

doi: 10.7690/bgzdh.2014.10.001

噪声干扰下防空雷达自卫距离的计算和分析

余巍¹, 王小念¹, 纳学柱², 罗江¹, 王晓东¹

(1. 防空兵学院指挥控制系, 郑州 450052; 2. 防空兵学院侦察预警系, 郑州 450052)

摘要: 为分析防空雷达的反噪声干扰能力, 建立防空雷达自卫距离计算模型。以干扰机掩护战斗轰炸机突防为作战背景, 计算在采用不同反干扰措施情况下防空雷达的自卫距离值。结果表明: 该模型考虑了脉冲积累、非理想干扰信号和采取固定多点跳频、随机数字编码跳频和脉冲压缩等技术措施后对自卫距离计算的影响, 能反映实际对抗效果, 具有一定的参考和应用价值。

关键词: 噪声干扰; 防空雷达; 自卫距离; 模型; 计算

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Calculating and Analyzing on Self-Protection Distance of Air Defense Radars in Noise Jamming

Yu Wei¹, Wang Xiaonian¹, Na Xuezhuzhu², Luo Jiang¹, Wang Xiaodong¹

(1. Department of Command & Control, Air Defense Forces Academy, Zhengzhou 450052, China;
2. Department of Scout & Early Warning, Air Defense Forces Academy, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: For the analysis of air defense radars anti-noise jamming ability, the paper establishes the calculation model of air defense radars self-protection distance. In the combat background that the jammer covers fighter bomber penetration, the paper calculates self-protection distance of air defense radars using different anti-jamming measures. The results show that the calculation model can reflect the actual combat effectiveness due to the considering of different factors, such as pulse accumulation, non-ideal jamming signal, frequency hopping, random data coding frequency hopping and pulse compress. The model has certain reference and application value.

Keywords: noise jamming; air defense radars; self-protection distance; model; calculation

0 引言

噪声干扰是一种频率、幅度、相位随机变化的电子干扰, 其性质与雷达接收机的内部噪声相似, 是压制性干扰的基本干扰样式^[1-2]。防空雷达是用于防空作战的各种雷达的统称, 包括防空情报雷达、武器控制雷达等。防空雷达是我军防空体系中非常重要的武器装备, 在现代战争复杂电磁环境下, 也是对方干扰的重点目标。防空雷达对目标检测是基于一定的概率准则在噪声中进行的, 当外部噪声进入雷达接收机, 将降低雷达接收机的信噪比, 使雷达难以检测目标^[3]。自卫距离是体现噪声干扰下防空雷达作战能力的重要参数。定量计算自卫距离, 对于分析防空雷达的反干扰能力, 研究合适的抗干扰技术和战术措施, 都有很好的参考价值。

1 自卫距离计算模型

1.1 一般情况下的自卫距离计算模型

当受到干扰机施放的噪声干扰时, 防空雷达接

收到的干信比^[4]为

$$\frac{P_{rj}}{P_{rs}} = \frac{P_j G_j}{P_t G_t} \cdot \frac{4\pi\gamma_j}{\sigma} \cdot \frac{G'_t}{G_t} \cdot \frac{R_t^4}{R_j^2} \cdot \frac{\Delta f_r}{\Delta f_j} \quad (1)$$

式中: P_{rj} 为防空雷达接收到的干扰功率; P_{rs} 为防空雷达接收到的信号功率; P_j 为干扰机的发射功率; G_j 为干扰机天线主瓣方向上的增益; γ_j 为干扰信号对雷达天线的极化系数, 一般取 $\gamma_j=0.5$; R_j 为干扰机与雷达之间的距离; Δf_j 为干扰机带宽; P_t 为雷达的发射功率; G_t 为雷达天线主瓣方向上的增益; σ 为目标有效反射面积; R_t 为目标与雷达之间的距离; Δf_r 为雷达接收机带宽; G'_t 为雷达天线在干扰机方向上的天线增益, G'_t 的概略计算公式^[4]为:

$$G'_t = \begin{cases} G_t & 0 \leq \theta < \theta_{0.5}/2 \\ K(\theta_{0.5}/\theta)^2 G_t & \theta_{0.5}/2 \leq \theta < 90^\circ \\ K(\theta_{0.5}/90)^2 G_t & 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 为雷达主瓣方向与干扰机方向的夹角; $\theta_{0.5}$

收稿日期: 2014-04-12; 修回日期: 2014-05-05

作者简介: 余巍(1980—), 男, 江西人, 硕士, 副教授, 从事火控雷达技术、雷达反干扰效能建模和分析。

为雷达天线波瓣宽度; K 为常数, 取值为 $0.04 \sim 0.10$; 对增益较高、方向性强的天线, K 取较大值; 对增益较小、波束较宽的天线, K 取较小值。

若干扰有效, 则干信比应大于等于压制系数 K_j , 即

$$\frac{P_{ij}}{P_{rs}} = \frac{P_j G_j}{P_i G_i} \cdot \frac{4\pi\gamma_j}{\sigma} \cdot \frac{G_i'}{G_i} \cdot \frac{R_i^4}{R_j^2} \cdot \frac{\Delta f_r}{\Delta f_j} \geq K_j \quad (3)$$

压制系数是指雷达发现概率下降到 0.1 时, 雷达接收机输入端所需要的最小干扰信号与雷达回波信号功率之比^[5]。即

$$K_j = P_j / P_r \Big|_{P_d=0.1} \quad (4)$$

显然, 压制系数是干扰信号调制样式, 干扰信号质量、接收机响应特性、信号处理方式等的综合性函数。文献[5]分析了分别采用环视显示器、距离显示器作为终端设备的雷达和自动工作的雷达的压制系数取值; 文献[6]指出对于常规脉冲雷达、捷变频雷达和频率分集雷达等, 干扰压制系数的取值一般为 3 dB。应注意的是上述取值只是一个概略估计值。文献[7]对采用不同调制样式的噪声干扰压制系数进行了计算; 文献[8]指出, 采用以下公式计算时, 当虚警概率 P_{fa} 在 $10^{-3} \sim 10^{-9}$ 之间, 而发现概率 P_d 在 $0.1 \sim 0.9$ 之间时, 结果可精确到 0.2 dB 以内。

$$S/J = \lg(A + 0.12AB + 1.7B) \quad (5)$$

式中: $A = \ln(0.62/P_{fa})$; $B = \ln[P_d/(1-P_d)]$ 。防空雷达一般采用恒虚警检测技术, 当确定虚警概率, 可计算发现概率 P_d 为 0.1 时的信噪比, 取倒数后即成为压制系数。

当式 (3) 取等号时, 此时的 R_i 称为雷达自卫距离, 可用 R_0 表示, 其值为

$$R_0 = \left(\frac{P_i G_i}{P_j G_j} \cdot \frac{\sigma}{4\pi\gamma_j} \cdot \frac{G_i'}{G_i} \cdot \frac{\Delta f_j}{\Delta f_r} \cdot R_j^2 \cdot K_j \right)^{1/4} \quad (6)$$

当目标距离大于等于 R_0 时, 干扰有效, 防空雷达无法发现目标; 当目标距离小于 R_0 , 则干扰无效。

1.2 脉冲积累对模型的修正

上述讨论的是基于 1 个目标回波基础上的计算模型, 防空雷达实际检测目标时, 将对来自目标的有用雷达回波进行累加。文献[8]指出, 在早期雷达中, 认为雷达操作员观察阴极射线管显示器时所获得的积累改善因子等于 \sqrt{n} (n 为积累的回波数), 这实际是根据不正确的理论和性能差的显示器得出的。在考虑脉冲积累时, 雷达发现概率、虚警概率和信噪比的关系应采用下述经验公式:

$$(S/J)_n = -5 \lg n + \left(6.2 + \frac{4.54}{\sqrt{n-0.44}} \right) \lg(A + 0.12AB + 1.7B) \quad (7)$$

应注意的是, 式 (7) 中的计算结果以 dB 为单位。雷达积累的回波数 n 可用下式进行计算:

$$n = \frac{\theta_{0.5} f_p}{\theta_s} \quad (8)$$

式中: $\theta_{0.5}$ 为雷达天线波瓣宽度; f_p 为脉冲重复频率; θ_s 为天线扫描速度。

1.3 非理想干扰信号对模型的修正

对于式 (5)、式 (7) 的计算, 雷达接收机输入的干扰信号是高斯噪声。从信息论的角度看, 最佳干扰波形是熵值最大, 即不确定性最大的波形。在平均功率一定的情况下, 高斯噪声在任意随机波形中具有最大熵值, 因此, 理想中的最佳干扰波形是高斯噪声。由于高斯噪声分布随机变量的幅值要覆盖到无穷大, 在实际设备中无法实现^[3]。文献[3,5]提出可用噪声质量因素来衡量实际干扰信号的质量。噪声质量因素表示在相同遮盖效果条件下, 理想干扰信号所需的功率 P_{j0} 与实际干扰信号所需的干扰功率 P_j 之比, 即:

$$\eta = \frac{P_{j0}}{P_j} \quad (9)$$

只要知道高斯噪声干扰时所需的干扰功率再乘以噪声质量因素, 就可以得到实际有效干扰所需的功率, 式 (6) 可修正为:

$$R_0 = \left(\frac{P_i G_i}{P_j G_j} \cdot \frac{\sigma}{4\pi\gamma_j} \cdot \frac{G_i'}{G_i} \cdot \frac{\Delta f_j}{\Delta f_r} \cdot R_j^2 \cdot \frac{K_j}{\eta} \right)^{1/4} \quad (10)$$

但是实际干扰信号的概率密度通常难以用数学公式解析表示, 故常用实验方法来确定噪声质量因素。通常, 噪声质量因素 $\ll 1$ ^[5]。对正在服役或研制的干扰机测试的结果表明, 实际产生的干扰信号的噪声质量因素与理想高斯噪声相比, 有 17 dB 的损失^[3], 即 $\eta=0.02$ 。

1.4 采用抗干扰措施对模型的修正

1) 采用固定多点跳频后的修正。

频率在较宽的范围内跳变, 使雷达不断跳到不受干扰的频率上工作, 是防空雷达重要的抗干扰措施。频率跳变的速度越快、范围越大、随机性越强, 则抗干扰能力就越高。若采用固定多点跳频方式, 则跳频的点数 n 一般不超过 20。对于这种捷变频雷达, 干扰机可以采用储频记忆, 同时发射 n 个频率

点的干扰信号，使雷达不论跳到哪个频率点都要受到噪声压制干扰^[6]。对于固定多点跳频抗干扰，式(6)可修正为

$$R_o = \left(\frac{P_t G_t}{P_j G_j} \cdot \frac{\sigma}{4\pi\gamma_j} \cdot \frac{G_t}{G_t'} \cdot \frac{\Delta f_j}{\Delta f_r} \cdot R_j^2 \cdot K_j \cdot n \right)^{1/4} \quad (11)$$

2) 采用随机数字跳频后的修正。

随着技术的发展，现代防空雷达可在整个工作带宽中采用随机数字编码跳频，此时由于干扰机无法掌握雷达固定的频率点，一般采用宽带噪声阻塞干扰，则干扰频带需要覆盖整个雷达的工作频带 f_r ，即

$$f_r = \Delta f_j \quad (12)$$

3) 采用脉冲压缩技术后的修正。

对于发射机发射载频按一定规律变化的宽脉冲信号，脉冲压缩是指在接收机中将目标回波信号压缩成窄脉冲信号。现代防空雷达常采用脉冲压缩技术。在发射时，可以采用宽脉冲提高发射平均功率，保证足够远的探测距离；接收时，还可以获得窄脉冲回波以保证良好的距离分辨力，因而有效地解决了探测距离与距离分辨力之间的矛盾^[10]。采用脉冲压缩技术后，当所有其他条件都相等时，由于匹配滤波器对宽脉冲的滤波作用，结果压制系数将增大 B 倍^[6, 11]：

$$B = \frac{\tau_s}{\tau_{sc} K_o} \quad (13)$$

式中： τ_s 为接收机输入端的脉冲信号宽度； τ_{sc} 为经过脉冲压缩后的脉冲信号宽度； K_o 为雷达发射脉冲宽度变宽后引起矩形参数变化的1个系数，可取值为1.5。

2 实例计算和分析

下面以干扰机掩护战斗轰炸机突防防空雷达为作战背景，计算在采用不同干扰样式、反干扰措施和雷达主瓣方向与干扰机方向不同夹角情况下，防空雷达的自卫距离值。

防空雷达参数设为： $P_t=160$ kw， $G_t=36$ dB， $\theta_{0.5}=2^\circ$ ， $\Delta f_r=3$ MHz，对 $\sigma=10$ m²的目标最远作用距离为75 km， $f_p=1$ 500 Hz， $\theta_s=90$ (°)/s， $P_{fa}=10^{-6}$ ，天线方向图常数 K 取0.1；采用固定跳频技术，则变频点为10个；若采用随机数字编码跳频，则可在 $f_r=1$ 000 MHz内随机变化；采用脉冲压缩技术，可将脉冲宽度由6 μ s压缩为0.3 μ s。干扰机和突防机的参数设为： $P_j=1$ 000 kw， $R_j=150$ km， $\sigma=10$ m²， $G_j=20$

dB， $\Delta f_j=6$ MHz。计算结果见表1。

表1 噪声干扰下防空雷达的自卫距离

抗干扰措施	$ \theta /(^\circ)$	自卫距离/km
无	0	2.4
	10	9.8
	30	17.0
	90	29.5
固定多点跳频	0	4.3
	10	12.2
	30	30.3
	90	52.4
随机数字跳频	0	8.8
	10	35.1
	30	61.2
	90	75.0
脉冲压缩	0	4.8
	10	18.6
	30	32.4
	90	56.4

也可以对各参数取不同值进行计算并画出自卫距离随夹角变化图，限于篇幅，不详细列举。对于上述作战背景，从计算结果可以看出：

1) 没有采用抗干扰措施时，最大自卫距离为29.5 km，为正常作用距离的39.3%；最小自卫距离仅有2.4 km，为正常作用距离的3.2%，已基本丧失工作能力。因此，防空雷达抗噪声干扰能力较差。

2) 采用抗干扰措施后，抗干扰能力有明显改善；其中随机数字编码跳频抗干扰措施的反干扰效果最佳；固定多点跳频和脉冲压缩的反干扰效果相似，若提高脉冲压缩比和固定跳频的点数，其自卫距离将进一步增加。

3) 防空雷达抗干扰能力和干扰机天线与雷达天线主瓣的夹角 θ 关联性很强。当干扰机位于雷达天线主瓣内进行干扰，雷达最大自卫距离不超过9 km，在正常作用距离的12%以内，雷达工作将受到很大影响；当干扰机位于雷达天线主瓣外进行干扰，雷达自卫距离将迅速增大。从这个方面考虑，传统的机械扫描雷达波束扫描速度慢，天线方向图基本固定，极易被侦察和干扰；相控阵体制雷达天线副瓣电平低、波束电控、变化方式多样，双(多)基地体制雷达则难以对接收站进行定位和主瓣干扰，在抗干扰上具有很大优势。

3 结束语

笔者对噪声干扰下防空雷达的自卫距离进行了计算和分析，由于考虑了脉冲积累、非理想干扰信号和采用固定多点跳频、随机数字编码跳频、脉冲压缩抗干扰技术措施等多种情况，使计算的结果能反映出实际对抗效果，具有一定参考和应用价值。