

## 面向射频隐身的星座雷达区域搜索能量管控与波位任务调度算法

李国平<sup>①②</sup> 时晨光<sup>\*①</sup> 周建江<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(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)

<sup>②</sup>(三江学院 南京 210012)

**摘要:** 该文针对星座雷达执行区域搜索任务场景, 提出一种面向射频隐身的星座雷达区域搜索能量管控与波位任务调度算法。首先, 将区域搜索空域按波位递推生成方式离散为波位集合, 将各波位的检测概率信息融合为区域复合检测信息, 结合该复合检测信息, 推导包含波位先验威胁、几何链路系数与辐射能量分配等参数的区域加权检测概率解析表达式, 并将其作为区域搜索任务性能的衡量指标。在此基础上, 构建面向射频隐身的星座雷达区域搜索能量管控优化模型, 即以最小化星座雷达的总辐射能量为优化目标, 以满足预先设定的加权检测概率阈值与波位全覆盖性能要求为约束条件, 对波位辐射能量进行优化分配; 进一步结合配额感知轮询与补盲调度策略, 将波位搜索任务调度至具体天基雷达执行, 形成可执行的波位任务调度方案。针对上述优化问题, 构造固定总辐射能量下的区域搜索性能函数, 并结合外层单调二分搜索与内层Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件求解, 形成两步分解求解算法。仿真结果表明, 与对比算法相比, 所提算法能够有效降低星座雷达系统在区域搜索任务中的总辐射能量, 从而降低系统射频暴露风险。

**关键词:** 星座雷达; 射频隐身; 能量管控; 波位任务调度; 区域搜索

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)x-0001-11

DOI: 10.12000/JR26070

CSTR: 32380.14.JR26070

**引用格式:** 李国平, 时晨光, 周建江. 面向射频隐身的星座雷达区域搜索能量管控与波位任务调度算法[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR26070.

**Reference format:** LI Guoping, SHI Chenguang, and ZHOU Jianjiang. Low probability of intercept based energy management and beam-position task scheduling algorithm for regional search in constellation radar[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR26070.

## Low Probability of Intercept Based Energy Management and Beam-Position Task Scheduling Algorithm for Regional Search in Constellation Radar

LI Guoping<sup>①②</sup> SHI Chenguang<sup>\*①</sup> ZHOU Jianjiang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

<sup>②</sup>(Sanjiang University, Nanjing 210012, China)

**Abstract:** This study proposes an algorithm focused on Low Probability of Intercept Based energy management and beam-position task scheduling for regional search in constellation radar systems. First, the search airspace is discretized into a set of beam positions using a recursive beam-position generation method. The detection

收稿日期: 2026-04-03; 改回日期: ; 网络出版: 2026-xx-xx

\*通信作者: 时晨光 [scg\\_space@163.com](mailto:scg_space@163.com) \*Corresponding Author: SHI Chenguang, [scg\\_space@163.com](mailto:scg_space@163.com)

基金项目: 国家自然科学基金(62271247), 江苏省自然科学基金优秀青年基金(BK20240181), 江苏高校青蓝工程

Foundation Items: National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62271247), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant No. BK20240181), Qing Lan Project of Jiangsu Province

责任编辑: 易伟 Corresponding Editor: YI Wei

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

data from individual beam positions are then combined to create regional composite detection information. Based on prior target threat distribution, geometric link gains, and radiation energy allocation, an analytical expression for the regional weighted detection probability is derived to serve as the performance metric for the regional search. On this basis, an RF stealth-oriented energy management optimization model is established, in which the total radiation energy of the constellation radar system is minimized while adhering to a specified threshold for the regional weighted detection probability and ensuring full coverage of all beam positions. In this model, the radiation energy for each beam position is treated as a continuous decision variable. The optimized beam-position search tasks are then assigned to specific space-based radars using a quota-aware polling and blind-compensation strategy to form a practical task scheduling scheme. To solve the formulated problem, a regional search performance function based on a fixed total radiation energy is constructed, and a two-step decomposition algorithm is developed. This algorithm combines an outer monotonic bisection search with an inner marginal-gain allocation based on the Karush–Kuhn–Tucker theorem. Simulation results show that the proposed algorithm effectively reduces the total radiation energy of the constellation radar system compared to benchmark methods, thereby lowering the cumulative RF exposure level.

**Key words:** Constellation radar; RF stealth; Energy management; Beam-position task scheduling; Regional search

## 1 引言

当前空天预警监视与区域搜索任务已经呈现出如下特点：(1)监视区域范围大、任务持续时间长；(2)搜索目标分布不均且威胁等级差异明显；(3)平台资源受限条件下对系统隐蔽生存能力提出了更高要求。传统单平台雷达受平台载荷、观测窗口与重访能力等条件限制，难以在复杂对抗环境下兼顾低暴露探测需求<sup>[1-7]</sup>与广域覆盖、持续监视。因此，星座雷达逐渐受到关注。星座雷达是指由多颗在轨天基雷达协同构成的有机整体，在时空覆盖、几何分集以及协同探测能力等方面具有显著优势<sup>[3]</sup>。星座雷达系统通过多星观测实现区域搜索信息的联合获取与任务协同执行，具有较强的广域持续感知能力、较高的系统鲁棒性以及灵活的任务重构能力，在预警监视、区域搜索与空间态势感知等领域具有广阔的应用前景<sup>[8-11]</sup>。

随着雷达资源管理理论与信号处理技术的迅速发展，面向探测与跟踪任务的雷达辐射资源优化研究成为热点，如何高效分配雷达系统有限辐射资源以提升目标探测与跟踪性能，已经成为国内外学者聚焦的研究课题<sup>[12-26]</sup>。Yi等人<sup>[24]</sup>针对组网式协同多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达的分布式多目标跟踪问题，基于贝叶斯克拉美罗下界量化跟踪精度，提出一种联合波束与功率调度方法，采用分布式融合架构与协方差交叉融合策略，在降低通信开销的同时保证了系统鲁棒性。Yan等人<sup>[25]</sup>针对雷达网络多目标跟踪的资源优化问题，引入“目标容量”概念刻画雷达网络在资源约束下所能有效跟踪的目标数量上限，以后验克拉

默-拉奥下界(Posterior Cramér-Rao Lower Bound, PCRLB)为跟踪性能指标，建立了目标容量驱动的资源优化模型，通过优化各雷达节点的发射信号能量实现系统跟踪容量最大化。Shi等人<sup>[26]</sup>面向分布式相控阵雷达网络目标跟踪问题，分别采用预测贝叶斯克拉美罗下界和拦截概率作为目标跟踪精度和低截获概率(Low Probability of Intercept, LPI)性能指标，将资源感知管理与波形选择框架融合为统一优化模型，协同调整各雷达节点的发射功率、驻留时间及波形参数，从而同时提升雷达网络的目标跟踪精度与LPI性能。文献<sup>[27,28]</sup>从低截获约束资源调度、认知射频隐身雷达以及一体化多基地系统LPI功率分配等角度开展了探索。

2024年，Ding等人<sup>[29]</sup>面向机动目标跟踪场景，提出了一种波束图设计与在线航迹规划联合优化算法，通过辐射参数与平台机动的协同设计提升了机载雷达系统整体跟踪效能。Yan等人<sup>[30]</sup>针对多目标定位场景中的不确定性约束，提出了一种鲁棒机会约束功率分配方法，在给定性能门限条件下实现了资源的自适应优化配置。文献<sup>[31]</sup>针对非理想检测环境下的多雷达网络场景，研究了节点选择与辐射资源联合优化分配问题，将非理想检测因素引入资源管理模型之中，从而提升了系统在实际条件下的任务性能。文献<sup>[32]</sup>进一步针对压制干扰环境下的相控阵雷达网络，提出了波束图感知的资源分配方法，说明雷达资源优化已由传统功率与时间分配逐步拓展到复杂电磁环境下的多维联合优化层面。

雷达系统的任务性能不仅受自身辐射参数的影响，还与系统构型和观测几何紧密相关。相较于单平台雷达，星座雷达具备更灵活的区域覆盖方式和

更丰富的几何配置形式。此外，在实际中，不同天基雷达对同一区域的可见窗口、观测时刻与几何链路条件往往存在差异，因此，星座雷达系统的区域搜索具有明显的多星协同与时空耦合特征。围绕天基搜索任务调度以及星座雷达资源优化问题，国内外学者开展了大量研究<sup>[33-37]</sup>。王增福等人<sup>[33]</sup>面向天基雷达跟踪场景，基于部分可观测的马尔可夫决策过程框架综合考虑目标威胁度、跟踪精度与LPI性能指标，对平均辐射功率和相参积累时间进行联合优化设计。杨迪等人<sup>[34]</sup>面向低轨卫星搜索海上移动目标任务，提出了一种基于运动预测的调度方法，通过建立目标概率分布模型并优化观测窗口与视场指向，有效提升了动态目标的搜索成功率。文献<sup>[35,37]</sup>则分别从星地协同引导和多星分布式构型设计角度对天基协同探测问题进行了研究。

然而，上述研究大多从平台级任务调度或一般资源分配角度展开。实际上，面向星座雷达区域搜索的资源优化还需要进一步落实到离散波位层面的能量精细化分配及多星协同调度。由于区域内目标威胁通常呈现空间非均匀分布，不同波位对应的几何链路条件也存在显著差异，因此，各波位完成同等检测任务所需的辐射能量往往并不相同。针对该问题，国内外学者开展了相关研究，并取得了一定进展<sup>[38-43]</sup>。王阳等人<sup>[38]</sup>针对传统规则波位编排易被电子战系统截获的问题，提出了一种基于波位交织与低损耗点设计的低截获波位编排方法，通过目标先验信息引导下一时刻探测波位的动态选择。文献<sup>[39,40]</sup>分别从分布式天基雷达信号建模和相控阵雷达最优波位编排角度研究了波位级搜索问题，文献<sup>[41,42]</sup>从强化学习和协同调度角度研究了波位调度问题，文献<sup>[43]</sup>进一步针对星座雷达高速运动条件下的覆盖问题提出了实时补偿天基雷达运动影响的波位编排方法。

综上，上述研究成果为星座雷达区域搜索中的资源调度、波位编排与射频隐身设计奠定了基础，然而，已有研究尚未在先验威胁非均匀、几何链路差异及区域全覆盖要求并存条件下，针对星座雷达区域搜索场景开展能量管控与波位任务调度优化。因此，本文围绕面向射频隐身的星座雷达区域搜索问题，在预生成波位集合的基础上，构建星座雷达区域搜索能量管控模型。在满足预设区域加权检测概率阈值和波位全覆盖要求的前提下，以波位辐射能量分配为连续优化变量，求解满足任务性能要求的最小系统总辐射能量；进一步结合波位优先级、天基雷达能量配额和补盲调度策略，将优化后的波位搜索任务调度至具体天基雷达执行，从而形成可

执行的多星协同区域搜索方案。在截获接收机空间分布未知条件下，本文以搜索周期内系统总辐射能量表征累计射频暴露代价，通过降低该指标抑制总体电磁暴露水平。仿真结果表明，所提算法能够有效降低星座雷达系统在区域搜索任务中的总辐射能量。

## 2 系统模型

考虑由 $M$ 部天基雷达组成的星座雷达网，对指定地球表面区域进行协同搜索任务。定义搜索的方位角范围为 $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ ，俯仰角范围为 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 。本文采用如下假设：

(1) 星座雷达系统由同构天基雷达组成，各天基雷达具有一致的载荷体制、辐射能力和波束参数，因此在协同搜索过程中采用统一的单波位能量上、下界约束；

(2) 搜索区域内目标建模为Swerling I型起伏目标，考虑到星座雷达区域搜索主要面向大范围、低动态目标搜索场景，本文不考虑高速目标运动对波位覆盖关系及搜索性能的影响。

(3) 波位中心位置和波位划分方式不作为本文优化模型中的决策变量。不同波位的搜索性能差异主要由目标先验威胁分布及星座雷达检测链路条件决定。

(4) 每部天基雷达同一时刻最多形成一个搜索波束，多个波位任务在搜索周期内按驻留时隙顺序执行。

### 2.1 区域搜索波位离散模型

本文采用文献<sup>[38]</sup>的递推方法预生成固定波位集合。设 $\varphi_B$ 和 $\theta_B$ 分别表示雷达波束在方位向和俯仰向的3 dB宽度， $\varphi_n$ 和 $\theta_n$ 分别表示第 $n$ 个波位中心的方位角和俯仰角。取初始波位中心为 $(\varphi_1, \theta_1) = (\varphi_{\min}, \theta_{\min})$ ，则第 $n$ 个波位中心可依据前一波位递推得到：

$$\varphi_n = \varphi_{n-1} + \frac{2 \frac{\varphi_B}{\cos \varphi_{n-1}}}{\sqrt{0.5 \left[ \frac{\varphi_B}{\cos \varphi_{n-1}} \right]^2 + 1 + 1}} \quad (1)$$

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \frac{2 \frac{\theta_B}{\cos \theta_{n-1}}}{\sqrt{0.5 \left[ \frac{\theta_B}{\cos \theta_{n-1}} \right]^2 + 1 + 1}} \quad (2)$$

其中， $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ 和 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 分别表示搜索空域在方位向和俯仰向的边界； $N$ 为离散化后得到的总波位数。上述递推公式保证大角度扫描下波位重叠率

一致性,避免传统等间隔划分导致的边缘欠覆盖或过度重叠。离散化共生成 $N$ 个波位,集合记为 $\mathcal{B} = \{1, 2, \dots, N\}$ 。

## 2.2 区域目标先验威胁模型

考虑到Beta分布定义域为有限区间,与归一化后的搜索空域边界天然匹配,无需额外截断处理;其概率密度形状可由参数灵活调节,能够较自然地描述均匀、集中、偏斜及边缘增强等多种空间先验分布形态,适合表征搜索区域内不同威胁热点的聚集特征;同时,该分布参数形式简洁,便于在连续角域上构造先验威胁密度。基于此,本文采用二维独立Beta分布作为区域目标先验威胁的基准建模形式<sup>[38]</sup>:

$$f(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}) \propto \text{Beta}(\tilde{\varphi}; \alpha_1, \beta_1) \cdot \text{Beta}(\tilde{\theta}; \alpha_2, \beta_2) \quad (3)$$

其中,  $\tilde{\varphi} = (\varphi - \varphi_{\min}) / (\varphi_{\max} - \varphi_{\min})$  和  $\tilde{\theta} = (\theta - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min})$  分别表示归一化的方位角与俯仰角坐标;  $\alpha_1, \beta_1$  和  $\alpha_2, \beta_2$  为Beta分布形状参数,用于表征目标威胁在方位向和俯仰向上的聚集程度,对于多目标或多热点场景,先验密度可进一步表示为多个Beta分布的加权混合形式。将连续先验概率密度映射到离散波位集合后,第 $n$ 个波位的离散先验概率为

$$p_n = \iint_{\Omega_n} f(\varphi, \theta) d\varphi d\theta \quad (4)$$

其中,  $\Omega_n$  表示第 $n$ 个波位的覆盖立体角域;  $p_n$  表示第 $n$ 个波位的先验威胁权重,满足  $\sum_{n=1}^N p_n = 1$ , 用于构造区域加权检测指标。由于后续优化模型实际使用的是由式(4)离散化得到的波位先验权重  $p_n$ , 因此所提算法并不依赖于Beta分布这一特定形式。

## 2.3 星座雷达检测模型

在星座雷达体制下,几何差异会显著影响检测门限与能量利用效率<sup>[39]</sup>。定义 $E_n$ 为分配给第 $n$ 个波位的辐射能量,  $P_{t,n}$  和  $T_{d,n}$  分别表示第 $n$ 个波位的发射功率与驻留时间( $E_n = P_{t,n} T_{d,n}$ )。由雷达方程可得:

$$\begin{aligned} \text{SNR}_n &= \frac{G_t G_r A_e \sigma}{4\pi k_B T_e L_s R_n^4} \cdot P_{t,n} \cdot T_{d,n} \\ &= \frac{G_t G_r A_e \sigma}{4\pi k_B T_e L_s R_n^4} \cdot E_n \triangleq \gamma_n E_n \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $G_t$  和  $G_r$  分别表示发射和接收天线增益;  $A_e$  表示接收有效孔径;  $\sigma$  表示目标雷达散射截面积;  $k_B$  表示玻尔兹曼常数;  $T_e$  表示雷达接收机等效

噪声温度。星座雷达区域搜索任务通常依据卫星轨道、星下点邻域及可见空域进行任务划分。对于大方位角区域,可由后续轨道位置或其他卫星接替搜索。因此,本文将方位向扫描损耗、波束指向误差和波束形成实现损耗统一计入等效系统损耗 $L_s$ 。取轨道高度为 $H$ ,第 $n$ 个波位的斜距为 $R_n = H / \cos\theta_n$ 。由于本文中各天基雷达的系统参数、目标RCS与等效系统损耗均视为固定量,因此  $\gamma_n = \frac{G_t G_r A_e \sigma}{4\pi k_B T_e L_s R_n^4}$  仅表示随波位俯仰角变化的几何链路系数,其取值可由各波位相对几何位置在优化前预先计算得到。

在恒虚警率(CFAR)检测下,设虚警概率为 $P_{fa}$ 。对于Swerling I型目标第 $n$ 个波位单次扫描检测概率与辐射能量之间的关系可表示为

$$P_{d,n}(E_n) = P_{fa}^{\frac{1}{1+\text{SNR}_n}} = P_{fa}^{\frac{1}{1+\gamma_n E_n}} \quad (6)$$

式(6)表明,单波位检测概率由该波位的几何链路系数及分配辐射能量共同决定。上述检测模型为后续构造区域复合检测信息及建立优化模型提供了基础。

## 3 面向射频隐身的星座雷达区域搜索能量管控与波位任务调度算法

### 3.1 区域加权检测概率推导

为度量区域搜索性能,本文按先验威胁权重融合各波位检测概率,定义区域加权检测概率,即

$$\mathbf{E} = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_N]^T \quad (7)$$

则星座雷达对应的区域加权检测概率定义为

$$\bar{P}_d(\mathbf{E}) = \sum_{n=1}^N p_n P_{d,n}(E_n) \quad (8)$$

将式(6)代入式(8),可得:

$$\bar{P}_d(\mathbf{E}) = \sum_{n=1}^N p_n P_{fa}^{\frac{1}{1+\gamma_n E_n}} \quad (9)$$

式(9)给出了包含先验威胁分布、几何链路系数与波位辐射能量分配等参数的区域加权检测概率解析表达式。当波位先验威胁较高或几何链路条件较优时,在该波位投入辐射能量能够带来更大的目标检测性能增益。

### 3.2 优化模型建立

在预生成波位集合 $\mathcal{B}$ 的基础上,本文以波位能量分配向量 $\mathbf{E}$ 为连续优化变量,建立区域搜索能量管控模型。优化目标为最小化搜索周期内的星座雷达的总辐射能量,约束包括区域加权检测概率门限和单波位能量上、下界。

首先，为保证区域搜索任务可靠性，星座雷达的区域加权检测概率应不低于预设门限  $P_d^{\text{tar}}$ ，即

$$\bar{P}_d(\mathbf{E}) \geq P_d^{\text{tar}} \quad (10)$$

其次，受天基雷达载荷功率孔径积、驻留时间和接收机灵敏度等因素限制，第  $n$  个波位的辐射能量需满足上、下界约束：

$$E_{\min} \leq E_n \leq E_{\max}, \forall n \in \mathcal{B} \quad (11)$$

其中， $E_{\min}$  表示单波位最低可执行能量，由硬件开机门限和最短驻留时间共同确定； $E_{\max}$  表示单波位最大可分配能量，由平台最大辐射能力、最大驻留时间和单波位允许射频暴露共同确定。若任务进一步要求单波位独立检测概率底线，将其等价转换为能量下界并入式(11)。在波位集合  $\mathcal{B}$  已实现几何全覆盖的前提下，式(11)中的下界约束保证每个波位均被实际照射，从而维持区域搜索的执行完整性。

在上述约束条件下，以最小化星座雷达的总辐射能量为优化目标，可得面向射频隐身的星座雷达搜索能量管控优化模型为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{E}} \quad & \sum_{n=1}^N E_n \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{n=1}^N p_n P_{d,n}(E_n) \geq P_d^{\text{tar}}, \\ E_{\max} \geq E_n \geq E_{\min}, \forall n \in \mathcal{B} \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)的连续优化变量为波位能量分配向量  $\mathbf{E}$ 。能量优化结果随后通过波位任务调度映射至具体天基雷达执行，因此，本文所提算法由“波位能量连续优化层”和“波位任务离散调度层”组成：前者用于确定满足检测性能要求的星座雷达最小总辐射能量，后者用于形成可执行的星座雷达协同搜索方案。

### 3.3 优化模型求解

为刻画星座雷达总辐射能量与区域搜索性能之间的可达边界关系，本文构造固定总辐射能量条件下的最优区域搜索性能函数。基于式(9)中区域加权检测概率关于各波位能量的单调非减性，定义给定总辐射能量  $E_{\text{total}}$  时星座雷达的最优区域加权检测概率为

$$\begin{aligned} J(E_{\text{total}}) = \max_{\mathbf{E}} \quad & \sum_{n=1}^N p_n P_{\text{fa}}^{\frac{1}{1+\gamma_n E_n}} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{n=1}^N E_n = E_{\text{total}}, \\ E_{\max} \geq E_n \geq E_{\min}, \forall n \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

其中， $J(E_{\text{total}})$  表征在给定总辐射能量预算下星座

雷达可达到的最优区域搜索性能。由于其关于  $E_{\text{total}}$  单调非减，且满足检测门限的可行总能量区间为  $[NE_{\min}, NE_{\max}]$ ，因此，外层采用二分搜索确定最小可行总辐射能量，内层在固定  $E_{\text{total}}$  条件下利用 KKT 条件求解波位能量分配。该两步分解形式将原始能量最小化问题转化为能量—性能边界函数上的阈值搜索问题。

下面进一步求解内层固定总能量优化问题。构造式(13)的拉格朗日函数

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = \sum_{n=1}^N p_n P_{d,n}(E_n) - \lambda \left( \sum_{n=1}^N E_n - E_{\text{total}} \right) \\ + \sum_{n=1}^N \mu_n (E_n - E_{\min}) - \sum_{n=1}^N \alpha_n (E_n - E_{\max}) \end{aligned} \quad (14)$$

其中， $\lambda$  表示等式约束乘子， $\mu_n \geq 0$  与  $\alpha_n \geq 0$  分别对应下界与上界约束。令  $A = -\ln P_{\text{fa}} > 0$ ，则式(6)可重写为

$$P_{d,n}(E_n) = \exp\left(-\frac{A}{1 + \gamma_n E_n}\right) \quad (15)$$

其关于能量的一阶导数为

$$\frac{\partial P_{d,n}(E_n)}{\partial E_n} = \frac{A\gamma_n}{(1 + \gamma_n E_n)^2} P_{d,n}(E_n) \quad (16)$$

根据KKT 平稳性条件<sup>[44]</sup>有

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial E_n} = p_n \frac{\partial P_{d,n}(E_n)}{\partial E_n} - \lambda + \mu_n - \alpha_n = 0 \quad (17)$$

定义第  $n$  个波位的加权边际收益函数为

$$g_n(E_n) \triangleq p_n \frac{\partial P_{d,n}(E_n)}{\partial E_n} = \frac{p_n A \gamma_n}{(1 + \gamma_n E_n)^2} P_{d,n}(E_n) \quad (18)$$

则式(17)可写为

$$g_n(E_n) = \lambda - \mu_n + \alpha_n \quad (19)$$

结合互补松弛条件

$$\mu_n (E_n - E_{\min}) = 0, \alpha_n (E_n - E_{\max}) = 0 \quad (20)$$

可以得到，最优解满足如下三段式结构：

若  $g_n(E_{\min}) < \lambda$ ，则  $E_n^* = E_{\min}$ 。

若  $g_n(E_{\max}) > \lambda$ ，则  $E_n^* = E_{\max}$ 。

若  $g_n(E_{\min}) \geq \lambda \geq g_n(E_{\max})$  则  $E_n^*$  满足  $g_n(E_n^*) = \lambda$  因此，第  $n$  个波位的最优能量分配可写为

$$E_n^*(\lambda) = \begin{cases} E_{\max}, & g_n(E_{\max}) > \lambda, \\ g_n^{-1}(\lambda), & g_n(E_{\min}) \geq \lambda \geq g_n(E_{\max}), \\ E_{\min}, & g_n(E_{\min}) < \lambda \end{cases} \quad (21)$$

其中， $g_n^{-1}(\cdot)$  可通过牛顿迭代或内点法进行数值求

解,进一步通过搜索满足 $\sum_{n=1}^N E_n^*(\lambda) = E_{\text{total}}$ 的最优拉格朗日乘子即可得到固定总能量条件下的最优波位能量分配结果。

获得全域波位能量分配结果后,结合波位优先级和天基雷达资源配额,将各波位搜索任务调度至具体天基雷达执行。由于多星协同执行过程受载荷能力、剩余能量配额及覆盖完整性约束影响,本文设计一种配额感知的优先级轮询与补盲调度策略。对于由同构天基雷达组成的星座雷达系统,将系统总辐射能量分解为各天基雷达的初始能量配额,设第 $m$ 颗星分配能量为

$$Q_m = \frac{E_{\text{total}}}{M}, m = 1, 2, \dots, M \quad (22)$$

首先,将所有波位按照先验威胁概率 $p_n$ 从大到小排序,得到波位优先级序列。对于优先级较高的波位,优先采用轮询方式在各天基雷达间分派,以提高整体负载均衡性;当某一天基雷达剩余能量配额不足以承担当前波位任务时,将该波位转交给当前剩余能量最大的天基雷达执行。

进一步地,为保证区域全覆盖约束,对于轮询阶段未成功分派的波位,采用强制补盲策略,将其依次分配给剩余可用能量最大的天基雷达平台。通过上述连续分配与离散调度相结合的方式,可在尽量保持配额均衡的同时保证所有波位均被执行,从而形成可执行的多星协同调度方案。

算法1给出了所提能量管控与波位任务调度流程。

**算法1 面向射频隐身的星座雷达区域搜索能量管控与波位任务调度算法**

**Alg. 1 RF Stealth-oriented energy management and beam-position task scheduling algorithm for regional search in constellation radar**

**输入:** 预生成波位集合、区域检测性能门限、单波位能量上/下界、波位先验威胁信息、几何链路信息及搜索终止阈值。

**输出:** 波位能量分配结果及多星波位任务调度结果。

- 步骤1 根据单波位能量约束初始化星座雷达总辐射能量搜索区间;
- 步骤2 在当前总能量预算下,构造固定总能量约束下的波位能量优化子问题;
- 步骤3 求解内层波位能量优化问题,得到当前总能量预算对应的波位能量分配结果,并计算相应的区域加权检测概率;
- 步骤4 判断当前检测性能是否满足预设门限;若满足,则收缩总能量搜索上界,否则收缩搜索下界,并重复步骤二和步骤三,直至满足终止条件;
- 步骤5 根据最优波位能量分配结果和波位优先级,采用配额感知轮询与补盲调度策略,将波位搜索任务分派至各天基雷达,并按调度序列依次执行;
- 步骤6 输出波位能量分配结果及波位任务调度结果。

### 3.4 复杂度分析

设外层总能量二分搜索精度为 $\varepsilon_E$ ,外层迭代次数为

$$I_{\text{out}} = \left\lceil \log_2 \frac{N(E_{\text{max}} - E_{\text{min}})}{\varepsilon_E} \right\rceil \quad (23)$$

则能量优化复杂度为

$$\mathcal{O}_{\text{opt}} = \mathcal{O}(I_{\text{out}} I_{\lambda} N I_g) \quad (24)$$

其中,拉格朗日乘子搜索迭代次数为 $I_{\lambda}$ ,单波位反函数 $g_n^{-1}(\cdot)$ 的数值求解迭代次数为 $I_g$ 。在波位任务调度层,波位优先级排序复杂度为 $\mathcal{O}(N \log_2 N)$ ,每次补盲分派均遍历 $M$ 部天基雷达以选择剩余能量最大的执行平台,调度复杂度为 $\mathcal{O}(NM)$ 。因此总体复杂度为

$$\mathcal{O}_{\text{total}} = \mathcal{O}(I_{\text{out}} I_{\lambda} N I_g + N \log_2 N + NM) \quad (25)$$

## 4 仿真结果及分析

本节通过仿真评估所提算法的能量管控性能和任务调度结果。考虑星座雷达系统由 $M = 4$ 部天基雷达组成,轨道高度为 $H = 500$  km。搜索空域方位角范围为 $\varphi_{\text{min}} = -10^\circ, \varphi_{\text{max}} = 10^\circ$ ,俯仰角范围为 $\theta_{\text{min}} = 10^\circ, \theta_{\text{max}} = 50^\circ$ 。星座雷达采用单波束工作假设,每部天基雷达同一时刻仅执行一个波位搜索任务,采用第2节建立的波位覆盖模型对搜索区域进行离散化,得到波位集合 $\mathcal{B}$ 。目标先验威胁分布采用两个二维Beta分布的加权混合形式,以模拟区域内存在多个潜在威胁热点的场景。区域加权检测概率阈值取 $P_d^{\text{tar}} = 0.95$ ,虚警概率取 $P_{\text{fa}} = 10^{-6}$ ,单波位最小能量阈值取 $E_{\text{min}} = 1$  J。其余仿真参数设置如表1所示。

图1给出了仿真场景下的目标先验威胁概率分布。图2给出了本文所提面向射频隐身的星座雷达区域搜索能量管控与波位任务调度算法在仿真场景下的波位检测概率、波位能量分配及波位任务调度结果。

图2(a)和图2(b)表明,波位检测概率和能量分配均呈现空间非均匀性,高先验权重且链路条件较

表1 星座雷达仿真参数设置

Tab. 1 Simulation parameters of the constellation radar

参数	数值	参数	数值
$G_t$	46 dB	$L_s$	3 dB
$\lambda$	0.03 m	$k_B$	$1.38 \times 10^{-23}$ J/K
$T_e$	290 K	$\sigma$	$1 \text{ m}^2$
$A_e$	$4 \text{ m}^2$	$P_{\text{fa}}$	$1e - 6$

优的波位获得更多辐射资源。图2(c)表明，各天基雷达承担的波位任务交错分布，调度结果满足区域覆盖要求。

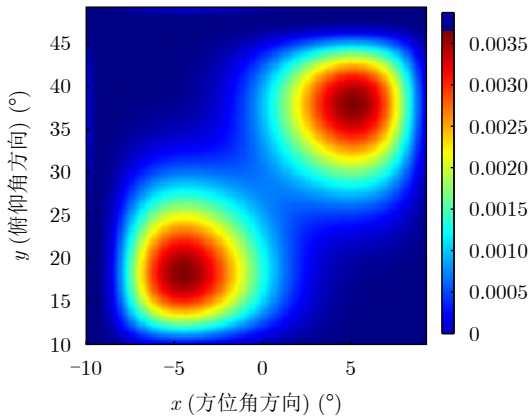


图1 目标先验威胁概率分布

Fig. 1 Spatial distribution of prior target threat probability

本文选取以下4种方法作为对比，评估所提算法性能：

- (1) 均匀资源分布算法：对所有波位进行均匀能量分配；
- (2) 先验加权分配算法：仅依据波位先验威胁概率进行能量分配；
- (3) 几何加权分配算法：仅依据波位几何链路系数进行能量分配；
- (4) 随机分配算法：在满足基本约束条件下随机生成波位能量分配结果。

图3给出了不同算法在基准场景下的能量消耗与检测性能比较结果。图3(a)表明，在相同检测门限下，所提算法所需总辐射能量最低。图3(b)表明，在相同能量预算下，所提算法获得的区域加权检测概率最高。

表2表明，所提算法在满足检测门限和覆盖约

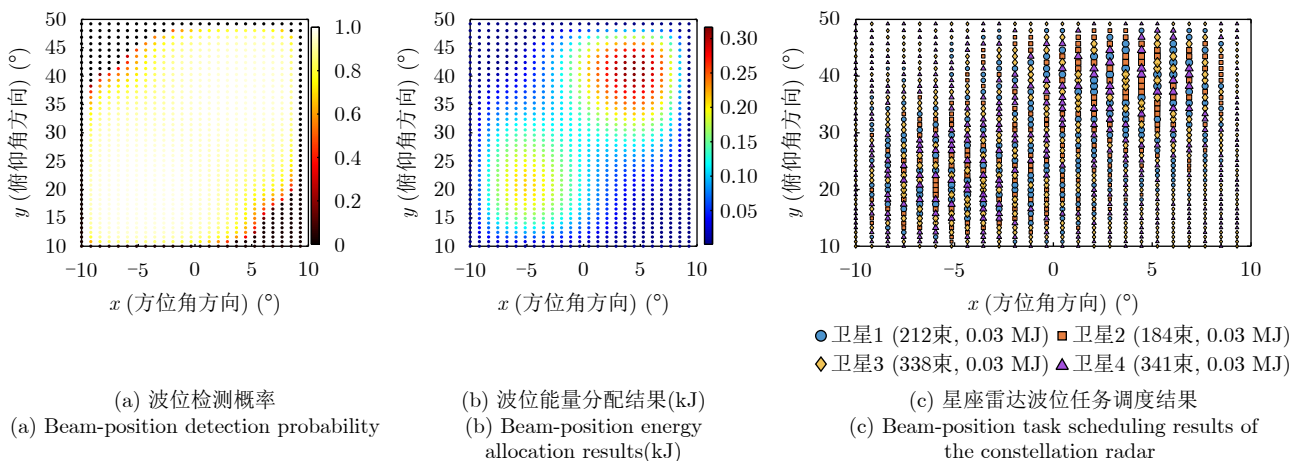


图2 星座雷达波位检测概率、能量分配及波位任务调度结果

Fig. 2 Beam-position detection probability, energy allocation, and beam-position task scheduling results of the constellation radar

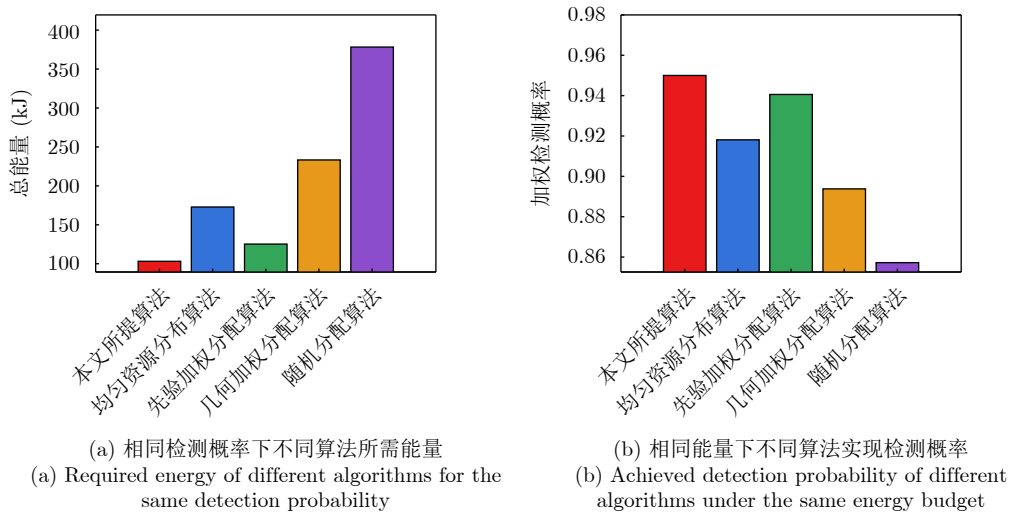


图3 不同算法能量消耗与检测性能对比

Fig. 3 Comparison of energy consumption and detection performance under different algorithms

表 2 不同算法策略下的能量消耗与探测性能对比

Tab. 2 Comparison of energy consumption and detection performance under different algorithms

算法策略	资源分配机制	总辐射能量消耗 (MJ)	能量节约比	覆盖完备性
本文所提算法	拉格朗日解	0.105	-	100%
均匀资源分布算法	均匀能量分布	0.175	40.0%	100%
先验加权分配算法	仅依据威胁度分配	0.125	16.0%	100%
几何加权分配算法	仅补偿距离损耗	0.230	54.3%	100%
随机分配算法	随机资源调度	0.380	72.4%	100%

束的条件下获得最低总辐射能量消耗。与均匀分配、先验加权、几何加权和随机分配方法相比,所提算法能够同时利用先验威胁差异和几何链路差异,提高能量利用效率。

进一步设置均匀先验场景,以评估算法对先验分布变化的适应性。在该场景下,各波位目标

出现概率视为相同,先验威胁权重退化为均匀分布。

图4表明,在均匀先验条件下,先验加权分配方法的优势减弱;所提算法仍保持较低总辐射能量和较高区域加权检测概率,表明其在先验分布变化条件下具有稳定的能量管控性能。

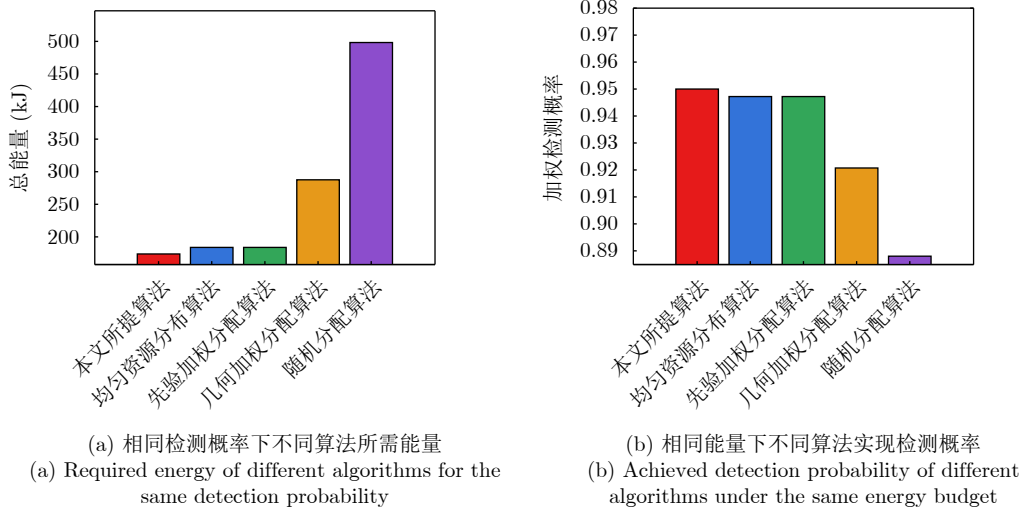


图 4 均匀先验场景下不同算法的能量消耗与检测性能对比

Fig. 4 Comparison of energy consumption and detection performance of different algorithms in the uniform-prior scenario

图5表明,随着轨道高度增加,各方法达到检测门限所需能量均增加。所提算法在不同轨道高度下保持最低能量消耗,表明其对几何链路变化具有较好的适应性。

## 5 结语

本文针对星座雷达区域搜索任务,提出了一种面向射频隐身的区域搜索能量管控与波位任务调度算法。通过将区域搜索空域离散为波位集合,并融合各波位检测概率信息,构建了区域加权检测概率指标;在此基础上,构建了以最小化星座雷达系统总辐射能量为目标、以区域加权检测概率阈值和波位全覆盖要求为约束的波位能量管控模型,并进一步结合配额感知轮询与补盲调度策略,将优化后的波位搜索任务调度至具体天基雷达,形成可执行的

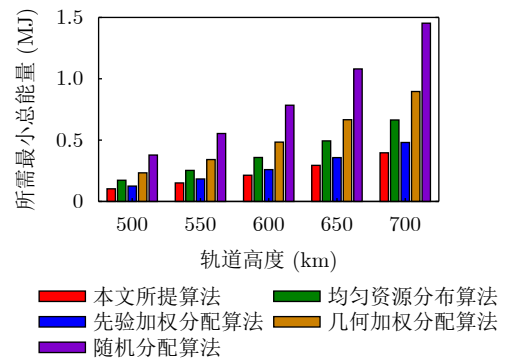


图 5 不同轨道高度下不同算法达到检测门限所需能量

Fig. 5 Required energy of different algorithms to achieve the detection threshold at different orbital heights

多星协同搜索方案。仿真结果表明,与均匀分配、先验加权、几何加权及随机分配等对比算法相比,

所提算法能够有效降低星座雷达系统在区域搜索任务中的总辐射能量。然而, 在实际区域搜索场景中, 目标RCS起伏以及复杂杂波和遮蔽环境等多种不确定因素会对星座雷达搜索性能产生影响, 后续研究将进一步引入方向相关截获概率或截获因子模型, 完善复杂对抗条件下的射频隐身性能评价。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

**Conflict of Interests** The authors declare that there is no conflict of interests

### 参 考 文 献

- [1] 贲德, 林幼权. 天基监视雷达[J]. 现代雷达, 2005, 27(4): 1–4. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2005.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2005.04.001).  
BEN D and LIN YQ. Space-based surveillance radar[J]. *Modern Radar*, 2005, 27(4): 1–4. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2005.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2005.04.001).
- [2] 贲德, 龙伟军. 天基雷达的关键技术[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(4): 391–396. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2013.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2013.04.001).  
BEN D and LONG WJ. Key technology of space-based radar[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(4): 391–396. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2013.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2013.04.001).
- [3] XIAO P, LIU B, and GUO W. ConGaLSAR: A constellation of geostationary and low Earth orbit synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(12): 2085–2089. doi: [10.1109/LGRS.2019.2962574](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2962574).
- [4] XIAO P, LIU B, WU YM, *et al.* A comprehensive method of ambiguity suppression for constellation of geostationary and low Earth orbit SAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 3327–3335. doi: [10.1109/JSTARS.2020.3002392](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3002392).
- [5] SCHLEHER D C. LPI radar: Fact or fiction[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2006, 21(5): 3–6. doi: [10.1109/MAES.2006.1635166](https://doi.org/10.1109/MAES.2006.1635166).
- [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](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.06.02).  
SHI CG, DONG J, ZHOU JJ, *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](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.06.02).
- [7] LYNCH JR D, 沈玉芳, 译. 射频隐身导论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 1–17.  
LYNCH JR D, SHEN Yufang, translation. Introduction to RF Stealth[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009: 1–17.
- [8] 陈荣. 美国天基预警雷达系统发展[J]. 国防科技, 2014, 35(2): 76–83. doi: [10.3969/j.issn.1671-4547.2014.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-4547.2014.02.019).  
CHEN R. Study of American space-based warning radar system development[J]. *National Defense Science & Technology*, 2014, 35(2): 76–83. doi: [10.3969/j.issn.1671-4547.2014.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-4547.2014.02.019).
- [9] 林幼权, 武楠. 天基预警雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 15–18.  
LIN YQ and WU N. Space Based Early Warning Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 15–18.
- [10] ZHANG B, MOUCHE A A, and PERRIE W. First quasi-synchronous hurricane quad-polarization observations by C-band radar constellation mission and RADARSAT-2[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4206510. doi: [10.1109/TGRS.2022.3161002](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3161002).
- [11] 郑舒予, 杨庆伟, 蒋李兵, 等. 面向预警监视任务的天基雷达研究进展[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(10): 3199–3217. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2025.10.08](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2025.10.08).  
ZHENG SY, YANG QW, JIANG LB, *et al.* Research progress on space-based radar for early warning and surveillance task[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2025, 47(10): 3199–3217. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2025.10.08](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2025.10.08).
- [12] 易伟, 袁野, 刘光宏, 等. 多雷达协同探测技术研究进展: 认知跟踪与资源调度算法[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 471–499. doi: [10.12000/JR23036](https://doi.org/10.12000/JR23036).  
YI W, YUAN Y, LIU GH, *et al.* Recent advances in multi-radar collaborative surveillance: Cognitive tracking and resource scheduling algorithms[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 471–499. doi: [10.12000/JR23036](https://doi.org/10.12000/JR23036).
- [13] YAN JK, JIAO H, PU WQ, *et al.* Radar sensor network resource allocation for fused target tracking: A brief review[J]. *Information Fusion*, 2022, 86/87: 104–115. doi: [10.1016/j.inffus.2022.06.009](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.06.009).
- [14] DAI JH, YAN JK, WANG PH, *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).
- [15] 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: 1–23.  
SHI CG, ZHOU JJ, WANG F, *et al.* Radio Frequency Stealth Technology for Airborne Radar Network[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 1–23.
- [16] 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 CG, DING LT, WANG F, *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).
- [17] 卢秀娟. 低截获约束下针对目标跟踪的雷达资源调度方法研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2023: 55–68. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2023.005499](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2023.005499).
- LU XJ. Research on radar resource scheduling method for target tracking under LPI constraints[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2023: 55–68. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2023.005499](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2023.005499).
- [18] SHI CG, DING LT, WANG F, *et al.* Joint target assignment and resource optimization framework for multitarget tracking in phased array radar network[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(3): 4379–4390. doi: [10.1109/JSYST.2020.3025867](https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3025867).
- [19] YAN JK, PU WQ, ZHOU SH, *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).
- [20] 张巍巍. 面向目标定位的组网雷达射频隐身资源管理技术研究[D]. [博士学位论文], 南京航空航天大学, 2022: 29–37. doi: [10.27239/d.cnki.gnhhu.2022.002414](https://doi.org/10.27239/d.cnki.gnhhu.2022.002414).
- ZHANG Weiwei. Research on Resource management technology for RF stealth in radar network for target localization[D]. [Ph.D. dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022: 29–37. doi: [10.27239/d.cnki.gnhhu.2022.002414](https://doi.org/10.27239/d.cnki.gnhhu.2022.002414).
- [21] SHI CG, WANG F, SELLATHURAI M, *et al.* Low probability of intercept-based optimal power allocation scheme for an integrated multistatic radar and communication system[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(1): 983–994. doi: [10.1109/JSYST.2019.2931754](https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2931754).
- [22] HUANG JY, XIE JW, YANG ZQ, *et al.* Joint resource allocation strategy for multiple target tracking in networked colocated MIMO radar system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(5): 7201–7211. doi: [10.1109/TVT.2025.3525642](https://doi.org/10.1109/TVT.2025.3525642).
- [23] 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: 25–47. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2020.000589](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2020.000589).
- LU YX. Research on cooperative sensing and resource management for networked radar[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2020: 25–47. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2020.000589](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2020.000589).
- [24] YI W, YUAN Y, 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).
- [25] YAN JK, DAI JH, PU WQ, *et al.* Target capacity based resource optimization for multiple target tracking in radar network[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 2410–2421. doi: [10.1109/TSP.2021.3071173](https://doi.org/10.1109/TSP.2021.3071173).
- [26] SHI CG, WANG YJ, SALOUS S, *et al.* Joint transmit resource management and waveform selection strategy for target tracking in distributed phased array radar network[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(4): 2762–2778. doi: [10.1109/TAES.2021.3138869](https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3138869).
- [27] WANG WQ. Moving-target tracking by cognitive RF stealth radar using frequency diverse array antenna[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 3764–3773. doi: [10.1109/TGRS.2016.2527057](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2527057).
- [28] 刘辛雨. 低截获概率雷达信号设计方法研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2021: 35–48. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2023.005917](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2023.005917).
- LIU XY. Research on signal design methods for low probability of intercept radar[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 35–48. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2023.005917](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2023.005917).
- [29] DING LT, SHI CG, and ZHOU JJ. Joint beam pattern design and online route planning for multitarget tracking in airborne radar system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(1): 774–788. doi: [10.1109/TAES.2023.3328799](https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3328799).
- [30] YAN JK, PU WQ, LIU HW, *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).
- [31] 时晨光, 唐志诚, 周建江, 等. 非理想检测下多雷达网络节点选择与辐射资源联合优化分配算法[J]. 雷达学报, 2024, 13(3): 565–583. doi: [10.12000/JR23081](https://doi.org/10.12000/JR23081).
- SHI CG, TANG ZC, ZHOU JJ, *et al.* Joint collaborative radar selection and transmit resource allocation in multiple distributed radar networks with imperfect detection performance[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(3): 565–583. doi: [10.12000/JR23081](https://doi.org/10.12000/JR23081).
- [32] XU HC, SUN J, YUAN Y, *et al.* Beam pattern-aware resource allocation for phased array radar network under suppression jamming[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(15): 24825–24840. doi: [10.1109/JSEN.2024.3414429](https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3414429).
- [33] 王增福, 杨广宇, 金术玲. 考虑综合性能最优的非短视快速天基雷达多目标跟踪资源调度算法[J]. 雷达学报, 2024, 13(1): 253–269.
- WANG ZF, YANG GY, and JIN SL. A non-myopic and fast resource scheduling algorithm for multi-target tracking of space-based radar considering optimal integrated performance[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(1): 253–269.
- [34] 杨迪, 李振瑜, 郭帅, 等. 天基低轨海上移动目标成像搜索任务

- 调度[J]. 航空学报, 2023, 44(15): 528752. doi: [10.7527/S1000-6893.2023.28752](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2023.28752).
- YANG D, LI ZY, GUO S, *et al.* Space-based LEO-observation search planning for maritime moving targets[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(15): 528752. doi: [10.7527/S1000-6893.2023.28752](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2023.28752).
- [35] 潘越, 郭继光. 预警卫星与地基雷达协同引导计算及效能分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(4): 421–426. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2018.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2018.04.011).
- PAN Y and GUO JG. Calculation and efficiency analysis of coordinated detecting for early-warning satellite and radar[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2018, 13(4): 421–426. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2018.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2018.04.011).
- [36] 柳超, 王月基. 对海探测雷达多目标跟踪技术综述[J]. 雷达学报, 2021, 10(1): 100–115. doi: [10.12000/JR20081](https://doi.org/10.12000/JR20081).
- LIU C and WANG YJ. Review of multi-target tracking technology for marine radar[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(1): 100–115. doi: [10.12000/JR20081](https://doi.org/10.12000/JR20081).
- [37] CHEN JY, HUANG PH, XI PL, *et al.* Approach for along-track baseline distribution design in a multi-satellite distributed space-based radar system[C]. IGARSS 2023 - 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, USA, 2023: 6125–6128. doi: [10.1109/IGARSS52108.2023.10282407](https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10282407).
- [38] 王阳. 一种低截获概率的波位编排方法[J]. 电讯技术, 2020, 60(9): 1064–1068. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2020.09.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2020.09.010).
- WANG Y. A beam position arrangement method with low probability of intercept[J]. *Telecommunication Engineering*, 2020, 60(9): 1064–1068. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2020.09.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2020.09.010).
- [39] CHEN JY, HUANG PH, XIA XG, *et al.* Multichannel signal modeling and AMTI performance analysis for distributed space-based radar systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5117724. doi: [10.1109/TGRS.2022.3202567](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3202567).
- [40] 陈建平, 刘志中, 尤立志. 相控阵雷达最优波位编排策略仿真算法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 244–250. doi: [10.3969/j.issn.1671-1815.2019.33.036](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2019.33.036).
- CHEN JP, LIU ZZ, and YOU LZ. Simulation algorithm of optimal beam position arrangement strategy for phased array radar[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(33): 244–250. doi: [10.3969/j.issn.1671-1815.2019.33.036](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2019.33.036).
- [41] KOSURU R, ZHEN Q, ZHEN D, *et al.* A modified reinforcement Q-learning method for multi-function phased array radar beam scheduling[C]. 2022 IEEE 21st International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing (ICCI\*CC), Toronto, Canada, 2022: 16–21. doi: [10.1109/ICCICC57084.2022.10101623](https://doi.org/10.1109/ICCICC57084.2022.10101623).
- [42] DENG AB, PEKTAS F, KUMRU F, *et al.* Adaptive beam scheduling for cooperative phased array radars with high-precision pencil-beam[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(6): 8475–8488. doi: [10.1109/TAES.2023.3308549](https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3308549).
- [43] 刘晏池, 江涛, 林幼权, 等. 天基预警雷达扇区建立与波位编排方法分析[J]. 现代雷达, 2025, 47(1): 39–45. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2025.01.007](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2025.01.007).
- LIU YC, JIANG T, LIN YQ, *et al.* Analysis of the sector division and beam position arrangement for spaced-based early warning radar[J]. *Modern Radar*, 2025, 47(1): 39–45. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2025.01.007](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2025.01.007).
- [44] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 50–62.

### 作者简介

李国平, 高级工程师, 主要从事雷达资源管理、飞行器射频隐身技术研究。

时晨光, 教授, 主要研究方向为飞行器雷达射频隐身、网络化雷达协同探测与资源管理、雷达通信一体化设计等。

周建江, 教授, 主要从事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研究。

(责任编辑: 于青)