组网雷达对远距离支援干扰的对抗效能研究

谢宇宝，李钦富

（中国电子科学研究院，北京 100041）

摘　要： 应用远距离支援干扰策略对组网雷达实施干扰，是空袭作战中常见的情况。文章提出利用组网雷达探测区和暴露区作为评估组网雷达对抗效能的指标，并对远距离支援干扰条件下单部雷达的自卫距离模型、探测区模型和暴露区模型进行分析，在此基础上建立组网雷达探测区模型和暴露区模型。最后，结合仿真应用背景，利用所提组网雷达探测区模型和暴露区模型对组网雷达的对抗效能进行仿真试验与分析。

关键词： 远距离支援干扰；作战效能；探测区；暴露区

中图分类号： TN972　　**文献标识码：** A

Research on adversarial effectiveness of networked radar against stand-off jamming

XIE Yubao，LI Qinfu

（China Academy of Electronics and Information Technology，Beijing 100041，China）

Abstract：The application of stand-off jamming strategies against networked radar is a common practice in air attack operations. The detectable area and exposed area of networked radar are proposed as indicators for evaluating its adversarial effectiveness. Under the condition of stand-off jamming，the self-defense distance model，detectable area model，and exposed area model of a single radar are analyzed. On this basis，the detectable area model and exposed area model of networked radar are established. Finally，based on a simulation application scenario，the proposed detectable area and exposed area models of networked radar are used to conduct simulation experiments and analyze the adversarial effectiveness of networked radar.

Key words：stand-off jamming，adversarial effectiveness，detectable area，exposed area

1　引言

在现代空袭作战中，空中进攻编队按照指挥所的命令对敌方实施空中突击。在突击过程中，进攻编队将受到敌方雷达网的探测。因此，选择一条较为安全的航路进行突防，是关系进攻编队安全的重要问题。目前，较为常见的方法是利用干扰飞机远离被干扰雷达和目标，施放电子干扰信号，为己方攻击编队的突击行动提供支援，即实施远距离支援干扰。

在实际作战中，这种干扰对抗策略能否有效压制组网雷达的探测、掩护攻击编队进行突防，以及组网雷达系统能否发现实施突防的攻击编队，都需要通过试验进行分析和验证。然而，组网雷达对抗系统是一个大型复杂系统，涉及多个领域，利用真实装备和实际作战环境开展试验并不现实。因此，需要利用现代计算机作战仿真技术建立仿真试验环境，通过计算机仿真模型和仿真试验，对组网雷达与远距离支援干扰之间的对抗作战效能进行分析评估。

本文提出利用组网雷达探测区模型和暴露区模型对组网雷达与远距离支援干扰的对抗效能进行分析评估，并给出主要计算模型及仿真试验分析。

2　组网雷达对抗效能评估指标

对于组网雷达对抗远距离支援干扰仿真系统而言，如何建立有效的效能评估指标体系，是开展对抗效能评估的重要前提和基础。组网雷达系统不仅是一种重要的军事电子信息系统，而且是典型的多源传感器信息融合系统。因此，在建立指标体系时，需要从多个方面进行考虑。评估指标体系主要包括探测能力、定位能力、跟踪能力以及识别能力等，其中组网雷达的探测能力是最基本、最重要的对抗效能评估指标。本文将组网雷达探测区和暴露区作为评估组网雷达对抗效能的主要指标。

雷达探测区是指雷达未受干扰时能够探测目标的区域，可以直观描述雷达的探测性能，其大小与雷达自身性能、目标特性等因素有关。组网雷达探测区是网内所有雷达探测区的并集。对于不同的目标高度、目标雷达反射截面积以及发现概率，组网雷达探测区的范围也

会有所不同。

暴露区是指雷达受到干扰后仍能够探测目标的区域，目标进入该区域后仍然存在被发现的可能。暴露区以外的区域称为压制区，也称为有效干扰区。采用探测区和暴露区分别表示无干扰和有干扰条件下的雷达作战效能，具有计算方法简单、结果直观和便于理解等特点。

组网雷达的干扰压制比定义为组网雷达暴露区面积与探测区面积之比：

$$J=\frac{S_J}{S_W} \tag{1}$$

组网雷达干扰压制比作为对抗效能指标，可以用于评估组网雷达抗干扰能力的强弱。由定义可知，组网雷达干扰压制比能够直接反映组网雷达受到远距离支援干扰后探测区的变化情况。

3 主要计算模型

在计算组网雷达干扰压制比之前，首先需要计算组网雷达的自卫距离，以及组网雷达的探测区和暴露区面积。以下分别给出上述指标的数学计算模型。

3.1 组网雷达自卫距离计算模型

随着目标与雷达之间距离的减小，雷达接收机端的干信比逐渐减小。当干信比达到雷达在干扰条件下的可见度要求时，雷达能够以一定的检测概率发现目标。此时，目标与雷达之间的距离称为“最小隐蔽距离”（对干扰机而言），或“烧穿距离”，又称为“自卫距离”（对雷达而言）[1]。定性而言，对于干扰机，自卫距离越小越有利；对于雷达，干扰机的最小隐蔽距离越大越有利。

3.1.1 单部雷达自卫距离计算模型

雷达接收到的目标回波信号功率为：

$$P_{rs}=\frac{P_t{G_t}^2\sigma\lambda^2}{(4\pi)^3 r_t^4} \tag{2}$$

式中，P_t表示雷达发射机峰值功率；G_t表示雷达天线主瓣方向增益；σ表示目标的雷达反射截面积（m^2）；λ表示雷达工作波长（m）；r_t表示目标与雷达之间的距离（m）。

进入雷达接收机输入端的干扰信号功率为：

$$P_{rj}=\frac{P_jG_j^2(\varphi)G_t(\theta)\lambda^2\gamma_j}{(4\pi)^2 r_j^2} \tag{3}$$

式中，P_j表示干扰机发射功率（W）；$G_j(\varphi)$表示干扰机天线在雷达方向的增益；$G_t(\theta)$表示雷达天线在干扰机方向的增益；γ_j表示干扰信号对雷达天线的极化损失；r_j表示干扰机至雷达的距离。

$G_j(\varphi)$可直接由干扰机天线方向图确定。当方向图未知时，也可以采用下式进行近似计算：

$$G_j(\varphi)=\begin{cases}G_j, & 0\leqslant\varphi\leqslant\dfrac{\theta_{0.5}}{2}\\ K_j\left(\dfrac{\varphi_{0.5}}{\varphi}\right)^2 G_j, & \dfrac{\theta_{0.5}}{2}<\varphi<90^\circ\end{cases} \tag{4}$$

式中，φ表示侦察机对雷达定位的误差角（°）；$\varphi_{0.5}$表示干扰机波瓣宽度；K_j为常数，取0.04~0.10。对于高增益、窄方向天线，K_j取0.07~0.10。对于波束较宽、增益较低的天线，K_j取0.04~0.07。

同理，$G_t(\theta)$可直接由雷达天线方向图确定。当方向图未知时，也可以采用下式进行近似计算：

$$G(\theta)=\begin{cases}G_t, & 0\leqslant\theta\leqslant\dfrac{\theta_{0.5}}{2}\\ K\left(\dfrac{\theta_{0.5}}{\theta}\right)^2 G_t, & \dfrac{\theta_{0.5}}{2}<\theta<90^\circ\\ K\left(\dfrac{\theta_{0.5}}{90}\right)^2 G_t, & \theta\geqslant 90^\circ\end{cases} \tag{5}$$

式中，θ表示雷达与目标连线和雷达与干扰机连线之间的夹角（°）；$\theta_{0.5}$表示雷达天线波瓣宽度（°）；K为常数，取0.04~0.10。

因此，雷达接收机输入端的信号功率与干扰功率之比为：

$$\frac{S}{J}=\frac{P_{rs}}{P_{rj}}=\frac{P_t{G_t}^2\sigma{r_j}^2}{P_jG_j(\varphi)G_t(\theta)\gamma_j 4\pi r_t^4} \tag{6}$$

根据自卫距离的定义，当信干比等于雷达检测信号所需的最小信干比时，雷达与目标之间的距离称为自卫距离：

$$r_z=\left[\frac{P_t{G_t}^2\sigma{r_j}^2}{P_jG_j(\varphi)G_t(\theta)\gamma_j 4\pi\left(\dfrac{S}{J}\right)_{\min}}\right]^{\frac{1}{4}} \tag{7}$$

式中，r_z表示雷达自卫距离（m）；$\left(\dfrac{S}{J}\right)_{\min}$表示雷达检测信号所需的最小信干比。

3.1.2 组网雷达自卫距离计算模型

设组网雷达中有n部雷达，每部雷达的自卫距离分别为$r_{zi}(i=1,2,\cdots,n)$，则组网雷达的自卫距离为：

$$(r_z)_{\text{net}}=\max_i\{r_{zi}\} \tag{8}$$

式中，$(r_z)_{\text{net}}$表示组网雷达的自卫距离（m）；r_{zi}表示第i部雷达的自卫距离（m）。

3.2 组网雷达探测区及暴露区计算模型

3.2.1 单部雷达探测区及暴露区模型

在无干扰条件下，雷达探测区为以雷达为圆心、以一定距离为半径的圆形区域[2]。该距离由雷达最大作用距离和目标高度决定（见图1），三者满足：

$$r=\sqrt{{r_t}^2-{h_t}^2} \tag{9}$$

式中，r表示探测区半径（m）；r_t表示雷达最大作用距离（m）；h_t表示目标高度（m）。

雷达受到干扰时，暴露区的大小可采用暴露区半径进行描述。雷达在不同方向上的暴露区半径并不相同，因此单部雷达的暴露区并非圆形[3-4]。现以干扰机

掩护运动目标为例，说明暴露区的计算方法，如图 2 所示。

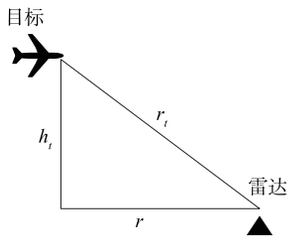

图 1　雷达探测区半径

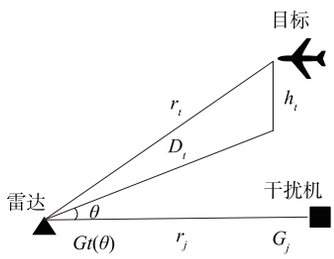

图 2　干扰机掩护运动目标时的空间关系

干扰机掩护运动目标时，有：

$$D_t^2=\begin{cases} r_0 r_j-h_t^2, & |\theta|\leqslant\dfrac{\theta_{0.5}}{2} \\ \dfrac{|\theta| r_0 r_j}{\theta_{0.5}\sqrt{K}}-h_t^2, & \dfrac{\theta_{0.5}}{2}<|\theta|<90^\circ \\ \dfrac{90 r_0 r_j}{\theta_{0.5}\sqrt{K}}-h_t^2, & 90\leqslant|\theta|\leqslant 180^\circ \end{cases} \tag{10}$$

式中，D_t 表示某一方向上的暴露区半径（m）；θ 表示干扰机和目标在地面的投影相对于雷达的张角（°）。

r_0 的计算式为：

$$r_0=\sqrt{\frac{P_t G_t \sigma K_j}{P_j G_j 4\pi\gamma_j}} \tag{11}$$

式中，K_j 表示压制系数。

3.2.2　组网雷达合成探测区及合成暴露区计算模型

组网雷达探测区定义为网内各雷达探测区的并集：

$$A_{\text{net}}=\bigcup_{i=1}^{n} A_i \tag{12}$$

式中，A_{net} 表示组网雷达合成探测区；A_i 表示第 i 部雷达的探测区；n 表示网内雷达数。

同理，组网雷达干扰暴露区定义为网内各雷达暴露区的并集：

$$B_{\text{net}}=\bigcup_{i=1}^{n} B_i \tag{13}$$

式中，B_{net} 表示组网雷达干扰暴露区；B_i 表示第 i 部雷达的暴露区。

3.2.3　组网雷达干扰压制比计算模型

在极坐标下，区域面积可以由下式求解：

$$S=\frac{1}{2}\int_0^{2\pi}[r(\theta)]^2 \mathrm{d}\theta \tag{14}$$

式中，S 表示区域面积（m^2）；θ 表示区域边界某点的方位角（°）；$r(\theta)$ 表示方位角 θ 对应边界点的极径。

4　仿真运行示例

为对不同条件下组网雷达对抗远距离支援干扰的作战效能进行评估分析，利用计算机仿真技术实现组网雷达对抗系统中的部分实体模型和相关计算模型，包括雷达仿真模型、干扰机仿真模型和攻击编队仿真模型等。在基准参数条件下，即在无外部干扰情况下计算雷达探测距离所采用的相关工作参数保持不变，每次改变一个参数（如雷达位置、干扰距离、干扰功率等），计算相应条件下雷达的自卫距离，从而得到组网雷达合成探测区面积、合成暴露区面积及对应的干扰压制比。记录各次试验数据，并根据试验结果对组网雷达对抗远距离支援干扰的作战效能进行分析评估。同时，为使用户能够实时观察远距离支援干扰条件下组网雷达合成暴露区的变化情况，对组网雷达合成探测区和合成暴露区进行二维显示。

4.1　合成探测区显示实现方法

采用弧线连接的方法实现组网雷达合成探测区的显示。首先，计算某一雷达探测区与其他雷达探测区的所有交点坐标；其次，任选一点作为起点，按照顺时针方向得到该探测区的所有矢量弧，并计算各矢量弧的中点坐标与其他雷达中心点之间的距离。

若某一矢量弧中点到某个雷达中心点的距离小于该雷达的探测半径，则表明该点位于该雷达的探测范围内，因此该矢量弧不是合成探测区的边界线，不进行显示；反之，若该点到其他所有雷达中心点的距离均大于相应雷达的探测半径，则表明该点不在其他雷达的探测范围内，该点所在的矢量弧即为整个合成探测区边界线的一部分，对其进行显示。

该算法的关键在于求取各雷达探测区矢量弧的中点坐标，以及建立矢量弧模型。矢量弧模型不仅需要包括圆弧的起点和终点坐标，还需要包括所属雷达探测区的中心点坐标。

4.2　合成暴露区显示实现方法

在远距离支援干扰条件下，雷达的探测距离（即自卫距离）在不同方位上并不相同，因此雷达的暴露区是不规则的几何图形，无法采用上述弧线连接方法进行显示。本文将每部雷达暴露区的边界线划分为若干具有位置属性的点组成的集合，即通过像素点绘制合成暴露区。当像素点足够密集时，用户观察到的合成暴露区与采用弧线连接方法生成的合成区域具有相近的显示效果。

采用该方法实现组网雷达合成暴露区显示时，只需已知雷达暴露区上各边界点的坐标，然后遍历其他所有雷达，计算该雷达暴露区边界上某一点与其他雷达中心点之间的距离。若该点到某个雷达中心点的距离小于

（下转第 145 页）