

多空中干扰源与舰载雷达的对抗研究

杨 军¹, 赵 锋¹, 宫 颖²

(1. 中国船舶工业集团船舶系统工程部, 北京 100036; 2. 中国空间技术研究院总体部, 北京 100094)

摘 要: 现代海战为了提高己方突袭飞机的成功率, 必须首先对敌方的舰载雷达实施电子干扰以降低其探测能力. 本文首先开展在干扰背景下雷达信号检测的理论分析, 获得了干扰进入方向与特性曲线的变化关系. 然后基于空间能量建立多部空中干扰源的干扰方程, 根据模型采用 MFC 程序框架和 OPENGL 工具, 对多干扰源条件下的雷达干扰压制区域进行了三维仿真计算和绘制. 仿真结果与理论分析一致.

关键词: 信号检测; 干扰区域; 对抗; 仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2007) 09 1647 04

Research of Multi- Jamming Resources Against Shipborne Radar

YANG Jun¹, ZHAO Feng¹, GONG Ying²

(1. Systems Engineering Research Institute, Beijing 100036, China; 2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to improve the ratio of the attack success in the marine fighting, the enemy's shipborne Radar should be countermeasure in advance for reducing the detection ability. In this paper, we first analyze the process theory of the radar signal on the jamming background, and then get the relationship between the jamming orientation and characteristic curve. After that, the equation of the multi-jamming resources based on the space energy is created. According to this model, the jamming effected area was simulated and portrayed in 3D by MFC program structure and OpenGL technique. The simulation result is consistent with the theory analysis.

Key words: signal detection; jamming area; counter measure; simulation

1 引言

前出飞行的空中干扰源对敌方防空体系的雷达系统实施干扰以掩护己方飞机突防, 是立体作战中典型的电子战应用. 本文首先开展雷达在干扰背景下信号检测的理论研究, 分析了干扰信号从雷达天线主、副瓣进入对探测产生的不同影响. 建立了多干扰源产生的雷达干扰区域模型, 通过仿真给出了干扰区域的三维场景, 形象地描述了干扰源在对准雷达主、副瓣时空间三维雷达干扰区域, 为干扰源的前出部署和飞机突防提供了理论依据.

2 干扰背景下的雷达信息检测理论研究^[1]

当不同类型的雷达工作在不同模式下, 雷达天线产生的波束并不相同. 从外界空间通过波束进入雷达系统的信息除了目标回波外, 干扰信号也进入雷达接收机并将对雷达的信号检测产生影响. 外界辐射的有源干扰分为压制干扰和欺骗干扰两类: 欺骗干扰产生的模拟目

标回波对每一种雷达的影响各不相同; 而压制干扰产生的随机起伏噪声, 以遮盖目标回波妨碍雷达信号检测为共同目的. 噪声压制干扰对雷达产生的影响是本文着重研究的内容.

实际工作的雷达系统是在各种内部噪声和外部干扰的背景下进行信息检测, 在干扰背景下对接收信息进行检测, 首先假定干扰是平稳的, 它由互不相关的干扰源, 即由独立的外部噪声源和接收通道的内部噪声所产生. 在雷达天线单元的输出端, 干扰电压的复振幅列矢量可表示为:

$$N(t) = N_0(t) + \sum_{l=1}^n X(v_L) A_L(t) \quad (1)$$

式中 $X(v_L) = \|X_i(v_L)\|$ 为干扰的幅相分布列矢量, 其表示符号和信号列矢量的表示符号相同, 因为空间分布特性是和辐射源的性质无关; $A_L(t)$ 是幅相因子为 1, 即 $X_i(v_L) = 1$ 时, 第 l 个天线单元输出端上, 由第 L 个源产生的干扰电压的复振幅.

将白噪声模型应用到内部噪声和外部干扰联合信

号检测, 干扰相关矩阵 $\phi = \phi_0 + \sum_{L=1}^n N_L X(v_L) X^{*T}(v_L)$, 接收机通道内部噪声功率谱密度为对角线矩阵 ϕ_0 :

$$\phi_0 = \begin{pmatrix} N_{01} & & & \\ & N_{02} & & \\ & & \vdots & \\ & & & N_{0m} \end{pmatrix}$$

N_L 为 $X_i(v_L)$ 时天线接收到的来自第 L 个外部干扰源的干扰功率谱密度.

2.1 单部干扰源分析

当只有一个外部干扰源对具有 M 单元阵列天线的雷达产生干扰时, 可用单位矩阵来表示. 在外部干扰的作用下, 干扰逆相关矩阵为:

$$\phi^{-1} = N_0^{-1} \{1 - [k/(1+k)] X(v) X^{*T}(v) / M\} \quad (2)$$

加权矢量 R 决定了自天线单元输出的电压幅相系数分布:

$$R = \phi^{-1} X(\alpha) = N_0^{-1} X(\alpha) - [k\rho(\alpha, v)/(1+k)] X(v) \quad (3)$$

输出电压的复振幅对检测信号的进入方向 α 满足关系式:

$$F_{\Sigma H}(\alpha_c | \alpha, v) = k_0 X^T(\alpha_c) R^*(\alpha, v) \quad (4)$$

式中, α 和 v 定义为回波信号和干扰信号的进入方向; k_0 为归一化系数.

在一个干扰源情况下, 方向特性为:

$$F_{\Sigma}(\alpha_c | \alpha, v) = \rho(\alpha, \alpha) - [k/(1+k)] \rho(\alpha, v) \rho(v, \alpha) \quad (5)$$

式中 k 为当匹配方向特性指向外干扰源时, 外部干扰和内部噪声两者的功率谱密度之比:

$$k = X^T(v) X^*(v) MN_0^{-1} = MN_0^{-1}$$

$$\rho(\alpha, v) = X^T(\alpha) X^*(v) / M = X^{*T}(v) X(\alpha) / M$$

$|\rho(\alpha, v)|$ 为匹配方向特性曲线. 根据雷达天线方

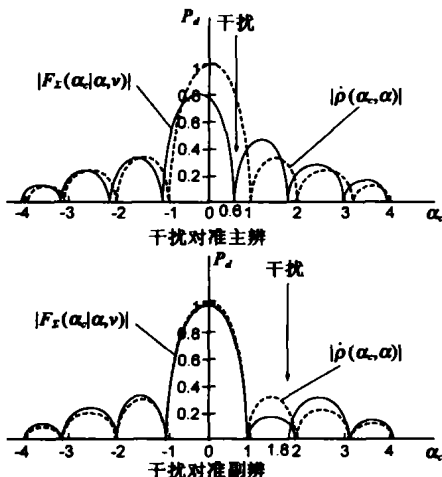


图 1 干扰对准主瓣、副瓣时的特性曲线

向图的形状, 干扰从主、副瓣进入到雷达接收机, 对信号检测产生的不同影响见图 1.

图中虚线表示匹配方向特性曲线, 实线表示在外部强干扰作用下 ($k \rightarrow \infty$) 的最佳方向特性曲线. 每一条特性曲线都是目标回波信号进入方向和干扰源进入方向的匹配特性 $\rho(\alpha, v)$ 和 $\rho(\alpha_c, v)$ 之加权差值的模. 曲线在干扰源进入方向上形成凹口. 从图 1 中可明显看出, 当干扰对准匹配特性的副瓣时, 主瓣畸变很小, 当干扰对准主瓣时, 主瓣明显发生畸变. 从此可以看出现代雷达的窄波束、低副瓣的特点, 远距离的副瓣干扰往往难以达到理想的压制效果.

2.2 两部干扰源分析

当雷达受到两个外部干扰源的作用下, 加权矢量为:

$$R = N_0^{-1} (X(\alpha) - k_1 X(v_1) - k_2 X(v_2)) \quad (6)$$

方向特性:

$$F_{\Sigma}(\alpha_c | \alpha, v) \approx \rho(\alpha_c, \alpha) - k_1 \rho(\alpha, v_1) - k_2 \rho(\alpha_c, v_2) \quad (7)$$

其中:

$$k_1 = k_2 [(1+k_2) \rho(v_1, \alpha) - k_2 \rho^*(v_2, v_1) \rho(v_2, \alpha)] / f$$

$$k_2 = k_2 [(1+k_1) \rho(v_2, \alpha) - k_1 \rho^*(v_1, v_2) \rho(v_1, \alpha)] / f$$

$$k_1 = MN_1 / N_0, k_2 = MN_2 / N_0$$

$$f = (1+k_1)(1+k_2) - k_1 k_2 |\rho(v_1, v_2)|^2$$

当两个干扰源从主、副瓣两个方向同时进行干扰时, 雷达信号检测结果见图 2.

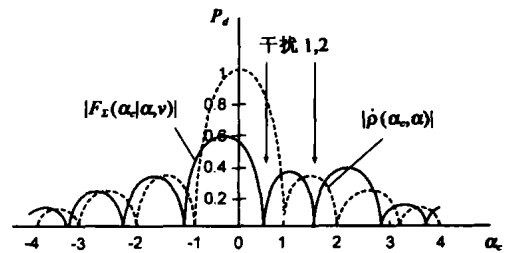


图 2 干扰同时对准主、副瓣时的特性曲线

在 $k_1 \rightarrow \infty, k_2 \rightarrow \infty$ 的强干扰作用下, 方向特性曲线如图 3, 从图中可明显看出在两个干扰源的作用下, 主瓣发生畸变的程度进一步加剧.

通过分析, 可以看出当无外部干扰源时, 最佳(匹配)方向特性 $F_{\Sigma H}(\alpha_c | \alpha)$ 的最大值指向目标方向. 在外部干扰源的作用下, 则在最佳(但不匹配)方向特性上形成凹口, 并分别指向各外部干扰源. 凹口深度决定于 $F_{\Sigma H}(\alpha_c | \alpha, v)$.

2.3 多部干扰源分析

通过采用递推关系式计算加权矢量 R :

$$R_{i+1} = \phi_0^{-1} X_{i+1} - \sum_{j=1}^i \frac{N_j R_j (R_j^{*T} X_{i+1})}{1 + N_j (R_j^{*T} X_j)} \quad (8)$$

递推步数等于干扰源的个数 n . 根据矢量 $\phi_0^{-1} X_1 =$

R_1 定加权矢量:

$$R_2 = \phi_0^{-1} X_2 - N_1 R_1 (R_1^* T X_2) / (1 + N_1 R_1^* T X_1) \quad (9)$$

这个加权矢量能在第一个干扰背景下保证对进入方向与矢量 X_2 相对应的信号进行最佳接收. 再根据矢量 R_1 和 R_2 确定出矢量 R_3 , R_3 能保证在第一和第二两个干扰源的背景下对信号(矢量 X_3) 进行最佳接收. 在计算出 n 个辅助矢量后, 便可求得加权矢量 $R_{n+1} = R(\alpha, v)$, 它能保证在 n 个干扰源的背景下对有用信号 $X_{n+1} = X(\alpha)$ 进行最佳接收. 当外部干扰强度远大于内部噪声时:

$$R_{i+1} = \phi_0^{-1} X_{i+1} - \sum_{j=1}^i R_j (R_j^* T X_{i+1}) / R_j^* T X_j \quad (10)$$

当雷达进行信号检测时, 由于干扰源的数目 n 是未知或不定的, 而加权矢量 R 的维数由 n 确定, 因此需要采用序贯算法. 因而当 $\phi_0 = N_0 I$ 时, R_{i+1} 简化为矢量组 $X_1, X_2, \dots, X_n, X_{n+1}$ 的序贯正交化.

3 空间干扰区域仿真模型

根据信息检测理论分析, 在干扰背景下雷达的正确检测概率将降低, 反映在空间的效果是雷达作用距离下降, 但不一定下降到零, 而是有一个暴露半径. 噪声干扰压制目标回波, 是功率方面的竞争. 在雷达接收机的输入端, 同时有干扰功率和目标回波功率到达. 两者相比, 如果干扰功率大于目标回波功率, 则干扰能压住目标; 如果干扰功率小于回波功率, 则雷达仍能发现目标. 所以, 干扰有效的条件, 至少是: 干扰功率 P'_j 和目标回波功率 P'_i 保持以下关系: $P'_j / P'_i \geq 1$ 但由于目标在雷达显示器上的积累作用, 仅仅具备这个条件还不够. 一般应要求 P'_j 比 P'_i 大几倍才能有效地压制. 这个倍数以压制系数 K_j 表示. 即: $K_i = P'_i / P_r$.^[5]

3.1 单干扰源干扰压制区域模型

为方便讨论, 建立雷达、目标和干扰源三者的空间几何关系, 见图 3. 先假定干扰机是固定的, 雷达是固定的, 被掩护的目标是一个运动的点目标. 设雷达天线指向目标, 干扰机天线指向雷达, 干扰信号偏离雷达天线最大方向的角度为 θ , 目标高度为 H , 距离雷达的水平

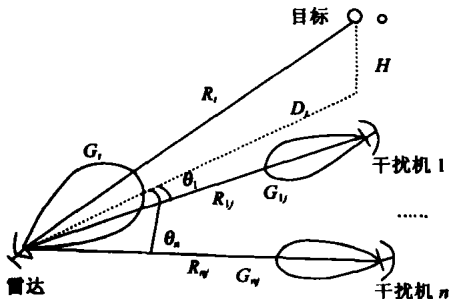


图 3 干扰源掩护目标的空间关系

距离为 D_i 有效反射面积为 σ .

当干扰源为单部时, 在干扰距离 R_j 已知、目标高度 H 不变、干扰机及雷达的参数一定的情况下, 可以得到以 θ 和 D_i 为变量的有效干扰区边界的曲线方程^[2]:

$$\frac{P_j G_j}{P_i G_i} \cdot \frac{\gamma_j}{R_j^2} \cdot \frac{4\pi k_0^2 \sigma (D_i^2 + H^2)^2}{\theta^2 \sigma} = K_j \quad (11)$$

式中, P_i 为雷达的发射功率, G_i 为天线增益, σ 为目标的有效反射面积, λ 为工作波长, P_j, G_j 为干扰机发射功率和干扰天线增益; R_j 为干扰机至雷达的距离; γ_j 为干扰信号对雷达天线的极化系数; K_j 表示压制系数.

3.2 多部干扰源干扰压制区域模型

单部干扰源进行信号压制, 可以在雷达终端上形成有效干扰扇面, 在此扇面内敌雷达无法发现目标. 随着雷达性能的不断提, 常用的有效干扰需要从雷达主瓣实施, 这使单部干扰源形成的干扰区域和掩护半径不大. 通过增加干扰源的发射功率可以增加干扰区域, 但是效果不明显. 缩短干扰源与雷达的距离虽然使干扰效果大幅提高, 但却增大了干扰源被敌发现、摧毁的概率. 此外, 雷达可以根据干扰扇面的中心线来判断目标和干扰源的方向.

当多部干扰源同时进行有效压制时, 在上述单干扰源干扰压制区域模型的基础上, 可以得知: 多部干扰源进行有效压制时干扰方程满足:

$$\sum_{i=1}^n \frac{P_{r,i,j}}{P_{r,s}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{i,j} G_{i,j} \gamma_{i,j}}{P_i G_i} \cdot \frac{4\pi R_i^4}{R_{i,j}^2} \cdot \frac{G_i}{G_i} \right) \geq K_j \quad (12)$$

式中, $P_{i,j}$ 为干扰源 i 的发射功率; $G_{i,j}$ 为干扰源 i 的干扰天线增益; $R_{i,j}$ 为干扰源 i 至雷达的距离; $\gamma_{i,j}$ 为干扰 i 的干扰信号对雷达天线的极化系数. 由此可知, 在干扰距离 $R_{i,j}$ 已知、目标高度 H 不变、干扰机及雷达的参数一定的情况下, 可以得到以 θ_i 和 D_i 为变量的有效干扰区边界的曲线方程:

$$\sum_{i=1}^n \frac{P_{i,j} G_{i,j}}{P_i G_i} \cdot \frac{\gamma_{i,j}}{R_{i,j}^2} \cdot \frac{4\pi k_0^2 \sigma (D_i^2 + H^2)^2}{\theta_i^2 \sigma} = K_j \quad (13)$$

4 仿真计算及结果分析

基于以上模型进行仿真软件编程. 仿真软件采用了 MFC 文档/视图程序框架来实现虚拟现实仿真. 仿真过程三维态势显示包括雷达搜索、目标和干扰源运动等场景. 仿真软件的开发环境基于 Windows 操作系统, 采用了 VC++ 6.0 和 OpenGL 图形函数库和纹理映射技术实现球形带视点的空间, 描绘了三维空间下的干扰区域^[3].

仿真软件以单干扰源及两个干扰源为例, 分别描绘了两种情况下的空间干扰区域. 典型雷达参数选取为: $P_i = 150 \text{ kW}$, $G_i = 28 \text{ dB}$; 目标参数为: $\sigma = 10 \text{ m}^2$; 干扰源参数为: $P_{i,j} = 100 \text{ W}$, $G_{i,j} = 4 \text{ dB}$, $R_{i,j} = 20 \text{ km}$, $\gamma_{i,j} = 3$, P_j

$= 100\text{W}$, $G_3 = 4\text{dB}$, $R_2 = 40\text{km}$, $\gamma_2 = 2$, $K_j = 3$. 最后得到的干扰区域仿真图像如图 4~ 图 6 所示. 从仿真结果可以得出以下结论:

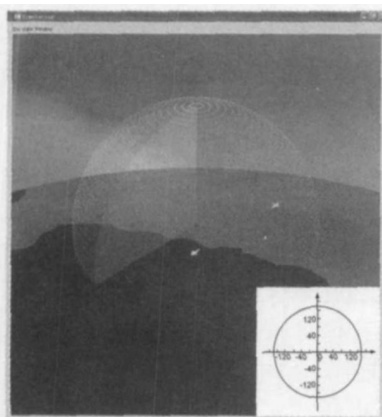


图 4 无干扰源雷达探测区域

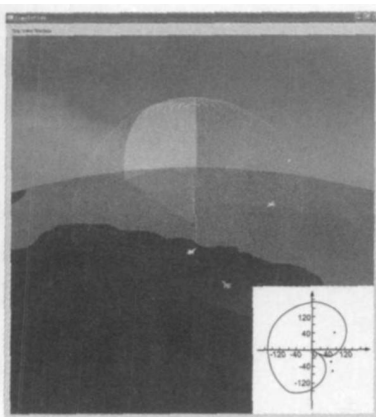


图 5 单干扰源雷达干扰区域

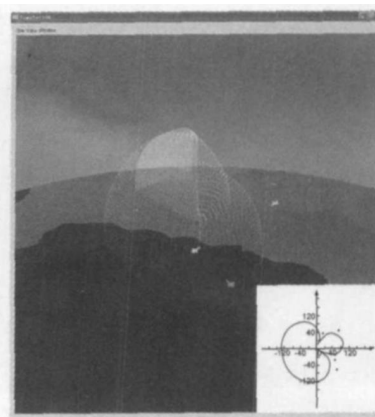


图 6 多干扰源雷达干扰区域

(2) 用两部干扰源从不同方向对雷达进行干扰时, 共同形成了一个有效的空间干扰区域. 结合我舰艇编队的作战态势, 合理的配置干扰机位置, 可以取得很好的战场电子进攻效果.

(3) 增加干扰源的数量后, 由于整个空间干扰区域的变化, 敌雷达无法根据干扰扇面的中心线来判断目标和干扰源的方向.

(4) 增加干扰源的发射功率、减小干扰源与雷达的距离和增加干扰源的数量等方法可以结合使用, 实现干扰效果的最优, 为编队航行、编队飞行提供直观有效的支持.

5 结束语

本文首先对干扰背景下的雷达信息处理进行理论分析, 在基于空间相关性已知和未知的干扰背景下建立信号和干扰的模型, 研究时空信号的最佳检测算法, 获得单个和两个干扰源以及对雷达主、副瓣的不同方向干扰所产生的特性曲线. 然后基于空间能量建立单干扰源和多干扰源的雷达干扰空间区域模型, 开展了两干扰源的雷达干扰区域数字仿真, 在三维空间下描绘了干扰区域. 该仿真结果与理论分析想定一致, 因此通过仿真演示从不同角度验证干扰源对雷达干扰的影响.

据此可完成可视化地表述干扰源数量与干扰区域的变化和特点, 以及与单干扰源的关系. 仿真结果为空中机动干扰源的数量要求、部署方案以及突防飞机的作战航路提供了理论依据.

参考文献:

- [1] Я Д 希尔曼, В Н 曼若斯. 雷达信息处理的理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1987. Я Д Ширман, В Н Манжос. Theory and Technology of Radar Information Process

(1) 当两部干扰源从同方向对雷达进行干扰时, 干扰效果仅等价于功率加大的单部干扰源, 干扰区域改善不明显.

ing[M]. Beijing: 科学出版社, 1987. (in Chinese)

- [2] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [3] 叶其孝, 沈永欢. 实用数学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [4] 魏保华, 等. 雷达干扰效果模糊综合评估方法研究[J]. 北京: 系统工程与电子技术, 2000, 11, 22(8): 68- 71. Wei Baohua. The method of fuzzy synthetic evaluation on radar jamming effects[J]. Beijing Systems Engineering and Electronics, 2000, 11, 22(8): 68- 71. (in Chinese)
- [5] 常朝稳, 李敬辉. 电子战效果评判方法研究[J]. 北京: 系统工程与电子技术, 1999, 21(5): 28- 31. Chang Chaowen, Li Jinghui. A research into passing judgment on the result of electronic war[J]. Beijing: Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(5): 28- 31. (in Chinese)

作者简介:



杨 军 男, 1967 年 5 月生于北京, 1989 年毕业于西北工业大学电子工程学院, 现为中国船舶工业集团公司系统工程部高级工程师. 主要研究方向为无人机系统、电子对抗、测向与定位、图像识别、信息融合. 曾获国防科工委科技进步三等奖两项, 中国船舶工业集团科技进步三等奖四项, 主持完成了 6 项省部级以上国防重点科研项目. E-mail: npuzf@163.com



赵 锋 男, 1980 年 10 月生于山西运城, 2005 年于西北工业大学电子工程学院系统工程专业获硕士学位, 现为中国船舶工业集团公司系统工程部工程师. 主要研究方向为无人机系统、系统仿真、电子对抗、测向与定位、图像识别、多传感器信息融合.