

doi: 10.7690/bgzdh.2025.10.011

综合噪声干扰条件下防空雷达协同配置优化模型

雷中原¹, 刘永兰², 李凌鹏²

(1. 军事科学院战略评估咨询中心, 北京 100091; 2. 空军预警学院, 武汉 430019)

摘要: 针对防空预警面临的综合噪声干扰威胁, 建立防空雷达协同配置优化模型。在分析传统的防空雷达抗干扰探测距离模型的基础上, 针对性给出远程压制干扰、伴随支援干扰和自卫干扰条件下的探测距离解析模型, 归纳建立综合噪声干扰条件下的雷达通用探测距离模型; 提出遍历搜索和黄金分割法相结合的求解方法, 运用典型实例进行验证。实例分析结果表明: 所建模型和方法有效可行, 能够明显提高防空雷达网的抗综合噪声干扰能力, 对防空雷达组网布站的研究与实践具有一定的借鉴意义。

关键词: 综合噪声干扰; 防空雷达; 空域协同; 配置优化

中图分类号: E911; TN958; TN974 **文献标志码:** A

Optimization Model of Air Defense Radar Cooperative Allocation Under Condition of Integrated Noise Jamming

Lei Zhongyuan¹, Liu Yonglan², Li Lingpeng²

(1. Strategic Assessments and Consultation Institute, Academy of Military Science, Beijing 100091, China;

2. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Aiming at the comprehensive noise jamming threat faced by air defense early warning, an optimization model of air defense radar cooperative allocation is established. Based on the analysis of the traditional anti-jamming detection range model of air defense radar, the analytical models of detection range under the conditions of long-range suppression jamming, accompanying support jamming and self-defense jamming are given, and the general detection range model of radar under the condition of comprehensive noise jamming is summarized and established. A solution method combining ergodic search and golden section method is proposed and verified by typical examples. The example analysis results show that the model and method are effective and feasible, and can significantly improve the anti-noise jamming ability of air defense radar network, which has a certain reference significance for the research and practice of air defense radar network deployment.

Keywords: integrated noise jamming; air defense radar; airspace coordination; configuration optimization

0 引言

噪声干扰是防空雷达面临的主要电磁威胁, 包括远程压制干扰、伴随支援干扰、自卫干扰 3 种样式^[1]。空域协同是防空雷达抗噪声干扰的重要方式^[2]。优化配置是提高防空雷达网探测能力的基本途径^[3]。国内学者高度重视雷达抗噪声干扰问题研究, 相关文献主要集中于从技术方法视角对雷达探测模型、能力评估、部署算法 3 方面进行探讨, 其中文献[4-7]分别构建了单个或多个干扰机干扰条件下的雷达探测距离模型, 文献[8-10]围绕雷达作战能力评估问题进行了探讨, 文献[11-12]分别提出了适用于地基有源雷达网、海上机动编队雷达网的抗干扰部署优化模型。在上述研究基础上, 笔者针对防空雷达空域协同抗综合噪声干扰现实问题, 从作战计算视角, 抓住 2 个雷达的协同配置距离优化

这个关键, 区分不同噪声干扰样式构建雷达探测距离计算模型, 区分不同空域协同抗干扰方式构建配置优化模型, 提出模型快捷计算方法, 并运用典型实例进行验证分析, 为防空雷达的协同配置优化提供操作性强的科学方法支撑。

1 防空雷达空域协同抗干扰问题描述

当雷达网中一部雷达受主瓣干扰时, 未受干扰或受干扰程度较轻的雷达以侧向支援的方式进行空域协同抗干扰, 如图 1 中雷达 2 对雷达 1。当雷达和干扰机因为地球曲率的制约不可视时, 雷达接受到的干扰信号将大大减弱, 可认为是零, 可将支援雷达部署在干扰机地球曲率直视范围外, 实行纵向空域协同抗干扰, 但此时主要对中空高空目标有效, 如图 1 中雷达 3 对雷达 1。综上所述, 空域协同抗

收稿日期: 2024-10-06; 修回日期: 2024-11-12

第一作者: 雷中原(1980—), 男, 湖北人, 博士。

噪声干扰可归纳为 2 种方式：侧向支援抗干扰和纵向支援抗干扰。

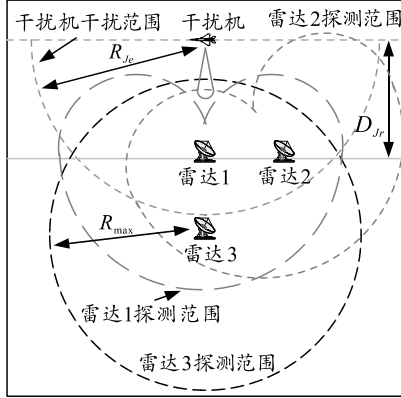


图 1 雷达空域协同抗噪声干扰

$$R_{jn} = \left[\frac{P_i G_i^2 \sigma D L^{-1} \lambda^2}{(4\pi K_{\min}^{-1} \sum_{i=1}^n P_{ji} G_j(\varphi_i) G_i(\theta_i) \gamma_{ji} B_i B_{ji}^{-1} L_{rji}^{-1} \lambda^2 R_{ji}^{-2} + (4\pi)^3 k T B F(S / N_0)_{\min})} \right]^{1/4} \quad (1)$$

式中：\$n\$ 为干扰机数量；对于第 \$i\$ 架干扰机，\$P_{ji}\$ 为辐射功率；\$G_j(\varphi_i)\$ 为在雷达方向的增益；\$\varphi_i\$ 为主瓣方向与该干扰机到雷达连线方向的夹角；\$G_i(\theta_i)\$ 为雷达在干扰机方向的增益；\$\theta_i\$ 为雷达与目标连线和雷达与干扰机连线之间的夹角；\$\gamma_{ji}\$ 为干扰信号对雷达天线的极化损失；\$R_j\$ 为干扰机至雷达的距离；\$B_j\$ 为干扰机带宽；\$B_i\$ 为接收机带宽；\$L\$ 为雷达信号传输的系统损耗；\$L_{rj}\$ 为干扰信号的系统损耗；\$K_{\min}\$ 为雷达检测信号的最小干信比，对于自动雷达，\$K_{\min} \approx 1.5 \sim 2\$。

\$G_j(\varphi)\$ 可以直接由干扰机天线方向图确定，当方向图未知时，可由下式近似计算^[4-7]，即：

$$G_j(\varphi) = \begin{cases} G_j & 0 \leq \varphi \leq \varphi_{0.5}/2 \\ K_1 (\varphi_{0.5}/\varphi)^2 G_j & \varphi_{0.5}/2 < \varphi < 90^\circ \\ K_1 (\varphi_{0.5}/90)^2 G_j & \varphi \geq 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中：\$G_j\$ 为干扰机天线主瓣方向增益；\$\varphi_{0.5}\$ 为干扰机波瓣宽度；\$K_1\$ 为常数，取 \$0.04 \sim 0.10\$。

\$G_i(\theta)\$ 可直接由雷达天线方向图确定，当方向图未知时，令 \$\theta_{0.5}\$ 为雷达天线波瓣宽度，将 \$\theta_{0.5}\$ 和 \$\theta\$ 代入式(2)即可算得对应的 \$G_i(\theta)\$ 值。由式(1)、(2)可知：\$\varphi\$ 和 \$\theta\$ 的值越大，雷达的探测距离就越大，防空雷达空域协同抗干扰配置优化的基本原理就是要使 \$\varphi\$ 和 \$\theta\$ 尽量大。

2.2 远程压制干扰条件下的探测距离模型

令 \$\Delta_1 = 4\pi K_{\min}^{-1} P_j G_j G_i \gamma_{ji} B_i B_{ji}^{-1} L_{rj}^{-1} \lambda^2 R_j^{-2}\$，\$\Delta_2 = (4\pi)^3 k T B F(S / N_0)_{\min}\$，\$m = \Delta_1 / \Delta_2\$，\$\varepsilon = G_j(\varphi) G_i(\theta) G_j^{-1} G_i^{-1}\$，\$S = [P_i G_i \sigma B_j D L^{-1} K_{\min} / (4\pi P_j G_j \gamma_{ji} B_i L_{rj}^{-1})]^{1/4}\$。\$\Delta_1\$ 为雷达

1.1 侧向支援抗干扰

支援雷达与被干扰雷达沿干扰机的干扰正面进行部署，通过合理的距离间隔实现相互支援，提高主干扰方向的探测距离，适用于线状部署。

1.2 纵向支援抗干扰

支援雷达部署在被干扰雷达后，通过合理的部署纵深实现对被干扰雷达的支援，提高主干扰方向的探测距离，适用于多层部署。

2 综合噪声干扰条件下雷达探测距离模型

2.1 基本模型

噪声干扰条件下，雷达的自卫距离为^[4-7]：

接受到的干扰机噪声功率系数，主要受雷达与干扰机距离 \$R_j\$ 的影响；\$\Delta_2\$ 为雷达的内部噪声系数；\$\varepsilon\$ 为雷达抗干扰空域系数，主要受 \$\theta\$ 和 \$\varphi\$ 的影响；\$m\$ 为干噪比；\$S\$ 为雷达的固有抗干扰系数，由雷达和干扰机性能参数决定。当雷达和干扰机的性能参数确定时，\$S\$ 为常数，雷达距离方程为关于 \$R_j\$、\$\theta\$ 和 \$\varphi\$ 的函数；当雷达和干扰机的配置位置确定时，\$\Delta_1\$、\$\Delta_2\$、\$S\$、\$m\$ 均已知，\$\varepsilon\$ 为关于 \$\theta\$ 的一元函数，雷达距离方程为关于 \$\theta\$ 的函数。据此，远程支援干扰条件下雷达探测距离模型可变换为如下的形式：

$$R_i = (1 + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i m_i)^{-1/4} R_{\max} \quad (3)$$

当雷达和干扰机副瓣增益未知时，\$\varepsilon\$ 的近似计算公式为：

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 & 0 \leq \varphi \leq \varphi_{0.5}/2, 0 \leq \theta \leq \theta_{0.5}/2 \\ K_1 \varphi_{0.5}^2 \varphi^{-2} & \varphi_{0.5}/2 < \varphi < 90^\circ, 0 \leq \theta \leq \theta_{0.5}/2 \\ 90^{-2} K_1 \varphi_{0.5}^2 & \varphi \geq 90^\circ, 0 \leq \theta \leq \theta_{0.5}/2 \\ K_2 \theta_{0.5}^2 \theta^{-2} & 0 \leq \varphi \leq \varphi_{0.5}/2, \theta_{0.5}/2 < \theta < 90^\circ \\ K_1 K_2 \varphi_{0.5}^2 \varphi^{-2} \theta_{0.5}^2 \theta^{-2} & \varphi_{0.5}/2 < \varphi < 90^\circ, \theta_{0.5}/2 < \theta < 90^\circ \\ 90^{-2} K_1 K_2 \varphi_{0.5}^2 \theta_{0.5}^2 \theta^{-2} & \varphi \geq 90^\circ, \theta_{0.5}/2 < \theta < 90^\circ \\ 90^{-2} K_2 \theta_{0.5}^2 & 0 \leq \varphi \leq \varphi_{0.5}/2, \theta \geq 90^\circ \\ 90^{-2} K_1 K_2 \varphi_{0.5}^2 \theta_{0.5}^2 \theta^{-2} & \varphi_{0.5}/2 < \varphi < 90^\circ, \theta \geq 90^\circ \\ 90^{-4} K_1 K_2 \varphi_{0.5}^2 \theta_{0.5}^2 & \varphi \geq 90^\circ, \theta \geq 90^\circ \end{cases} \quad (4)$$

2.3 伴随(自卫)干扰条件下的探测距离模型

对于伴随支援干扰，可以近似地认为干扰机配置在一个大目标上，这样可以将它在一定程度上看作自卫干扰。对于伴随干扰和自卫干扰，由于目标

距离和干扰距离相同, 可将式(1)转化为如下形式:

$$R_c = [\varepsilon S^{-4} R_c^{-2} + R_{\max}^{-4}]^{-1/4}. \quad (5)$$

当干扰机副瓣增益未知时, ε 可按下式近似计算:

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 & 0 \leq \varphi \leq \varphi_{0.5}/2 \\ K_1 \varphi_{0.5}^2 \varphi^{-2} & \varphi_{0.5}/2 < \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式(5)中 R_c 为雷达的探测距离, 该公式为关于 R_c 的高次方程, 解得其探测距离方程为:

$$R_c = \sqrt{2} [S^{-4} \varepsilon + \sqrt{S^{-8} \varepsilon^2 + 4 R_{\max}^{-4}}]^{-1/2}. \quad (7)$$

2.4 综合干扰条件下的探测距离模型

实际作战中, 远程支援干扰和伴随干扰、自卫干扰往往是同时存在的。将式(1)转化可得到:

$$R_s = \left[\sum_{i=1}^n \varepsilon_i m_i + 1 + \varepsilon_j S^{-4} R_{\max}^4 R_s^{-2} \right]^{-1/4} R_{\max}. \quad (8)$$

式中 ε_i 、 ε_j 分别为远程支援干扰和伴随(自卫)干扰的雷达抗干扰空域系数。

解得其探测距离模型为:

$$R_s = \sqrt{2} \left[S^{-4} \varepsilon_j + \sqrt{S^{-8} \varepsilon_j^2 + 4 \left(1 + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i m_i \right) R_{\max}^{-4}} \right]^{-1/2}. \quad (9)$$

当无伴随干扰和自卫干扰时, $\varepsilon_j=0$, 式(9)转化为式(3); 当无远程支援干扰存在时, $\varepsilon_i=0$, 式(9)转化为式(7)。式(3)和(7)均为式(9)的特例。

2.5 地球曲率对干扰机有效干扰范围的影响

假设干扰机与雷达不可视时, 不存在干扰。设雷达天线的配置高度为 H_r , km; 干扰机的巡逻高度为 H_j , km; 干扰机对雷达的最大有效作用距离为:

$$R_e = 130(\sqrt{H_r} + \sqrt{H_j}). \quad (10)$$

于是雷达的自卫距离可表示为:

$$R_{\min j} = \begin{cases} R_j & D_{jr} \leq R_e \\ R_{\max} & D_{jr} > R_e \end{cases}. \quad (11)$$

式中 R_j 为雷达在有效干扰范围内的自卫距离。

3 侧向支援抗干扰配置优化模型

以被干扰雷达为原点, 主干扰方向为 y 轴建立直角坐标系, 如图 2 所示。 D_{ij} 为两雷达之间的距离, φ_j 为干扰机主波瓣方向与雷达 j 之间的夹角, θ_j 为雷达 j 的主波瓣方向。对于远程支援干扰, D_i 为雷达 i 与干扰机之间的距离, 为已知量; 对于伴随干扰和自卫干扰, D_i 为目标的暴露距离, 为未知量。

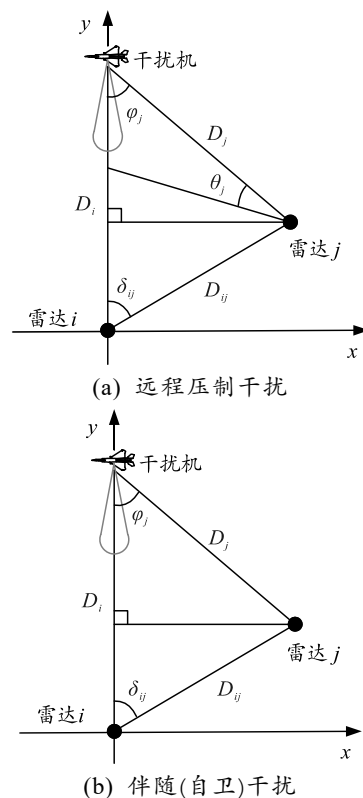


图 2 侧向支援抗干扰

3.1 远程压制干扰条件下配置优化模型

设雷达 j 的噪声系数比为 m_j , 最大探测距离为 $R_{\max j}$, 则雷达 j 对雷达 i 主瓣方向的掩护距离满足以下函数关系:

$$R_{ij} \sin(\theta_j + \varphi_j) = D_{ij} \sin \delta_{ij}. \quad (12)$$

雷达 j 在雷达 i 与干扰机连线方向的有效探测距离为:

$$y_{ij} = D_{ij} \sin \delta_{ij} \cot(\theta_j + \varphi_j) + D_{ij} \cos \delta_{ij}. \quad (13)$$

支援加强距离是指在干扰机主瓣方向, 支援雷达的掩护距离与被支援雷达自卫距离的差值。雷达 j 对雷达 i 在干扰机主瓣方向的支援加强距离为:

$$\Delta_{ij} = y_{ij} - R_{li}. \quad (14)$$

$\Delta_{ij} > 0$ 时, 雷达 j 对雷达 i 具有支援加强作用。据雷达配置实际, 可近似认为 $\delta_{ij} = 90^\circ$, 支援雷达在干扰机有效干扰范围内时, 有:

$$\begin{aligned} \max \quad & D_{ij} \cot[\theta_j + \varphi_j]; \\ \text{st.} \quad & R_j \sin[\varphi_j] = D_{ij}, \\ & \theta_j \in [0, \pi/2 - \varphi_j], \\ & D_{ij} \in \left[0, \min \left\{ R_{\max j}, \sqrt{R_{je}^2 - D_i^2} \right\} \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $\varphi_j = \arctan(D_{ij}/D_i)$, 当支援雷达在干扰机有效干扰范围外时, 支援雷达在干扰机主瓣方向的探测距离为:

$$y_{ij} = \begin{cases} \sqrt{R_{\max j}^2 - D_{ij}^2} & R_j > R_{Je} \text{ 且 } R_{\max j} > D_{ij} \\ 0 & R_{\max j} \leq D_{ij} \end{cases} \quad (16)$$

式(15)为关于 θ_j 、 D_{ij} 的二元非线性规划模型，采用 2 维搜索法求解，求解流程如图 3 所示。

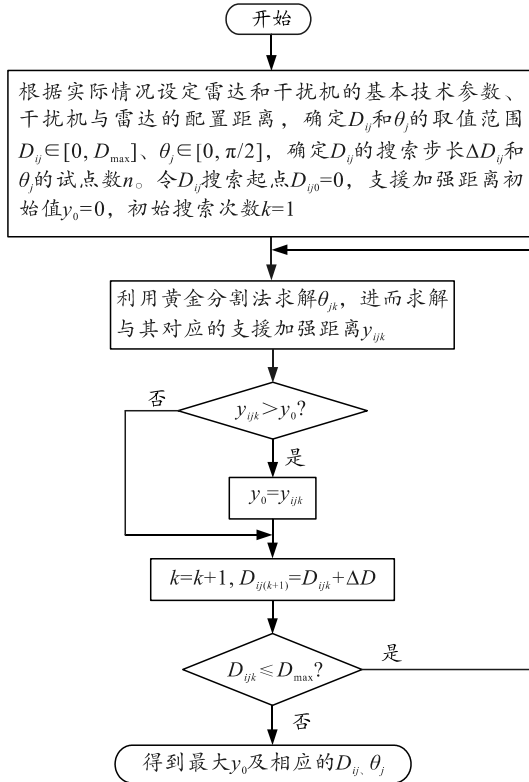


图 3 侧向支援抗干扰最佳配置间距求解流程

3.2 伴随(自卫)干扰条件下配置优化模型

伴随(自卫)干扰条件下，雷达 j 对雷达 i 主瓣方向的掩护距离满足以下函数关系：

$$R_{cj} \sin \varphi_j = D_{ij} \sin \delta_{ij} \quad (17)$$

式中 R_{cj} 由式(7)计算得到。支援雷达在中心站—干扰机连线方向的有效探测距离为：

$$y_{ij} = R_{cj} \cos \varphi_j + D_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (18)$$

雷达 j 对雷达 i 在干扰机主瓣方向的支援加强距离为：

$$\Delta_{ij} = y_{ij} - R_{ci} \quad (19)$$

在雷达 i 位置确定情况下，雷达 j 位置的优选即是确定 D_{ij} 和 δ_{ij} ，使 y_{ij} 最大，根据雷达配置的实际情况，可近似认为 $\delta_{ij} = 90^\circ$ ，于是可建立如下规划模型：

$$\begin{aligned} \max \quad & R_{cj} \cos \varphi_j \\ \text{st.} \quad & R_{cj} \sin \varphi_j = D_{ij} \\ & \varphi_j \in [0, \pi/2] \\ & D_{ij} \in [0, R_{\max j}] \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)中含有 2 个相关变量 D_{ij} 和 φ_j ，求解方法及流程同图 3 所示。

3.3 综合干扰条件下配置优化模型

同理，结合式(9)和(20)可建立其配置优化模型为：

$$\begin{aligned} \max \quad & R_{sj} \cos \varphi_j ; \\ \text{st.} \quad & R_{sj} \sin \varphi_j = D_{ij} , \\ & \varphi_j \in [0, \pi/2] , \\ & D_{ij} \in [0, R_{\max j}] \end{aligned} \quad (21)$$

式中： D_{ij} 和 φ_j 为 2 个相关变量； R_{sj} 由式(9)计算得到。求解方法及流程同图 3 所示。

3.4 配置距离的确定

对于雷达 i 、 j ，分别求出雷达 i 对雷达 j 的最佳掩护距离 D_{ij} 和雷达 j 对雷达 i 的最佳掩护距离 D_{ji} ，最佳配置间距取两者中的小者，即：

$$D = \min \{D_{ij}, D_{ji}\} \quad (22)$$

4 纵向支援抗干扰配置优化模型

当支援雷达不在干扰机有效干扰范围内时，其探测距离将不受电子干扰的影响。此时支援雷达的配置距离必须满足：

$$D_{ij} \geq R_{Je} - D_i \quad (23)$$

纵向支援抗干扰的判决条件：

$$R_{\max j} \geq R_{Je} - D_i + R_{\min i} \quad (24)$$

式中： $R_{\max j}$ 为支援雷达 j 的最大探测距离； D_i 为中心雷达与干扰机的距离； $R_{\min i}$ 为中心雷达的最小自卫距离。这就要求支援雷达的探测距离比较远，才能对被干扰雷达有支援加强作用。因此纵向支援抗干扰主要适用于中高空中远程警戒雷达。

5 实例分析

对于远程警戒雷达，根据典型情况，作如下假设： $P_j = 100 \text{ kW}$ ， $G_r \approx 3 G_j$ ， $B_j = 30 B_r$ ， $D = 20$ ， $L \approx 2 L_{rj}$ ， $\gamma_j = 0.5$ ， $H_r = 0.05 \text{ km}$ ， $H_j = 10 \text{ km}$ ， $\sigma = 1 \text{ m}^2$ ， $K_{\min} = 2$ ，干扰机波瓣宽度为 30° ，雷达波瓣宽度为 8° ，在 10 km 高度层的最大探测距离为 350 km ，2 部雷达除频率外其他参数一致。在以被支援雷达为原点的直角坐标系中，干扰机和雷达的坐标分别为 $(0, 300)$ 、 $(0, 0)$ ；目标突防航线为干扰与被支援雷达的连线方向，其所带自卫干扰设备的功率 $P_{js} = 1 \text{ kW}$ ， $G_r = 9 G_{js}$ ， $L \approx 2 L_{rjs}$ ， $\gamma_{js} = 0.5$ ，目标高度 $H_{js} = 10 \text{ km}$ 。远程压制干扰

机采取宽带阻塞干扰样式；当 2 部雷达同频时，自卫干扰机采取窄带瞄准干扰模式；当 2 步雷达异频时，自卫干扰机采取宽带阻塞干扰模式。

图 4 为远程压制干扰和综合干扰条件下雷达的探测区仿真。

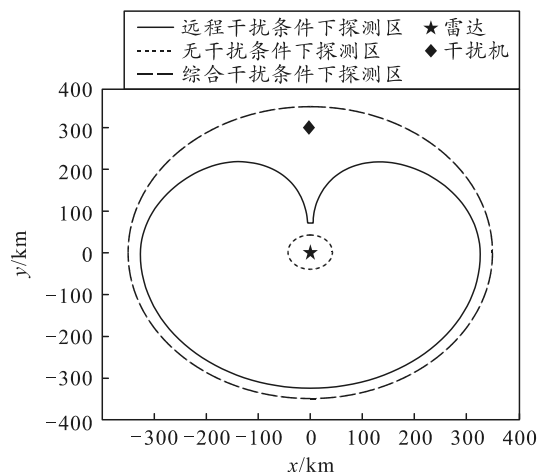


图 4 多种干扰条件下雷达探测区

由图 4 可以看出：综合干扰条件下雷达几乎失去有效探测能力。

图 5-7 为同频雷达侧向支援抗干扰能力仿真。

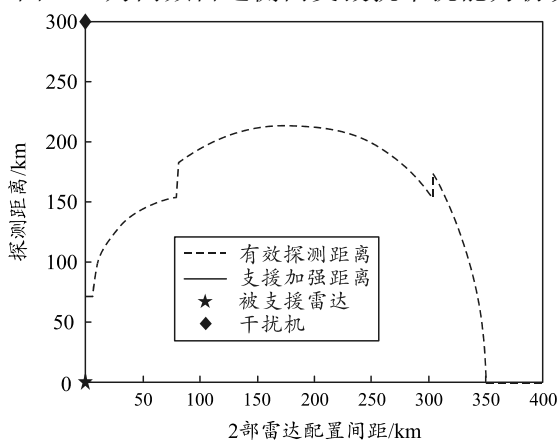


图 5 同频雷达协同抗远程压制干扰能力

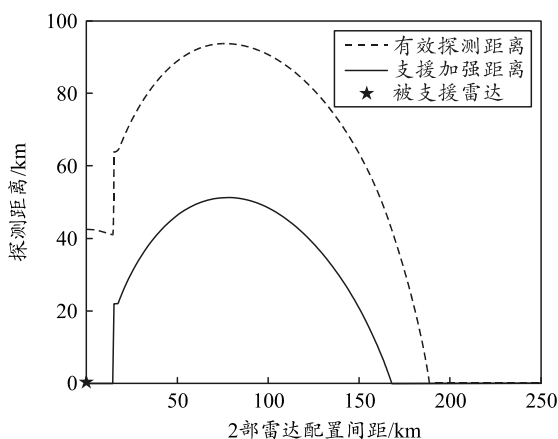


图 6 同频雷达协同抗自卫干扰能力

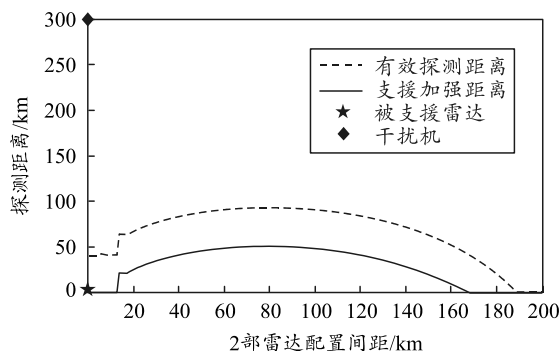


图 7 同频雷达协同抗综合干扰能力

图 8-9 为异频雷达侧向支援抗干扰能力仿真。

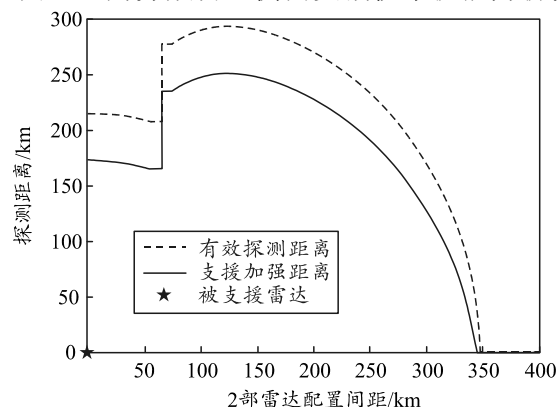


图 8 异频雷达协同抗自卫干扰能力

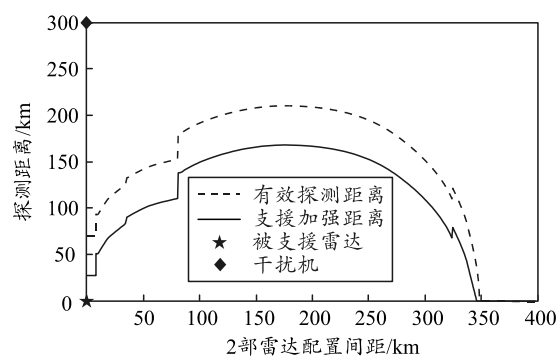


图 9 异频雷达协同抗综合干扰能力

图 10 为纵向支援抗干扰能力仿真。表 1 为与各种干扰条件和抗干扰样式对应的雷达间最佳配置间距及其探测距离值。

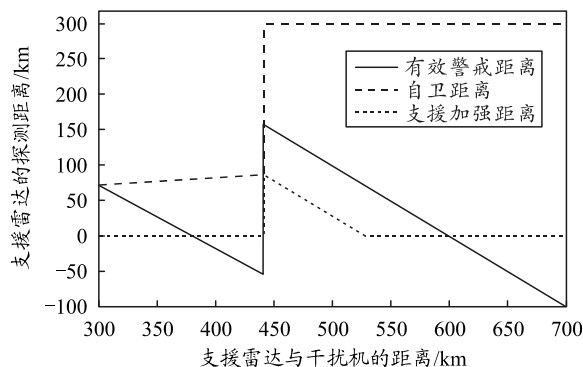


图 10 纵向支援协同抗干扰探测能力

表 1 雷达最佳配置间距及探测能力

干扰样式	最佳配置 间距/km	有效探测 距离/km	支援加强 距离/km	探测距离 增加倍数
同频抗远程 压制干扰	180.5	213.1	141.9	2.0
横向往频抗 自卫干扰	78.2	93.6	51.3	1.2
横向往频抗 综合干扰	81.0	93.1	50.8	1.2
横向往频抗 自卫干扰	126.3	292.8	250.5	5.9
横向往频抗 综合干扰	178.2	210.3	168.0	4.0
纵向抗远程 压制干扰	141.1	208.8	137.6	1.9

由图 5-9 和表 1 可以看出：两雷达采取侧向支援抗干扰方式，选择适当的配置距离，可大大提高其在各种干扰条件下的探测能力，探测距离增加 51.3~250.5 km、约 1.2~5.9 倍；异频雷达抗自卫干扰能力和抗综合干扰能力远远优于同频雷达，探测距离约为其 2.3~3.1 倍。由图 10 和表 1 可以看出：当采取纵向支援抗干扰方式时，选择适当的配置距离，后方支援雷达可将探测距离增加 137.6 km、约 1.9 倍，大大提高雷达网的综合探测能力。

6 结束语

实例分析结果表明：所建综合噪声干扰条件下防空雷达探测距离模型、协同配置优化模型及其求解方法有效可行，通过空域协同配置优化能够明显提高防空雷达网的抗干扰能力，研究成果对防空雷达组

网布站的研究与实践具有一定的参考借鉴意义。

参考文献：

[1] 陈永光, 李修和, 沈阳. 组网雷达作战能力分析与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

[2] 余巍, 朱岩, 王博琦, 等. 防空雷达与雷达干扰装备协同方法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(3): 6-9.

[3] 李侠, 蔡万勇, 花良发, 等. 责任区雷达组网系统抗干扰优化部署算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(8): 1254-1257.

[4] 刑福成, 康锡章, 王国宏. 干扰下雷达网的威力范围[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(7): 90-96.

[5] 范时胜, 张文元. 多重干扰下雷达探测威力范围研讨[J]. 现代电子技术, 2006(5): 10-12.

[6] 李文锋, 陈荣. 干扰环境下雷达探测威力范围计算研究[J]. 现代雷达, 2013, 35(3): 78-80.

[7] 余巍, 王小念, 纳学柱, 等. 噪声干扰下防空雷达自卫距离的计算和分析[J]. 兵工自动化, 2014, 33(10): 1-3.

[8] 赵会朋, 冯占林, 李博骁, 等. 防空反导预警装备覆盖能力推演分析[J]. 兵工自动化, 2020, 39(8): 16-21.

[9] 杨娟, 池建军, 王伟中. 复杂电磁环境下雷达作战能力仿真[J]. 兵工自动化, 2012, 31(2): 1-3.

[10] 龚春晖, 魏冬峰. 复杂电磁环境下的雷达探测概率模型[J]. 兵工自动化, 2007, 26(3): 78-80.

[11] 雷中原. 有源雷达与无源雷达协同抗干扰部署优化模型研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(2): 20-25.

[12] 谢燕军, 孙伟. 海上编队雷达网抗干扰优化部署算法[J]. 计算机与数字工程, 2013(4): 522-525.

[13] ZHAO H T, LIU M, SUN Y Y, et al. Fault diagnosis of control moment gyroscope based on a new CNN scheme using attention-enhanced convolutional block[J]. Technological Sciences, 2022, 65(11): 2605-2616.

[14] 刘杨, 杨飞然, 梁兆杰, 等. 基于卡尔曼滤波的 STFT 域回声抵消算法[J]. 声学技术, 2022, 41(5): 757-762.

[15] LUIS V M, HABETS E A P. Low-complexity multi-microphone acoustic echo control in the short-time Fourier transform domain[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2019, 27(3): 595-609.

[16] 肖瑛, 殷福亮. 解相关 EMD: 消除模态混叠的新方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 25-29.

[17] 张怀念, 周焰, 梁复台, 等. 一种基于经验模态分解的弹道群目标关联算法[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(7): 138-141, 149.

[18] 马泽, 张志杰. 基于 EMD 算法的激波管系统误差识别与消除方法[J]. 测试技术学报, 2018, 32(3): 243-249.

(上接第 39 页)

[7] 赵博, 李鹤. 结合 EMD 和 LSF 的振动信号降噪方法的研究[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(3): 606-610, 624.

[8] 石志远, 徐卫明, 孟浩. 全波形激光雷达改进的降噪方法[J]. 测绘通报, 2023(3): 5-9.

[9] 刘伯相, 张远民, 江竹. 基于变分模态分解的管道泄漏信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(2): 397-403, 416.

[10] 张鹏, 谢艳, 魏志. 一种基于新阈值函数的小波降噪方法在高速风洞中的应用[J]. 兵工自动化, 2016, 35(4): 52-55.

[11] 徐方素, 孙兴伟, 董祉序, 等. 基于新型小波阈值函数的降噪方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2021(5): 23-24.

[12] 刘备, 董胡, 钱盛友. 基于经验模态分解与小波分析的超声信号降噪方法[J]. 测试技术学报, 2018, 32(5): 422-428.