目标的连续探测跟踪能力, 已成为国内外研究人员的共识。与此同时, 随着军事装备技术的飞速发展, 多雷达协同的作战环境也变得越来越复杂, 电磁频谱环境的复杂性、时变性以及难以预测性, 对雷达系统提出了严峻挑战。如何让雷达系统在与通信基站共享同一工作频段的条件下, 通过优化自身的射频辐射资源配置以提升其探测跟踪性能, 已经成为一个热点问题^[1-7]。

对于共享频谱的雷达和通信系统, 需要设计有效的管理方案来减少两者间的相互干扰, 从而保证彼此都能正常工作^[8-18]。针对该问题, Zheng等人^[9]提出了一种非合作雷达/通信共存的自适应干扰消除方法, 优先考虑保护通信系统性能, 并通过求解凸问题对雷达参数和通信解调误差进行估计, 仿真结果验证了算法的有效性与优越性。鲁彦希^[10]以雷达对通信系统的干扰能量为约束条件, 对组网雷达节点选择与功率参数进行自适应优化设计。文献^[11]提出了用于多雷达系统中多目标跟踪的通信感知资源调度策略, 考虑在最小化雷达对通信干扰的同时, 对雷达发射功率和采样间隔进行优化分配, 仿真结果表明, 该算法能够有效提高系统多目标跟踪性能。文献^[12]针对异构雷达与通信系统之间的频谱共存问题, 通过分配有限的发射功率、驻留时间和共享带宽资源, 来提高组网雷达的跟踪性能, 同时保持通信下行链路的吞吐量水平。文献^[13]对通信系统传输协方差矩阵以及基于稀疏感知和矩阵补全的多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)雷达采样方案进行联合设计, 旨在保持通信系统的平均容量和发射功率的同时, 最大限度地降低雷达接收机处的有效干扰功率。Hessar等人^[14]采用具有低复杂度的空频域隔离机制, 并结合具体的雷达通信系统操作策略解决频谱共存问题。韩凯峰等人^[15]提出了一种雷达通信频谱共存场景下基于块对角化的通信雷达波束设计方案, 该方案以通信对雷达无干扰及通信用户间无干扰为约束, 在满足功率资源约

束的条件下, 最大化通信系统和速率。仿真结果表明, 所提算法适用于多种场景, 且与现有算法相比, 具有更低的计算复杂度和更好的通信性能。文献^[16]针对多雷达通信一体化系统相互干扰的问题, 提出了基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)子载波分配的雷达通信一体化系统, 利用子载波间的互相正交性, 消除雷达与通信用户间干扰以及通信用户之间的相互干扰。文献^[17]提出了频谱共存下基于Stackelberg博弈的多基地分布式雷达功率分配算法, 在满足预先设定的目标探测信干噪比阈值的情况下, 最小化各雷达辐射功率, 从而起到保护通信基站不受雷达射频辐射干扰。

组网雷达具有多雷达探测资源协同运用与信息融合紧密结合的技术体制特点, 且在目标检测、跟踪、识别等诸多场景中均具有显著优势^[19]。射频资源管理是组网雷达目标跟踪任务中重要的一环, 通过对辐射功率、驻留时间、信号带宽和辐射采样间隔等射频参数进行优化, 能够有效提升雷达系统性能^[20-35]。Zhang等人^[20]对杂波环境下分布式MIMO雷达多目标跟踪的资源分配问题进行了研究, 通过对雷达节点和功率资源进行自适应优化配置, 最小化多目标跟踪误差, 并提出了次优解排序方法对该优化模型进行求解。Lu等人^[21]提出了一种机载雷达路径规划与辐射资源联合优化算法, 该算法将机载雷达路径规划和辐射资源作为优化参数, 并采用多目标跟踪误差效用函数作为优化目标, 采用多步分解法和梯度投影法对该问题进行求解, 仿真结果表明, 该算法有效提升了雷达系统多目标跟踪性能。文献^[22]提出了面向低截获概率的机载雷达功率资源分配算法, 该算法以包含雷达多目标跟踪误差和截获概率的加权为目标函数, 并采用两步分解法对模型进行求解。仿真结果表明, 该算法能够有效降低跟踪过程中雷达被敌方无源探测系统截获的概率。文献^[23]提出了一种多目标跟踪场景下的相控阵雷达最优资源分配算法, 该算法以多目标跟踪性能作为约束条件, 以最小化雷达资源消耗为优化目标, 对雷达的功率和带宽参数进行联合优化分配。Cheng等人^[24]提出了同时多波束集中式MIMO

雷达自适应时空资源与波形联合优化算法, 该算法采用智能优化方法对雷达采样周期、发射能量、子阵列数和多波束方向矢量等多个参数进行联合优化设计, 能够自适应选择工作模式, 从而在最大化目标跟踪精度的同时, 达到最小化雷达资源消耗的目的。文献[25]以最小化雷达驻留时间和辐射功率资源加权和为优化目标, 结合内点法和匈牙利算法对雷达节点分配方式、辐射功率和驻留时间进行优化, 仿真结果表明, 相较于资源均匀分配算法, 该算法能够有效提升雷达系统的射频隐身性能。文献[26]对多基地雷达之间的博弈优化模型进行分析, 将预先设定的信干噪比阈值作为约束条件, 结合凸优化方法和博弈思想, 对多基地雷达功率分配和波束形成进行联合优化, 仿真结果验证了该算法对雷达间的干扰抑制能力。文献[27]提出了基于Stackelberg博弈的组网雷达功率分配算法, 该算法旨在最小化功率消耗的同时最优化目标跟踪精度, 仿真结果表明, 该算法能够有效提高雷达系统的资源利用率。严俊坤等人[28]提出了基于机会约束的集中式MIMO雷达功率分配算法, 该算法以MIMO雷达高概率满足多目标跟踪精度为约束条件, 以最小化MIMO雷达的发射功率为优化目标, 并采用凸优化方法对优化模型进行求解。文献[29]提出了分布式MIMO雷达多目标跟踪接收波束资源分配算法, 该算法能够基于跟踪周期中的反馈信息, 采用内点法实现接收波束与目标之间的最优分配。

综上所述, 上述研究成果为优化组网雷达目标跟踪性能和解决雷达通信频谱共存问题奠定了坚实的基础。然而, 针对多目标跟踪场景, 文献[10,11]等已有研究并未充分考虑雷达通信频谱共存环境下组网雷达功率时间资源的联合优化配置, 解决该问题对于提升我方雷达探测系统的目标跟踪精度、射频资源利用率及对敌作战效能具有重要意义。因此, 本文围绕多目标跟踪场景下雷达通信频谱共存和组网雷达辐射资源管理领域, 研究了频谱共存下面向多目标跟踪的组网雷达射频资源联合优化分配问题。首先, 由于各优化参数的约束不同, 采用发射能量作为优化参数的算法复杂度较高, 因此针对频谱共存环境下多目标跟踪问题, 建立了组网雷达功率时间资源联合优化模型, 以最小化多目标跟踪贝叶斯克拉默-拉奥下界(Bayesian Cramér-Rao Lower Bound, BCRLB)为优化目标, 以给定的组网雷达射频资源和预先设定的通信基站最大可容忍干扰能量阈值为约束条件, 通过联合优化雷达节点选择、发射功率和驻留时间等射频辐射参数, 提升组网雷达的多目标跟踪精度。仿真结果验证了本文所提算法的可行性和稳健性。

2 系统模型

考虑一个由 N 部雷达组成的组网雷达系统, 各雷达节点分散部署于二维直角坐标系中, 并保持时间、空间、频率同步。第 n 部雷达的位置坐标可以表示为 $\mathbf{x}_{R,n} = (x_{R,n}, y_{R,n})$, $n = 1, 2, \dots, N$ 。另外, 假设组网雷达系统的探测范围内存在 Q 个运动目标和 C 个通信基站。

2.1 目标运动模型

定义目标 q 在 k 时刻的状态向量为 $\mathbf{X}_k^q = [x_k^q, y_k^q, v_{x,k}^q, v_{y,k}^q]^T$, 其中, (x_k^q, y_k^q) 和 $(v_{x,k}^q, v_{y,k}^q)$ 分别表示 k 时刻目标 q 的位置和速度。假设目标均做匀速直线运动, 则其状态方程可以表示为[25]

$$\mathbf{X}_k^q = \mathbf{F} \mathbf{X}_{k-1}^q + \mathbf{W} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_2$ 表示目标 q 的状态转移矩阵; ΔT_0 表示雷达采样间隔; \otimes 表示克罗内克积; \mathbf{I}_2 表示2阶单位矩阵; \mathbf{W} 表示高斯过程白噪声且均值为零, 其协方差矩阵 \mathbf{U}_q 可以表示为

$$\mathbf{U}_q = r_q \mathbf{I}_2 \otimes \begin{bmatrix} \frac{(\Delta T_0)^3}{3} & \frac{(\Delta T_0)^2}{2} \\ \frac{(\Delta T_0)^2}{2} & \Delta T_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, r_q 表示过程噪声强度。

2.2 雷达量测模型

假设各个时刻每部雷达最多可跟踪一个目标。为方便起见, 定义雷达节点选择二元变量 $\alpha_{n,k}^q \in \{0, 1\}$, 其中, $\alpha_{n,k}^q = 1$ 表示 k 时刻雷达 n 对目标 q 进行照射跟踪; $\alpha_{n,k}^q = 0$ 表示 k 时刻雷达 n 未对目标 q 进行照射跟踪。因此, k 时刻雷达 n 对目标 q 的量测模型可以表示为[25]

$$\mathbf{Z}_{n,k}^q = \begin{cases} \mathbf{H}(\mathbf{X}_k^q) + \mathbf{V}_{n,k}^q, & \alpha_{n,k}^q = 1 \\ \emptyset, & \alpha_{n,k}^q = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{Z}_{n,k}^q$ 表示 k 时刻雷达 n 对目标 q 的量测矢量, 即 k 时刻雷达 n 关于目标 q 距离和方位角的量测值; $\mathbf{H}(\mathbf{X}_k^q)$ 表示非线性转移函数, 可以计算为

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{X}_k^q) &= \begin{bmatrix} R_{n,k}^q \\ \varphi_{n,k}^q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sqrt{(x_k^q - x_{R,n})^2 + (y_k^q - y_{R,n})^2} \\ \arctan 2 \left(\frac{y_k^q - y_{R,n}}{x_k^q - x_{R,n}} \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $R_{n,k}^q$ 和 $\varphi_{n,k}^q$ 分别表示 k 时刻目标 q 相对于雷达 n 的距离和方位角; $\mathbf{V}_{n,k}^q$ 表示 k 时刻雷达 n 关于目标 q 的量测噪声矢量, 服从零均值、方差为 $\mathbf{\Omega}_{n,k}^q$ 的高斯分布, 其方差 $\mathbf{\Omega}_{n,k}^q$ 可以表示为

$$\mathbf{\Omega}_{n,k}^q = \mathbf{\Psi}_{n,k} + \begin{bmatrix} \frac{c^2}{(4\pi)^2 \beta^2 \text{SNR}_{n,k}^q} & 0 \\ 0 & \frac{3\lambda^2}{\pi^2 \gamma^2 \text{SNR}_{n,k}^q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{\Psi}_{n,k} = \text{Re}[2P_{n,k}^q (\mathbf{M}_{n,k}^q)^H (\mathcal{L}_n)^{-1} \mathbf{M}_{n,k}^q]^{-1}$ 表示通信基站对雷达 n 施加的量测干扰噪声协方差矩阵, 其中,

$$\mathbf{M}_{n,k}^q = \left[\frac{\partial \mathbf{u}(R_{n,k}^q)}{\partial R_{n,k}^q} \otimes \mathbf{v}(\varphi_{n,k}^q) \mathbf{u}(R_{n,k}^q) \otimes \frac{\partial \mathbf{v}(\varphi_{n,k}^q)}{\partial \varphi_{n,k}^q} \right]^T$$

(\cdot)^T 表示矩阵转置运算; $\mathbf{u}(R_{n,k}^q)$ 表示雷达 n 的发射波形序列; $\mathbf{v}(\varphi_{n,k}^q)$ 表示雷达 n 的半波长导向矢量; β 表示雷达发射信号带宽; λ 和 γ 分别表示雷达波长和天线孔径; $\text{SNR}_{n,k}^q$ 为 k 时刻雷达 n 对目标 q 的回波信噪比, 可以计算为

$$\text{SNR}_{n,k}^q = \frac{T_{n,k}^q P_{n,k}^q G_t G_r \sigma_n^q \lambda^2 G_{\text{RP}}}{T_r (4\pi)^3 k T_o B F_r (R_{n,k}^q)^4} \exp\left(-4 \ln(2) \frac{(\tilde{\alpha}_{n,k}^q)^2}{\theta_{3 \text{ dB}}^2}\right) \quad (6)$$

式中, $T_{n,k}^q$ 和 $P_{n,k}^q$ 分别表示 k 时刻雷达 n 跟踪目标 q 的驻留时间和发射功率; G_t 和 G_r 分别表示雷达发射天线增益和接收天线增益; σ_n^q 表示目标 q 相对于雷达 n 的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS);

$$[\mathbf{\Xi}_{m,n}]_{u,v} = N_{m,n} \begin{cases} f_{U,m,n} - f_{L,m,n}, & u = v \\ \frac{e^{j2\pi T_s f_{U,m,n}(u-v)} - e^{j2\pi T_s f_{L,m,n}(u-v)}}{j2\pi T_s (u-v)}, & u \neq v \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{\Xi}_{m,n}$ 的第 u 行第 v 列的元素为对应信号延时的自相关函数, 同时也是通信基站信号 PSD 的离散时间傅里叶逆变换; T_s 表示信号采样周期。考虑到距离衰减等因素影响, 第 m 个通信基站对第 n 部雷达施加的干扰噪声为

$$\mathbf{e}_{m,n} = \frac{\chi_{m,n} \bar{\mathbf{e}}_{m,n} \otimes \mathbf{v}(\theta_m^n)}{\|\mathbf{x}_{C,m} - \mathbf{x}_{R,n}\|_2} \quad (9)$$

式中, $\chi_{m,n}$ 表示传输信道的强度系数; $\bar{\mathbf{e}}_{m,n}$ 表示第 m 个通信基站在第 n 部雷达频带范围产生的干扰序列; θ_m^n 表示通信基站 m 相对于雷达 n 的方位角。假设各通信基站的发射信号相互正交, 则所有通信基站对雷达 n 的干扰时域协方差矩阵可以表示为

$$\mathcal{L}_n = \sum_{m=1}^M \frac{(\chi_{m,n})^2 \{\mathbf{\Xi}_{m,n} \otimes [\mathbf{v}(\theta_m^n) \mathbf{v}^H(\theta_m^n)]\}}{\|\mathbf{x}_{C,m} - \mathbf{x}_{R,n}\|_2^2} \quad (10)$$

式中, $\mathbf{x}_{C,m}$ 表示第 m 个通信基站的位置。由式(8)可

G_{RP} 表示雷达接收机处理增益; T_r 表示脉冲重复周期; k 为玻尔兹曼常量; T_o 表示雷达接收机噪声温度; B 表示雷达接收机匹配滤波器带宽; F_r 表示雷达接收机噪声系数; $\tilde{\alpha}_{n,k}^q$ 表示 k 时刻目标 q 的真实方位角与雷达 n 发射波束指向之间的角度差; $\theta_{3 \text{ dB}}$ 表示雷达 3 dB 天线波束宽度。

2.3 干扰模型

通信基站在一定频带范围内持续性向外辐射电磁信号, 会使雷达系统的探测跟踪性能下降。另外, 在频谱共存环境下, 雷达在执行目标探测跟踪任务时也会对通信基站的正常工作造成负面影响。因此, 本节对雷达和通信基站两者的相互干扰进行分析。首先, 考虑通信基站对雷达的干扰, 此类干扰可以看作多种随机调制信号的组合。根据中心极限定理, 假设信号形式可近似表示为占据一定带宽的循环对称带限的复高斯序列, 该信号的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)在雷达的工作通带范围内表现出了均匀特性^[36], 即

$$\delta_{m,n}(f) = \begin{cases} N_{m,n}, & f_{L,m,n} \leq f \leq f_{U,m,n} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $N_{m,n}$ 表示信号 PSD 强度; $f_{U,m,n}$ 和 $f_{L,m,n}$ 分别表示第 m 个通信基站和第 n 部雷达共同覆盖频带的上界和下界。定义第 m 个通信基站对第 n 部雷达产生的干扰信号的时域协方差矩阵 $\mathbf{\Xi}_{m,n}$ 可以表示为^[10]

知, $(f_{U,m,n} - f_{L,m,n})$ 值越大, 则通信基站对雷达的干扰能量越强; 如果第 m 个通信基站和第 n 部雷达在频谱上没有覆盖, 则 $f_{U,m,n} - f_{L,m,n} = 0$, 即可认为对应的干扰强度为 0。

雷达在跟踪运动目标时对通信基站的干扰是时变的, 且与目标的运动状态有关。本文使用雷达发射信号能量的联合空频域分布来表征干扰强度, 可以计算为

$$\mathbb{E}(\alpha_{n,k}^q P_{n,k}^q \mathbf{x}_{C,m}) = \sum_{q=1}^Q \sum_{n=1}^N \alpha_{n,k}^q P_{n,k}^q G_n^q(\mathbf{x}_{C,m}) \mathbf{s}_n^H \Phi_{m,n} \mathbf{s}_n \quad (11)$$

式中, $\mathbf{s}_n = [s_n(1), s_n(2), \dots, s_n(L)]^T$ 表示具有有限间隔的雷达波形序列; $G_n^q(\mathbf{x}_{C,m})$ 表示雷达发射信号能量的空间分布^[10], 即

$$G_n^q(\mathbf{x}_{C,m}) = \frac{\left| \sum_{a=0}^A e^{(-j\pi a [\sin(\theta_m^n - \theta_q^n) - \sin(\theta_q^n - \theta_q^0)])} \right|^2}{\|\mathbf{x}_{C,m} - \mathbf{x}_{R,n}\|_2^2} \quad (12)$$

式中, θ_q^n 表示雷达 n 对目标 q 的跟踪角度; θ_q^0 表示目标 q 与初始位置之间的角度。于是, $\Phi_{m,n}$ 可以表示为

$$[\Phi_{m,n}]_{u,v} = \begin{cases} f_{U,m,n} - f_{L,m,n}, & u = v \\ \frac{e^{j2\pi f_{U,m,n}(u-v)} - e^{j2\pi f_{L,m,n}(u-v)}}{j2\pi T_s(u-v)}, & u \neq v \end{cases} \quad (13)$$

3 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

针对频谱共存环境下多目标跟踪资源分配问题, 提出一种面向多目标跟踪的组网雷达功率时间联合优化分配算法, 旨在满足给定雷达系统射频资源和预先设定的通信基站最大可容忍干扰能量阈值等约束的条件下, 对雷达节点选择、发射功率和驻留时间等射频参数进行自适应优化配置, 从而在保证通信基站正常工作的同时, 有效提升组网雷达的多目标跟踪精度。

3.1 优化模型建立

在建立优化模型之前, 需要推导表征目标跟踪精度衡量指标的解析表达式。文献[37]中指出, 在参数无偏估计的条件下, BCRLB为运动目标跟踪的均方误差提供了下界, 可以用来表征组网雷达跟踪运动目标的性能衡量指标。首先, 推导出 k 时刻目标 q 的预测贝叶斯信息矩阵表达式为

$$\begin{aligned} J(\mathbf{X}_{k|k-1}^q) &= [\mathbf{U}_q + \mathbf{F}J^{-1}(\mathbf{X}_{k|k-1}^q)\mathbf{F}^T]^{-1} \\ &+ \sum_{n=1}^N \alpha_{n,k}^q (\mathbf{G}_{n,k|k-1}^q)^T (\boldsymbol{\Omega}_{n,k|k-1}^q)^{-1} \\ &\cdot \mathbf{G}_{n,k|k-1}^q \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $\mathbf{G}_{n,k|k-1}^q = [\nabla_{\mathbf{X}_{k|k-1}^q} (\mathbf{H}(\mathbf{X}_{k|k-1}^q))]^T$ 表示 $k-1$ 时刻雷达 n 相对于目标的雅可比矩阵预测值; $\nabla_{\mathbf{X}_{k|k-1}^q}$ 表示对 $\mathbf{X}_{k|k-1}^q$ 求1阶偏导; $\boldsymbol{\Omega}_{n,k|k-1}^q$ 为雷达发射功率 $P_{n,k}^q$ 和驻留时间 $T_{n,k}^q$ 的函数。因此, 对式(14)求逆, 即可得到多目标状态估计误差的预测BCRLB矩阵解析表达式, 并采用预测BCRLB矩阵的迹作为表征目标跟踪精度的衡量指标:

$$\mathfrak{S}_k^q(\mathbf{X}_{k|k-1}^q, \boldsymbol{\alpha}_k^q, \mathbf{P}_k^q, \mathbf{T}_k^q) = \text{trace} \left[\left(J(\mathbf{X}_{k|k-1}^q) \right)^{-1} \right] \quad (15)$$

式中, $\text{trace}(\cdot)$ 表示矩阵求迹运算; $\boldsymbol{\alpha}_k^q$ 表示雷达节

点选择参数集合, \mathbf{P}_k^q 和 \mathbf{T}_k^q 分别表示雷达发射功率和驻留时间集合, 即

$$\begin{cases} \boldsymbol{\alpha}_k^q = [\alpha_{1,k}^q, \alpha_{2,k}^q, \dots, \alpha_{n,k}^q, \dots, \alpha_{N,k}^q] \\ \mathbf{P}_k^q = [P_{1,k}^q, P_{2,k}^q, \dots, P_{n,k}^q, \dots, P_{N,k}^q] \\ \mathbf{T}_k^q = [T_{1,k}^q, T_{2,k}^q, \dots, T_{n,k}^q, \dots, T_{N,k}^q] \end{cases} \quad (16)$$

本文提出了一种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, 通过联合优化分配雷达节点选择、发射功率和驻留时间等射频辐射参数, 在满足给定的雷达射频资源和预先设定的通信基站最大可容忍干扰能量阈值的条件下, 最大限度地降低组网雷达系统的多目标跟踪误差, 可构建如下数学优化模型:

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\alpha}_k^q, \mathbf{P}_k^q, \mathbf{T}_k^q} & \sum_{q=1}^Q \mathfrak{S}_k^q(\mathbf{X}_{k|k-1}^q, \boldsymbol{\alpha}_k^q, \mathbf{P}_k^q, \mathbf{T}_k^q) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} T_{\min} \leq T_{n,k}^q \leq T_{\max}, & \alpha_{n,k}^q = 1 \\ T_{n,k}^q = 0, & \alpha_{n,k}^q = 0 \\ P_{\min} \leq P_{n,k}^q \leq P_{\max}, & \alpha_{n,k}^q = 1 \\ P_{n,k}^q = 0, & \alpha_{n,k}^q = 0 \end{cases} \\ & \sum_{q=1}^Q \alpha_{n,k}^q \leq 1, \quad \alpha_{n,k}^q \in \{0, 1\} \\ & \sum_{n=1}^N \alpha_{n,k}^q \leq \partial_{\max} \\ & \mathbb{E}(\alpha_{n,k}^q, P_{n,k}^q, \mathbf{x}_{C,m}) \leq E_{\max} \\ & \sum_{n=1}^N T_{n,k}^q = T_{\text{total}} \\ & \sum_{n=1}^N P_{n,k}^q = P_{\text{total}} \end{cases} \quad (17) \end{aligned}$$

式中, T_{\max} 和 T_{\min} 分别表示各雷达驻留时间的上界和下界; P_{\max} 和 P_{\min} 分别表示各雷达发射功率的上界和下界; T_{total} 和 P_{total} 分别表示照射各目标的所有雷达驻留时间和发射功率之和; E_{\max} 表示通信基站所能容忍的最大雷达干扰能量阈值; $\sum_{q=1}^Q \alpha_{n,k}^q \leq 1$ 表示 k 时刻每部雷达最多可跟踪一个目标; ∂_{\max} 表示各时刻组网雷达跟踪目标 q 可选择的最多雷达节点数目。

3.2 优化模型求解

由于 $\alpha_{n,k}^q$ 是一个二元变量, 优化模型(17)为含有雷达节点选择、发射功率和驻留时间3个变量的非凸、非线性优化问题[38]。本文结合半正定规划(Semi-Definite Programming, SDP)算法和循环最小化算法, 提出了一种两步分解法对组网雷达的雷达节点选择、发射功率和驻留时间等射频辐射资源

进行自适应联合优化配置。由于 $\alpha_{n,k}^q$ 是一个二元变量，且各优化参数在约束和目标函数中耦合，难以寻找最优的实时解决方案，因此，本文采用两步分解法，将原问题分解为多个子凸问题，并结合循环最小化算法，得到逼近原问题最优解的射频辐射资源配置方案次优解^[20]。具体求解步骤如下：

步骤1 首先，针对运动目标 q ，给定各雷达发射功率 $\hat{P}_{n,k}^q$ 和驻留时间初始值 $\hat{T}_{n,k}^q$ ，将 $\alpha_{n,k}^q$ 凸松弛为连续变量 $0 \leq \alpha_{n,k}^q \leq 1$ 。此时，优化模型(17)可简化为如下凸问题：

$$\begin{aligned} \min_{\alpha_k^q} \quad & \mathfrak{S}_k^q \left(\mathbf{X}_{k|k-1}^q, \alpha_k^q \right) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{n=1}^N \alpha_{n,k}^q \leq \partial_{\max} \\ \mathbb{E} \left(\alpha_{n,k}^q, \hat{P}_{n,k}^q, \mathbf{x}_{C,m} \right) \leq E_{\max} \\ \sum_{q=1}^Q \alpha_{n,k}^q \leq 1, \alpha_{n,k}^q \in [0, 1] \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

采用SDP算法对优化模型(18)进行求解，得到各个雷达节点的权重系数，并将其降序排列，选取其中权重系数较大的若干个雷达节点进行目标跟踪，可得到共 $(\partial_{\max} - 1)$ 种满足约束条件 $\sum_{n=1}^N \bar{\alpha}_{n,k}^q \leq \partial_{\max}$ 的雷达节点选择方案。

步骤2 令 $s = 1, 2, \dots, (\partial_{\max} - 1)$ ，对于雷达节点选择方案 s ，设定选择的雷达节点权重系数 $\bar{\alpha}_{n,k,s}^q = 1$ ，其余的雷达节点权重系数 $\bar{\alpha}_{n,k,s}^q = 0$ 。此时，优化模型(17)可简化为包含雷达发射功率和驻留时间两个优化变量的凸问题：

$$\begin{aligned} \min_{P_{k,s}^q, T_{k,s}^q} \quad & \mathfrak{S}_{k,s}^q \left(\mathbf{X}_{k|k-1}^q, P_k^q, T_k^q \right) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} T_{\min} \leq T_{n,k,s}^q \leq T_{\max} \\ \sum_{n=1}^N T_{n,k,s}^q = T_{\text{total}} \\ \mathbb{E} \left(\bar{\alpha}_{n,k,s}^q, P_{n,k,s}^q, \mathbf{x}_{C,m} \right) \leq E_{\max} \\ P_{\min} \leq P_{n,k,s}^q \leq P_{\max} \\ \sum_{n=1}^N P_{n,k,s}^q = P_{\text{total}} \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

同样地，设定发射功率和驻留时间两个参数的优先级相同，采用SDP算法对优化模型(19)进行求解，得到所选择雷达节点的发射功率和驻留时间分配值，进而可以得到 $(\partial_{\max} - 1)$ 个射频资源配置方案及其对应的多目标跟踪误差。

步骤3 选取步骤2所有方案中最小的多目标跟踪误差与其对应的射频资源优化分配方案作为备选方案，并将该资源优化分配结果作为下一次循环的初始值。跳转至步骤1，直到连续两次得到的备选

方案多目标跟踪误差差值小于某一设定的阈值时，跳出循环，并将得到的优化分配方案作为 k 时刻跟踪目标 q 的最优雷达节点选择方案和功率时间优化分配方案。

步骤4 确定下一个跟踪的目标，移除步骤3已选取的雷达节点，跳转至步骤1，直到对所有目标的跟踪方案都完成优化，即可得到 k 时刻组网雷达跟踪多目标时的雷达节点选择方案和功率时间联合优化分配方案。上述算法流程如**算法1**所示。

算法1 频谱共存下面向多目标跟踪的组网雷达功率时间

联合优化算法求解流程

Alg. 1 Solution flow of joint transmit power and dwell time allocation for multitarget tracking in radar networks under spectral coexistence

初始化: $\mathfrak{S}(0)$ 为给定常数，定义发射功率和驻留时间初始值 $\hat{P}_{n,k}^q, \hat{T}_{n,k}^q$;

步骤1 选定运动目标 q ，求解SDP问题(18)，求出 k 时刻雷达权重矢量 α_k^q ，获得 $(\partial_{\max} - 1)$ 种雷达节点选择备选方案。

步骤2 对于 $s = 1, 2, \dots, (\partial_{\max} - 1)$:

1. 设定方案 s 选择的雷达节点权重系数 $\bar{\alpha}_{n,k,s}^q = 1$ ，其余节点权重系数均初始化为0;
2. 求解SDP问题(19)，得到雷达节点选择 $\alpha_{k,s}^q$ 、发射功率 $P_{k,s}^q$ 、驻留时间 $T_{k,s}^q$ 以及目标跟踪误差 $\mathfrak{S}_{k,s}^q$;

步骤3 选取步骤2所有方案中的最小跟踪误差 \mathfrak{S}_k^q 及其对应雷达节点选择方案和资源分配方案作为备选方案；

如果 $|\mathfrak{S}_k^q - \mathfrak{S}(0)| \leq \varepsilon$ 且 $\mathfrak{S}_k^q < \mathfrak{S}(0)$ ：选取 \mathfrak{S}_k^q 和其对应的雷达节点权重集合、发射功率集合和驻留时间集合作为 k 时刻跟踪目标 q 的资源分配方案；

否则： $\mathfrak{S}(0) = \min(\mathfrak{S}(0), \mathfrak{S}_k^q)$ ，并保存其对应的雷达节点选择和资源分配方案，跳转至步骤1；

步骤4 输出原问题(17)的最终雷达节点选择、发射功率、驻留时间结果 α_k^q, P_k^q, T_k^q ，并确定下一个跟踪目标，跳转至步骤1，直到所有的运动目标跟踪方案都完成优化。

4 仿真结果及分析

为了验证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的可行性与有效性，本节进行了如下仿真：假设组网雷达系统由 $N = 6$ 部位置固定且已知的雷达组成，各部雷达的系统参数均相同。组网雷达系统在 k 时刻需要同时跟踪 $Q = 2$ 个目标，目标1的初始位置为 $[-70, 0]$ km，以速度 $[900, 400]$ m/s匀速飞行；目标2的初始位置为 $[70, 80]$ km，以速度 $[-900, -400]$ m/s匀速飞行。在组网雷达探测区域中存在 $C = 2$ 个通信基站，如图1所示，两个通信基站位置分别为 $[50, 50]$ km和 $[-40, 50]$ km。雷达采样间隔为 $\Delta T = 3$ s，跟踪持续过程时间为150 s，共50帧。 k 时刻跟踪某一目标的雷达节点数目最大值 $\partial_{\max} = 3$ ，通信基站最大可容忍干扰能量阈值为 $E_{\max} = 4.2$ J。其中，组网雷达仿真

参数设置如表1所示。本文针对RCS不变、RCS变化和 E_{\max} 阈值变化3种仿真场景分别进行仿真。

4.1 RCS不变

在该仿真场景中，假设雷达节点观测运动目标的RCS均为 1 m^2 ，组网雷达布阵及多目标运动轨迹如图1所示。

图2给出了组网雷达跟踪目标1和目标2的节点选择和功率时间资源优化分配结果，黑色部分表示该雷达节点在相应帧未被赋予目标跟踪任务，即 $\alpha_{n,k}^q = 0$ ；反之，则表示该雷达节点在相应帧被赋予目标跟踪任务，即 $\alpha_{n,k}^q = 1$ 。从图2可以看出，组网雷达系统会优先选择距离目标较近的雷达节点进行跟踪，且各部雷达的发射功率和驻留时间分配情况均随着目标运动状态变化自适应进行调整。例如，前28帧组网雷达系统均选择了距离目标1更近

的雷达1和雷达2进行跟踪，随着目标1逐渐远离雷达1而靠近雷达2，分配给雷达1的射频资源也在不断增加；对于目标2，前8帧组网雷达系统选择了距离目标2更近的雷达5和雷达6进行跟踪，并向与目标2距离变大的雷达6分配更多的射频资源。

同时，组网雷达系统的节点选择结果也受到通信基站最大可容忍干扰能量阈值的影响。例如，从第40帧开始，目标1与通信基站距离小，雷达对通信基站的干扰能量接近通信基站最大可容忍干扰能量阈值，导致每一帧都会选择不同的雷达节点对目标1进行跟踪。同样地，对于目标2，从第9帧开始，组网雷达系统选择对通信基站干扰较弱的雷达3替代雷达5对目标2进行跟踪。

为了进一步验证本文所提算法的优越性，将所提算法的多目标跟踪误差与其他4种对比算法进行比较。

(1) 无通信干扰算法。该算法不考虑通信基站与组网雷达之间的相互干扰，采用本文所提两步分解求解方法对组网雷达节点选择、发射功率和驻留时间等射频辐射参数进行优化配置。

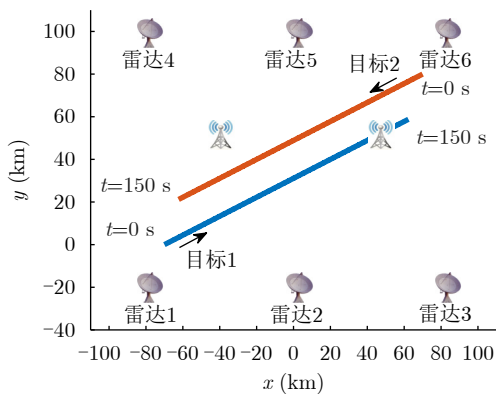


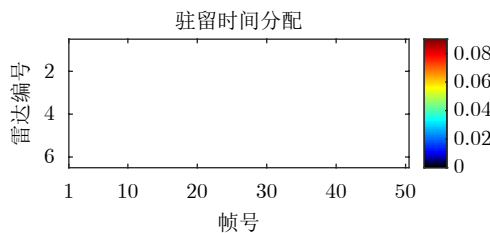
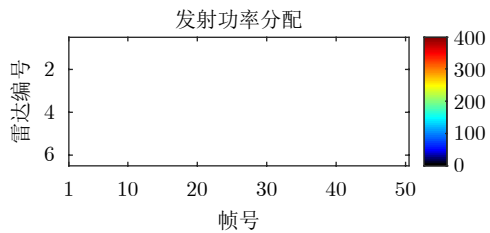
图 1 组网雷达布阵及多目标运动轨迹图

Fig. 1 Deployment of radar networks and trajectories of multiple targets

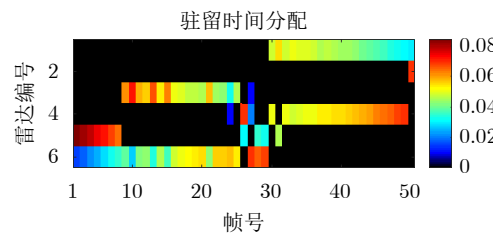
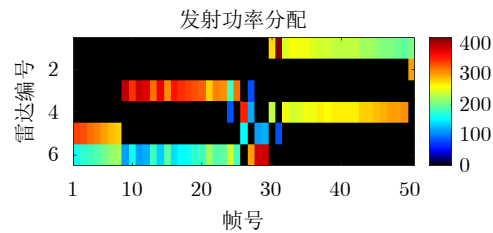
表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation parameter settings

参数	数值	参数	数值
G_t	36 dB	β	1 MHz
G_r	35 dB	F_r	3 dB
G_{RP}	45	k	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
P_{\min}	100 W	P_{\max}	600 W
T_{\min}	0.01 s	T_{\max}	0.08 s
P_{total}	700 W	T_{total}	0.1 s



(a) 目标1
(a) Target 1



(b) 目标2
(b) Target 2

图 2 雷达节点选择与功率时间资源优化分配结果

Fig. 2 Radar node selection and allocation results of power and dwell time resources

(2) 随机节点选择算法。该算法对各时刻跟踪目标的雷达节点进行随机选择, 并采用本文所提求解方法对选择的雷达进行发射功率和驻留时间优化配置。

(3) 均匀时间分配算法。该算法固定各雷达驻

留时间, 仅优化雷达节点选择和发射功率分配。

(4) 均匀功率时间分配算法。该算法固定各雷达的发射功率和驻留时间, 仅优化雷达节点选择。

定义 t 时刻目标跟踪的平均均方根误差(Average Root Mean Square Error, ARMSE)为

$$\text{ARMSE} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{MC}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{MC}}} \frac{1}{N_k^q(n)} \sum_{k=1}^{N_k^q(n)} \left\{ \left[x_k^q - \hat{x}_{n,k|k}^q \right]^2 + \left[y_k^q - \hat{y}_{n,k|k}^q \right]^2 \right\}} \quad (20)$$

式中, N_{MC} 为蒙特卡罗实验次数; $(\hat{x}_{n,k|k}^q, \hat{y}_{n,k|k}^q)$ 为第 n 次蒙特卡罗实验得到的目标位置估计, 本文设定 $N_{\text{MC}} = 100$ 。本文所提算法和上述4种算法的ARMSE对比结果如图3所示。从图3可以看出, 本文所提算法相较于有固定资源分配算法和随机节点选择算法具有更低的多目标跟踪误差, 这说明雷达节点选择和射频资源优化分配对提升多目标跟踪精度有较大影响, 而且优化的射频资源越多, 各目标跟踪精度也越好。由于无通信干扰算法中不存在通信基站, 即不考虑雷达与通信基站间的相互干扰, 其所得多目标跟踪误差低于本文所提算法, 这也进一步说明了通信基站的存在对组网雷达多目标跟踪性能有一定影响。总的来说, 本文所提算法能够在给定组网雷达射频资源条件和预先设定的通信基站最大可容忍干扰能量阈值下, 通过联合优化雷达节点选择以及辐射功率与驻留时间等射频资源配置, 获得相较于其他对比算法更优的多目标跟踪精度。

4.2 RCS变化

在该仿真场景中, 主要研究目标RCS的变化对组网雷达射频资源配置与多目标跟踪精度的影响。目标1和目标2相对于雷达3和雷达4的RCS模型为Swerling I型, 其中, 各目标RCS变化情况如图4所示, 目标相对于其他雷达节点的RCS值仍固定为 1 m^2 。

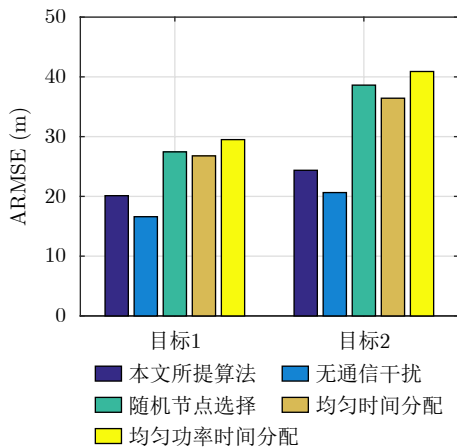


图3 RCS不变场景下ARMSE对比结果

Fig. 3 Comparison results of ARMSE with same RCS

图5给出了RCS变化情况下组网雷达跟踪目标1和目标2的雷达节点选择和功率时间资源优化分配结果。从图5可以看出, 由于目标回波信噪比与其RCS值呈正比关系, 组网雷达系统倾向于选择相对目标RCS值较大的雷达节点来完成跟踪任务。例如, 各目标相对于雷达3和雷达4的RCS值在大多数跟踪时刻均高于其他雷达, 相较于RCS不变条件下的节点选择方案, 由于目标1和目标2相对于雷达3和雷达4的RCS值在多数时刻均高于RCS不变场景下的RCS设定值, 因此组网雷达选择雷达3和雷达4来跟踪目标1和目标2的时刻显著增多; 同时, 为了获得更好的目标跟踪精度, 本文所提算法更多选择3部雷达对目标进行跟踪。

同样地, RCS变化情况下本文所提算法与其他对比算法的ARMSE对比结果如图6所示。由于雷达节点选择受到目标RCS变化的影响, 组网雷达的跟踪性能略差于RCS不变情况下的跟踪性能, 但仍优于同一场景下的其他对比算法, 体现了本文所提算法的稳健性。

4.3 E_{max} 变化

在该仿真场景中, 主要研究通信基站最大可容忍干扰能量阈值, 即 E_{max} 变化对组网雷达多目标跟踪精度的影响。图7给出了 $E_{\text{max}} = 3 \text{ J}$ 时组网雷达跟踪目标1和目标2的节点选择和功率时间资源优化分配结果。从图7可以看出, 相较于第1种仿真场景,

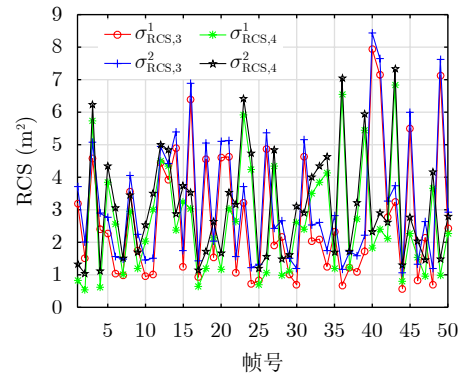


图4 各目标RCS数值

Fig. 4 RCS values of each target

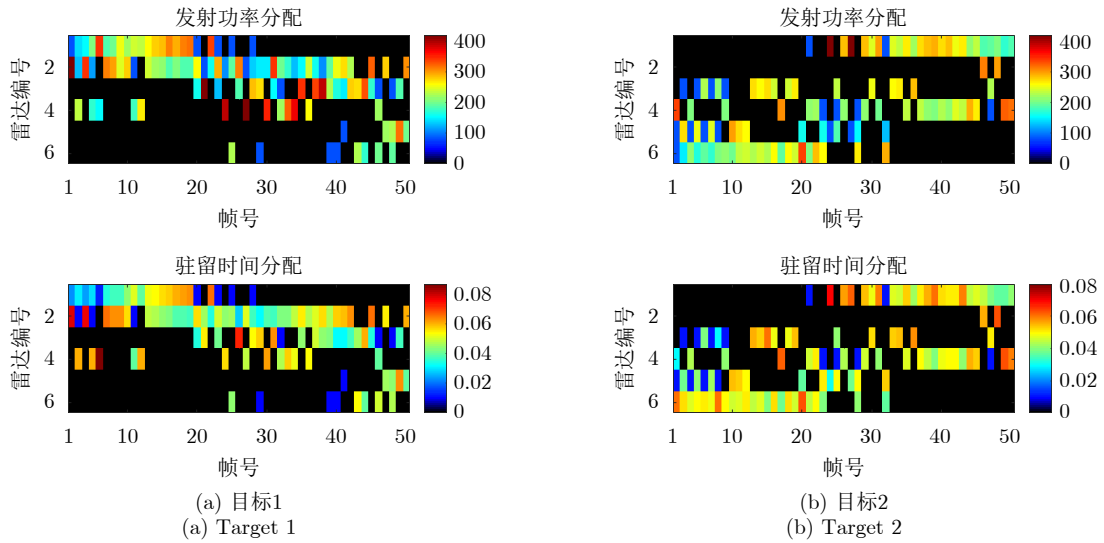


图 5 RCS变化场景下雷达节点选择与功率时间资源优化分配结果
 Fig. 5 Radar node selection and allocation results of power and dwell time resources with various RCS

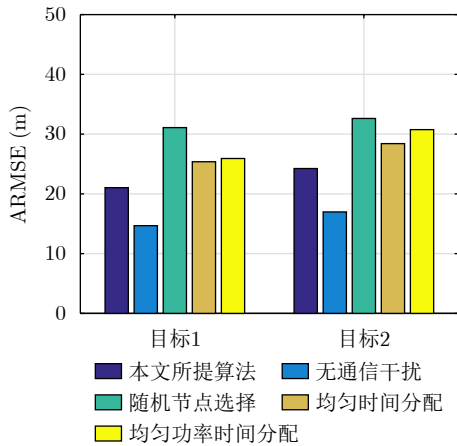


图 6 RCS变化场景下ARMSE对比结果
 Fig. 6 Comparison results of ARMSE with various RCS

由于 E_{max} 值变小, 通信基站对雷达干扰能量的可容忍度降低, 此时, 组网雷达选择了满足约束条件下的最优雷达射频资源分配方案; 类似地, 组网雷达更多地选择3部雷达对多目标进行跟踪。

同样地, 图8显示不同 E_{max} 条件下本文所提算法与其他4种算法的ARMSE对比结果。从图中可以看出, 随着 E_{max} 值不断增加, 通信基站对雷达干扰能量的可容忍度不断提升, 使得可供组网雷达配置的射频辐射资源增多, 于是, 系统能够得到更低的多目标跟踪误差, 所得ARMSE值也更逼近无通信干扰条件下的跟踪误差。

5 结语

本文考虑了频谱共存环境下通信基站对组网雷

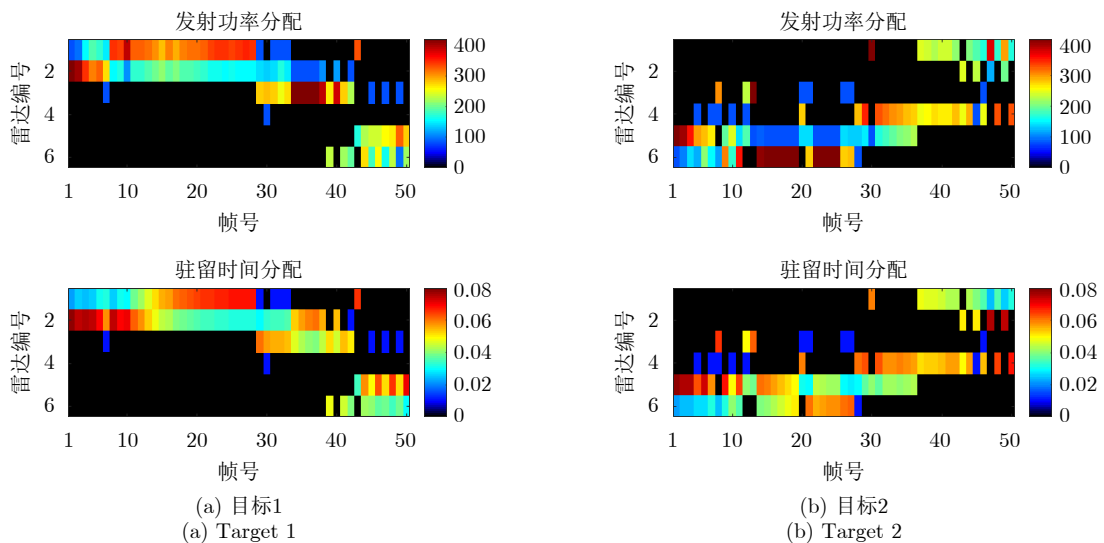
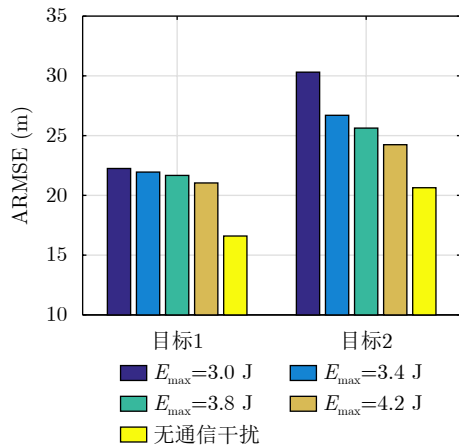


图 7 $E_{max} = 3$ J时雷达节点选择与功率时间资源优化分配结果
 Fig. 7 Radar node selection and allocation results of power and dwell time resources with $E_{max} = 3$ J

图8 不同 E_{\max} 条件下ARMSE对比结果Fig. 8 Comparison results of ARMSE under different E_{\max} conditions

达多目标跟踪性能的影响，提出了一种面向多目标跟踪的组网雷达功率时间联合优化算法，以满足组网雷达射频资源和预先设定的通信基站最大可容忍干扰能量阈值为约束条件，以最小化多目标跟踪BCRLB为优化目标，通过联合优化分配雷达节点选择、发射功率和驻留时间等参数，提高了组网雷达的多目标跟踪精度。仿真结果表明，多目标跟踪精度不仅与组网雷达和各目标的空间位置关系及目标散射特性有关，而且还受通信基站最大可容忍干扰能量阈值的影响；另外，与现有算法相比，本文所提算法能够在保证通信基站正常工作的条件下，有效提升多目标跟踪性能。下一步将围绕频谱共存环境下组网雷达射频辐射参数与飞行路径联合优化问题进行研究。

参 考 文 献

- [1] SKOLNIK M I, 左群声, 徐国良, 马林, 等译. 雷达系统导论[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 191–199.
SKOLNIK M I, ZUO Qunsheng, XU Guoliang, MA Lin, et al. translation. Introduction to Radar Systems[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 191–199.
- [2] 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: 5–12.
SHI Chenguang, ZHOU Jianjiang, WANG Fei, et al. Radio Frequency Stealth Technology for Airborne Radar Network[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 5–12.
- [3] 陈小龙, 薛永华, 张林, 等. 机载雷达系统与信息处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021: 33–41.
CHEN Xiaolong, XUE Yonghua, ZHANG Lin, et al. Airborne Radar System and Information Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021: 33–41.
- [4] 刘凡, 袁伟杰, 原进宏, 等. 雷达通信频谱共享及一体化: 综述与展望[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 467–484. doi: 10.12000/JR20113.
LIU Fan, YUAN Weijie, YUAN Jinhong, et al. Radar-communication spectrum sharing and integration: Overview and prospect[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(3): 467–484. doi: 10.12000/JR20113.
- [5] 韩长喜, 董金良, 邓大松, 等. 2021年雷达技术态势与发展趋势[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(4): 329–334. doi: 10.3969/j.issn.1673-5692.2022.04.004.
HAN Changxi, DONG Jinliang, DENG Dasong, et al. Current progress and development trend of radar system and technology in 2021[J]. *Journal of CAEIT*, 2022, 17(4): 329–334. doi: 10.3969/j.issn.1673-5692.2022.04.004.
- [6] 时晨光, 董璟, 周建江, 等. 飞行器射频隐身技术研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(6): 1452–1467. doi: 10.12305/j.issn.1001-506X.2021.06.02.
SHI Chenguang, DONG Jing, ZHOU Jianjiang, et al. Overview of aircraft radio frequency stealth technology[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(6): 1452–1467. doi: 10.12305/j.issn.1001-506X.2021.06.02.
- [7] 王峰, 李培, 徐锋. 新一代雷达电磁空间深蓝博弈技术需求分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(12): 1195–1200, 1223. doi: 10.3969/j.issn.1673-5692.2021.12.003.
WANG Feng, LI Pei, and XU Feng. Demand analysis of deep blue game in electromagnetic space for new generation radar[J]. *Journal of CAEIT*, 2021, 16(12): 1195–1200, 1223. doi: 10.3969/j.issn.1673-5692.2021.12.003.
- [8] QIAN Junhui, LOPS M, ZHENG Le, et al. Joint system design for coexistence of MIMO radar and MIMO communication[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(13): 3504–3519. doi: 10.1109/TSP.2018.2831624.
- [9] ZHENG Le, LOPS M, and WANG Xiaodong. Adaptive interference removal for uncoordinated radar/communication coexistence[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2018, 12(1): 45–60. doi: 10.1109/jstsp.2017.2785783.
- [10] 鲁彦希. 网络化雷达协同探测与资源管理研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2020.
LU Yanxi. Research on collaborative sensing and resource management of networked radar[D]. [Ph. D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [11] SU Yang, CHENG Ziyang, HE Zishu, et al. Communication-awareness adaptive resource scheduling strategy for multiple target tracking in a multiple radar system[J]. *IET Signal Processing*, 2022, in press. doi: 10.1049/sil2.12097.
- [12] WU Linlong, MISHRA K V, SHANKAR M R B, et al. Resource allocation in heterogeneously-distributed joint

- radar-communications under asynchronous Bayesian tracking framework[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(7): 2026–2042. doi: [10.1109/JSAC.2022.3157371](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3157371).
- [13] LI Bo, PETROPULU A P, and TRAPPE W. Optimum co-design for spectrum sharing between matrix completion based MIMO radars and a MIMO communication system[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(17): 4562–4575. doi: [10.1109/TSP.2016.2569479](https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2569479).
- [14] HESSAR F and ROY S. Spectrum sharing between a surveillance radar and secondary Wi-Fi networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(3): 1434–1448. doi: [10.1109/TAES.2016.150114](https://doi.org/10.1109/TAES.2016.150114).
- [15] 韩凯峰, 黄立涛, 陈力, 等. 基于块对角化的通信雷达频谱共存设计[J]. *通信学报*, 2021, 42(12): 226–235. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2021227](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2021227).
- HAN Kaifeng, HUANG Litao, CHEN Li, *et al.* Communication-radar coexistence design based on block diagonalization[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(12): 226–235. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2021227](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2021227).
- [16] 惠通. MIMO雷达与通信系统频谱共存联合设计[D]. [硕士论文], 哈尔滨工程大学, 2021.
- HUI Tong. Spectrum sharing joint design of MIMO radar and MIMO communication system[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2021.
- [17] SHI Chenguang, WANG Fei, SALOUS S, *et al.* Distributed power allocation for spectral coexisting multistatic radar and communication systems based on Stackelberg game[C]. 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brighton, UK, 2019: 4265–4269. doi: [10.1109/ICASSP.2019.8683349](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8683349).
- [18] WANG Yijie, SHI Chenguang, WANG Fei, *et al.* LPI-based optimal radar power allocation for target time delay estimation in joint radar and communications system[C]. 2020 IEEE 11th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), Hangzhou, China, 2020: 1–4. doi: [10.1109/SAM48682.2020.9104292](https://doi.org/10.1109/SAM48682.2020.9104292).
- [19] 丁建江, 许红波, 周芬. 雷达组网技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 1–12.
- DING Jianjiang, XU Hongbo, and ZHOU Fen. The Technology of Netted Radar System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 1–12.
- [20] ZHANG Haowei, LIU Weijian, ZHANG Zhaojian, *et al.* Joint target assignment and power allocation in multiple distributed MIMO radar networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(1): 694–704. doi: [10.1109/JSYST.2020.2986020](https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2986020).
- [21] LU Xiujuan, YI Wei, and KONG Lingjiang. Joint online route planning and resource optimization for multitarget tracking in airborne radar systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, in press. doi: [10.1109/JSYST.2021.3116020](https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3116020).
- [22] LU Xiujuan, XU Zhenchang, REN Haiwei, *et al.* LPI-based resource allocation strategy for target tracking in the moving airborne radar network[C]. 2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22), New York City, USA, 2022: 1–6. doi: [10.1109/RadarConf2248738.2022.9764195](https://doi.org/10.1109/RadarConf2248738.2022.9764195).
- [23] 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, doi: [10.1109/ICCAIS46528.2019.9074602](https://doi.org/10.1109/ICCAIS46528.2019.9074602).
- [24] CHENG Ting, LI Xi, TAN Qianqian, *et al.* Adaptive time-space resource and waveform control for collocated 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).
- [25] 时晨光, 丁琳涛, 汪飞, 等. 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[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(3): 539–546. doi: [10.11999/JEIT200636](https://doi.org/10.11999/JEIT200636).
- SHI Chenguang, DING Lintao, WANG Fei, *et al.* Radio frequency stealth-based optimal radio frequency resource allocation algorithm for multiple-target tracking in radar network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(3): 539–546. doi: [10.11999/JEIT200636](https://doi.org/10.11999/JEIT200636).
- [26] 赫彬, 苏洪涛. 一种多目标与多基地雷达之间的博弈策略[J]. *西安电子科技大学学报*, 2021, 48(2): 125–132. doi: [10.19665/j.issn1001-2400.2021.02.016](https://doi.org/10.19665/j.issn1001-2400.2021.02.016).
- HE Bin and SU Hongtao. Study of game strategy between multiple targets and multistatic radars[J]. *Journal of Xidian University*, 2021, 48(2): 125–132. doi: [10.19665/j.issn1001-2400.2021.02.016](https://doi.org/10.19665/j.issn1001-2400.2021.02.016).
- [27] 邝晓飞, 彭宇, 靳标, 等. 基于Stackelberg博弈的组网雷达功率分配方法[J]. *战术导弹技术*, 2021(6): 38–46. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.114](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.114).
- KUANG Xiaofei, PENG Yu, JIN Biao, *et al.* Power allocation method for netted radar based on Stackelberg game[J]. *Tactical Missile Technology*, 2021(6): 38–46. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.114](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.114).
- [28] 严俊坤, 陈林, 刘宏伟, 等. 基于机会约束的MIMO雷达多波束稳健功率分配算法[J]. *电子学报*, 2019, 47(6): 1230–1235. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2019.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2019.06.007).
- YAN Junkun, CHEN Lin, LIU Hongwei, *et al.* Chance constrained based robust multibeam power allocation algorithm for MIMO radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(6): 1230–1235. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2019.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2019.06.007).

- [29] XIE Mingchi, YI Wei, KONG Lingjiang, *et al.* Receive-beam resource allocation for multiple target tracking with distributed MIMO radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(5): 2421–2436. doi: [10.1109/TAES.2018.2818579](https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2818579).
- [30] 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).
- [31] SU Yang, CHENG Ting, HE Zishu, *et al.* Joint waveform control and resource optimization for maneuvering targets tracking in netted colocated MIMO radar systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, in press. doi: [10.1109/JSYST.2021.3098622](https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3098622).
- [32] 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).
- [33] YAN Junkun, PU Wenqiang, LI Hongwei, *et al.* Robust chance constrained power allocation scheme for multiple target localization in colocated MIMO radar system[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(15): 3946–3957. doi: [10.1109/TSP.2018.2841865](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2841865).
- [34] 戴金辉, 严俊坤, 王鹏辉, 等. 基于目标容量的网络化雷达功率分配方案[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(9): 2688–2694. doi: [10.11999/JEIT200873](https://doi.org/10.11999/JEIT200873).
- DAI Jinhui, YAN Junkun, WANG Penghui, *et al.* Target capacity based power allocation scheme in radar network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(9): 2688–2694. doi: [10.11999/JEIT200873](https://doi.org/10.11999/JEIT200873).
- [35] 张大琳, 易伟, 孔令讲. 面向组网雷达干扰任务的多干扰机资源联合优化分配方法[J]. *雷达学报*, 2021, 10(4): 595–606. doi: [10.12000/JR21071](https://doi.org/10.12000/JR21071).
- ZHANG Dalin, YI Wei, and KONG Lingjiang. Optimal joint allocation of multijammer resources for jamming netted radar system[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(4): 595–606. doi: [10.12000/JR21071](https://doi.org/10.12000/JR21071).
- [36] LU Yanxi, HE Zishu, LIU Shuangli, *et al.* Communication-awareness joint beams and power allocation scheme of radar network for manoeuvring targets tracking[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(2): 207–215. doi: [10.1049/iet-rsn.2019.0215](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0215).
- [37] 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).
- [38] BOYD S, VANDENBERGHE L, 王书宁, 许肇, 黄晓霖, 译. 凸优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 1–10.
- BOYD S, VANDENBERGHE L, WANG Shuning, XU Yun, and HUANG Xiaolin, translation. *Convex Optimization*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 1–10.

作者简介

时晨光, 副教授, 主要研究方向为飞行器射频隐身技术、网络化雷达资源管理, 多平台传感器协同等。

董 璟, 硕士生, 主要研究方向为网络化雷达多目标跟踪与协同资源管理。

周建江, 教授, 主要研究方向为飞行器射频隐身技术、雷达目标特性分析、航空电子信息技术等。

(责任编辑: 高华)