# 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
 文章编号:2095-283X(2023)03-0590-12

**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<sup>\*</sup> 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

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

责任主编: 严俊坤 Corresponding Editor: YAN Junkun

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

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<sup>[1-7]</sup>。

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<sup>[8-18]</sup>。针对该问题, Zheng等人<sup>[9]</sup> 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<sup>[10]</sup>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<sup>[14]</sup>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<sup>[20-35]</sup>。Zhang等人<sup>[20]</sup>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<sup>[21]</sup>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<sup>[24]</sup>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<sup>[28]</sup>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 $\mathbf{x}_{\text{R},n} = (x_{\text{R},n}, y_{\text{R},n}), n = 1, 2, ..., N$ 。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 $X_k^q = [x_k^q, y_k^q, v_{x,k}^q, v_{y,k}^q]^{\mathrm{T}}$ ,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<sup>[25]</sup>

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

式中,  $F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes I_2$ 表示目标 q的状态转移 矩阵;  $\Delta T_0$ 表示雷达采样间隔;  $\otimes$ 表示克罗内克积;  $I_2$ 表示2阶单位矩阵; W表示高斯过程白噪声且均 值为零,其协方差矩阵 $U_q$ 可以表示为

$$\boldsymbol{U}_{q} = r_{q}\boldsymbol{I}_{2} \otimes \begin{bmatrix} \frac{(\Delta T_{0})^{3}}{3} & \frac{(\Delta T_{0})^{2}}{2} \\ \frac{(\Delta T_{0})^{2}}{2} & \Delta T_{0} \end{bmatrix}$$
(2)

式中, r<sub>q</sub>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<sup>[25]</sup>

$$\mathbf{Z}_{n,k}^{q} = \begin{cases} \boldsymbol{H}\left(\boldsymbol{X}_{k}^{q}\right) + \boldsymbol{V}_{n,k}^{q}, \ \boldsymbol{\alpha}_{n,k}^{q} = 1\\ \boldsymbol{\varnothing}, \qquad \boldsymbol{\alpha}_{n,k}^{q} = 0 \end{cases}$$
(3)

式中,  $Z_{n,k}^q$ 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;  $H(X_k^q)$ 表示非线性转移函数,可以计算为

$$\boldsymbol{H}\left(\boldsymbol{X}_{k}^{q}\right) = \begin{bmatrix} R_{n,k}^{q} \\ \varphi_{n,k}^{q} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} \sqrt{\left(x_{k}^{q} - x_{\mathrm{R},n}\right)^{2} + \left(y_{k}^{q} - y_{\mathrm{R},n}\right)^{2}} \\ \arctan 2\left(y_{k}^{q} - y_{\mathrm{R},n}, x_{k}^{q} - x_{\mathrm{R},n}\right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $R_{n,k}^q \eta \varphi_{n,k}^q \beta$ 别表示k时刻目标q相对于雷达 n的距离和方位角;  $V_{n,k}^q$ 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 $\Omega_{n,k}^q$ 的高 斯分布, 其方差 $\Omega_{n,k}^q$ 可以表示为

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

式中,  $\Psi_{n,k} = \operatorname{Re}[2P_{n,k}^q (M_{n,k}^q)^{\mathrm{H}} (\mathcal{L}_n)^{-1} M_{n,k}^q]^{-1}$ 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,

$$\boldsymbol{M}_{n,k}^{q} = \left[ \frac{\partial \boldsymbol{u} \left( \boldsymbol{R}_{n,k}^{q} \right)}{\partial \boldsymbol{R}_{n,k}^{q}} \otimes \boldsymbol{v} \left( \boldsymbol{\varphi}_{n,k}^{q} \right) \boldsymbol{u} \left( \boldsymbol{R}_{n,k}^{q} \right) \otimes \frac{\partial \boldsymbol{v} \left( \boldsymbol{\varphi}_{n,k}^{q} \right)}{\boldsymbol{v} \left( \boldsymbol{\varphi}_{n,k}^{q} \right)} \right]^{\mathrm{T}}$$

 $(·)^{T}$ 表示矩阵转置运算;  $u\left(R_{n,k}^{q}\right)$ 表示雷达n的发射 波形序列;  $v\left(\varphi_{n,k}^{q}\right)$ 表示雷达n的半波长导向矢量;  $\beta$ 表示雷达发射信号带宽;  $\lambda n \gamma \beta$ 别表示雷达波长 和天线孔径;  $SNR_{n,k}^{q} \beta k$ 时刻雷达n对目标q的回波 信噪比,可以计算为

 $\mathrm{SNR}^q_{n,k}$ 

$$=\frac{T_{n,k}^{q}}{T_{\rm r}}\frac{P_{n,k}^{q}G_{\rm t}G_{\rm r}\sigma_{n}^{q}\lambda^{2}G_{\rm RP}}{\left(4\pi\right)^{3}kT_{\rm o}BF_{\rm r}\left(R_{n}^{q}\right)^{4}}\exp\left(-4\ln\left(2\right)\frac{\left(\tilde{\alpha}_{n,k}^{q}\right)^{2}}{\theta_{3\,\rm dB}^{2}}\right)$$

$$\tag{6}$$

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; $\sigma_n^q$ 表示目标q相对于雷达 n的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS);  $G_{\rm RP}$ 表示雷达接收机处理增益;  $T_{\rm r}$ 表示脉冲重复周 期; k为玻尔兹曼常量;  $T_{\rm o}$ 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;  $F_{\rm r}$ 表示雷 达接收机噪声系数;  $\hat{\alpha}^{q}_{n,k}$ 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<sup>[36]</sup>,即

$$\delta_{m,n}(f) = \begin{cases} N_{m,n}, & f_{\mathrm{L},m,n} \le f \le f_{\mathrm{U},m,n} \\ 0, & \ddagger \& \end{cases}$$
(7)

式中, N<sub>m,n</sub>表示信号PSD强度; f<sub>U,m,n</sub>和f<sub>L,m,n</sub>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**E**<sub>m,n</sub>可以表 示为<sup>[10]</sup>

$$\left[\boldsymbol{\Xi}_{m,n}\right]_{u,v} = N_{m,n} \begin{cases} f_{\mathrm{U},m,n} - f_{\mathrm{L},m,n}, & u = v\\ \frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi T_{\mathrm{s}}f_{\mathrm{U},m,n}(u-v)} - \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi T_{\mathrm{s}}f_{\mathrm{L},m,n}(u-v)}}{\mathrm{j}2\pi T_{\mathrm{s}}\left(u-v\right)}, & u \neq v \end{cases}$$
(8)

式中, *Ξ<sub>m,n</sub>*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<sub>s</sub>*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

$$\boldsymbol{e}_{m,n} = \frac{\chi_{m,n} \bar{\boldsymbol{e}}_{m,n} \otimes \boldsymbol{v}\left(\boldsymbol{\theta}_{m}^{n}\right)}{\left\|\boldsymbol{x}_{\mathrm{C},m} - \boldsymbol{x}_{\mathrm{R},n}\right\|_{2}} \tag{9}$$

式中, $\chi_{m,n}$ 表示传输信道的强度系数; $\bar{e}_{m,n}$ 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; $\theta_m^n$ 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

$$\mathcal{L}_{n} = \sum_{m=1}^{M} \frac{\left(\chi_{m,n}\right)^{2} \left\{ \boldsymbol{\Xi}_{m,n} \otimes \left[\boldsymbol{v}\left(\boldsymbol{\theta}_{m}^{n}\right) \boldsymbol{v}^{\mathrm{H}}\left(\boldsymbol{\theta}_{m}^{n}\right)\right] \right\}}{\left\|\boldsymbol{x}_{\mathrm{C},m} - \boldsymbol{x}_{\mathrm{R},n}\right\|_{2}^{2}} \quad (10)$$

式中, x<sub>C,m</sub>表示第m个通信基站的位置。由式(8)可

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

$$\mathbb{E}\left(\alpha_{n,k}^{q}, P_{n,k}^{q}, \boldsymbol{x}_{\mathrm{C},m}\right)$$
$$= \sum_{q=1}^{Q} \sum_{n=1}^{N} \alpha_{n,k}^{q} P_{n,k}^{q} G_{n}^{q}\left(\boldsymbol{x}_{\mathrm{C},m}\right) \boldsymbol{s}_{n}^{\mathrm{H}} \boldsymbol{\varPhi}_{m,n} \boldsymbol{s}_{n} \qquad (11)$$

式中,  $s_n = [s_n(1), s_n(2), \dots, s_n(L)]^T$ 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<sup>[10]</sup>, 即 式中, $\theta_q^n$ 表示雷达n对目标q的跟踪角度; $\theta_q^0$ 表示目标q与初始位置之间的角度。于是, $\boldsymbol{\Phi}_{n,n}$ 可以表示为

$$\left[\boldsymbol{\varPhi}_{m,n}\right]_{u,v} = \begin{cases} f_{\mathrm{U},m,n} - f_{\mathrm{L},m,n}, & u = v\\ \frac{\mathrm{e}^{j2\pi f_{\mathrm{U},m,n}(u-v)} - \mathrm{e}^{j2\pi f_{\mathrm{L},m,n}(u-v)}}{j2\pi T_{\mathrm{s}}\left(u-v\right)}, & u \neq v \end{cases}$$
(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

$$\boldsymbol{J}\left(\boldsymbol{X}_{k|k-1}^{q}\right) = \left[\boldsymbol{U}_{q} + \boldsymbol{F}\boldsymbol{J}^{-1}\left(\boldsymbol{X}_{k|k-1}^{q}\right)\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\right]^{-1} \\ + \sum_{n=1}^{N} \alpha_{n,k}^{q} \left(\boldsymbol{G}_{n,k|k-1}^{q}\right)^{\mathrm{T}} \left(\boldsymbol{\Omega}_{n,k|k-1}^{q}\right)^{-1} \\ \cdot \boldsymbol{G}_{n,k|k-1}^{q}$$
(14)

式中,  $G_{n,k|k-1}^{q} = [\nabla_{X_{k|k-1}}^{q} (H(X_{k|k-1}^{q}))^{T}]^{T}$ 表示k - 1时刻雷达n相对于目标的雅可比矩阵预测值;  $\nabla_{X_{k|k-1}}^{q}$ 表示对 $X_{k|k-1}^{q}$ 求1阶偏导;  $\Omega_{n,k|k-1}^{q}$ 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:

$$\Im_{k}^{q}\left(\boldsymbol{X}_{k|k-1}^{q},\boldsymbol{\alpha}_{k}^{q},\boldsymbol{P}_{k}^{q},\boldsymbol{T}_{k}^{q}\right) = \operatorname{trace}\left[\left(\boldsymbol{J}\left(\boldsymbol{X}_{k|k-1}^{q}\right)^{-1}\right)\right]$$
(15)

式中, trace(·)表示矩阵求迹运算;  $\alpha_k^q$ 表示雷达节

点选择参数集合, $P_k^q 和 T_k^q 分别表示雷达发射功率$ 和驻留时间集合,即

$$\begin{cases} \boldsymbol{\alpha}_{k}^{q} = \left[ \alpha_{1,k}^{q}, \alpha_{2,k}^{q}, \cdots, \alpha_{n,k}^{q}, \cdots, \alpha_{N,k}^{q} \right] \\ \boldsymbol{P}_{k}^{q} = \left[ P_{1,k}^{q}, P_{2,k}^{q}, \cdots, P_{n,k}^{q}, \cdots, P_{N,k}^{q} \right] \\ \boldsymbol{T}_{k}^{q} = \left[ T_{1,k}^{q}, T_{2,k}^{q}, \cdots, T_{n,k}^{q}, \cdots, T_{N,k}^{q} \right] \end{cases}$$
(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:

$$\min_{\boldsymbol{\alpha}_{k}^{q}, \boldsymbol{P}_{k}^{q}, \boldsymbol{T}_{k}^{q}} \sum_{q=1}^{Q} \Im_{k}^{q} \left( \boldsymbol{X}_{k|k-1}^{q}, \boldsymbol{\alpha}_{k}^{q}, \boldsymbol{P}_{k}^{q}, \boldsymbol{T}_{k}^{q} \right) \\
\begin{cases}
T_{\min} \leq T_{n,k}^{q} \leq T_{\max}, \quad \alpha_{n,k}^{q} = 1 \\
T_{n,k}^{q} = 0, \quad \alpha_{n,k}^{q} = 0 \\
P_{\min} \leq P_{n,k}^{q} \leq P_{\max}, \quad \alpha_{n,k}^{q} = 1 \\
P_{n,k}^{q} = 0, \quad \alpha_{n,k}^{q} = 0 \\
\sum_{q=1}^{Q} \alpha_{n,k}^{q} \leq 1, \quad \alpha_{n,k}^{q} \in \{0,1\} \\
\sum_{n=1}^{N} \alpha_{n,k}^{q} \leq \partial_{\max} \\
\sum_{n=1}^{N} T_{n,k}^{q} = T_{\text{total}} \\
\sum_{n=1}^{N} P_{n,k}^{q} = P_{\text{total}}
\end{cases}$$
(17)

式中, $T_{\text{max}} n T_{\text{min}} \beta$ 别表示各雷达驻留时间的上界 和下界; $P_{\text{max}} n P_{\text{min}} \beta$ 别表示各雷达发射功率的上 界和下界; $T_{\text{total}} n P_{\text{total}} \beta$ 别表示照射各目标的所有 雷达驻留时间和发射功率之和; $E_{\text{max}}$ 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; $\partial_{\text{max}}$ 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<sup>[38]</sup>。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

595

进行自适应联合优化配置。由于α<sup>*q*</sup><sub>*n,k*</sub>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<sup>[20]</sup>。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 $0 \le \alpha_{n,k}^q \le 1$ 。此时,优化模型(17)可简化为如下凸问题:

$$\min_{\boldsymbol{\alpha}_{k}^{q}} \Im_{k}^{q} \left( \boldsymbol{X}_{k|k-1}^{q}, \boldsymbol{\alpha}_{k}^{q} \right)$$
s.t.
$$\begin{cases}
\sum_{n=1}^{N} \alpha_{n,k}^{q} \leq \partial_{\max} \\
\mathbb{E} \left( \alpha_{n,k}^{q}, \hat{P}_{n,k}^{q}, \boldsymbol{x}_{\mathrm{C},m} \right) \leq E_{\max} \\
\sum_{q=1}^{Q} \alpha_{n,k}^{q} \leq 1, \ \alpha_{n,k}^{q} \in [0, 1]
\end{cases}$$
(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 $s = 1, 2, ..., (\partial_{\max} - 1)$ ,对于雷达 节点选择方案s,设定选择的雷达节点权重系数  $\bar{\alpha}^{q}_{n,k,s} = 1$ ,其余的雷达节点权重系数 $\bar{\alpha}^{q}_{n,k,s} = 0$ 。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:

$$\min_{\boldsymbol{P}_{k,s}^{q},\boldsymbol{T}_{k,s}^{q}} \mathfrak{S}_{k,s}^{q} \left( \boldsymbol{X}_{k|k-1}^{q}, \boldsymbol{P}_{k}^{q}, \boldsymbol{T}_{k}^{q} \right)$$
s.t.
$$\begin{cases}
T_{\min} \leq T_{n,k,s}^{q} \leq T_{\max} \\ \sum_{n=1}^{N} T_{n,k,s}^{n} = T_{\text{total}} \\
\mathbb{E} \left( \bar{\alpha}_{n,k,s}^{q}, P_{n,k,s}^{q}, \boldsymbol{x}_{\mathrm{C},m} \right) \leq E_{\max} \\
P_{\min} \leq P_{n,k,s}^{q} \leq P_{\max} \\
\sum_{n=1}^{N} P_{n,k,s}^{q} = P_{\text{total}}
\end{cases}$$
(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:  $\Im(0)$ 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 $\alpha_k^q$ ,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 $\Im_{k,s}^q$ ;

步骤3选取步骤2所有方案中的最小跟踪误差3%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 $|\Im_k^q - \Im(0)| \le \varepsilon \exists \Im_k^q < \Im(0)$ : 选取 $\Im_k^q$ 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:  $\Im(0) = \min(\Im(0), \Im_k^q)$ , 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 $\alpha_k^q, P_k^q, T_k^q$ ,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*<sub>max</sub>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<sup>2</sup>,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



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



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。

表 1 仿真参数设置 Tab. 1. Simulation parameter settings

Tab. 1 Simulation parameter settings			
参数	数值	参数	数值
$G_{ m t}$	$36 \mathrm{dB}$	β	1 MHz
$G_{ m r}$	$35 \mathrm{dB}$	$F_{ m r}$	3  dB
$G_{ m RP}$	45	k	$1.38 \times 10^{-23} ~{\rm J/K}$
$P_{\min}$	$100 \mathrm{W}$	$P_{\rm max}$	$600 \mathrm{W}$
$T_{\min}$	$0.01~{\rm s}$	$T_{ m max}$	$0.08 \mathrm{\ s}$
$P_{\rm total}$	$700 \mathrm{W}$	$T_{ m total}$	$0.1 \mathrm{~s}$



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

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

式中, $N_{\rm MC}$ 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NMC = 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<sup>2</sup>。





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 Emax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Emax变化对组网雷达多目标跟 踪精度的影响。图7给出了 $E_{\text{max}} = 3$ 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 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*<sub>max</sub>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*<sub>max</sub>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*<sub>max</sub>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

发射功率分配

本文考虑了频谱共存环境下通信基站对组网雷



Fig. 7 Radar node selection and allocation results of power and dwell time resources with  $E_{\text{max}} = 3 \text{ J}$ 



图 8 不同E<sub>max</sub>条件下ARMSE对比结果 Fig. 8 Comparison results of ARMSE under different E<sub>max</sub> 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

- 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.* Radarcommunication 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.
- 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.

- [13] LI Bo, PETROPULU A P, and TRAPPE W. Optimum codesign 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.
- [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.
- [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.

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.

 [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.

- 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.
- [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.
- [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.
- [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.

- [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.
- [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.
- [24] CHENG Ting, LI Xi, TAN Qianqian, et al. Adaptive timespace 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.
- [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.
  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.
  [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.

HE Bin and SU Hongtao. Study of game strategy between multiple targets and multistatics radars[J]. *Journal of Xidian University*, 2021, 48(2): 125–132. doi: 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.

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.

[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.

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.

- [29] XIE Mingchi, YI Wei, KONG Lingjiang, et al. Receivebeam 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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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:

#### 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。

#### 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.

[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.

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.

- [36] LU Yanxi, HE Zishu, LIU Shuangli, et al. Communicationawareness 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/ietrsn.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.
- [38] BOYD S, VANDENBERGHE L, 王书宁, 许鋆, 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.

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)