

北京航空航天大学学报
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics
ISSN 1001-5965,CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目：面向任务需求的反导预警雷达部署覆盖严密性评估方法
作者：牛闯，吕金建，尹康银，高婷，陆晨，韦旭
DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0475
收稿日期：2026-07-09
网络首发日期：2026-10-27
引用格式：牛闯，吕金建，尹康银，高婷，陆晨，韦旭．面向任务需求的反导预警雷达部署覆盖严密性评估方法[J/OL]．北京航空航天大学学报．https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0475



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

面向任务需求的反导预警雷达部署覆盖严密性评估方法

牛闯[1]，吕金建[1,✉]，尹康银[1]，高婷[1]，陆晨[1]，韦旭[2]

（1. 空军预警学院，武汉 430019；2. 93209 部队，北京 100085）
*通信作者 吕金建，E-mail： lvjj1979_radar@163.com

摘要 现有反导预警雷达部署研究多以优化站位为目标，缺乏对给定部署能否严密支撑探测任务链的可计算、可诊断评估。为此，提出一种面向任务需求的覆盖严密性评估与诊断方法。该方法由拦截需求反推搜索、跟踪、识别、精密跟踪四类任务的时空与精度门限，区分检测档与识别档，并从空间、时间、任务、交接、冗余五个维度刻画严密性。两级聚合中，先以非补偿的硬可行性条件判定部署是否严密，再以补偿性评分定位薄弱环节，最后以“评估—诊断—优化”闭环检验。仿真表明，覆盖质量与任务可行性相互解耦，补偿性评分高并不保证任务可行。原位增设雷达只抬高评分而不改变可行覆盖，瓶颈在于相邻雷达的交接未能成链。经诊断引导的站位优化以更少的雷达使交接成链，实现全向严密覆盖，站位几何因而较雷达数量更具主导作用。

关键词 反导预警雷达；覆盖严密性；任务需求；部署评估；薄弱环节诊断；预警时间预算
中图分类号 TN959.1 文献标志码 A DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0475

Task-requirement-driven assessment of coverage tightness for anti-missile early-warning radar deployment

NIU Chuang[1], LÜ Jinjian[1✉], YIN Kangyin[1], GAO Ting[1], LU Chen[1], WEI Xu[2]

（1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China；2. Unit 93209 of the PLA, Beijing 100085, China）
*LÜ Jinjian，E-mail: lvjj1979_radar@163.com

Abstract Existing studies on anti-missile early-warning radar deployment focus largely on optimizing station siting, yet offer no computable, diagnosable way to assess whether a given deployment can tightly sustain the detection task chain. This paper proposes a task-requirement-driven method for assessing and diagnosing coverage tightness. Working backward from the intercept requirements, the method derives the spatio-temporal and accuracy thresholds of the four detection tasks, namely search, tracking, identification and precision tracking. It distinguishes the shorter identification range from the detection range, and characterizes tightness along five dimensions: spatial, temporal, task, handover and redundancy. Aggregation proceeds in two stages. A non-compensatory hard feasibility condition first decides whether a deployment is tight; a compensatory score then locates the weakest link; an assess–diagnose–optimize closed loop finally verifies the result. Case studies show that coverage quality and task feasibility are decoupled, in that a high compensatory score does not guarantee task feasibility. Adding radars in place raises the score without changing the feasible coverage, because the handover between adjacent radars fails to form a chain. Diagnosis-guided siting optimization restores that chain with fewer radars and attains fully tight omnidirectional coverage, so station geometry matters more than radar count.
Key words anti-missile early-warning radar; coverage tightness; task requirements; deployment assessment; weak-link diagnosis; warning-time budget

弹道导弹具有飞行速度快、射程远、突防能力强等特点，从发射到命中往往仅以分钟计，对防御方的预警探测能力提出了苛刻要求[1,2]。防御方以多型雷达组网构成反导预警探测体系，在来袭目标的助推、中段与再入三阶段完成搜索（search, S）、跟踪（track, T）、识别（identification, I）与精密

收稿日期：2026-07-09
基金项目：国家自然科学基金项目（62231026）
Fund：National Natural Science Foundation of China (62231026)
网络首发时间：2026-10-27 14:48:59 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20261027.1144.003

跟踪（precision track, P，简称精跟）四类任务[3,4]。四类任务有先后关系，串接为一条探测任务链。任务链须按时按质为拦截提供目标信息。雷达部署能否在所有来袭方向与射程上稳定地贯通这条任务链，直接决定体系的作战效能[5,6]；而如何判断一个给定部署的覆盖是否严密、薄弱何在，正是部署评估必须回答的问题。

反导预警雷达的部署与协同已有大量研究，可大致归为三类。第一类以几何或能量覆盖最大化为目标求解雷达站位，所用方法涵盖混沌遗传算法[7,8]、粒子群及其改进算法[9,10]、烟花算法[11]与博弈论方法[12,13]；其中文献[9]面向复杂多方向威胁，从远程预警、跟踪识别、机动式三型雷达的任务特点出发，建立多型预警雷达优化部署模型。该模型在最优覆盖、协同交接与目标识别等约束下，以云自适应分区离散粒子群（cloud adaptive partition binary particle swarm optimization, CPBPSO）算法求解，并以弹道覆盖率、持续跟踪率、预警时间比率等指标评估所得部署。第二类关注组网协同中的资源调度与目标交接，包括兼顾跟踪精度与切换代价的目标分配[14]、多功能雷达组网的资源与探测调度[15,16]，以及组网雷达的无缝交接最优分配[17,18]；面向防空的雷达资源管理亦有系统综述[19]。第三类直接面向预警方案的评估与择优，包括以仿真设计若干探测方案、再用改进模糊层次分析法（fuzzy analytic hierarchy process, FAHP）综合打分优选[20]；或对预警作战方案做设计与智能推荐[21]；相关综述亦有涉及，文献[1]提出涵盖严密性、时效性、准确性与可靠性的能力需求框架。然而，上述工作大多以求解最优站位为目标，评估往往只是优化的附属步骤，仅以若干标量指标衡量覆盖效果；即便直接面向评估的方法，也多采用加权综合打分这类补偿型评价，各维度可相互弥补，难以暴露不可补偿的关键短板；相关综述虽已提出“严密性”等能力概念，却仍停留在定性层面，尚未给出可计算、可诊断的度量。可见，针对给定部署、面向四类探测任务，至今仍缺少系统化的严密性评估与薄弱环节诊断方法。具体而言，现有评价多未区分检测与识别的作用距离，较少将交接与冗余作为独立的覆盖维度，也未以拦截需求作为牵引。

鉴于此，本文提出一种面向任务需求的覆盖严密性评估与诊断方法，由交战时间线反推四类任务的时空与精度门限[22,23]，进而评估给定部署、诊断薄弱环节，并将部署优化纳入闭环以检验诊断结论。

本文的主要贡献概括如下。1）提出面向任务需求的覆盖严密性评估框架，建立涵盖四类任务、五个维度的严密性指标体系，把“严密性”的定性表述落实为可计算度量，并将交接与冗余增列为独立的覆盖维度。2）建立从拦截需求到四类探测任务时空与精度门限、再到部署约束的定量因果链，并以逐任务可执行性判据区分检测档与识别档，使“覆盖严密”获得面向任务的明确内涵。3）给出由硬可行性条件与补偿性评分构成的两级聚合方法，以及薄弱环节的诊断定位流程，可将其落实到具体的弹道、任务与维度，并给出相应的补强建议。4）将评估、诊断与优化构成闭环，以可行覆盖率为首要目标、辅以期望与最坏情形评分，用粒子群算法联合优化雷达站位与朝向，据此检验并印证诊断结论。

1 问题描述与系统建模

1.1 问题描述与建模框架

本文研究的覆盖严密性评估问题，是给定雷达部署 D、威胁场景 Θ 与拦截需求 $\mathcal{W}$，求严密性度量 $\boldsymbol{S}(D|\,\Theta,\mathcal{W})$ 与薄弱环节集合 $\Omega(D)$，以判定部署是否满足任务需求并定位薄弱环节。其中，$D=\{(\boldsymbol{s}_r,h_r,\boldsymbol{n}_r,\mathrm{type}_r,\mu_r)\}_{r\in\mathcal{R}}$ 为雷达集合 $\mathcal{R}$ 上的部署，单部雷达 r 由位置 $\boldsymbol{s}_r$、天线高 h_r、阵面法向 $\boldsymbol{n}_r$、型号 type_r 与工作模式 μ_r 刻画；$\Theta=(\mathcal{B},\pi)$ 为弹道族 $\mathcal{B}$ 与权重 π；$\mathcal{W}$ 为拦截层集合及其时间线与防御范围。四类任务（搜索 S、跟踪 T、识别 I、精跟 P）的时空与精度需求由拦截需求沿任务链 $S\rightarrow T\rightarrow I\rightarrow P$ 反推得到。

本文方法的总体思路如图 1 所示，由拦截需求沿任务链反推四类任务的时空与精度门限，对给定部署逐弹道、逐任务构建 5×4 严密性矩阵，经硬可行性条件（非补偿）与补偿性评分两级聚合得到弹道族级指标，再诊断定位最薄弱环节，进而以部署优化检验诊断结论，形成“评估—诊断—优化”

闭环。

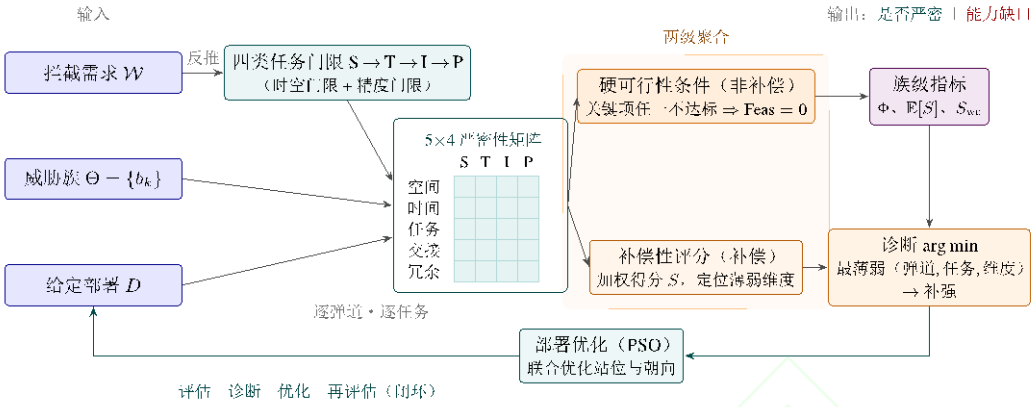


图 1　覆盖严密性评估方法总览（技术路线）

Fig.1 Overview of the proposed coverage-tightness assessment method

本文所称覆盖严密性，是雷达部署 D 在传感器层的一项覆盖属性，衡量在给定威胁与拦截需求下，搜索、跟踪、识别与精跟四类任务能否按时按质逐一贯通。D 由式中五参数刻画，不含拦截与指挥控制环节；拦截需求 $\mathcal{W}$ 以交战时间线与防御范围作外部输入，用于牵引各任务门限，杀伤能力与指挥决策不纳入评估。

本文建模基于以下假设：

H1（弹道确定性）：威胁由确定的代表弹道族 $\mathcal{B}=\{b_k\}_{k=1}^{K}$ 刻画，单条弹道状态由 1.2 节的威胁场景确定；弹道族的不确定性通过权重 π_k 与最坏情形体现。

H2（参数公开性）：各型雷达能力由公开代表性参数刻画，所有数值均为示例性，需配合敏感性分析使用。

H3（能力—模式）：每部雷达的可担任务由集合 $\mathcal{T}_r(\mu_r)$ 描述，同一时刻处于单一模式；多功能雷达的资源竞争在基准情形中不予建模，必要时可另加占用率约束刻画。

H4（探测环境）：以晴空、无干扰为基准，不计云雨衰减、雨杂波、有源干扰及诱饵/分导多弹头与机动突防。

H5（量测与融合）：量测误差近似零均值高斯、精度随信噪比（signal-to-noise ratio, SNR）标度；多雷达对同一目标的融合精度按 Fisher 信息相加，以 Cramér–Rao 下界（Cramér–Rao bound, CRLB）近似为可达下界。

H6（传感器范围）：仅考虑地基/海基雷达；天基红外预警若纳入，需另建异构融合维度。

1.2 威胁场景与目标运动建模

严密性是面向所有可能来袭方向与射程的属性，一个部署可能对主轴威胁覆盖充分，却在侧翼方向留有缺口。因此本文不取单条典型弹道，而以遍历威胁空域的弹道族 $\mathcal{B}=\{b_k\}_{k=1}^{K}$ 为评估对象，并对各弹道赋权 π_k，由加权统计与最坏情形共同表达威胁分布的不确定性。弹道族在方位上遍历威胁扇区、在射程上取远近两档，按助推、中段、再入三阶段仿真生成。基准弹道族仅含经典三阶段弹道，不含机动再入弹头（maneuvering reentry vehicle, MaRV）与高超声速滑翔体（hypersonic glide vehicle, HGV），这两类突防形式须重新生成弹道族并调整目标散射特性与检测门限，本文未予建模。

弹道以三种方式进入探测判据。一是高度剖面，目标须升至雷达地平线以上方可被照射，弹道越高则进入视线越早，中段可供高分辨成像的时长也越长。二是顶空几何，目标临近要地时俯仰角迅速增大，可能越出阵面俯仰上限而落入顶空盲锥。三是时间尺度，全程时长与降至可拦区的时刻共同框定任务链的可支配时间，射程越远，留给各任务的余量越宽。每条弹道 b_k 以步长 Δt 采样为离散时序 $\{t_{k,j}\}$，各采样点记录目标位置、速度与所处阶段；雷达散射截面（radar cross section, RCS）$\sigma_k(t)$ 随

阶段与姿态变化。位置决定目标能否落入雷达可视域与斜距远近，RCS 决定回波信噪比，二者是后续可执行性判据与质量判据的直接输入。

1.3 雷达类型与可担任务集

真实体系中专用雷达与多功能雷达并存，其分工源于频段在“作用距离—分辨率”之间的权衡。低频段（UHF/P/L）作用距离远而角分辨率粗，宜于搜索预警；高频段（X）作用距离近而角分辨率高，宜于识别与火控。识别须在同一距离分辨单元内区分弹头、末级与诱饵，依赖宽带成像。三类典型雷达如表 1 所示，其频段、平台与典型型号取自公开资料[3,4,24,25]。

表 1 雷达类型与可担任务集

Table 1 Radar types and their assignable task sets

类型	频段	平台	$\mathcal{T}_r$	典型型号
远程预警雷达	UHF/P、L	固定地基	$\{S,T\}$(粗跟踪)	PAVE PAWS/ FPS-132、Cobra Dane、BMEWS
精密跟踪识别雷达	X	固定/海基/前置	$\{T,I,P\}$	GBR/GBR-X、SBX、TPY-2（末段）
多功能相控阵雷达	S/C/X	海基/地基/机动	$\{S,T,I,P\}$	SPY-1/SPY-6、LRDR、TPY-2（多模）、LTAMDS[3,4,25]

每部雷达赋以可担任务集 $\mathcal{T}_r(\mu_r)\subseteq\{S,T,I,P\}$，工作模式 $\mu_r\in\mathcal{M}_r$ 且同一时刻唯一（例如 TPY-2 的前置模式 $\{S,T\}$ 与末段模式 $\{T,I,P\}$ 不可兼得）。如此，专用与多功能被统一为同一模型。专用雷达对应单一固定的 $\mathcal{T}_r$，多功能雷达对应可切换的模式族 $\mathcal{M}_r$。把任务集作为雷达的固有属性显式建模，便于后续分别评估四类任务，并体现识别比检测所需作用距离更短这一常被忽略的特性。

四类任务沿弹道飞行阶段的先后衔接及其与雷达频段（UHF/X）的对应关系如图 2 所示。



图 2 沿来袭弹道的探测任务链与频段分工

Fig.2 Detection task chain and frequency-band assignment along the incoming trajectory

若需严格刻画多功能雷达的资源竞争，可对每部雷达施加占用率约束 $\sum_{\tau}\eta_r^{\tau}\le 1$，其中 η_r^{τ} 为任务 τ 的占用率，可接入资源调度建模[14,15]。基准情形不计资源竞争，各任务按需执行。

1.4 单部雷达逐任务可执行性判据

可执行性指某部雷达在当前时刻能否执行某类任务的二值判定。一项任务被判为可执行，当且仅当能力/模式、几何、地平线、地形、检测五个条件同时满足，任一条件不达即判不可执行。五条件取逻辑与，即作非补偿判定而非加权打分，以防某一项充裕掩盖另一项的关键缺陷；例如目标信噪比虽足，却落在波束扇区之外。

以地心地固（earth-centered earth-fixed, ECEF）坐标系描述目标位置 $\boldsymbol{p}(t)$ 与雷达站位 $\boldsymbol{s}_r$，由二者得目标相对该雷达的斜距 R、方位 A 与俯仰 E，其中方位与俯仰取自雷达本地东北天（east-north-up, ENU）坐标系中的视线方向。

雷达 r 在 $(\boldsymbol{p},\sigma,t)$ 处对任务 τ 的可执行性定义为五因子之积，如式(1)所示：

$$\chi^{r,\tau}(\boldsymbol{p},\sigma,t)=\mathbf{1}[\tau\in\mathcal{T}_r(\mu_r)]\cdot\mathbf{1}_{\mathrm{geo}}\cdot\mathbf{1}_{\mathrm{hor}}\cdot\mathbf{1}_{\mathrm{mask}}\cdot\mathbf{1}_{\mathrm{det}}^{\tau}\in\{0,1\}\tag{1}$$

式中：$\mathbf{1}[\tau\in\mathcal{T}_r(\mu_r)]$ 为能力—模式因子，体现型号与任务的多对多关系，雷达不支持的任务恒为零；$\mathbf{1}_{\mathrm{geo}}$、$\mathbf{1}_{\mathrm{hor}}$、$\mathbf{1}_{\mathrm{mask}}$、$\mathbf{1}_{\mathrm{det}}^{\tau}$ 分别为几何、地平线、地形与检测指示函数，其定义如下。

几何因子要求目标同时落入方位扇区、俯仰范围与距离窗，如式(9)所示：

$$\mathbf{1}_{\text{geo}} = \mathbf{1}\left[\left| A - A_{r,0} \right| \le \Delta A_r \right] \cdot \mathbf{1}\left[E_{\min}^{r} \le E \le E_{\max}^{r} \right] \cdot \mathbf{1}\left[R_{\min}^{r} \le R \le R_{\max}^{r} \right] \tag{2}$$

地平线因子计入地球曲率与标准大气折射（等效地球半径 $a_{e'} = \frac{4}{3} a_e$），如式(10)所示：

$$\mathbf{1}_{\text{hor}} = \mathbf{1}\left[E \ge E_{\text{hor}} \right],\ d_{\text{hor}} \approx \sqrt{2 a_{e'} h_r} + \sqrt{2 a_{e'} h_t} \tag{3}$$

式中：$A_{r,0}$ 为由阵面法向 $\boldsymbol{n}_r$ 确定的方位可视扇区中心，ΔA_r 为方位可视半宽；$R_{\min}^{r}$ 为最小作用距离；$R_{\max}^{r}$ 为任务 τ 的最大作用距离，由式(8)给出；$E_{\min}^{r}$ 为最低俯仰角，形成低空盲区；$E_{\max}^{r}$ 为俯仰上限，形成顶空盲锥；d_{hor} 为地平线视距，h_r、h_t 分别为雷达天线高与目标高度，E_{hor} 为地平线对应的最低可视俯仰角。地形因子 $\mathbf{1}_{\text{mask}}$ 由视线与数字高程模型（digital elevation model, DEM）求交判定，无遮挡时 $\mathbf{1}_{\text{mask}} = 1$。

检测因子较前述几项更为复杂，区分检测档与识别档两级，由回波信噪比与可检测门限的比较确定；回波信噪比由雷达方程给出，如式(4)所示：

$$\text{SNR}(R,\sigma) = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k_{\text{B}} T_0 B F_{\text{n}} L} \tag{4}$$

式中：P_t 为峰值功率；G 为天线增益；λ 为波长；σ 为目标 RCS；R 为斜距；k_{B} 为玻尔兹曼常数；T_0 为参考噪声温度；B 为接收机噪声带宽；F_{n} 为噪声系数；L 为系统综合损耗。式(4)给出单脉冲信噪比 SNR；N_τ（任务 τ 的积累脉冲数）个脉冲非相参积累后的信噪比记为 $\text{SNR}_{\text{int}} = N_\tau \text{SNR}$，其积累增益在检测中由可检测因子 $D_x^\tau(N_\tau)$ 体现，在精度与识别中则直接以 SNR_{int} 衡量。慢起伏（Swerling Ⅰ）目标的单脉冲检测概率（虚警率 $P_{\text{fa}} = \text{e}^{-V_{\text{T}}}$，$V_{\text{T}}$ 为归一化检测门限）如式(5)所示：

$$P_d = P_{\text{fa}}^{1/(1+\text{SNR})} \tag{5}$$

式(5)仅对单脉冲成立，不可将积累信噪比直接代入。当 N_τ 个脉冲非相参积累时，检测概率须由 Marcum/Swerling 积分确定，并以 Shnidman 公式反解达到给定 $(P_d^{\text{req},\tau}, P_{\text{fa}})$ 所需的可检测因子 $D_x^\tau = D_x\left(P_d^{\text{req},\tau}, P_{\text{fa}}, N_\tau, \text{Sw}\right)$，非起伏目标则可改用 Albersheim 近似[26,27]。目标起伏模型按雷达频段确定。窄带预警雷达（UHF/L）带宽有限，难以靠脉间跳频实现去相关，因而取慢起伏 Swerling Ⅰ；宽带频率捷变雷达（X）脉间去相关，取快起伏 Swerling Ⅱ。回波信噪比不低于可检测因子即判为可检测，如式(6)所示：

$$\mathbf{1}_{\text{det}}^{\tau} = \mathbf{1}\left[\text{SNR}(R,\sigma) \ge D_x^\tau \right] \tag{6}$$

识别与精跟在“被检测”之上另有更高的信噪比要求。宽带高分辨距离像（high-resolution range profile, HRRP）成像将目标回波能量摊布到沿视线的 N_{rc} 个距离单元（$N_{\text{rc}} \approx$ 目标长度/距离分辨率），须各单元均具足够信噪比方能提取距离像特征以判性；火控级精跟亦需更高信噪比以保证测量精度。因此识别/精跟的可检测因子在检测之上提高一判别裕量 κ，如式(14)所示：

$$D_x^I = D_x^P = \kappa D_x\left(P_d^{\text{req}}, P_{\text{fa}}, N, \text{Sw}\right) \tag{7}$$

其中 $\kappa \approx 5$（约 7dB）与公开测算（识别所需信噪比约为检测的 5 倍）一致[28]。由式(4)、式(6)、式(7)可得任务相关的最大作用距离，如式(8)所示：

$$R_{\max}^{r,\tau}(\sigma) = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 B F_{\text{n}} L \cdot \text{SNR}_\tau^{\text{th}}} \right]^{1/4} \tag{8}$$

式中：$\text{SNR}_\tau^{\text{th}} = D_x^\tau$ 为任务 τ 的信噪比门限（即可检测因子；检测/跟踪为 P_d^{req} 反解值，识别/精跟再乘判别裕量 κ）。由 $\kappa \approx 5$ 得识别档作用距离约为检测档的 $\kappa^{-1/4} \approx 1/1.5$，即 $R_{\max}^{r,I} \approx R_{\max}^{r,S}/1.5$。文献[28]对真实 AN/TPY-2 雷达的公开测算亦呈此比值，检测档约 870km、识别档约 580km；其与本文示例雷

达的绝对作用距离因功率孔径不同而有差异，但两档约 1.5 的比值与功率孔径无关。

识别档作用距离显著短于检测档，是后文据此约束站位几何等结论的物理前提，也是将四类任务分别建模的必要性所在。以本文示例雷达为例，UHF 与 X 波段检测档、X 波段识别档作用距离随目标 RCS 的变化如图 3 所示。

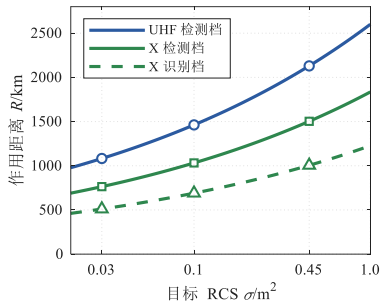


图 3 目标 RCS 对两波段作用距离的影响

Fig.3 Effect of target RCS on the radar range of the two bands

1.5 量测精度与任务质量

可执行性只判定能否完成任务，尚不足以保证完成质量。仅有几何照射，未必能支撑跟踪起批、识别判性或火控级精跟；若不计精度，则会系统性高估部署的真实能力。为此，对每类任务 τ 定义质量标量 $q_k^{\tau}(t)$ 并设定相应门限。

单部雷达的距离、角度量测精度均随信噪比的提高而改善，如式(9)所示：

$$\sigma_R=\frac{c}{2B_{\mathrm{res}}\sqrt{2\mathrm{SNR}_{\mathrm{int}}}},\ \sigma_{\mathrm{az}}=\frac{\theta_{az,3\mathrm{dB}}}{k_m\sqrt{2\mathrm{SNR}_{\mathrm{int}}}} \tag{9}$$

式中：σ_R、σ_{az} 分别为距离、方位精度；c 为光速；B_{res} 为接收带宽，不同于式(4)的接收机噪声带宽 B；k_{m} 为单脉冲测角斜率；$\theta_{\mathrm{az,3dB}}$ 为方位 3dB 波束宽度；T_d 为驻留时间。横向（切向）误差约为 $R\cdot\sigma_{\mathrm{angle}}$（$\sigma_{\mathrm{angle}}$ 泛指角量测精度），随距离线性增大；因此低频宽波束的远程雷达精度较差，而 X 波段近程雷达精度较高。多雷达对同一目标的融合精度以 Cramér–Rao 下界[29]近似。先将单雷达球坐标协方差 $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{meas},r}=\mathrm{diag}(\sigma_R^2,\sigma_{\mathrm{az}}^2,\sigma_{\mathrm{el}}^2)$ 经球坐标到直角坐标的雅可比 $\boldsymbol{J}_r$ 变换至直角系，如式(10)所示：

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{cart},r}=\boldsymbol{J}_r\,\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{meas},r}\,\boldsymbol{J}_r^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{cart},r}$ 为直角坐标系下的单雷达量测协方差；$\boldsymbol{J}_r$ 为球坐标到直角坐标的雅可比矩阵；σ_{el} 为俯仰角量测精度（类比式(9)的 σ_{az}）。

再按 Fisher 信息相加，得融合位置协方差，如式(11)所示：

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{fused}}=\left(\sum_{r\in\mathcal{R}}\chi^{r,\tau}\,\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{cart},r}^{-1}\right)^{-1} \tag{11}$$

由式(11)可得跟踪/精跟质量，如式(12)所示：

$$q_k^{T}=\sqrt{\mathrm{tr}\,\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{fused,pos}}} \tag{12}$$

式中：q_k^T 为跟踪质量，即位置均方根误差（root mean square error, RMSE）下界。跟踪门限取 $q_k^T\le\varepsilon_T$；精跟质量 q_k^P 取同一位置 RMSE 下界，门限收紧至火控级 $q_k^P\le\varepsilon_{\mathrm{fc}}$（$\varepsilon_{\mathrm{fc}}\ll\varepsilon_T$）。实际采用的扩展/无迹卡尔曼滤波（extended/unscented Kalman filter, EKF/ UKF）的稳态精度还取决于数据率 f_{up} 与机动/过程噪声 $\boldsymbol{Q}$，式(11)给出的是可达下界；以该下界评估严密性偏乐观。

识别质量取决于距离分辨率、积累信噪比与驻留时间三者[30,31]。距离分辨率 $\Delta R=c/(2B)$ 须细于散射点沿视线的间隔 Δs，即 $\Delta R\le\Delta s$，方能在距离像上分辨弹头结构；积累信噪比须达到识别门限 $\mathrm{SNR}_{\mathrm{int}}\ge\mathrm{SNR}_{\mathrm{disc}}^{\mathrm{th}}$，以保证各距离单元的特征可被提取；驻留时间则须足够长（$T_d\ge T_{\mathrm{disc}}$），不短于一

个微动周期，或能提供足以获取横向分辨 $\sim \lambda/(2\Delta\theta)$ 的视角变化 $\Delta\theta$。三者同时满足，方判为可行。由此，识别概率与可行指示分别如式(13)、式(14)所示：

$$q_k^I = P_{\text{disc}}(\text{SNR}_{\text{int}}, T_d, B) \tag{13}$$

$$\mathbf{1}_{\text{disc}} = \mathbf{1}[\Delta R \le \Delta s]\cdot\mathbf{1}[\text{SNR}_{\text{int}} \ge \text{SNR}_{\text{disc}}^{\text{th}}]\cdot\mathbf{1}[T_d \ge T_{\text{disc}}] \tag{14}$$

式中：q_k^I 为识别质量（即识别概率）；T_d 为驻留时间；$\text{SNR}_{\text{disc}}^{\text{th}}$ 为识别成像所需的门限，与积累信噪比 SNR_{int} 比较，不同于式(8)的 $\text{SNR}_\tau^{\text{th}}$，后者与单脉冲信噪比比较；$P_{\text{disc}}(\cdot)$ 为由积累信噪比、驻留时间与信号带宽决定的识别概率函数；$\mathbf{1}_{\text{disc}}$ 为识别可行指示，三个因子分别要求距离分辨、积累信噪比与驻留时长达标，取逻辑与。

至此，搜索以检测概率 P_d 衡量，跟踪、识别与精跟则有了可量化的质量门限，四类任务的达标判据齐备，可供下节并入组网覆盖。

1.6 组网覆盖与达标覆盖

基于单部雷达的可执行性 $\chi^{r,\tau}$ 与质量判据，组网级瞬时任务覆盖取各雷达之并集，即至少一部雷达能完成，如式(15)所示：

$$C_k^\tau(t) = 1 - \prod_{r\in\mathcal{R}}\left(1-\chi^{r,\tau}(\mathbf{p}_k(t),\sigma_k(t),t)\right) \in \{0,1\} \tag{15}$$

建批采用 M-of-N[32]准则，起批时刻如式(16)所示：

$$t_{\text{estab},k}^\tau = \min\{t : n_{\text{det}}(t-NT_{\text{scan}}, t] \ge M\} \tag{16}$$

式中：$n_{\text{det}}(a,b]$ 为时窗 $(a,b]$ 内的检测次数；N 为统计时窗内的扫描次数；T_{scan} 为雷达扫描周期；M 为判为建批所需的最少检测次数。

将质量门限并入覆盖，可得达标覆盖，如式(17)所示：

$$\tilde{C}_k^\tau(t) = C_k^\tau(t)\cdot\mathbf{1}_{\text{qual}}^\tau(t) \tag{17}$$

式中：$\mathbf{1}_{\text{qual}}^\tau$ 为任务 τ 的质量达标指示函数，各任务达标条件分别为：搜索 $P_d \ge P_d^{\text{req}}$、跟踪 $q_k^T \le \varepsilon_T$、识别 $\mathbf{1}_{\text{disc}}=1$ 且 $P_{\text{disc}} \ge P_{\text{disc}}^{\text{th}}$、精跟 $q_k^P \le \varepsilon_{\text{fc}}$。其中跟踪与精跟以 RMSE 衡量，越小越好；搜索与识别以概率衡量，越大越好。本文的严密性指标一律以达标覆盖 $\tilde{C}$ 度量，而非仅以几何覆盖 C，因而对量测精度与分辨能力敏感。

2　任务链时序与预警时间预算

覆盖是否严密，最终判据不在于目标能否被照射到，而在于能否在拦截所需的时刻、以所需的质量，按 $S\to T\to I\to P$ 的次序完成任务链。任务链的时序约束，本质上是把交战时间线映射为四类探测任务的截止时刻与质量门限，从而使任务门限直接源于拦截需求。

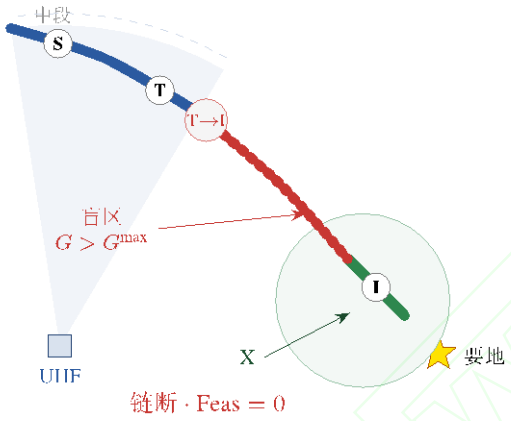
2.1 任务链先后约束

四类任务之间存在强先后关系 $S \to T \to I \to P$。未起批则无从跟踪，未稳定跟踪则无从识别，未识别则无从转入火控级精跟。此外，各步均须持续一段建立/确认时延方算完成。各任务的达标起始时刻以式(17)的达标覆盖 $\tilde{C}_k^\tau(t)$ 为判据，按先后关系递推，如式(18)所示：

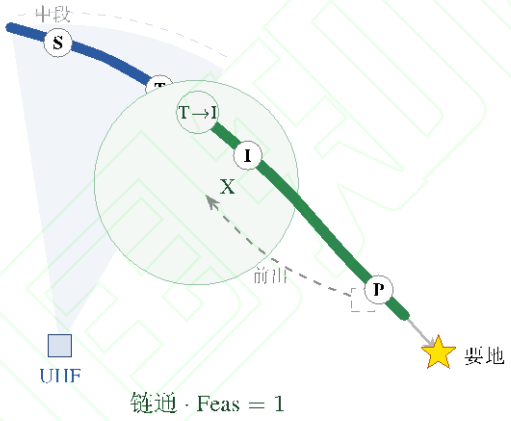
$$\begin{aligned} t_k^S &= t_{\text{estab},k}^S \\ t_k^T &= \min\{t \ge t_k^S : \tilde{C}_k^T \equiv 1 \text{ on } [t, t+\tau_{\text{track}}]\} \\ t_k^I &= \min\{t \ge t_k^T : \tilde{C}_k^I \equiv 1 \text{ on } [t, t+T_{\text{disc}}]\} \\ t_k^P &= \min\{t \ge t_k^I : \tilde{C}_k^P \equiv 1 \text{ on } [t, t+\tau_{\text{fc}}]\} \end{aligned} \tag{18}$$

式中：$t_{\text{estab},k}^S$ 为搜索起批时刻，由 1.6 节的 M-of-N 准则给出；τ_{track} 为稳定跟踪所需的最短连续时长；T_{disc} 为识别驻留所需的最短连续时长；τ_{fc} 为火控级精跟所需的最短连续时长。起批、判性与火控解算都需要在一段时长内持续获得达标量测，因此各任务以连续可用、而非某一时刻可用为完成

条件。t_k^{τ} 记该任务达标窗口的起始时刻，其后持续相应时长即告完成，两者之差为该任务的最短连续时长。前置任务未完成，或达标覆盖 $\tilde{C}_k^{\tau}$ 在要求时长内出现中断，该任务即视为未按时完成。这样便将瞬时照射与任务完成区分开来；交接连续性（不丢批）也因此成为第 3 节严密性的一个独立维度。



(a) X 后置致识别盲区、任务链断裂



(b) X 前出在中段完成识别、任务链贯通

图 4 交接成链机理
Fig.4 Handoff-chaining mechanism

相邻雷达能否沿弹道接力成链，直接决定交接连续性与任务链能否贯通。X 波段雷达后置时，目标须深入至其识别档方能被成像，留下识别盲区、任务链断裂（图 4(a)）；X 波段雷达前出时，目标于中段即进入识别档、完成判性，任务链得以贯通（图 4(b)）。

2.2 预警时间预算与截止反推

任务链各任务的截止时刻由拦截需求反推确定。拦截弹只能在交战高度上限以下的可拦区内交会，因而取来袭目标降至该高度上限、进入可拦区的时刻 $t_{\mathrm{arrive},k}$ 为交会基准。欲在 $t_{\mathrm{arrive},k}$ 交会，拦截弹须提前 T_{fly} 发射。发射又须在火控解算 T_{fc} 与数据处理 T_{proc} 之前定下决心，由此得发射决策截止时刻与识别、精跟的截止约束，如式(19)所示：

$$t_{\mathrm{commit},k}^{\mathrm{deadline}} = t_{\mathrm{arrive},k} - T_{\mathrm{fly}} - T_{\mathrm{fc}} - T_{\mathrm{proc}}, t_k^I \le t_{\mathrm{commit},k}^{\mathrm{deadline}}, t_k^P \le t_{\mathrm{commit},k} \tag{19}$$

式中：$t_{\mathrm{arrive},k}$ 为弹道 k 降至交战高度上限、进入可拦区的时刻，作为交会基准；T_{fly} 为拦截弹飞行时延；T_{fc} 为火控解算时延；T_{proc} 为指挥控制与数据处理时延；$t_{\mathrm{commit},k}^{\mathrm{deadline}}$ 为发射决策截止时刻，识别与精跟均须在其之前完成。各环节时延在量级上差异显著，弹道导弹预警系统（ballistic missile early

warning system, BMEWS）类远程预警窗约 10–25min，而火控与数据处理则为秒级，因此截止时刻主要由预警窗与拦截弹飞行时间决定。该截止进一步约束部署几何，搜索雷达须前置多远、朝向何方，方能使 t_k^S 足够提前、为后续 T/I/P 留出时间余量。

2.3 多层拦截

实战中常设置中段层、末段层等多个拦截层，各层各有其发射决策时刻 t_{commit}、拦截窗与防御范围（footprint）。各层对应于不同的截止时刻集合 $\{t_{\text{dl},k}^{\tau}\}$，其中 $t_{\text{dl},k}^{\tau}$ 为弹道 k 任务 τ 的完成截止时刻。各层的火控解算与数据处理时延一致，截止时刻之差只源于拦截弹飞行时间之差；末段层的拦截弹飞行时间最短，发射决策可最晚作出，其截止时刻因而最迟。

防御体制只要求满足任一层时，四类任务只须在最迟一层的截止之前完成，取各层截止的最大者，探测判据最松；要求逐层均满足时，须在最早一层的截止之前完成，取最小者，判据最严。两种取法都把拦截需求 $\mathcal{W}$ 显式参数化，并纳入硬可行性条件。此处的松紧只就探测判据而言，末段层截止最迟只因其拦截弹飞行时间最短，与该层拦截本身的难易无关。

3　覆盖严密性指标体系

区别于既有工作多以单一覆盖率或探测概率衡量预警能力[8,33,34]，本文围绕能否贯通任务链这一核心，构建覆盖严密性指标体系。具体地，本节从空间、时间、任务、交接、冗余五个维度刻画严密性，以两级聚合将弹道级 5×4 矩阵压缩为单标量，按威胁权重 π_k 由弹道级聚合到威胁族级，最终诊断输出薄弱环节及其成因。所谓覆盖严密，指对给定弹道，搜索、跟踪、识别与精跟四类任务均在拦截所需的时间、质量与连续性约束下达标。判据不在于空域能否被覆盖，而在于任务链能否逐一贯通。

3.1 五维严密性指标

本文对每条弹道 b_k、每类任务 τ，从上述五个维度刻画其严密性，一律以达标覆盖 $\tilde{C}$ 计。其中，交接（D4）与冗余（D5）在已有工作中多被作为独立的目标分配/调度[14,17,18]或可靠性问题处理，而本文将其增列为覆盖严密性的两个独立可计算维度。

$S_{d,k}^{\tau}$ 为各维度归一化后的严密性分量；$G^{\max}$、$P_{\text{drop}}^{\max}$、T_{reacq} 为体制门限，由拦截需求 $\mathcal{W}$ 给出。

空间维 D1 以达标弹道覆盖率衡量，如式(20)所示：

$$\rho_k^{\tau}=\frac{1}{T_k}\int_0^{T_k}\tilde{C}_k^{\tau}(t)\,dt \tag{20}$$

式中：T_k 为弹道 k 的全程时长；$\rho_k^{\tau}\in[0,1]$ 越大表示该任务在该弹道上的可用覆盖越充分。

时间维 D2 关注告警的及时性，由首点告警时刻、最长连续覆盖时长 L_k^{τ}（$\tilde{C}_k^{\tau}=1$ 的最长连续区间长度）与最大盲区间隔 G_k^{τ}（首次达标覆盖之后、末次达标覆盖之前，$\tilde{C}_k^{\tau}=0$ 的最长连续区间长度）共同刻画。其中首点告警时刻 $t_{\text{first},k}^{\tau}=\min\{t:\tilde{C}_k^{\tau}(t)=1\}$ 越小，表示首次告警越早，可为后续任务争取更大时间余量。

任务维 D3 衡量截止满足情况与时间裕量，如式(21)所示：

$$\delta_k^{\tau}=\mathbf{1}\left[t_k^{\tau}\le t_{\text{dl},k}^{\tau}\right],\ m_k^{\tau}=t_{\text{dl},k}^{\tau}-t_k^{\tau} \tag{21}$$

式中：$\delta_k^{\tau}\in\{0,1\}$ 为截止满足指示，$\delta=1$ 表示按时完成；m_k^{τ} 为时间裕量，越大越鲁棒。

交接维 D4 刻画批次在雷达间传递的连续性。设交接时刻 t_h 为移交雷达的末次量测时刻。由 i 的单站量测得位置协方差、并据跟踪间隔估计速度协方差，合成状态（位置、速度）协方差 $\boldsymbol{P}_i^0$；将其按匀速模型作一步预测、传播至接收雷达完成重捕之时刻（预测时长 $\Delta t_{ij}=\max(0,-O_{ij})+T_{\text{reacq}}$，跨越交接间隙与重捕时段），得状态预测协方差 $\boldsymbol{F}\boldsymbol{P}_i^0\boldsymbol{F}^{\mathsf{T}}+\boldsymbol{Q}$，其位置分块记为 $\boldsymbol{P}_i(t_h)$，即式(22)中的预测位

置协方差。接收雷达 j 的捕获波束与距离门张成捕获体积 V_j，则捕获概率与连续 n_b 次未捕获的丢批概率分别如式(22)、式(23)所示：

$$P_{\mathrm{acq},ij}(t_h)=\int_{V_j}\mathcal{N}\left(\boldsymbol{x};\boldsymbol{x}_i(t_h),\boldsymbol{P}_i(t_h)\right)d\boldsymbol{x} \tag{22}$$

$$P_{\mathrm{drop},ij}=\left(1-P_{\mathrm{acq},ij}\right)^{n_b} \tag{23}$$

式中：V_j 为接收雷达 j 的捕获体积；$\mathcal{N}(\cdot)$ 为高斯密度；n_{b} 为允许连续未捕获的次数；$\boldsymbol{F}$、$\boldsymbol{Q}$ 分别为预测的状态转移矩阵与过程噪声协方差；$\boldsymbol{x}_i(t_h)$ 为移交雷达 i 的位置预测均值；$\boldsymbol{P}_i(t_h)$ 为状态预测协方差的位置分块；$\boldsymbol{P}_i^0$ 为移交时刻的状态协方差；Δt_{ij} 为预测时长（交接间隙与重捕时段之和）。此外要求交接重叠时长 $O_{ij,k}\geq T_{\mathrm{reacq}}$，以保证接收雷达有足够时间完成搜索、确认与建批；交接严密性取所有交接界面中的最弱者，如式(24)所示：

$$S_{\mathrm{D4},k}=\min_{(i\to j)\in\mathcal{H}}\left\{\left(1-P_{\mathrm{drop},ij,k}\right)\cdot\mathbb{1}\left[O_{ij,k}\geq T_{\mathrm{reacq}}\right]\right\} \tag{24}$$

式中：$\mathcal{H}$ 为弹道 k 的交接界面集合；T_{reacq} 为接收雷达完成搜索、确认与建批所需的重捕时长；$O_{ij,k}$ 为交接窗内两站共同覆盖时长。

冗余维 D5 以瞬时冗余度衡量，如式(25)所示：

$$\mathrm{Red}_k^{\tau}(t)=\sum_{r\in\mathcal{R}}\chi^{r,\tau} \tag{25}$$

式中：$\mathrm{Red}_k^{\tau}(t)$ 为同时能完成任务 τ 的雷达数。

上述五维汇成每条弹道的 5×4 严密性矩阵，如式(26)所示：

$$\boldsymbol{S}_k=\left[S_{d,k}^{\tau}\right],\tau\in\{S,T,I,P\},\ d\in\{D1,\ldots,D5\} \tag{26}$$

其中空间维 $S_{\mathrm{D1}}=\rho_k^{\tau}$、任务维 $S_{\mathrm{D3}}=\delta_k^{\tau}$ 与交接维 S_{D4} 由式(20)、式(21)、式(24)直接给出且天然落于[0,1]，S_{D4} 的交接界面由跟踪覆盖的相邻区间给出，为弹道级量，四类任务共用；时间维 D2 与冗余维 D5 则分别由最大盲区 G_k^{τ} 与平均瞬时冗余度 $\overline{\mathrm{Red}}_k^{\tau}$ 按式(27)归一化：

$$S_{\mathrm{D2},k}^{\tau}=\max\left(0,1-\frac{G_k^{\tau}}{T_k}\right),S_{\mathrm{D5},k}^{\tau}=\max\left(0,1-\frac{1}{\overline{\mathrm{Red}}_k^{\tau}}\right) \tag{27}$$

式中：T_k 为弹道 k 全程时长（无盲区即 $S_{\mathrm{D2}}=1$）；$\overline{\mathrm{Red}}_k^{\tau}$ 为瞬时冗余度在几何覆盖非零时段上的平均（无冗余 $\overline{\mathrm{Red}}=1$ 时 $S_{\mathrm{D5}}=0$，双重冗余 $\overline{\mathrm{Red}}=2$ 时 $S_{\mathrm{D5}}=0.5$）；G_k^{τ} 为弹道 k 任务 τ 在首末达标覆盖之间的最大盲区间隔。如此 $S_{d,k}^{\tau}$ 各分量均归一至[0,1]，5×4 严密性矩阵的结构如表 2 所示。

表 2 弹道级严密性矩阵的分量与归一化

Table 2 Components and normalization of the per-trajectory tightness matrix

维度	分量（符号）
D1 空间	弹道覆盖率 ρ_k^{τ}
D2 时间	首点告警时刻 $t_{\mathrm{first},k}^{\tau}$、最长连续覆盖 L_k^{τ}、最大盲区间隔 G_k^{τ}
D3 任务	截止满足指示 δ_k^{τ}、时间裕量 m_k^{τ}
D4 交接	捕获概率 $P_{\mathrm{acq},ij}$、丢批概率 $P_{\mathrm{drop},ij}$、重叠时长 $O_{ij,k}$
D5 冗余	瞬时冗余度 $\mathrm{Red}_k^{\tau}(t)$、单点失效损失 ΔS_k^{τ}

注：硬可行性条件中 $G_k^{\tau}\leq G^{\max}$ 仅对持续守候型任务 $\mathcal{T}_{\mathrm{cust}}=\{T,P\}$ 生效；搜索（S）与识别（I）为事件型任务，仅以截止前是否达成判定，不受连续盲区约束。

3.2 硬可行性条件与评分的两级聚合

将 5×4 矩阵压缩为单一标量时存在补偿风险。简单加权求和会让交接、冗余维度的高分掩盖任务维度未在截止前完成这一关键缺陷。为此，本文采用两级聚合，先以非补偿的硬可行性条件判定是否严密，再在可行域内用补偿型评分排序与优化。

弹道 k 满足非补偿硬可行性条件即判为覆盖严密，要求对所有任务的截止满足、质量达标，对须持续守候的任务最大盲区不超限，且所有交接界面的丢批概率与重叠时长均合格，如式(28)所示：

$$\begin{aligned}\mathrm{Feas}_k = &\left[\forall \tau : \delta_k^\tau = 1\right] \wedge \\ &\left[\forall \tau \in \mathcal{T}_{\mathrm{cust}} : G_k^\tau \le G^{\max}\right] \wedge \left[\forall \tau : \mathbf{1}_{\mathrm{qual}}^\tau = 1\right] \wedge \\ &\left[\forall (i \to j) \in \mathcal{H} : P_{\mathrm{drop},ij,k} \le P_{\mathrm{drop}}^{\max} \wedge O_{ij,k} \ge T_{\mathrm{reacq}}\right]\end{aligned} \tag{28}$$

式中：$\mathcal{T}_{\mathrm{cust}}$ 为须持续守候的任务集；$G^{\max}$ 为最大允许盲区时长；$P_{\mathrm{drop}}^{\max}$ 为允许的最大丢批概率门限；$\mathbf{1}_{\mathrm{qual}}^\tau$ 为式(17)定义的质量达标指示。四条件同时成立即判该弹道覆盖严密，任一不成立则判为覆盖不严密，且不可被其他维度补偿。

最大盲区约束 $G_k^\tau \le G^{\max}$ 的适用范围，取决于四类任务的时间语义。跟踪（T）与精跟（P）属“持续守候”型任务：拦截弹的火控解算与中制导需要在一段时间内不间断地维持航迹，一旦中途出现超限盲区，航迹连续性与滤波收敛即遭破坏，因而这两类任务必须满足连续性约束。搜索（S）与识别（I）则属“一次性事件”型任务：搜索只需完成一次起批，识别只需对目标完成一次判性，即一次成功的高分辨成像与特征提取，任务一旦达成即转入下一环节，其价值不在于持续，而在于是否达成。因此连续盲区门限 $G^{\max}$ 只对持续守候型任务有意义；若对事件型任务也施加连续性约束，便会把探测窗口偶有间断误判为不可行。据此取 $\mathcal{T}_{\mathrm{cust}} = \{T, P\}$，而搜索与识别仅以“截止前是否达成”（$\delta^\tau = 1$、$\rho^\tau > 0$）判定。这一区分虽属建模细节，却直接决定前出探测、间歇照射等部署形态能否被判为可行。

式(28)中“质量达标”一项 $(\mathbf{1}_{\mathrm{qual}}^\tau = 1)$ 已并入达标覆盖 $\tilde{C}_k^\tau$ 的定义（式(17)），在实现上等价于要求该任务在截止前存在达标覆盖，即空间维占比 $\rho_k^\tau > 0$。在可行域内，再以补偿型加权评分进行排序或优化，如式(29)所示：

$$S_k^{\mathrm{agg}} = \sum_{\tau,d} w_{\tau,d}\, S_{d,k}^\tau, S_k^{\mathrm{agg}} \in [0,1], \sum w = 1 \tag{29}$$

式中：$w_{\tau,d} \ge 0$ 为任务—维度权重；$S_{d,k}^\tau$ 为归一化后的严密性分量。

3.3 威胁族聚合

对弹道族按威胁可能性/严重度赋权 π_k（$\sum_k \pi_k = 1$），据此定义可行覆盖率、最坏情形与期望严密性三个体系级指标，如式(30)所示：

$$\Phi = \sum_k \pi_k \mathbf{1}[\mathrm{Feas}_k],\ S_{\mathrm{wc}} = \min_k S_k^{\mathrm{agg}},\ \mathbb{E}[S] = \sum_k \pi_k S_k^{\mathrm{agg}} \tag{30}$$

式中：$\Phi \in [0,1]$ 为弹道族中任务链可贯通弹道的加权占比；S_{wc} 为最坏方向的严密性评分；$\mathbb{E}[S]$ 为整体平均水平。评估以可行覆盖率 Φ 与最坏情形 S_{wc} 为主、期望严密性 $\mathbb{E}[S]$ 为辅。$\mathbb{E}[S]$ 作为加权均值会稀释个别方向的失效。当某一整个方向不可行时，$\mathbb{E}[S]$ 仍可因其余方向高分而显得乐观，从而掩盖问题。

3.4 薄弱环节诊断

评估不应止于给分，更要指出薄弱所在与补强方向。为此，对每条不可行弹道，在其 5×4 严密性矩阵中定位得分最低的（任务、维度）组合；所有不可行弹道的组合合成诊断集合 $\Omega(D)$，如式(31)所示：

$$\Omega(D) = \left\{ \left(k, \tau_k^*, d_k^*\right) \middle| \mathrm{Feas}_k = 0,\ (\tau_k^*, d_k^*) \in \underset{(\tau,d)}{*\arg\min}\ S_{d,k}^\tau \right\} \tag{31}$$

式中：(τ^*, d_k^*) 为弹道 k 上得分最低的（任务、维度）组合；最低分并列时任取其一，若并列项分

属不同维度，则须结合式(28)中不成立的条件一并判读。据此可回溯至导致 $\chi=0$ 或质量不达标的具体雷达、交接界面或时间段，进而给出补强建议（如增设作用距离足够的雷达、前推搜索站位）。

4 评估流程与部署优化

4.1 评估算法

本文将前述模型串接为一条可计算的评估流程，由拦截需求反推各任务截止，对每条弹道顺次执行覆盖、时序、五维、可行性四步处理，再做威胁族聚合与诊断；整体流程如图 5 所示。

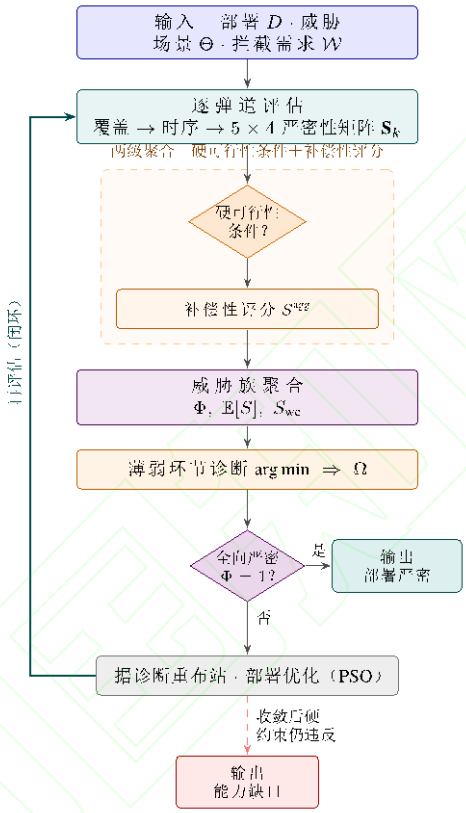


图 5 评估方法总体流程图

Fig.5 Overall flowchart of the proposed assessment method

评估算法的输入为部署 D 、威胁场景 $\Theta=(\mathcal{B},\pi)$ 与拦截需求 $\mathcal{W}$。输出为各弹道严密性矩阵 $\boldsymbol{S}_k$ 、可行覆盖率 Φ 、最坏情形 S_{wc} 与诊断集合 Ω 。主要步骤如下：

步骤 1）由 $\mathcal{W}$ 反推各拦截层的截止时刻 $t^{\tau}_{\mathrm{dl},k}$ ；

步骤 2）对每条弹道 $b_k\in\mathcal{B}$ ，依次执行下列子步骤：

步骤 2-i）生成弹道并采样 $\{t_{k,j}\}$ ；

步骤 2-ii）对每个采样点、每部雷达 r 、每类任务 τ ，计算可执行性 $\chi^{r,\tau}$ 与任务质量 q^{τ}_k ；

步骤 2-iii）聚合得覆盖 C^{τ}_k 、达标覆盖 $\tilde{C}^{\tau}_k$ 与起批时刻 t_{estab} ；

步骤 2-iv）按先后递推任务达标起始时刻 t^{τ}_k ；

步骤 2-v）计算五维指标 D1–D5、弹道评分 S^{agg}_k ，并判定可行性 Feas_k ；

步骤 3）威胁族聚合得 Φ 、 S_{wc} 、 $\mathbb{E}[S]$ ，并诊断薄弱环节 Ω 。

由此评估算法的计算复杂度为 $O\big(K\cdot J\cdot|\mathcal{R}|\big)$ ，其中 K 为弹道数、 J 为弹道采样点数、 $|\mathcal{R}|$ 为雷达

数，对四类任务的逐点判定为被 O 吸收的常数因子；复杂度瓶颈在于步骤 2-ii 的逐点逐雷达可执行性判定（启用地形遮蔽时还含逐点遮蔽求交）。

4.2 评估—诊断—优化闭环与部署优化

在评估与诊断指出薄弱所在之后，闭环的最后一步是据此自动重新布站，检验所诊断的薄弱环节能否通过调整站位几何予以消除。为此直接以评估指标为目标构造部署优化问题。以可行覆盖率为首要目标（亦可取最坏情形 $\max_D S_{\mathrm{wc}}(D)$），部署优化模型如式(32)所示：

$$\max_{D} \Phi(D) \quad \text{s.t.} \quad |\mathcal{R}| \le N_{\max}, \mathrm{type}_r \in \mathcal{Y}, D \in \mathcal{D}_{\mathrm{feas}} \tag{32}$$

式中：$N_{\max}$ 为雷达数量上限；$\mathcal{Y}$ 为可选雷达型号集合；$\mathcal{D}_{\mathrm{feas}}$ 为站位、阵面法向与视场的可行域。作为互补形式，也可在 $\Phi(D) \ge \Phi^{*}$ 的约束下最小化部署代价，即 $\min_D C(D)$。其中 Φ^{*} 为可行覆盖率约束门限，$C(D)$ 为部署代价，由雷达数量和型号配置决定。由于 Φ 取值离散（弹道数有限）、对决策变量不可微，直接以其为适应度会使搜索在大片等值区上失去方向信息。为此在求解时采用标量化的代理目标，如式(33)所示：

$$J(D) = \Phi(D) + \alpha \mathbb{E}[S](D) + \beta S_{\mathrm{wc}}(D) \tag{33}$$

式中：$\alpha, \beta > 0$ 为较小的权重，以保证 Φ 始终主导；其作用是在 Φ 相等的诸多部署之间，用连续的期望与最坏情形评分拉开差距、指引搜索方向。决策变量 D 含各雷达的站位、阵面法向、视场与型号配置；多雷达逐格寻优的耗时可达小时量级[35]，因此采用粒子群、遗传、烟花等启发式算法求解[7-9,11]；本文采用粒子群算法（particle swarm optimization, PSO）求解。

本方法以评估与诊断为主线，优化用于检验诊断结论。若重新布站后 Φ 显著提升，即印证薄弱确由站位几何所致；若优化收敛后，识别截止或最大盲区等硬约束仍被违反，则可判定在给定雷达数量与型号下该威胁无法被严密防御，应据此输出能力缺口，而不是继续微调站位。

5 仿真分析

本文通过 MATLAB 仿真验证所提方法，评估指标取可行覆盖率 Φ、最坏情形 S_{wc} 与期望严密性 $\mathbb{E}[S]$，并辅以逐弹道的 5×4 严密性矩阵与基于式(31)的薄弱环节诊断。各类雷达与目标参数取公开代表性数值[3,4,24,25,28]，仅用于方法演示。不失一般性，设防御方对南向来袭扇区开展严密性评估，要地位于参考坐标原点，主轴威胁方位取西南 225°。

5.1 仿真场景与参数设置

本文以一种前出分层的分布式部署为基准,其 7 部雷达的频段、站位、法向方位、视场与可担任务集列于表 3。其中 3 部 UHF 远程预警雷达沿来袭弧担负搜索与跟踪，4 部 X 波段雷达分担终端、近程、中段与前出的跟踪、识别与精跟，各雷达站位与朝向互异。威胁族由方位{135°,165°,195°, 225°,285°}6 个方向与射程{4000, 6000}km 交叉而成的 12 条弹道构成，刻画南向来袭扇区。任务链门限与威胁场景参数集中于表 4。

表 3 前出分层基准部署的雷达参数

Table 3 Radar parameters of the forward-layered baseline deployment

雷达	频段	站位①	法向方位②	视场/(°)	$\mathcal{T}_r$
R1 远程预警 UHF-东南	UHF	(152°, 645 km)	158°	±62	$\{S,T\}$
R2 远程预警 UHF-西南	UHF	(216°,1989 km)	215°	±62	$\{S,T\}$
R3 远程预警 UHF-西	UHF	(252°, 1656km)	262°	±62	$\{S,T\}$
R4 前出跟踪识别 X-西南	X	(218°,1079 km)	222°	±55	$\{T,I,P\}$
R5 中段识别 X-西	X	(253°, 839 km)	260°	±55	$\{T,I,P\}$
R6 终端跟踪识别 X	X	(0, 0)	全向	±180	$\{T,I,P\}$
R7 近程精跟 X-西南	X	(209°, 348 km)	210°	±50	$\{T,I,P\}$

注：①站位以(方位°,距要地 km)给出（以要地为原点的平面投影，与图 6、11(a) 一致）；②朝向以阵面法向方位给出，R6 为多功能阵列、全向覆盖。

表 4 任务链门限与威胁场景参数

Table 4 Task-chain thresholds and threat-scenario parameters

类别	参数	取值
任务门限	跟踪精度 ε_T	≤500 m
	火控精跟精度 $\varepsilon_{\mathrm{fc}}$	≤50 m
	识别概率门限 P_{disc}	≥0.8
	最大允许盲区 $G^{\max}$	30s
威胁族	方位（间隔 30°）	{135°,165°,195°,225°,285°}
	射程/km	{4000,6000}
时序判据	到达时刻 t_{arrive}	目标降穿 150km
	commit 截止 $t_{\mathrm{commit}}^{\mathrm{deadline}}$	由式(19)反推

注：各项门限按公开示例取值；雷达参数取自公开代表性参数[3,4,24,25,28]。

后续各组对照共用同一套设定。表 4 的任务门限在全部算例中取同一取值，族级指标均在同一 12 条威胁族上计算，各组结果可直接相比。所比较的变量是部署本身，即雷达的站位、法向方位与数量 N。

由表 3、4 参数派生的作用距离与弹道量经核验，与公开资料量级相符。对 RCS 为 0.45/0.10/0.03 m² 的目标，检测档作用距离约为 UHF 2130/1463/1082km、X 1503/1033/763km（窄带 UHF 取 Swerling Ⅰ、宽带捷变 X 取 Swerling Ⅱ）；X 波段识别档计入判别裕量 $\kappa\approx5$ 的成像信噪比后约 1005/690/510km，约为检测档的三分之二，与 1.4 节一致；火控级精度 $\varepsilon_{\mathrm{fc}}\le50$ m 仅近程可达。4000km 弹道顶点高约 568km、全程约 17.4min。威胁族各弹道均取同一射程下顶点较低者。

基准部署的雷达站位、视场与南向 12 条威胁族弹道的几何关系如图 6 所示。

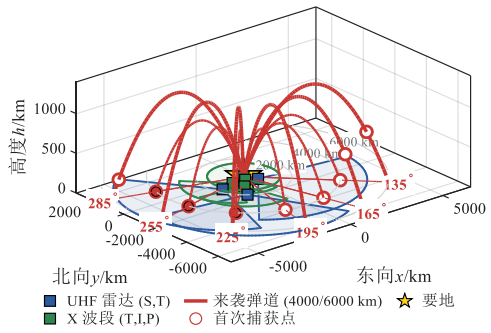


图 6 前出分层基准部署几何与南向威胁族

Fig.6 Geometry of the forward-layered baseline deployment and the southern threat family

5.2 任务驱动的覆盖严密性算例分析

为同时检验方法对单方向可行性与多方向严密性的评估能力，依次给出两组算例。算例 A 取单条主轴威胁，用以建立可行性基准并展示 5×4 严密性矩阵的诊断粒度；算例 B 取 12 条方向威胁族，用以暴露基准部署的方向不均与瓶颈维度，并据最薄弱环节诊断给出补强对照。

5.2.1 算例 A：基准部署完成任务链

核心场景取单条西南主轴威胁（方位 225°、射程 4000km）。7 部雷达沿任务链依次完成各任务，起批、稳定跟踪、识别与火控级精跟的时刻分别为 $t^S=228\,\mathrm{s}$、$t^T=236\,\mathrm{s}$、$t^I=618\,\mathrm{s}$、$t^P=668\,\mathrm{s}$。由拦截需求反推的发射决策截止，中段层为 848 s、末段层为 912s。本算例按任一层即可判定，取两层截止的最大者，即末段层的 912s 为可行截止。四类任务的完成时刻均早于该截止，最末的精跟尚余 244s，即 D3 的时间裕量 m^P，该弹道满足硬可行性条件，$\mathrm{Feas}=1$；任务链各节点时刻与各层截止的对应关系如图 7 所示，图中标注的 180s 是精跟距中段层截止的余量，该层截止更早、要求更严。其中识别时刻较稳定跟踪晚约 380s，源于识别档作用距离更短、目标须更接近要地方能完成判性，与 1.4 节识别档显著短于检测档的结论一致。该弹道的 5×4 严密性矩阵如表 5 所示，任务维 D3 与交接维 D4 各任务均达标，时间维 D2 近满分，空间维 D1 总体偏低，反映识别与精跟作用距离更短、可用窗口更窄，其中跟踪因多部雷达沿弧接力而显著最高、识别次之，搜索与精跟相近；冗余维 D5 在主轴方向最弱，搜索向因仅单部 UHF 覆盖而得分为 0，识别与精跟向亦低，该维不计入硬可行性条件。可见即便单方向已判可行，5×4 矩阵仍能逐维定位其隐患。仅凭二元的 $\mathrm{Feas}=1$ 会掩盖主轴冗余为 0 这一短板，而矩阵的诊断粒度能将其显化，即可行并不等于鲁棒。

表 5 算例 A 的 5×4 严密性矩阵

Table 5 The 5×4 tightness matrix of Case A

维度＼任务	S 搜索	T 跟踪	I 识别	P 精跟
D1 空间	0.339	0.770	0.404	0.331
D2 时间	1.000	1.000	1.000	0.975
D3 任务	1.000	1.000	1.000	1.000
D4 交接	1.000	1.000	1.000	1.000
D5 冗余	0.000	0.336	0.221	0.221

注：各元为归一化至 [0,1] 的严密性分量，D5 不计入硬可行性条件。

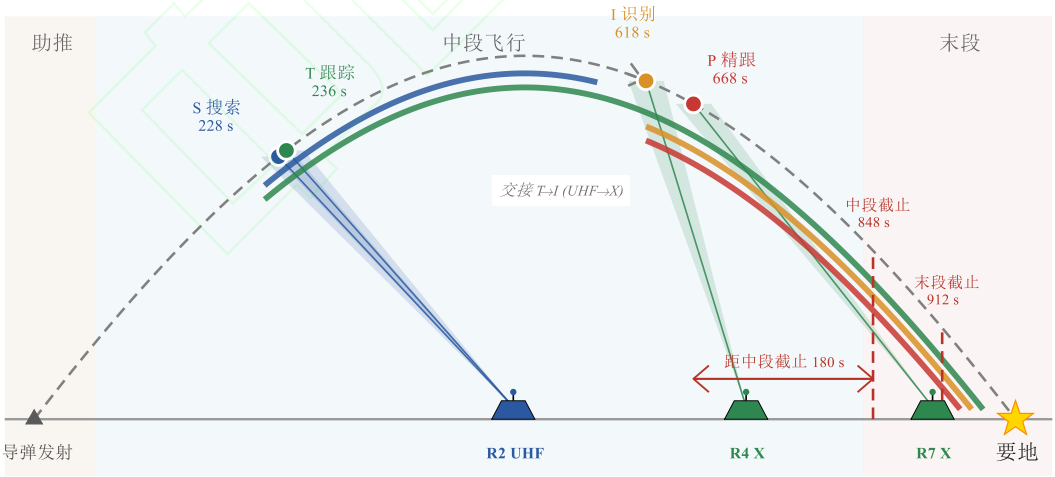


图 7 算例 A 作战剖面与任务链执行（西南向威胁）

Fig.7 Operational profile and task-chain execution of Case A

5.2.2 算例 B：覆盖剖面与诊断

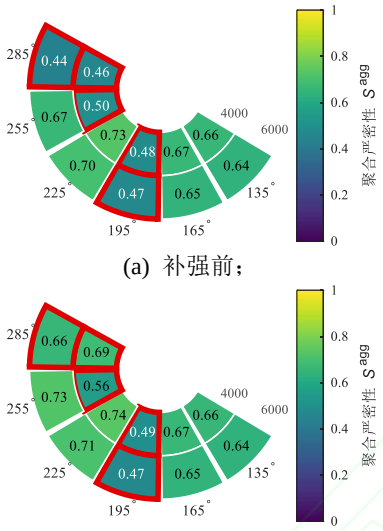


图 8 算例 B 方位×射程覆盖图谱（红框=不可行）
Fig.8 Azimuth-range coverage map of Case B(red box = infeasible)

同一部署对 12 条方向威胁族的覆盖剖面如图 8(a)所示。由图 8(a)可见，可行覆盖率 $\Phi=0.583$，即 12 条中 7 条可行，期望严密性 $\mathbb{E}[S]=0.589$、最坏情形 $S_{\mathrm{wc}}=0.436$，覆盖在方向上明显不均。其中东南侧与主轴方向任务链贯通、完全可行，含 135°、165°、225°的两个射程及 255°的远射程共 7 条。不可行的 5 条集中在西偏方向，含 195°与 285°的两个射程，以及 255°的近射程 4000km，皆因该轴相邻覆盖雷达未能沿弹道成链、交接重叠不足而出现超限间隙（交接维 D4 得分为 0）。任务链无法贯通，故 $\mathrm{Feas}=0$。可见，基准部署虽能覆盖大半扇区，却在西翼留有明显的方向缺口。

各任务的族级达标覆盖率无论最小值还是均值都普遍偏低（图 9），就均值而言沿任务链呈非单调变化，跟踪最高、精跟最低；识别与精跟覆盖率最低，反映其作用距离更短、可用窗口更窄。结合图 8(a)的不可行格分布，按式(31)定位这 5 条弹道的薄弱环节，一致落在交接维 D4。但不成立的条件不止交接一项。其中 2 条的最大盲区分别在跟踪与精跟上超出 $G^{\max}$。四类任务在覆盖可达处均能在截止前完成（$\delta_k^{\tau}=1$），可见问题在站位几何，不在雷达型号的探测能力。诊断由此指向“改善西翼站位几何、补齐相邻雷达的交接间隙”。

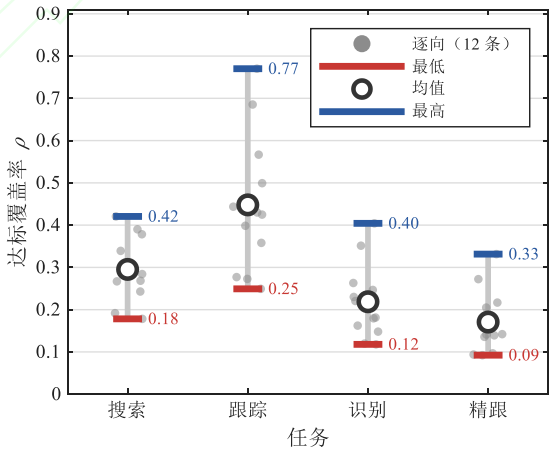


图 9 算例 B 的族级达质量覆盖率
Fig.9 Family-level quality-meeting coverage of Case B

5.2.3 诊断驱动的补强对照

依上述诊断，沿西翼增设 3 部同类 X 波段雷达，强化 195°、255°、285°方向的前出与中段覆盖，部署增至 10 部，构成评估—诊断—优化—再评估的闭环对照。如图 8(b)所示，补强后可行覆盖率 Φ 仍为 0.583、可行弹道数仍为 7 条，均无提升；上升的只是补偿型评分，期望严密性 $\mathbb{E}[S]$ 由 0.589 升至 0.639、最坏情形 S_{wc} 由 0.436 升至 0.472。对照补强前后可见，西翼各不可行格的聚合严密性 S^{agg} 普遍抬升，但红框原样保留。195°两条与 255°近射程上，相邻雷达仍未沿弹道成链；285°两条的交接则已因增设而成链，却仍不可行，其最大盲区在精跟上超出 $G^{\max}$。后者说明式(28)的四项条件须同时成立，补上交接一项并不足以判为可行。可见，在已被探测覆盖、却未贯通任务链的方向上追加同类雷达，只能抬高 $\mathbb{E}[S]$、S_{wc} 等补偿型评分，却不满足非补偿硬可行性条件；这些缺口是站位几何造成的，单纯增设同类雷达无法填补，只能靠重新安排站位解决，这也正是后续优化的着力点。值得注意的是，在本文交接随覆盖几何成链、不含最优指派的设定下，新增 X 波段雷达的视场若过宽，会在邻向插入劣质交接、使原本可行的方向退化，因此须收窄其朝向，方能在补强西翼的同时不扰动已可行方向；该退化可由式(24)判出。

5.3 全向覆盖代价与站位几何分析

5.2 节暴露的方向不均，根本上关乎全向可行性主要由雷达数量决定，还是由站位几何决定。为厘清这一点，先沿威胁弧逐扇区补强，对比三种人工布站策略下可行覆盖率 Φ 随雷达数 N 的变化（表 6、图 10）；再以 4.2 节的粒子群优化联合调整站位与朝向，检验“评估—诊断—优化”闭环能否以更少的雷达达成全向严密（图 11）。

表 6 三种布站策略的可行覆盖率对比

Table 6　Comparison of feasible coverage rate among three deployment strategies

N	宽波束 ±50°	窄波束 ±24°	前沿分布式
5	0.583	0.583	0.667
7	—	—	0.667
8	0.583	0.583	—
9	—	—	0.833
10	0.583	0.583	—
11	—	—	1.000
12 / 14 / 16	0.583	0.583	—

注：“—”表示该 N 未在对应策略的网格上计算。宽波束/窄波束在 $5 \le N \le 16$ 全程恒为 0.583；前沿分布式于 $N=11$ 达 1.000。

5.3.1 三策略代价曲线

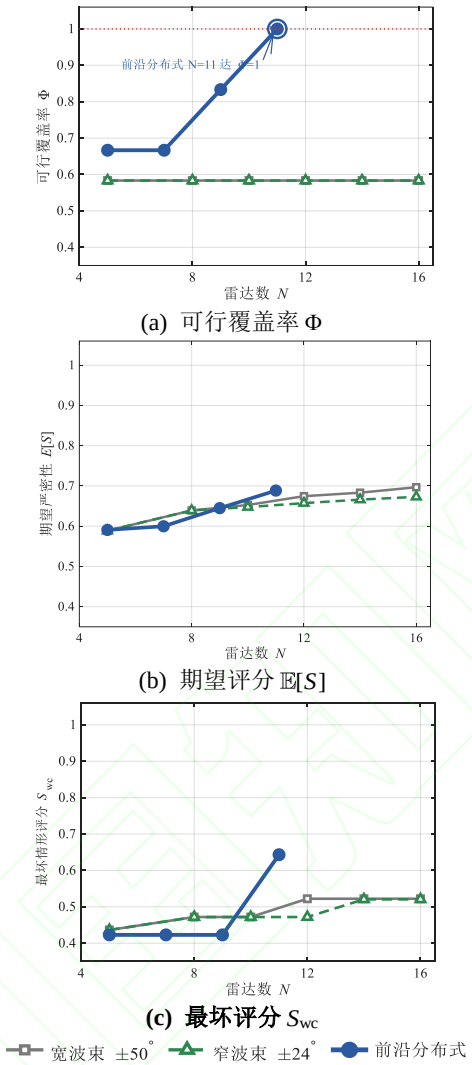


图 10 随雷达数 N 的三种布站策略代价曲线

Fig.10 Cost curves under three deployment strategies versus number of radars N

三种人工策略的对照（图 10(a)）印证并延伸了 5.2 节的观察。宽波束与窄波束两种策略均只在原有责任弧附近增设 X 波段雷达，二者仅波束宽窄不同。宽波束（±50°）会触发 5.2.3 节所述的劣质交接退化，窄波束（±24°）则规避了此退化；但两者可行覆盖率在 $5 \le N \le 16$ 全程恒为 0.583，与 5.2 节原位补强一致，期望分随数量抬升而 Φ 不变。唯前沿分布式将 X 波段雷达沿威胁弧前推、按射程分层，Φ 才单调升至 1.000，但人工逐扇区铺设需多达 11 部（表 6）。可见单纯增加数量并不能提升 Φ，唯有把新增雷达放到缺口方向的前出几何才能奏效；前沿分布式在此可行，是因示例识别档作用距离（约 1005km）与中段弹道顶点高度（约 568–900 km）相当，前出雷达能在中段完成判性、不致拖垮任务链。补偿型评分（图 10(b)(c)）进一步印证这一区分。三策略的期望分 $\mathbb{E}[S]$ 均随 N 缓升，但宽、窄波束的最坏分 S_{wc} 始终低位徘徊（约 0.44–0.52，受困于不可行方向），唯前沿分布式在 $N=11$ 达 $\Phi=1.000$ 的同时 S_{wc} 由约 0.42 跃升至 0.64，可行性的跨越同时带来了最坏方向的实质改善。

5.3.2 评估—诊断—优化闭环：PSO 优化布站

以最大化可行覆盖率为目标、联合优化站位与朝向，按 4.2 节的优化问题用粒子群算法求解。决策向量为 13 维，含 2 部 UHF 搜索雷达的法向、5 部 X 波段雷达的来袭方位与前出距离，以及 1 个共

享波束半张角；固定 8 部雷达，并在初始种群中植入集中式部署作为优化起点。该集中式部署中，8 部雷达全部位于要地近旁，其中 1 部 X 波段雷达居要地担任终端，另 5 部 X 均匀分布在距要地约 600 km 的圆弧上，2 部 UHF 远程预警雷达布设于其外约 850km 处。这一布设既未按射程分层，亦未深远前出，可行覆盖率仅为 0.333，即 12 条弹道中只有 4 条可行。适应度取式(33)的标量化目标 $J=\Phi+\alpha\mathbb{E}[S]+\beta S_{\mathrm{wc}}$，取 $\alpha=0.25$、$\beta=0.10$ 使 Φ 主导，并以连续评分在 Φ 的等值区上提供搜索方向。在 6 方位×2 射程的全分辨率下以 18 粒子、30 代运行，所得对照如表 7、图 11 所示。

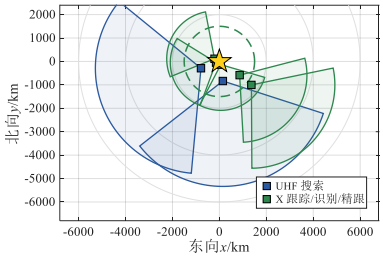
表 7 四种部署形态的全族指标对照

Table 7　Comparison of family-level metrics across four deployment forms

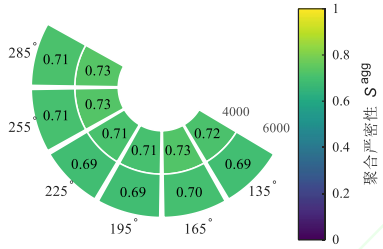
部署形态	N	Φ	$\mathbb{E}[S]$	S_{wc}
集中式部署	8	0.333	0.592	0.460
前出分层基准部署	7	0.583	0.589	0.436
原位增设补强	10	0.583	0.639	0.472
PSO 优化后	8	1.000	0.709	0.688

注：各形态均在 6 方位×2 射程共 12 条威胁族上评估；N 为雷达数。

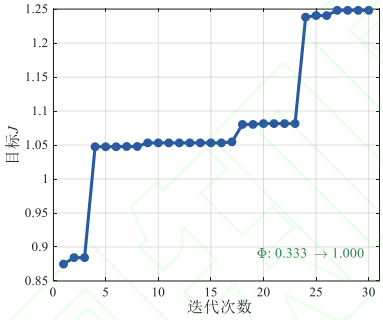
由表 7 与图 11 可见，可行覆盖率由集中式部署的 0.333 跃升至 1.000，实现全族严密，期望分与最坏分亦一并上升，优化解在三项指标上均严格优于其余三种部署形态，可行性的提升没有牺牲覆盖质量；其收敛过程呈阶梯式跃升（图 11(c)）。图 11(b)逐向给出优化解各弹道的聚合严密性，12 条全部可行，直观印证 $\Phi=1.000$ 系任务链逐向时序贯通所致，而非静态扇区铺满。优化器自主收敛到的布站方向是关键所在（图 11(a)）。2 部 UHF 搜索雷达的法向被分别重瞄至责任弧两端以覆盖全方位起批；X 波段雷达则一部居中担负终端全向跟踪/识别/精跟，数部部署在中近程提供各向火控级精跟，另有 1 部沿东南向前出至距要地约 1700km，使该向远程目标在中段过顶时落入其识别档作用距离、完成一次判性；5.2 节诊断的西翼缺口（195°、255°、285°）则由重瞄至该向的 UHF 搜索雷达与近程 X 协同补齐，其识别由要地全向 X 在目标进入识别档后完成。各薄弱方向由此分别重建连续覆盖、使相邻雷达交接成链，且优化器并未把识别雷达前推至其成像距离之外。这表明该闭环有效，优化沿诊断所指的方向收敛，并以 8 部雷达达成前沿分布式策略需 11 部才能实现的全向严密。



(a) 优化后部署布局



(b) 优化解逐向可行性



(c)目标函数收敛历史

图 11 评估—诊断—优化闭环的优化结果
Fig.11 Results of the assess–diagnose–optimize loop

5.3.3 识别按一次性事件判定的必要性

3.2 节已论证识别本质上是一次性事件。判性一次即可转入精跟，无须像火控守候那样全程维持，因此本文未将识别纳入连续守候任务集 $\mathcal{T}_{\text{cust}}$。为说明这一设定的必要性，做一次消融对照，将识别误并入连续守候（令 $\mathcal{T}_{\text{cust}}=\{S,T,I,P\}$）后，以同样 8 部雷达重新优化。此时 PSO 最优解止步于 $\Phi=0.833$，东南 135°两条弹道被判不可行，失败维度为识别，因目标高速穿越前出波束时识别窗口出现超限间断。但这两条弹道的顶点高度（约 568–900km）远在识别档作用距离（约 1005km）以内，中段确有完成一次成像判性的机会，该不可行仅因施加了识别须全程连续这一过严约束所致。恢复 $\mathcal{T}_{\text{cust}}=\{T,P\}$后，同样 8 部雷达即把 135°两条纳入可行，$\Phi$ 回升至 1.000。可见将识别按一次性事件判定，是任务链可行性评估不可省略的设定。若按持续守候处理，会把中段确可判性的方向误判为缺口。

5.4 与现有评估方法的对照

本节以文献[20]的改进 FAHP 为对照。该法对预警探测方案打分优选，准则层为探测、识别、跟踪、拦截引导与抗干扰五项，不含雷达间交接，其中抗干扰不在本文晴空、无干扰的基准之内，未予建模。对照使用同一指标集与同一批部署形态，只移植其权重导出与加权综合两步，并以本文的严密性分量替代专家评语打分。该法的判断矩阵由各维重要性评分唯一确定。为免结论依赖某一组权重，对 1–9 分内的全部评分组合逐一构造矩阵并以方根法求权，得一致性比率（consistency ratio, CR）小于 0.1 者 26 281 组。结果见表 8。

表 8 三种部署变更的可行覆盖率与 FAHP 综合分对照

Table 8 Comparison of feasible coverage rate and FAHP aggregate score under three deployment changes

部署变更	可行覆盖率	FAHP 综合分
基准→补强	0.583→0.583 逐条弹道不变	全部判更优，升幅 1.10%～25.82%
基准→集中式	0.583→0.333	变化−12.37%～+25.45%，其中 59.6%判更优
补强→PSO 优化	0.583→1.000	97.7%判更优

补强较基准增设 3 部雷达，12 条弹道的可行性逐条未变，薄弱方向仍是同样五条，而 26281 组权重无一例外判补强更优，即便把重要性几乎全给时间与任务两维（评分 3,9,9,1,1），综合分仍由 0.882 升至 0.892。集中式的情形相反，其可行弹道由 7 条减至 4 条，可行覆盖率降低 42.9%，而综合分降幅最多 12.4%，不到可行覆盖率降幅的一半，多数权重甚至将其排在基准之前。补强与 PSO 优化之间两类判据排序一致，分歧只出现在前两种变更上。两者的成因在于，文献[20]的指标中不含雷达间交接，而 5.2 节诊断出的五条薄弱环节全部落在交接维，缺口恰在其指标之外；加权综合中任一维度的不足又可由其余维度弥补，无法表达任一条件不成立即判不严密的要求，此点由聚合形式决定，与权重取值无关。以弹道覆盖率、持续跟踪率一类标量为单一目标择优的方法[7-9]受同一限制，在本算例上相当于按表 6 增加雷达数，此类标量随雷达数持续改善，而 Φ 在 $5\le N\le 16$ 恒为 0.583，据此择优会不断增设雷达，按本文判据择优则改从站位几何入手，8 部即达 1.000，所需雷达数反而更少。

5.5 讨论与局限

由表 7 的四种部署形态可见两点。其一，覆盖质量与任务可行性相互解耦。期望严密性 $\mathbb{E}[S]$ 与最坏情形 S_{wc} 随雷达数提高，而反映任务链能否贯通的 Φ 始终不变，因此仅凭 $\mathbb{E}[S]$ 会系统性高估部署的任务可行性，唯有非补偿硬可行性条件才能定位真正的薄弱环节。其二，站位几何较雷达数量更具主导作用。原位增设至 16 部，Φ 仍为 0.583，而联合优化站位与朝向仅需 8 部即达 1.000；可行覆盖率的提高只发生在站位几何被改变时，单纯增设雷达只提高补偿型评分。决定严密与否的，是雷达能否被放到缺口方向，并使相邻雷达沿弹道成链、使中段弹道落入识别档作用距离；数量则在其次。这一主次关系以本算例薄弱环节在于任务交接未成链、探测能力本已够用为前提，也提示真实体系中前沿基地宜担负探测与跟踪，火控级精跟与识别须由作用距离能够覆盖的中近程雷达承担；文中绝对距离仅为示例，不应外推为真实部署距离。

本文评估的是传感器层的覆盖严密性，不涉及拦截环节，Φ 不应被解读为拦截率。本算例逐弹道独立评估，未计同时多目标与波束竞争，Φ 亦不代表抗饱和能力；识别未含诱饵与弹头鉴别，交接未含最优指派，弹道仅取经典三阶段，量测精度以 CRLB 下界近似而偏乐观。

本算例取平地与晴空假设，地形因子 $\mathbf{1}_{\mathrm{mask}}\equiv 1$，未计地形遮蔽、多径效应、云雨衰减、雨杂波与有源干扰；这些因素可分别经式(4)的系统综合损耗与式(6)的可检测因子代入，判据不变，但基准结果不宜直接外推。上述简化不改变本文的定性结论；其中抗饱和与诱饵鉴别两项，在工程落地前应予优先补强。

6 结论

1）本文面向任务需求建立了反导预警雷达部署覆盖严密性评估方法，给出任务链可行性判定（Feas）、严密性指标（Φ）与薄弱环节诊断流程，可对部署作定量评估与缺口定位。

2）算例表明，覆盖质量与任务可行性解耦。雷达数增至 16 部，Φ 仍止步于 0.583；本算例的可行性瓶颈在于任务交接未成链，唯改进站位几何方能提升可行覆盖率，可见站位几何较数量更具主导作用。

3）以粒子群算法联合优化站位与朝向，8 部即把可行覆盖率由集中式部署的 0.333 提升至 1.000，并经消融对照确认识别须按一次性事件判定，验证了所提评估—诊断—优化方法的有效性。

本文评估以 CRLB 为偏乐观下界，未含抗饱和；后续将引入工程级精度与多目标竞争模型，并拓展至天基红外等异构传感资源协同部署的严密性评估。

参考文献（References）

[1] 刘伟，刘昌云，陈晨，等．反导预警装备部署方法综述[J]．探测与控制学报，2022，44（3）：27-33．
LIU W,LIU C Y,CHEN C,et al.A review on anti-missile early warning equipment deployment methods[J].Journal of Detection & Control,2022,44(3):27-33(in Chinese).

[2] 韩晋山，邢建平，张浩，等．美国导弹预警系统的发展现状与趋势分析[J]．科技导报，2019，37（4）：91-95．
HAN J S,XING J P,ZHANG H,et al.Development of American missile early warning system[J].Science & Technology Review,2019,37(4):91-95(in Chinese).

[3] Center for Strategic and International Studies.Sensor systems[EB/OL].[2026-06-20].https://missilethreat.csis.org/system_tax/sensors/.

[4] U.S. Missile Defense Agency.Sensors[EB/OL]. [2026-06-20]. https://www.mda.mil/system/sensors.html.

[5] 盖美庆，闫世强，马梁，等．基于改进 ADC 模型的反导预警雷达作战效能评估[J]．现代雷达，2020，42（3）：20-24．
GAI M Q,YAN S Q,MA L,et al.Operational effectiveness evaluation of anti-ballistic-missile EWR based on improved ADC model[J].Modern Radar,2020,42(3):20-24(in Chinese).

[6] 王远，贡岩，刘立业．基于两层三模超网络的区域防空作战体系分析[J]．系统工程与电子技术，2025，47（1）：182-190．
WANG Y,GONG Y,LIU L Y.Analysis of regional air defense combat system based on supernetwork with two layers and three modes[J].Systems Engineering and Electronics,2025,47(1):182-190(in Chinese).

[7] 付鑫，张峰，冯占林．基于并行计算的混沌遗传算法对反导预警雷达部署优化研究[J]．中国电子科学研究院学报，2016，11（3）：276-282．
FU X,ZHANG F,FENG Z L.Research of chaos genetic algorithm based on parallel computing for anti-missile warning radar disposition[J].Journal of China Academy of Electronics and Information Technology,2016,11(3):276-282(in Chinese).

[8] PAN W,ZHENG L F,HUANG F,et al.Optimal deployment of radar network based on chaos genetic algorithm[C]//Proceedings of the 2019 Chinese Control and Decision Conference(CCDC).Piscataway:IEEE Press,2019:6096-6101.

[9] 刘伟，刘昌云，郭相科，等．复杂多方向威胁下的导弹预警雷达优化部署方法[J]．北京航空航天大学学报，2024，50（4）：1392-1404．
LIU W,LIU C Y,GUO X K,et al.Deployment optimization method for missile early warning radar under complex and multi-directional missile threats[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2024,50(4):1392-1404(in Chinese).

[10] HAN Y,LI X T,ZHANG T X,et al.Multi-static radar system deployment within a non-connected region utilising particle swarm optimization[J].Remote Sensing,2024,16(21):4004.

[11] 田桂林，刘昌云，高嘉乐，等．基于烟花算法的多传感器优化模型部署[J]．系统工程与电子技术，2019，41（8）：1742-1748．
TIAN G L,LIU C Y,GAO J L,et al.Multi-sensor optimal disposition model based on fireworks algorithm[J].Systems Engineering and Electronics,2019,41(8):1742-1748(in Chinese).

[12] RAO D V,RAVISHANKAR M.A methodology for optimal deployment and effectiveness evaluation of air defence resources using game theory[J].Sādhanā,2020,45(1):60.

[13] HO E,RAJAGOPALAN A,SKVORTSOV A,et al.Game theory in defence applications:A review[J].Sensors,2022,22(3):1032.

[14] 杨善超，田康生，吴卫华，等．反导预警相控阵雷达网目标分配方法[J]．北京航空航天大学学报，2020，46（7）：1325-1334．
YANG S C,TIAN K S,WU W H,et al.Target assignment method for phased array radar network in anti-missile early warning[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2020,46(7):1325-1334(in Chinese).

[15] 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．
YI W,YUAN Y,LIU G H ,et al. Recent advances in multi-radar collaborative surveillance: Cognitive tracking and resource scheduling algorithms[J].Journal of Radars,2023,12(3):471-499(in Chinese).

[16] 邢怀玺，邢清华．一种组网雷达烁探测优化调度模型[J]．北京航空航天大学学报，2024，50（12）：3884-3893．
XING H X,XING Q H.An optimal scheduling model for scintillation detection of netted radars[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2024,50(12):3884-3893(in Chinese).

[17] 董晨，帅逸仙，周金鹏，等．网络化多传感器-多武器协同防空任务规划[J]．系统工程与电子技术，2022，44（12）：3738-3746．
DONG C,SHUAI Y X,ZHOU J P,et al.Cooperative air defense task planning of networked multi-sensor-multi-weapon[J].Systems Engineering and Electronics,2022,44(12):3738-3746(in Chinese).

[18] KIM J,CHO D H,LEE W C,et al.Optimal target assignment with seamless handovers for networked radars[J].Sensors,2019,19(20):4555.

[19] 齐铖，谢军伟，张浩为，等．基于防空目标探测与跟踪的雷达资源管理技术研究综述[J]．信号处理，2024，40（11）：1972-1989．
QI C,XIE J W,ZHANG H W,et al.Review of radar resource management technology for air defense target detection and tracking[J].Journal of Signal Processing,2024,40(11):1972-1989(in Chinese).

[20] ZHENG Y,YAN S,QU S,et al.Research on design and evaluation method of anti-missile early warning and detection plan[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference(ITNEC).Piscataway:IEEE Press,2021:864-867.

[21] QU S,MENG C Z,JIN H B,et al.A design and intelligent recommendation method for ballistic missile early warning operation plan[J].International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence,2023,37(16):2359024.

[22] 蒋春山，周天卫，周园明．电子战对宙斯盾舰反导能力的降效作用分析[J]．中国电子科学研究院学报，2020，15（12）：1180-1185．
JIANG C S,ZHOU T W,ZHOU Y M.Analysis of electronic warfare on anti-missile capability of the Aegis ship[J].Journal of China Academy of Electronics and Information Technology,2020,15(12):1180-1185(in Chinese).

[23] 杨子成，鲜勇，李少朋，等．基于学习的中段反导拦截时间和拦截点预测方法[J]．北京航空航天大学学报，2021，47（11）：2360-2368．
YANG Z C,XIAN Y,LI S P,et al.Prediction method of intercept time and intercept point based on learning mid-course antimissile[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2021,47(11):2360-2368(in Chinese).

[24] GlobalSecurity.org.Ground based radar(GBR)/X-band radar(XBR)[EB/OL].[2026-06-20].https://www.globalsecurity.org/space/systems/gbr.htm.

[25] Raytheon(RTX).LTAMDS:Lower tier air and missile defense sensor[EB/OL].[2026-06-20].https://www.rtx.com/raytheon/what-we-do/integrated-air-and-missile-defense/ltamds.

[26] SKOLNIK M I.Introduction to radar systems[M].3rd ed.New York:McGraw-Hill,2001.

[27] RICHARDS M A.Fundamentals of radar signal processing[M].2nd ed.New York:McGraw-Hill,2014.
[28] LEWIS G,POSTOL T.Ballistic missile defense:Radar range calculations for the AN/TPY-2 X-band and NAS proposed GBX radars[EB/OL].(2012-09-21)[2026-06-20].https://mostlymissiledefense.com/2012/09/21/ballistic-missile-defense-radar-range-calculations-for-the-antpy-2-x-band-and-nas-proposed-gbx-radars-september-21-2012/.
[29] BAR-SHALOM Y,LI X R,KIRUBARAJAN T.Estimation with applications to tracking and navigation[M].New York:Wiley,2001.
[30] 李开明，张袁鹏，罗迎，等．弹道导弹雷达目标识别研究进展[J]．系统工程与电子技术，2025，47（9）：2870-2889．
LI K M,ZHANG Y P,LUO Y,et al.Research progress on radar target recognition of ballistic missile[J].Systems Engineering and Electronics,2025,47(9):2870-2889(in Chinese).
[31] 马梁．弹道中段目标微动特性及综合识别方法[D]．长沙：国防科学技术大学，2011．
MA L.The micro-motion characteristic and combining classification of ballistic target[D].Changsha:National University of Defense Technology,2011(in Chinese).
[32] 何友，修建娟，关欣，等．雷达数据处理及应用[M]．3版．北京：电子工业出版社，2013．
HE Y,XIU J J,GUAN X,et al.Radar data processing with applications[M].3rd ed.Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2013(in Chinese).
[33] WANG Z Y,WANG M,WU X H,et al.Multi-node small radar network deployment optimization in 3D terrain[J].Sensors,2025,25(7):1964.
[34] 李光明，唐业敏，蒋苏蓉．雷达网反隐身性能评估—雷达网综合发现概率[J]．现代雷达，2006（1）：23-25．
LI G M,TANG Y M,JIANG S R.Performance evaluation of radar network for counterchecking stealth aircraft comprehensive detecting probability of radar network[J].Modern Radar,2006(1):23-25(in Chinese).
[35] 刘卓承，张云雷，刘涛，等．基于 DEM 数据和遗传算法的对海雷达部署优化研究[J]．指挥控制与仿真，2023，45（3）：113-118．
LIU Z C,ZHANG Y L,LIU T,et al.Research on optimization of seaside radar deployment based on DEM data and GA[J].Command Control & Simulation,2023,45(3):113-118(in Chinese).