面向射频隐身的天基雷达区域搜索探测窗口与波位能量联合优化算法

李国平[①②] 时晨光[*①] 周建江[②]

[①](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)

[②](三江学院 南京 210012)

摘要：针对天基雷达区域搜索场景下时序耦合带来的射频隐身能量管控难题，该文提出面向射频隐身的天基雷达区域搜索探测窗口与波位能量联合优化算法。首先，将搜索区域离散为波位集合，根据天基雷达运动特性与波位串行驻留时序，建立考虑探测窗口、波位能量及时变几何链路的波位检测概率模型；结合波位先验威胁权重，对各波位检测概率进行加权融合，推导包含波位先验威胁、探测窗口起始时刻、时变几何链路系数与波位能量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天基雷达区域搜索探测窗口与波位能量联合优化模型，即以最小化天基雷达总辐射能量为优化目标，以满足预先设定的区域加权检测概率阈值、单波位能量上/下界和区域可见窗口要求为约束条件，对探测窗口起始时刻与波位能量进行联合优化设计。针对上述优化问题，设计外层探测窗口起始时刻搜索与内层波位能量迭代优化相结合的双层联合求解框架：外层以总辐射能量最小化为准则确定探测窗口起始时刻，内层迭代更新波位照射时刻和时变几何链路系数，并基于Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件求解约束能量分配。仿真结果表明，与现有方法相比，所提算法能够进一步降低天基雷达在区域搜索任务中的总辐射能量，从而提升其射频隐身效能。

关键词：射频隐身；天基雷达；探测窗口；能量管控；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/JR26141 **CSTR**: 32380.14.JR26141

引用格式：李国平, 时晨光, 周建江. 面向射频隐身的天基雷达区域搜索探测窗口与波位能量联合优化算法[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR26141.

Reference format: LI Guoping, SHI Chenguang, and ZHOU Jianjiang. RF stealth-oriented joint optimization algorithm for the detection window and beam-position energy in space-based radar regional search[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR26141.

RF Stealth-Oriented Joint Optimization Algorithm for the Detection Window and Beam-Position Energy in Space-Based Radar Regional Search

LI Guoping[①②] SHI Chenguang[*①] ZHOU Jianjiang[②]

[①](*Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics*, *Ministry of Education*, *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, *Nanjing* 210016, *China*)

[②](*Sanjiang University*, *Nanjing* 210012, *China*)

Abstract: To address the challenge of radio frequency (RF) stealth energy management induced by temporal coupling in space-based radar regional search scenarios, this paper proposes an RF stealth-oriented joint

收稿日期：2026-08-12；改回日期：；网络出版：2026-xx-xx

*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)，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: The National Natural Science Foundation of China (62271247), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20240181), Qing Lan Project of Jiangsu Province

责任主编：周成伟 Corresponding Editor: ZHOU Chengwei

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

optimization algorithm for the detection window and beam-position energy in space-based radar regional search. First, based on the motion characteristics of the space-based radar and by jointly considering the detection window, beam-position energy, and time-varying geometric link, the algorithm derives the beam-position detection probability. Next, the prior threat weight of each beam position is incorporated into a regional composite detection metric for characterizing the regional search performance. The optimization aims to minimize the total radiated energy of the space-based radar subject to multiple constraints: the prescribed weighted-detection probability threshold, the upper and lower bounds of single-beam-position energy, and the visible-window time. Accordingly, the start time of the detection window is optimized jointly with the beam-position energy. Finally, a two-layer joint solution framework is designed to address the coupling among the detection window, beam-position energy, and time-varying geometric link. The outer layer optimizes the start time of the detection window using minimal total radiated energy as the criterion. The inner layer iteratively updates the beam-position illumination time and geometric link coefficient and solves the constrained energy allocation under the Karush–Kuhn–Tucker conditions. Simulation results show that compared with existing methods, the proposed algorithm can further reduce the total radiated energy of the space-based radar while satisfying the specified regional search performance requirement, thereby enhancing its RF stealth performance.

Key words: RF stealth; Space-based radar; Detection window; Energy management; Regional search

1 引 言

当前，远域预警、广域监视和重点区域搜索任务已呈现出如下特点：(1) 任务作用范围不断扩展，要求探测系统具备大尺度空间覆盖和跨区域感知能力；(2) 目标出现时空位置不确定，搜索任务对系统快速响应、周期重访和持续观测能力提出更高要求；(3) 复杂电磁对抗环境下平台生存与任务隐蔽性需求增强，主动探测系统需要兼顾任务效能与射频暴露控制。因此，天基雷达探测作为空天一体化预警监视体系的重要组成部分，是提升广域持续感知能力的重要技术途径。天基雷达依托卫星平台运行于近地轨道或其他空间轨道，能够在较大观测范围内获取地面、海面及空中目标信息，具有覆盖范围广、观测视角灵活、受地理部署限制小等优势。相较于地基雷达、机载雷达，天基雷达可在一定程度上突破地球曲率和地面站址条件带来的探测限制，因此在区域搜索任务中具有重要应用价值[1−3]。针对区域搜索任务中目标出现时机不确定、活动区域分散且持续观测需求突出的特点，天基雷达通常需要在有限可见窗口内完成快速区域覆盖与重点区域持续监测。与此同时，作为主动射频传感器，天基雷达在执行区域搜索时还需兼顾辐射暴露控制，以降低其被敌方无源探测系统截获的风险，从而提升任务隐蔽性。

近年来，随着认知雷达和雷达资源闭环管控理论方法的发展，面向探测、搜索、跟踪与干扰等任务的雷达射频资源优化受到广泛关注[4−17]。易伟等学者[4]围绕认知跟踪与资源调度方向开展了系统性综述，从资源要素、融合架构、性能指标及复杂场景等维度梳理了该领域的研究进展，揭示了认知探测闭环与雷达资源优化的内在耦合关系。张大琳等学者[5]针对多目标突防组网雷达的协同干扰资源分配问题，以组网雷达目标检测概率为干扰性能度量构建了资源优化模型，在有效压制组网雷达探测性能的同时，提升了干扰资源配置的鲁棒性。Yan等学者[6]针对异构雷达网络中的异步多目标跟踪资源优化问题，以贝叶斯克拉美罗下界量化跟踪性能，提出了资源消耗最小化与跟踪精度最大化两类异构资源联合分配方案，在雷达资源约束下，有效提升了多目标跟踪精度与异构资源利用率。Ding等学者[7]面向多目标跟踪射频隐身需求，构建了兼顾跟踪精度阈值与辐射暴露约束的混合整数优化模型，在保障多目标跟踪精度的同时，有效降低了雷达被截获风险，实现了目标跟踪性能与射频隐身[18]均衡设计。上述研究表明，雷达射频资源的精细化配置是提升雷达系统任务效能与降低射频暴露风险的重要途径。

不同于地基或机载雷达，天基雷达观测几何、链路增益和可用观测时间随轨道运动持续变化，资源分配过程需同时满足可见窗口、星上能源、载荷工作能力和射频隐身等约束[19−27]。廖骥等学者[26]面向天基雷达多目标跟踪任务，综合目标空域位置、工作频率、目标优先级和卫星运动状态等信息，将多目标任务规划问题转化为二维分配问题求解，高效获得最优的目标规划顺序。高飞等学者[27]面向天基分布式雷达海面目标跟踪应用，分析了区域覆盖、重访周期、任务规划和多目标跟踪处理等关键问题，指出任务效能与星座构型、访问时序和任务资源组织方式等因素密切相关。

相较于上述面向目标跟踪的天基雷达射频资源

调度研究，面向区域搜索任务时，还需额外考虑波位编排及其对搜索性能的影响。波位作为区域搜索任务执行的基本单元，其空间划分方式决定了搜索区域的覆盖结构，其访问顺序和驻留资源分配也直接影响了搜索效率和检测性能。文献[28–31]分别从低截获波位编排以及相控阵雷达最优波位编排等方面开展了探索。王阳[28]针对规则波位编排易暴露雷达工作规律的问题，提出了基于波位交织与低损耗点设计的低截获波位编排方法。陈建平等学者[29]分析了波束指向、波束跃度、波束宽度与脉冲积累时间的耦合约束关系，提出了基于点阵图元的波束截面建模方法，并通过遗传算法实现了相控阵雷达最优波位编排策略。

在波位编排研究的基础上，已有研究进一步将波位几何链路、任务调度与辐射能量管控纳入统一建模框架，开展联合优化设计。Chen等学者[32]面向天基雷达连续区域监视任务，将观测区域离散为网格，以雷达驻留时间作为调度代价，构建了雷达星座区域监视任务调度模型，提出了重调度方法和任务重分配算法，实现了大范围不规则区域的连续覆盖观测。文献[33]面向区域搜索任务，在预设探测窗口与既定几何链路条件下，构建了包含区域先验威胁、几何链路系数和辐射能量分配的区域加权检测概率模型，并在预先设定的目标检测性能约束下，提出了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方法，有效提高了区域搜索任务中的辐射能量利用率，为进一步研究时变观测条件下的区域搜索资源优化提供了重要参考。

上述研究成果为天基雷达区域搜索中的任务规划、波位编排、资源分配和射频隐身设计奠定了重要基础。然而，现有天基雷达区域搜索资源管理研究尚未充分刻画探测窗口、波位能量与轨道时变几何之间的耦合关系。天基雷达对各波位的实际探测时刻由探测窗口起始时刻及前序波位驻留时间共同决定，而驻留时间又与分配能量相关；波位能量分配会改变后续波位的探测时刻及其几何链路状态，进而影响天基雷达的区域检测性能和射频隐身性能。

因此，本文围绕天基雷达区域搜索场景下时序耦合带来的射频隐身能量管控问题，提出面向射频隐身的天基雷达区域搜索探测窗口与波位能量联合优化算法。该算法基于波位串行驻留时序与时变几何链路特性，结合波位先验威胁权重构建区域加权检测概率指标，用于衡量区域搜索任务性能。不同于文献[33]在预设探测窗口条件下开展的区域搜索能量管控，本文将探测窗口起始时刻显式纳入优化变量，以最小化天基雷达总辐射能量为优化目标，以满足预先设定的区域加权检测概率阈值、单波位能量上/下界和区域可见窗口要求为约束条件，建立探测窗口与波位能量联合优化模型。针对该时序耦合的非线性优化问题，设计双层联合求解框架：外层以总辐射能量最小化为准则确定探测窗口起始时刻，内层迭代更新波位照射时刻和时变几何链路系数，并基于 KKT 条件求解约束能量分配。仿真结果表明，所提算法能够有效降低天基雷达在执行区域搜索任务中的总辐射能量，改善射频隐身性能

2　系统模型

考虑一部天基雷达沿近地轨道高速运动，对地面给定区域执行区域搜索任务。不失一般性的，本文作出如下假设：

(1) 天基雷达发射功率及占空比固定，不同波位采用统一的单波位能量上/下界约束；

(2) 天基雷达采用单波束工作模式，区域内波位按给定序列串行驻留，实际探测窗口时长由各波位驻留时间累加得到，探测窗口时长表征天基雷达的射频暴露时间[34]。

在上述假设下，天基雷达对目标区域的探测窗口时长由其总辐射能量决定，而总辐射能量由探测窗口起始时刻和各波位能量联合决定。因此，本文建立区域搜索波位离散模型、先验威胁模型、探测窗口模型以及时变检测模型，为后续探测窗口与波位能量联合优化提供基础。

2.1　区域搜索波位离散模型

设天基雷达在时刻t的地固坐标为

$$\boldsymbol{s}(t) \in \mathbb{R}^3 \tag{1}$$

搜索区域中心在地固坐标系中的位置为$\boldsymbol{q}_{\mathrm{c}}$，区域可见时间区间为$W_{\mathrm{vis}} = [t^{\mathrm{s}}_{\mathrm{vis}}, t^{\mathrm{e}}_{\mathrm{vis}}]$，天基雷达相对于搜索区域中心的最近通过时刻为

$$t_{\mathrm{r}} = \arg \min_{t \in [t^{\mathrm{s}}_{\mathrm{vis}}, t^{\mathrm{e}}_{\mathrm{vis}}]} ||\boldsymbol{s}(t) - \boldsymbol{q}_{\mathrm{c}}||_2 \tag{2}$$

其中，$t^{\mathrm{s}}_{\mathrm{vis}}$和$t^{\mathrm{e}}_{\mathrm{vis}}$分别表示区域可见窗口的起止时刻。于是，可见窗口中心时刻为

$$t_{\mathrm{c}} = \frac{t^{\mathrm{s}}_{\mathrm{vis}} + t^{\mathrm{e}}_{\mathrm{vis}}}{2} \tag{3}$$

本文以t_{r}时刻天基雷达到区域中心的视线方向为参考轴建立局部角坐标系。记天基雷达波束在方位向和俯仰向的3 dB波束宽度分别为φ_{B}和θ_{B}，取初始波位中心为$(\varphi_1, \theta_1) = (\varphi_{\min}, \theta_{\min})$，则第$n$个波位中心的方位角$\varphi_n$和俯仰角$\theta_n$可依据前一波位递推得到[28,33]

$$\varphi_n=\varphi_{n-1}+\frac{2\dfrac{\varphi_{\mathrm{B}}}{\cos\varphi_{n-1}}}{\sqrt{0.5\left[\dfrac{\varphi_{\mathrm{B}}}{\cos\varphi_{n-1}}\right]^2+1}+1} \tag{4}$$

$$\theta_n=\theta_{n-1}+\frac{2\dfrac{\theta_{\mathrm{B}}}{\cos\theta_{n-1}}}{\sqrt{0.5\left[\dfrac{\theta_{\mathrm{B}}}{\cos\theta_{n-1}}\right]^2+1}+1} \tag{5}$$

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；$N$表示离散化后得到的总波位数。离散化后波位集合记为$\mathcal{B}=\{1,2,\cdots,N\}$。

第n个波位对应的地面足印中心在地固坐标系中的位置记为

$$\boldsymbol{q}_n\in\mathbb{R}^3,n\in\mathcal{B} \tag{6}$$

2.2 区域目标先验威胁模型

为描述区域内目标出现概率的空间非均匀性，本文为每个波位赋予先验威胁权重。设连续角域内的目标先验概率密度函数为$f(\varphi,\theta)$，将方位角和俯仰角归一化为[28,33]

$$\tilde{\varphi}=\frac{\varphi-\varphi_{\min}}{\varphi_{\max}-\varphi_{\min}},\tilde{\theta}=\frac{\theta-\theta_{\min}}{\theta_{\max}-\theta_{\min}} \tag{7}$$

本文采用二维独立 Beta 分布构造基准先验概率密度函数：

$$f(\varphi,\theta)=\frac{1}{\mathrm{C}}\mathrm{Beta}(\tilde{\varphi};\alpha_1,\beta_1)\cdot\mathrm{Beta}\left(\tilde{\theta};\alpha_2,\beta_2\right) \tag{8}$$

其中， α_1,β_1和α_2,β_2分别表示Beta分布形状参数；C表示归一化常数。对于多目标威胁聚集分布的场景，可采用多个Beta分布的加权混合形式描述先验威胁分布。将连续先验概率密度映射到离散波位集合后，则第n个波位的离散先验概率可表示为[33]

$$p_n=\iint_{\Omega_n}f(\varphi,\theta)\,\mathrm{d}\varphi\mathrm{d}\theta \tag{9}$$

其中，Ω_n表示第n个波位的覆盖立体角域。

2.3 区域搜索探测窗口模型

设目标区域探测窗口时间区间为

$$W_{\mathrm{det}}=[t_{\mathrm{s}},t_{\mathrm{e}}]\subseteq W_{\mathrm{vis}} \tag{10}$$

其中，t_{s}和t_{e}分别表示探测窗口起始时刻和结束时刻；$T_{\mathrm{det}}=t_{\mathrm{e}}-t_{\mathrm{s}}$表示探测窗口；为优先保障高威胁波位的搜索性能，本文按照波位先验威胁权重从高到低确定串行照射顺序。设波位执行序列为

$$\boldsymbol{\pi}=[\pi_1\pi_2\cdots\pi_N] \tag{11}$$

其中，π_k表示第k个被照射的波位。定义第n个波位的辐射能量为E_n，驻留时间为$T_{\mathrm{d},n}$，在发射功率P_{t}和占空比η固定时，天基雷达波束驻留时间可表示为

$$T_{\mathrm{d},n}=\frac{E_n}{\eta P_{\mathrm{t}}} \tag{12}$$

因此，第π_k个波位的驻留中点时刻为

$$t_{\pi_k}^{\mathrm{mid}}=t_{\mathrm{s}}+\sum_{j=1}^{k-1}\frac{E_{\pi_j}}{\eta P_{\mathrm{t}}}+\frac{1}{2}\frac{E_{\pi_k}}{\eta P_{\mathrm{t}}} \tag{13}$$

天基雷达波位的实际照射时刻不仅由探测窗口起始时刻决定，还受到前序波位驻留时间的影响。由于驻留时间由波位能量决定，波位能量分配将进一步影响后续波位的照射时刻和观测几何状态。

天基雷达探测窗口时长可表示为

$$T_{\mathrm{det}}=\sum_{n=1}^{N}T_{\mathrm{d},n}=\frac{1}{\eta P_t}\sum_{n=1}^{N}E_n \tag{14}$$

其探测结束时刻为

$$t_{\mathrm{e}}=t_{\mathrm{s}}+T_{\mathrm{det}} \tag{15}$$

在单波束串行驻留工作模式下，天基雷达主动辐射仅发生于各波位驻留期间，天基雷达探测窗口时长由各波位驻留时间累加而成。其中，T_{det}与总辐射能量成正比，因此，天基雷达探测窗口时长最小化等价于总辐射能量最小化。

为保证区域搜索任务在可见窗口内完成，天基雷达探测窗口需满足如下约束：

$$t_{\mathrm{s}}\geq t_{\mathrm{vis}}^{\mathrm{s}},t_{\mathrm{e}}\leq t_{\mathrm{vis}}^{\mathrm{e}} \tag{16}$$

2.4 天基雷达时变检测模型

天基雷达对第n个波位在时刻t对应的斜距为

$$R_n(t)=||\boldsymbol{q}_n-\boldsymbol{s}(t)||_2 \tag{17}$$

由于天基雷达沿近地轨道高速运动，在区域搜索过程中$R_n(t)$随时间变化，从而导致各波位链路增益具有明显时变特征。

令A_{e}表示天基雷达接收天线有效孔径；G_{t}和G_{r}分别表示发射和接收天线增益；σ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；L_{s}表示等效系统损耗。由雷达方程可得第n个波位在时刻t的信噪比为[33]

$$\mathrm{SNR}_n(t,E_n)=\frac{G_{\mathrm{t}}G_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{e}}\sigma}{4\pi k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{e}}L_{\mathrm{s}}R_n^4(t)}\cdot E_n\triangleq\gamma_n(t)E_n \tag{18}$$

其中，$\gamma_n(t)$表示第n个波位的几何链路系数，定义为

$$\gamma_n(t)=\frac{G_{\mathrm{t}}G_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{e}}\sigma}{4\pi k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{e}}L_{\mathrm{s}}R_n^4(t)}=\frac{\mathrm{C}_0}{R_n^4(t)} \tag{19}$$

其中，C_0为由天基雷达参数和目标散射特性共同决定的常数。在给定雷达参数和目标散射特性的条件下，$\gamma_n(t)$主要由天基雷达与各波位之间的斜距决定。

设虚警概率为P_{fa}，在恒虚警率(CFAR)检测下，令$A=-\ln P_{\mathrm{fa}}$，可推导得到第n个波位单次扫描检测概率表达式：

$$P_{\mathrm{d},n}\left(t,E_n\right)=\exp\left(-\frac{A}{1+\gamma_n(t)E_n}\right) \tag{20}$$

在此基础上，第π_k个波位的检测概率可表示为

$$P_{d,\pi_k}=P_{\mathrm{d},\pi_k}\left(t_{\pi_k}^{\mathrm{mid}},E_{\pi_k}\right) \tag{21}$$

式(21)表明，天基雷达的波位能量分配不仅直接决定该波位的信噪比和检测概率，还通过驻留时间影响后续波位的照射时刻，进而改变其几何链路系数。因此，探测窗口起始时刻、波位能量分配、串行驻留时序和时变观测几何之间存在耦合关系。

3　面向射频隐身的天基雷达区域搜索探测窗口与波位能量联合优化算法

3.1　区域加权检测概率指标

为表征天基雷达区域搜索性能，本文将各波位检测概率按照先验威胁权重融合，定义区域加权检测概率。设波位能量向量为

$$\boldsymbol{E}=\left[E_1E_2\cdots E_N\right]^{\mathrm{T}} \tag{22}$$

在给定探测窗口起始时刻和执行序列的条件下，天基雷达的区域加权检测概率定义为

$$\bar{P}_{\mathrm{d}}\left(t_{\mathrm{s}},\boldsymbol{E}\right)=\sum_{k=1}^{N}p_{\pi_k}P_{\mathrm{d},\pi_k}\left(E_{\pi_k},t_{\pi_k}^{\mathrm{mid}}\right) \tag{23}$$

将单波位检测概率表达式代入，可得

$$\bar{P}_{\mathrm{d}}\left(t_{\mathrm{s}},\boldsymbol{E}\right)=\sum_{k=1}^{N}p_{\pi_k}\exp\left(-\frac{A}{1+\gamma_{\pi_k}(t_{\pi_k}^{\mathrm{mid}})E_{\pi_k}}\right) \tag{24}$$

上述天基雷达区域加权检测概率将作为后续探测窗口与波位能量联合优化模型中的任务性能约束条件。

3.2　优化模型建立

本文以天基雷达的探测窗口起始时刻和波位能量分配向量为联合优化变量，在满足区域搜索检测性能要求和可见窗口约束的条件下，最小化天基雷达总辐射能量。为保证区域搜索任务在可见窗口内完成，天基雷达探测窗口需满足：

$$t_{\mathrm{s}}\geq t_{\mathrm{vis}}^{\mathrm{s}} \tag{25}$$

$$t_{\mathrm{s}}+\sum_{n=1}^{N}\frac{E_n}{\eta P_{\mathrm{t}}}\leq t_{\mathrm{vis}}^{\mathrm{e}} \tag{26}$$

为保证区域搜索探测性能，区域加权检测概率应不低于预设门限$P_{\mathrm{d}}^{\mathrm{tar}}$，即

$$\bar{P}_{\mathrm{d}}\left(t_{\mathrm{s}},\boldsymbol{E}\right)\geq P_{\mathrm{d}}^{\mathrm{tar}} \tag{27}$$

同时，受载荷功率孔径积、最短驻留时间、最大驻留时间和单波位射频暴露约束影响，天基雷达单波位能量上/下界约束为

$$E_{\min}\leq E_n\leq E_{\max},n=1,2,\cdots,N \tag{28}$$

在上述约束条件下，建立面向射频隐身的天基雷达区域搜索探测窗口与波位能量联合优化模型为

$$\begin{aligned}&\min_{t_{\mathrm{s}},\boldsymbol{E}}J(\boldsymbol{E})=\sum_{n=1}^{N}E_n\\&\text{s.t.}\begin{cases}\bar{P}_{\mathrm{d}}\left(t_{\mathrm{s}},\boldsymbol{E}\right)\geq P_{\mathrm{d}}^{\mathrm{tar}},\\E_{\min}\leq E_n\leq E_{\max},n=1,2,\cdots,N\\t_{\mathrm{s}}\geq t_{\mathrm{vis}}^{\mathrm{s}},\\t_{\mathrm{s}}+\sum\limits_{n=1}^{N}\frac{E_n}{\eta P_{\mathrm{t}}}\leq t_{\mathrm{vis}}^{\mathrm{e}}\end{cases}\end{aligned} \tag{29}$$

式(29)的连续优化变量包括探测窗口起始时刻t_{s}和波位能量分配向量$\boldsymbol{E}$。由于天基雷达的波位照射时刻$t_{\pi_k}^{\mathrm{mid}}$由探测窗口起始时刻t_{s}和前序波位能量共同决定，而几何链路系数$\gamma_{\pi_k}(t_{\pi_k}^{\mathrm{mid}})$随时间变化，因此式(29)为具有时序耦合特征的非线性优化问题。

在发射功率和占空比固定条件下，天基雷达的实际探测窗口时长可表示为

$$W_{\mathrm{det}}=t_{\mathrm{e}}-t_{\mathrm{s}}=\sum_{n=1}^{N}\frac{E_n}{\eta P_{\mathrm{t}}} \tag{30}$$

因此，最小化天基雷达总辐射能量可相应压缩其实际探测窗口时长，减少射频暴露时间。

3.3　优化模型求解

针对式(29)中天基雷达探测窗口、波位能量分配与时变几何链路之间的耦合关系，本文构建天基雷达探测窗口与波位能量双层联合求解框架。该框架包括外层探测窗口起始时刻优化和内层波位能量迭代优化：外层在可见窗口内构造候选探测窗口起始时刻，并以内层返回的最小总辐射能量为评价准则确定探测窗口起始时刻；内层在给定探测窗口起始时刻下，递推更新天基雷达各波位的照射时刻和几何链路系数，并基于KKT条件求解约束能量分配，从而实现探测窗口与波位能量的联合优化。

3.3.1　KKT约束波位能量迭代优化

对于给定的探测窗口起始时刻t_{s}，天基雷达各

波位实际照射时刻由波位能量分配决定。由于波位能量决定驻留时间，而驻留时间累加又影响后续波位的照射时刻及对应几何链路系数，因此需对天基雷达波位能量、照射时刻和几何链路系数进行迭代求解。

在第r次迭代中，将各波位几何链路系数冻结为$\boldsymbol{\gamma}=[\gamma_1\ \gamma_2\ \cdots\ \gamma_N]^{\mathrm{T}}$，则天基雷达波位能量分配问题可写为

$$\min_{\boldsymbol{E}}\sum_{n=1}^{N}E_n \quad \text{s.t.}\begin{cases}\sum_{n=1}^{N}\mathrm{p}_n\exp\left(-\dfrac{A}{1+\gamma_nE_n}\right)\geq P_{\mathrm{d}}^{\mathrm{tar}}\\ E_{\min}\leq E_n\leq E_{\max},n=1,2,\cdots,N\end{cases}\tag{31}$$

进一步地，求解固定几何链路系数条件下的内层波位能量优化问题。构造式(31)所示的拉格朗日函数：

$$\mathcal{L}=\sum_{n=1}^{N}E_n+\lambda\left[P_{\mathrm{d}}^{\mathrm{tar}}-\sum_{n=1}^{N}\mathrm{p}_n\boldsymbol{exp}\left(-\frac{A}{1+\gamma_nE_n}\right)\right]+\sum_{n=1}^{N}\alpha_n(E_{\min}-E_n)+\sum_{\mathrm{n}=1}^{N}\beta_n(E_n-E_{\max})\tag{32}$$

其中，$\lambda\geq0$表示区域加权检测概率约束对应的拉格朗日乘子，$\alpha_n\geq0$和$\beta_n\geq0$分别表示单波位能量下界和上界约束对应的拉格朗日乘子。根据KKT平稳性条件[35]，则有

$$1=\lambda p_n\frac{A\gamma_n}{(1+\gamma_nE_n)^2}\exp\left(-\frac{A}{1+\gamma_nE_n}\right)+\alpha_n-\beta_n\tag{33}$$

对于未触及能量上/下界的波位，有$\alpha_n=0$，$\beta_n=0$。令

$$g_n(E_n)=p_n\frac{A\gamma_n}{(1+\gamma_nE_n)^2}\exp\left(-\frac{A}{1+\gamma_nE_n}\right)\tag{34}$$

表示第n个波位的加权边际检测收益函数。基于KKT条件，可获得满足约束的波位能量分配解为[33]

$$E_n^{(r)}(\lambda)=\begin{cases}E_{\max}, & g_n(E_{\max})>\lambda^{-1},\\ g_n^{-1}(\lambda^{-1}), & g_{\mathrm{n}}(E_{\min})\geq\lambda^{-1}\geq g_n(E_{\max})\\ E_{\boldsymbol{min}}, & g_{\mathrm{n}}(E_{\boldsymbol{min}})<\lambda^{-1}\end{cases}\tag{35}$$

由此可得，当前迭代下的天基雷达波位能量分配结果为：

$$\boldsymbol{E}^{(r)}=\left[E_1^{(r)}\ E_2^{(r)}\cdots E_N^{(r)}\right]^{\mathrm{T}}\tag{36}$$

在获得当前能量分配结果后，根据天基雷达发射功率和占空比更新各波位驻留时间$t_{\pi_k}^{\mathrm{mid}}$。随后，根据串行驻留时序，更新各波位驻留中点时刻：

$$\left(t_{\pi_k}^{\mathrm{mid}}\right)^{(r+1)}=t_{\mathrm{s}}+\sum_{j=1}^{k-1}\frac{E_{\pi_j}^{(r)}}{\eta P_{\mathrm{t}}}+\frac{E_{\pi_k}^{(r)}}{2\eta P_{\mathrm{t}}}\tag{37}$$

根据天基雷达轨道与几何链路模型，在更新后的照射中点时刻重新计算各波位几何链路系数，即

$$\gamma_{\pi_k}^{(r+1)}=\gamma_{\pi_k}\left[\left(t_{\pi_k}^{\mathrm{mid}}\right)^{(r+1)}\right],k=1,2,\cdots,N\tag{38}$$

将更新后的几何链路系数作为下一次迭代的输入参数，重复执行KKT约束下的波位能量求解过程。

为判断天基雷达波位能量分配的迭代求解是否收敛，定义相邻两次能量分配结果的相对变化量为

$$\delta^{(r)}=\frac{||\boldsymbol{E}^{(\mathrm{r})}-\boldsymbol{E}^{(\mathrm{r\text{-}1})}||_1}{\max(||\boldsymbol{E}^{(\mathrm{r\text{-}1})}||_1,1)}\tag{39}$$

当$\delta^{(r)}\leq\varepsilon$或达到最大迭代次数$K_{\max}$时，内层迭代终止，得到给定探测窗口起始时刻$t_{\mathrm{s}}$下天基雷达的优化能量近似解$\boldsymbol{E}^*(t_{\mathrm{s}})$以及其对应的总辐射能量，即：

$$J^*(t_{\mathrm{s}})=\sum_{n=1}^{N}E_n^*(t_{\mathrm{s}})\tag{40}$$

3.3.2 探测窗口起始时刻优化与联合解确定

在内层KKT约束波位能量迭代优化的基础上，在天基雷达可见窗口$[t_{\mathrm{vis}}^{\mathrm{s}},t_{\mathrm{vis}}^{\mathrm{e}}]$内，按照间隔$\Delta t_{\mathrm{s}}$构造候选探测窗口起始时刻集合，记为$\{t_{\mathrm{s}}^{(1)},t_{\mathrm{s}}^{(2)},\cdots,t_{\mathrm{s}}^{(L)}\}$，其中$L$表示候选探测窗口起始时刻的总数。对于每个候选探测窗口起始时刻，执行内层KKT约束波位能量迭代优化，得到对应的能量分配结果和探测结束时刻：

$$t_{\mathrm{e}}^{(l)}=t_s^{(l)}+\sum_{n=1}^{N}\frac{E_n^*(t_s^{(l)})}{\eta P_{\mathrm{t}}}\tag{41}$$

在所有可行候选解中，选择总辐射能量最小的解作为最终的联合优化结果：

$$t_{\mathrm{s}}^*=\arg\min_{t_{\mathrm{s}}^{(l)}}J^*(t_{\mathrm{s}}^{(l)})\tag{42}$$

$$\boldsymbol{E}^*=\boldsymbol{E}^*(t_{\mathrm{s}}^*)\tag{43}$$

$$t_{\mathrm{e}}^*=t_s^*+\sum_{n=1}^{N}\frac{E_n^*(t_s^*)}{\eta P_{\mathrm{t}}}\tag{44}$$

$$T_{\mathrm{det}}^*=\sum_{n=1}^{N}\frac{E_n^*(t_s^*)}{\eta P_{\mathrm{t}}}\tag{45}$$

其中，t_{s}^*和t_e^*分别表示优化得到的天基雷达探测窗

口起始时刻和结束时刻；T_{det}^{*}表示优化得到的探测窗口；$\boldsymbol{E}^{*}$表示各波位能量分配结果。

3.4 算法流程

算法1给出了本文所提面向射频隐身的天基雷达区域搜索探测窗口与波位能量联合优化算法流程。

4 仿真结果及分析

为了验证所提算法的探测窗口和波位能量联合优化结果，仿真生成天基雷达区域搜索场景。天基雷达轨道采用经典轨道六根数描述，轨道历元设为2025-06-01 00:00:00 (UTCG)，六根数具体取值为：半长轴 6978.14 km、偏心率 0.02、轨道倾角 40°、升交点赤经 0.73°、近地点幅角 0.0°、真近点角 0.0°。仿真时间区间设为 2025-06-01 00:05:00 至 2025-06-01 00:12:00，采样间隔为 1 s。待搜索区域半径为 100 km，区域中心相对于星下点轨迹的最小地面距离为 400 km，对应区域最近通过时刻为$t_{\mathrm{r}}=178.5$ s。区域可见窗口的起止时刻分别为$t_{\mathrm{vis}}^{\mathrm{s}}=55.8$ s和 $t_{\mathrm{vis}}^{\mathrm{e}}=309.53$ s，则窗口中心时刻$t_{\mathrm{c}}=182.68$ s。仿真场景见图1。

搜索区域按照第2节建立的波位覆盖模型进行离散化，得到波位集合$\mathcal{B}$。目标先验威胁分布采用二维Beta 分布，以模拟区域内存在潜在威胁热点的场景。区域加权检测概率阈值取$P_{\mathrm{d}}^{\mathrm{tar}}=0.95$，虚警概率取$P_{\mathrm{fa}}=10^{-6}$，单波位最小能量阈值取$E_{\min}=1$ J，最大能量阈值取$E_{\max}=5000$ J。天基雷达发射功率取$P_{\mathrm{t}}=1$ kW，占空比固定为$\eta=0.25$，收敛阈值取$\varepsilon=10^{-3}$，内层最大迭代次数取$K_{\max}=30$，候选探测窗口起始时刻间隔取$\Delta t_{\mathrm{s}}=2$ s。其余仿真参数设置如表1所示。

图2给出了天基雷达区域搜索仿真场景下的目标先验威胁概率分布。图3给出了探测窗口起始时刻对天基雷达区域搜索任务所需辐射能量和探测窗口时长的影响。图3(a)表明，天基雷达完成区域搜索任务所需辐射能量随探测窗口起始时刻动态变化，总辐射能量最小时对应的起始时刻，即不同于最近通过时刻t_{r}，也不同于可见窗口中心时刻t_{c}。图3(b)表明不同探测窗口起始时刻对应的天基雷达探测窗口时长存在明显差异。当$t_{\mathrm{s}}=168.2$ s时，探测窗口达到最小值 18.47 s。相比于最近通过时刻$t_{\mathrm{r}}=178.5$ s或可见窗口中心时刻$t_{\mathrm{c}}=182.68$ s作为探

算法 1　面向射频隐身的天基雷达区域搜索探测窗口与波位能量联合优化算法

Alg. 1　RF stealth-oriented joint optimization algorithm of detection window and beam-position energy for space-based radar regional search

输入：区域可见窗口、波位集合及固定执行序列、先验威胁权重、轨道与几何链路模型、雷达系统参数、检测概率门限、单波位能量上/下界、候选起始时刻间隔、最大迭代次数、收敛阈值。

输出：探测窗口起始时刻、探测结束时刻、波位能量分配结果、区域加权检测概率、总辐射能量、探测窗口时长。

步骤1　根据区域可见窗口和候选起始时刻间隔，生成候选探测窗口起始时刻集合，并初始化；对每一个候选探测窗口起始时刻，按照固定执行序列初始化各波位照射时刻和几何链路系数；

步骤2　在当前几何链路系数下，构造满足检测概率门限和单波位能量上/下界约束的波位能量分配子问题；基于KKT条件求解当前子问题，得到该次迭代下的波位能量分配结果；

步骤3　根据当前波位能量分配结果更新各波位驻留时间，并按串行执行序列递推更新各波位实际照射时刻；

步骤4　根据更新后的照射时刻重新计算各波位几何链路系数，判断能量分配结果是否收敛；若未收敛，则返回步骤2继续迭代；若收敛，更新结果；

步骤5　输出探测窗口起始时刻、探测结束时刻、波位能量分配结果、区域加权检测概率、总辐射能量和探测窗口时长；

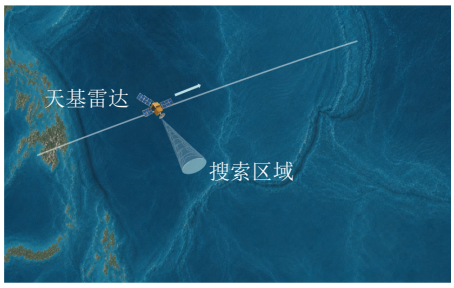


图 1 天基雷达区域搜索几何关系示意图

Fig. 1 Geometry of space-based radar regional search

表 1　天基雷达仿真参数设置

Tab. 1　Simulation parameters of the space-based radar

参数	数值	参数	数值
G_{t}	46 dB	L_{s}	3 dB
λ	0.03 m	k_{B}	1.38×10^{-23} J/K
T_{e}	290 K	σ	1 m^2
A_{e}	4 m^2	P_{fa}	1e − 6

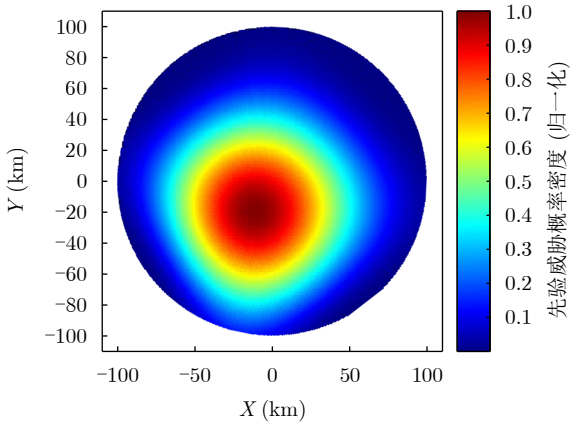
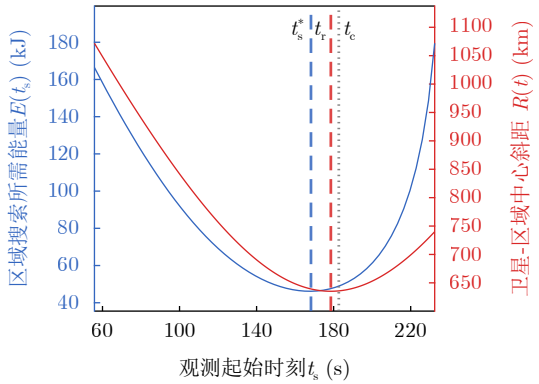
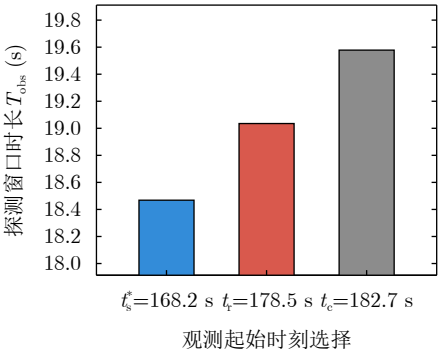


图 2 先验威胁分布示意图

Fig. 2 Prior threat distribution of the search region



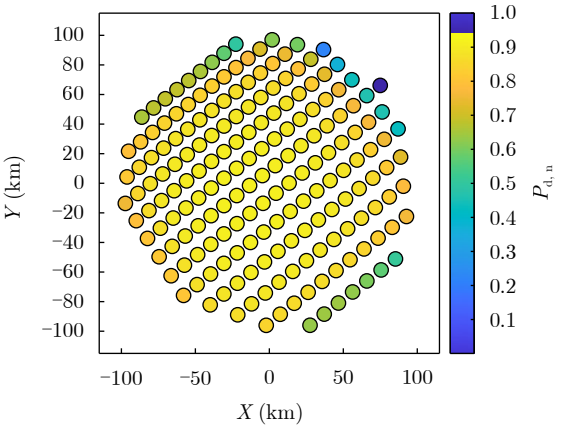
(a) 天基雷达与搜索区域斜距及所需辐射能量随时间变化曲线
(a) Time-varying range between the space-based radar and the search region and required radiated energy



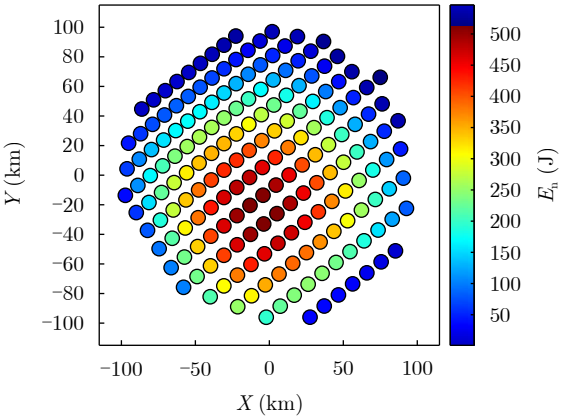
(b) 探测窗口时长随起始时刻的变化曲线
(b) Detection window duration versus the start time

图 3 探测窗口起始时刻对所需辐射能量与探测窗口时长的影响

Fig. 3 Impact of detection-window initiation time on the required radiated energy and detection window duration



(a) 波位检测概率
(a) Beam-position detection probability



(b) 波位能量分配结果
(b) Beam-position energy allocation results

图 4 优化探测窗口起始时刻下的波位检测概率与能量分配结果

Fig. 4 Beam-position detection probability and energy allocation results at the optimized detection start time

测窗口起始时刻，所提方法获得的探测窗口起始时刻能够降低所需总辐射能量，进而压缩天基雷达射频暴露时间。

图4给出了所提算法在优化探测窗口起始时刻下，天基雷达的波位检测概率和波位能量分配结果。由图4(a)和图4(b)可见，天基雷达的波位检测概率和能量分配均呈现明显的空间非均匀性。先验威胁权重较高且几何链路条件较优的波位获得更多辐射能量，有效提升了天基雷达的辐射资源利用效率。

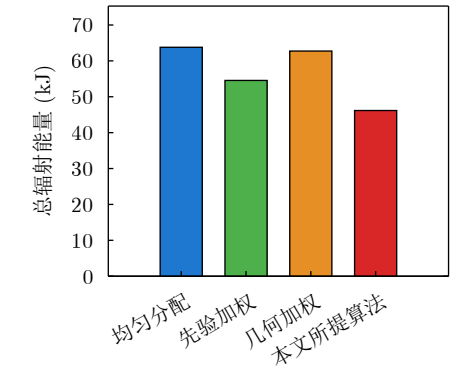
上述仿真结果验证了探测窗口起始时刻优化对减少射频暴露时间的有效性。进一步地，本文将3种基线策略嵌入与所提方法一致的探测窗口起始时刻搜索框架中进行对比。其中，均匀资源分配基线在给定总能量约束下对各波位平均分配能量；先验加权分配基线按波位先验威胁权重分配总能量；几何加权分配基线按起始时刻几何链路系数倒数为权重分配能量，以对几何链路较差波位进行补偿。

图5(a)对比了不同方法在分别优化探测窗口起始时刻后，满足预设区域加权检测概率门限天基雷达所需的最小总辐射能量；图5(b)对比了在本文算法所得最优能量预算下，各方法在分别优化探测窗口起始时刻后可实现的最大区域加权检测概率。对比结果表明，所提算法所需总辐射能量最低；在相同能量预算下，所提算法能够获得最高的区域检测性能。

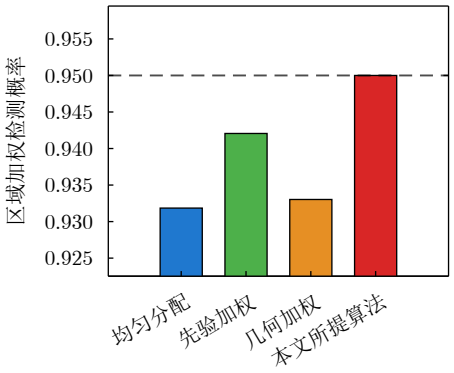
表2汇总了不同方法下天基雷达的探测窗口起始时刻、探测窗口时长、总辐射能量和能量节约比。其中，能量节约比表示该基线方法的总辐射能量与本文所提算法总辐射能量之差占该基线方法总辐射能量的百分比。对比结果表明，所提算法能够获得最低的总辐射能量，有效提升了天基雷达的射频隐身效能。

5 结 语

本文针对天基雷达区域搜索场景下时序耦合带来的射频隐身能量管控难题，提出了面向射频隐身的探测窗口与波位能量联合优化算法。该算法将搜



(a) 相同检测概率下不同算法所需能量
(a) Required energy of different algorithms for the same detection probability



(b) 相同能量下不同算法实现检测概率
(b) Achieved detection probability of different algorithms under the same energy budget

图 5 不同算法能量消耗与检测性能对比

Fig. 5 Comparison of energy consumption and detection performance under different algorithms

表 2　不同策略下的能量消耗与探测窗口对比

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

算法策略	窗口起始时刻/s	窗口时长/s	总辐射能量/(kJ)	能量节约比
均匀资源分配基线	171.44	25.52	63.79	27.62%
先验加权分配基线	161.80	21.82	54.55	15.36%
几何加权分配基线	171.44	25.10	62.74	26.41%
本文所提算法	168.23	18.47	46.17	-

索区域离散为波位集合，结合天基雷达轨道运动特性和波位串行驻留时序，推导了区域加权检测概率指标。在此基础上，以最小化天基雷达总辐射能量为优化目标，以区域加权检测概率阈值、单波位能量上/下界和区域可见窗口要求为约束条件，构建了探测窗口与波位能量联合优化模型。针对该时序耦合的非线性优化问题，设计了双层联合求解框架。仿真结果表明，所提算法能够有效减少天基雷达在执行区域搜索任务中的总辐射能量，提升了天基雷达的射频隐身效能。然而，天基雷达高速运动可能引起波位编排和波位覆盖关系的动态变化，进而影响区域搜索性能。后续研究将进一步引入波位动态重构与在线波位编排机制，以完善高速运动平台条件下基于区域搜索的天基雷达射频隐身资源优化方法。

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.
BEN De and LIN Youquan. Space-based surveillance radar[J]. *Modern Radar*, 2005, 27(4): 1–4. doi: 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.
BEN De and LONG Weijun. 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.

[3] 贲德, 王海涛. 天基监视雷达新技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 1–34.
BEN De and WANG Haitao. Space-Based Surveillance Radar Technologies [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 1–34.

[4] 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.
YI Wei, YUAN Ye, LIU Guanghong,*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.

[5] 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.

[6] YAN Junkun, PU Wenqiang, ZHOU Shenghua, *et al*. Optimal resource allocation for asynchronous multiple targets tracking in heterogeneous radar networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 4055–4068. doi: 10.1109/TSP.2020.3007313.

[7] DING Lintao, LONG Fei, SHI Chenguang, *et al*. LPI-Based Robust Node Selection and Power Allocation Scheme for Multiple Targets Tracking in Colocated MIMO Radar

Network[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, 61(4): 10394–10409. doi: 10.1109/TAES.2025.3560607.

[8] 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.

[9] 宋晓程, 李陟, 任海伟, 等. 目标动态威胁度驱动的分布式组网相控阵雷达资源优化分配算法[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 629–641. doi: 10.12000/JR22240.
SONG Xiaocheng, LI Zhi, REN Haiwei, *et al*. Threat-driven resource allocation algorithm for distributed netted phased array radars[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 629–641. doi: 10.12000/JR22240.

[10] 张鹏, 严俊坤, 高畅, 等. 动态电磁环境下多功能雷达一体化发射资源管理方案[J]. 雷达学报(中英文), 2025, 14(2): 456–469. doi: 10.12000/JR24230.
ZHANG Peng, YAN Junkun, GAO Chang, *et al*. Integrated transmission resource management scheme for multifunctional radars in dynamic electromagnetic environments[J]. *Journal of Radars*, 2025, 14(2): 456–469. doi: 10.12000/JR24230.

[11] 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.
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.

[12] 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*, 2022, 16(3): 4198–4209. doi: 10.1109/JSYST.2021.3116020.

[13] SHI Chenguang, DING Lintao, WANG Fei, *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.

[14] 焦浩, 严俊坤, 郝佳, 等. 面向多机动目标的资源分配与精细化跟踪算法[J]. 雷达学报(中英文), 2026, 15(1): 292–306. doi: 10.12000/JR25037.
JIAO Hao, YAN Junkun, HAO Jia, *et al*. Resource allocation and precise tracking algorithm for multiple maneuvering targets[J]. *Journal of Radars*, 2026, 15(1): 292–306. doi: 10.12000/JR25037.

[15] YAN Junkun, PU Wenqiang, LIU 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.

[16] 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(中英文), 2024, 13(3): 565–583. doi: 10.12000/JR23081.
SHI Chenguang, TANG Zhicheng, ZHOU Jianjiang, *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.

[17] XU Haicheng, SUN Jun, YUAN Ye, *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.

[18] 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.

[19] 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(中英文), 2024, 13(1): 253–269. doi: 10.12000/JR23162.
WANG Zengfu, YANG Guangyu, and JIN Shuling. 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. doi: 10.12000/JR23162.

[20] 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.
PAN Yue and GUO Jiguang. 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.

[21] 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.
LIU Chao and WANG Yueji. Review of multi-target tracking technology for marine radar[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(1): 100–115. doi: 10.12000/JR20081.

[22] CHEN Jiangyuan, HUANG Penghui, XI Peili, *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.

[23] CHEN Jiangyuan, HUANG Penghui, XIA Xianggen, *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.

[24] 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.
ZHENG Shuyu, YANG Qingwei, JIANG Libing, *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.

[25] 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.
YANG Di, LI Zhenyu, GUO Shuai, *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.

[26] 廖骥, 楼宇涛, 张栩琪, 等. 面向多目标跟踪的卫星系统任务自主规划方法[J]. 上海航天(中英文), 2025, 42(5): 75–81,111. doi: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2025.05.009.
LIAO Ji, LOU Yutao, ZHANG Xuqi, *et al*. Autonomous mission planning method for satellite systems orienting to multi-target tracking[J]. *Aerospace Shanghai* (*Chinese & English*), 2025, 42(5): 75–81,111. doi: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2025.05.009.

[27] 高飞,吴疆,马俊,等. 天基分布式雷达海面目标跟踪应用总体技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(8): 2667–2675. doi: 10.12305/j.issn.1001-506X.2024.08.14.
GAO Fei, WU Jiang, MA Jun, *et al*. Research on the overall technology of space-based distributed radar sea surface target tracking application[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2024, 46(8): 2667–2675. doi: 10.12305/j.issn.1001-506X.2024.08.14.

[28] 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.
WANG Yang. 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.

[29] 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.
CHEN Jianping, LIU Zhizhong, and YOU Lizhi. 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.

[30] KOSURU R, ZHEN Qu, ZHEN Ding, *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.

[31] 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.
LIU Yanchi, JIANG Tao, LIN Youquan, *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.

[32] CHEN Guanren, LIU Wei, QIU Feng, *et al*. Task scheduling of radar constellation for continuous area monitoring[C]. IET International Radar Conference (IRC 2023), Chongqing, China, 2023: 3794–3800. doi: 10.1049/icp.2024.1716.

[33] 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/OL]. 雷达学报(中英文), (2026-06-01) [2026-06-01].https://link.cnki.net/urlid/10.1030.TN.20260529.1721.002.
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/OL]. *Journal of Radars*, (2026-06-01) [2026-06-01].https://link.cnki.net/urlid/10.1030.TN.20260529.1721.002.

[34] 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 Chenguang, ZHOU Jianjiang, WANG Fei, *et al*. Radio Frequency Stealth Technology for Airborne Radar Network[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 1–23.

[35] 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，主要研究方向为雷达资源管理、强化学习、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：于青)