

天波雷达抗欺骗干扰能力定量评估模型

贾晶, 盛文

(空军预警学院, 武汉 430019)

摘要: 为解决有源欺骗干扰条件下天波雷达抗干扰能力的定量评估问题, 根据天波雷达特点和雷达信号截获的必要条件, 建立了截获概率模型。采用灰色度量方法估算了天波雷达抗欺骗性干扰措施有效概率。给出了分选识别概率、模拟雷达信号概率和干噪比达到要求的概率计算模型, 在此基础上, 构建了天波雷达抗欺骗性干扰概率评估模型。应用模型对金达莱天波雷达系统在典型条件下抗欺骗干扰能力进行了评估, 从而验证了评估模型的可行性和有效性。

关键词: 天波超视距雷达; 有源欺骗性干扰; 抗欺骗性干扰概率; 评估模型

中图分类号: TN97 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0031-04

A Model for Quantitative Evaluation of Sky-Wave Radar Anti-deception Jamming Capability

JIA Jing, SHENG Wen

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: To solve the problem of quantitative evaluation of sky-wave radar anti-jamming capability under active deception jamming conditions, an intercepting probability model was established based on the characteristics of sky-wave radar and necessary conditions for intercepting radar signal. The effective probability of sky-wave radar anti-deception jamming measures was estimated by using the grey measurement method, and models were given for calculating the sorting and identification probability, the probability of simulating radar signals and the probability that interference-to-noise ratio met the requirement. On which basis, a model for evaluating the sky-wave radar anti-deception jamming probability was established. The anti-deception jamming capability of Azalea sky-wave radar system was evaluated under typical conditions by use of this evaluation model, thus confirming its feasibility and validity.

Key words: sky-wave over-the-horizon radar; active deception jamming; anti-deception jamming probability; evaluation model

0 引言

天波超视距雷达作为远程战略预警的重要装备, 抗电子干扰能力的好坏直接影响其作战效能, 如何定量评估天波雷达抗干扰能力以便更好地发挥雷达效能成为热点问题。欺骗性干扰是雷达面临的主要电子干扰样式之一, 目前, 关于雷达抗欺骗干扰能力评估的研究并不多, 且主要针对跟踪雷达。文献[1-2]基于多指标综合评估的思想, 通过构建抗干扰评估指标体系并分别运用证据理论和模糊综合评判法对雷达的

抗干扰能力进行了评估; 文献[3]在分析压制式和欺骗式干扰对雷达工作性能的最终影响的基础上, 提出了一种以电子对抗效果矩阵为基础的雷达抗干扰性能综合评估方法。上述文献虽都是针对雷达抗干扰能力的综合评估方法, 但也适用于抗欺骗干扰能力的评估。文献[4-5]在分析欺骗干扰特点的基础上, 提出了以抗欺骗性干扰概率为度量标准的雷达抗欺骗干扰能力评估方法。目前, 关于天波雷达的抗欺骗性有源干扰能力评估的研究鲜有报道。前述的多指标综合评估法主观性较强, 评估结果难以信服。电子对抗效果矩阵法需要大量的对抗实测数据, 对天波雷达而言难以实现。抗欺骗干扰概率的评估方法具有较强的可操作性, 评估结果比较客观。本文引入文献[4-5]的评估思想, 建立了天波雷达抗欺骗干扰概率计算模型, 从

收稿日期: 2014-12-31 修回日期: 2015-01-29

基金项目: 省部级科研基金(KJ2012228)

作者简介: 贾晶(1985—), 男, 四川南充人, 博士生, 研究方向为雷达装备效能评估与作战运用。

而为天波雷达抗欺骗性干扰能力评估提供了一条有效途径。

1 天波雷达抗欺骗性干扰概率计算模型

天波雷达与欺骗干扰的对抗模型如图1所示。干扰方要实施欺骗性干扰,首先要由干扰机侦察系统截获、分选识别出雷达信号,然后由干扰机模拟雷达目标信号,向雷达方向辐射。天波雷达可以利用各种抗欺骗干扰措施来识别剔除欺骗性干扰。

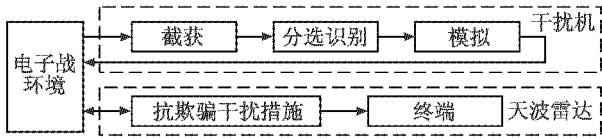


图1 欺骗性干扰电子对抗框图

Fig.1 Diagram of deception jamming electronic countermeasure

根据上述分析,假设 P_{J1} 、 P_{J2} 、 P_{J3} 和 P_{J4} 分别为干扰机截获天波雷达信号的概率、分选识别雷达信号各参数的概率、模拟雷达信号的概率和干扰比达到要求的概率, P_E 为天波雷达抗欺骗性干扰措施的有效概率,则天波雷达抗欺骗干扰概率为

$$K_{FJ} = 1 - P_{J1}P_{J2}P_{J3}P_{J4}(1 - P_E)。(1)$$

1.1 截获概率模型

要成功截获天波雷达信号,干扰机的侦察系统必须同时满足在空域、频域上对准雷达信号,并且截获的雷达信号电平要超过检测门限,则截获概率为

$$P_{J1} = P_{Jf}P_{Jl}。(2)$$

式中: P_{Jf} 为空频域联合截获概率; P_{Jl} 为雷达信号电平超过侦察接收机检测门限的概率。

空域和频域截获事件不是随机事件而是周期性重合事件,因而 P_{Jf} 可以采用窗口函数^[6]进行描述。每一个截获条件 i 可以表示为一个标准的窗口函数(T_i , τ_i),其中, T_i 为截获条件 i 的平均搜索周期, τ_i 为截获条件 i 的平均窗口宽度。假设有 n 个搜索窗,当各个搜索窗重合时即为截获。侦察天波雷达,在空域、频域上的截获涉及到以下窗口函数。

1) 侦察系统方向搜索窗口。

$$\begin{cases} T_1 = T_r \\ \tau_1 = \theta_h T_r / \theta_s \end{cases}。(3)$$

式中: T_r 为侦察系统天线扫描周期; θ_h 为侦察机天线方位波束宽度; θ_s 为侦察系统天线方位搜索范围。

2) 天波雷达波束搜索窗口。

天波雷达通常采取搜索工作模式,即通过改变工作频率和相位实现对责任区内多个探测子区的周期性搜索。当天波雷达波束主瓣对准侦察天线主瓣时

$$\begin{cases} T_2 = T_a \\ \tau_2 = T_a / N \end{cases}。(4)$$

式中: T_a 为天波雷达波束搜索周期; N 为天波雷达搜索的探测子区个数。当天波雷达副瓣对准侦察天线主瓣时

$$\tau_2 = N_s T_a / N。(5)$$

式中, N_s 为在侦察接收机所在探测子区的距离段内天波雷达搜索的探测子区个数。

3) 侦察机频率搜索窗口。

$$\begin{cases} T_3 = T_f \\ \tau_3 = \Delta f_f T_f / (f_2 - f_1) \end{cases}。(6)$$

式中: T_f 为侦察机频率搜索周期; $f_1 \sim f_2$ 为侦察频段; Δf_f 为侦察机瞬时带宽。

在分析出上述窗口函数后,空频域联合截获概率^[6]的运算式为

$$\begin{cases} \bar{T}_0 = \prod_{i=1}^n \frac{T_i}{\tau_i} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} \\ P_{Jf}(T) = 1 - (1 - \prod_{i=1}^n \frac{\tau_i}{T_i}) e^{-(T/\bar{T}_0)} \end{cases}。(7)$$

式中: \bar{T}_0 为平均重合周期; T 为侦察时间。

P_{Jl} 由侦察系统截获到的雷达信号与噪声功率的比值 $R_{S,Nf}$ 是否大于门限值确定。这里的噪声是指侦察系统所在位置的外部环境噪声,而不是通常的机内噪声。由基本的雷达原理不难推导出侦察接收机信噪比方程为

$$R_{S,Nf} = \frac{P_{av} G_t G_r \lambda^2 \gamma_l}{(4\pi)^2 (k T_0 B_l F_{ln}) R_j^2 L_l L_{lj}}。(8)$$

式中: P_{av} 为天波雷达平均发射功率; G_t 为天波雷达发射天线在侦察接收机方向的增益; G_r 为侦察接收机的增益; λ 为工作波长; γ_l 为侦察天线极化损失; B_l 为侦察接收机等效噪声带宽; F_{ln} 为侦察接收机处高频环境噪声系数; R_j 为天波雷达到干扰机的射线距离; L_l 为侦察接收机系统损耗; L_{lj} 为单程电离层吸收损耗。若 $R_{S,Nfmin}$ 为侦察接收机检测所需要的最小信噪比,则

$$P_{Jl} = \begin{cases} 1 & R_{S,Nf} \geq R_{S,Nfmin} \\ 0 & R_{S,Nf} < R_{S,Nfmin} \end{cases}。(9)$$

1.2 抗欺骗性干扰措施有效概率计算方法

当同时存在 n 种欺骗性干扰样式,天波雷达同时采用 m 种抗欺骗性干扰措施时,抗欺骗性干扰措施有效概率为^[7]

$$P_E = \prod_{i=1}^n P_{ECCMi}。(10)$$

式中, P_{ECCMi} 为天波雷达 m 种抗欺骗性干扰措施抗第 i 种欺骗性干扰的有效概率。假设抗欺骗性干扰措施都是并联的,则

$$P_{ECCMi} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_{ij})。(11)$$

式中, P_{ij} 为第 j 种抗欺骗性干扰措施对抗第 i 种欺骗性干扰样式的有效概率。 P_{ij} 的值应通过大量试验进行统计的方法获得, 但由于目前没有专门的天波雷达欺骗干扰机且天波雷达责任区域通常远离大陆, 试验难以开展, 因此, 本文采用半定性半定量的灰色度量方法估算 P_{ij} 值。将天波雷达抗欺骗干扰措施有效概率划分为7个等级, 如表1所示。根据此量化表, 针对具体的欺骗性干扰样式, 可以为天波雷达抗欺骗干扰措施按其有效程度赋予一个量化值。

表1 半定性半定量的量化表

Table 1 The semiquantitative/semiquantitative quantization values

等级	1	2	3	4	5	6	7
意义	无效	效果很差	效果差	效果一般	效果好	效果很好	效果极好
数值	0	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1

根据文献[8], 天波雷达面对的欺骗干扰样式主要有距离欺骗、方位欺骗、速度欺骗和航迹欺骗。其中: 距离欺骗是对假信号进行不同的时延调制产生同方位不同距离上的多个假目标, 天波雷达可以采用重频捷变和幅度起伏特性识别法对抗此类干扰, 由于是单参数欺骗, 两种措施均能取得较好的抗干扰效果, 划分到第4~5等级之间; 方位欺骗是从天波雷达旁瓣连续注入假信号, 从而在天波雷达主瓣方向形成不同方向的多个假目标, 这类干扰非常依赖雷达的旁瓣特性, 采用自适应波束形成技术较易将其剔除掉, 将这项措施划分到第5等级, 另外, 改变搜索周期使假目标在显示上产生跳变也可以较好地识别方位欺骗干扰, 将其划分到第4~5等级之间; 速度欺骗通过给假信号调制不同的多普勒频率从而产生不同速度的假目标, 天波雷达可通过距离变化率和幅度起伏特性识别法对抗此类干扰, 两项措施运用起来相对复杂, 抗干扰效果一般, 将其划分到第4等级; 航迹欺骗是一种复合的欺骗干扰样式, 通过同时改变假目标的距离和方位参数在天波雷达上形成连续的假目标航迹, 天波雷达可采用抗距离和方位欺骗干扰的措施来对抗航迹欺骗干扰。根据上述分析, 给天波雷达抗欺骗干扰措施有效概率的赋值结果如表2所示。

表2 抗欺骗干扰措施有效概率估值

Table 2 Values of effective probability of anti-deception jamming measures

欺骗干扰样式	抗欺骗干扰措施				
	重频捷变	幅度起伏特性识别	自适应波束形成	变搜索周期	距离变化率识别
距离欺骗	0.6	0.55	\	\	\
方位欺骗	\	\	0.7	0.6	\
速度欺骗	\	0.55	\	\	0.5

1.3 其他概率计算模型

1) 分选识别概率。

假设 P_k 为分选概率, P_{id} 为识别概率, 则分选识别概率为

$$P_{id} = P_k P_{id} \quad (12)$$

侦察系统分选能力主要体现为可处理的信号流密度, 则 P_k 计算式为

$$P_k = \begin{cases} 1 & P_{s_{sr}} \leq P_{s_{src}} \\ \frac{P_{s_{src}}}{P_{s_{sr}}} & P_{s_{sr}} > P_{s_{src}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{s_{sr}}$ 为实际输入的信号流密度; $P_{s_{src}}$ 为侦察系统能够处理的信号流密度。假设识别信号参数的事件为 A 事件, “识别反应时间 t 小于所规定的时间 τ ” 的事件为 B 事件, 则识别概率为

$$P_{id} = P(A)P(B) \quad (14)$$

2) 模拟雷达信号概率。

模拟就是使干扰机产生的假信号的基本参数相同或者接近于雷达信号并同时包含人为改变的一个或几个参数值^[9]。若干扰机能够模拟天波雷达信号, 则 $P_B = 1$, 反之 $P_B = 0$ 。

3) 干噪比达到要求的概率。

欺骗性干扰要达到干扰效果还必须使欺骗干扰信号能够被天波雷达检测到。由基本的雷达原理不难推导出天波雷达接收到的干扰噪声功率比为

$$J_{N,R} = \frac{P_j G_j G'_j \lambda^2 D_g \gamma_2}{(4\pi)^2 R_j^2 L_s L_{pj} k T_0 F_a B_s} \quad (15)$$

式中: P_j 为干扰机发射功率; G_j 为干扰机天线在雷达方向的增益; G'_j 为雷达接收天线在干扰机方向的增益; D_g 为天波雷达固有信噪比改善因子; γ_2 为雷达天线极化损失; B_s 为雷达接收机带宽; F_a 为天波雷达处外部环境噪声系数; L_s 为雷达系统损耗。若天波雷达信噪比检测门限值为 $R_{s,Nmin}$, 则 P_{μ} 的计算式为

$$P_{\mu} = \begin{cases} 1 & J_{N,R} \geq R_{s,Nmin} \\ 0 & J_{N,R} < R_{s,Nmin} \end{cases} \quad (16)$$

2 实例评估

以澳大利亚金达莱天波雷达系统为例, 应用上述评估模型对其抗欺骗干扰能力进行评估。根据文献[10], 金达莱天波雷达系统典型参数为: $P_{av} = 53$ dB, $G_r = 24$ dB, $G_t = 30$ dB, $\lambda = 20$ m, $D_g = 50$ dB, $B_s = 10$ kHz, $F_a = 35$ dB, $L_s = 10$ dB, 搜索子区数 $N = 6$ 。由于没有实际干扰设备, 参照短波通信干扰机性能参数, 假定侦察干扰机参数为: $\theta_h = \theta_s = 360^\circ$ (全向天线), 宽开截获, 侦察截获时间 $T = 5$ s, $G_r = 0$ dB, $B_r = 50$ kHz, $F_{ra} = 35$ dB, $L_r = 10$ dB, $P_j = 20$ W, $G_j = 3$ dB, $L_{pj} = 10$ dB。假设 $R_{s,Nmin} = R_{s,Nmin} = 10$ dB。

当飞机目标对金达莱雷达系统进行自卫式距离欺

骗干扰时, $G'_r = G_r$, 假设 $R_j = 1400$ km。为了突出分析的主要方面, 假定 $P_D = P_B = 1$ 。由式(7)、式(9)计算得 $P_{hf} = 0.91$, $P_l = 1$ ($R_{s,NI} = 56.1$ dB > 10 dB), 则 $P_{j1} = 0.91$ 。将干扰机和天波雷达参数代入式(15)可得到干扰比 $J_{N,R} = 88$ dB > 10 dB, 则 $P_{j4} = 1$ 。将表2中抗距离欺骗干扰措施有效概率值代入式(10), 得到 $P_E = 0.82$ 。再由式(1)可计算得上述条件下金达莱雷达系统抗距离欺骗干扰概率为 $K_{FJ} = 0.836$ 。

当飞机目标对金达莱雷达系统进行自卫式速度欺骗干扰时, 其他参数设置与距离欺骗时相同。将表2中抗速度欺骗干扰措施有效概率值代入式(10), 计算得 $P_E = 0.775$, 则由式(1)计算得上述条件下金达莱雷达系统抗速度欺骗干扰概率为 $K_{FJ} = 0.795$ 。

假设地面固定式侦察干扰机对金达莱雷达系统进行方位欺骗干扰, $N_{zs} = 2$, $R_j = 1400$ km。由式(7)可得 $P_{hf} = 0.99$ 。雷达发射天线副瓣电平取 -12 dB, $R_{s,NI} = 48$ dB > 10 dB, 则 $P_l = 1$, 此时计算得 $P_{j1} = 0.99$ 。雷达接收天线副瓣电平取 -30 dB, $J_{N,R} = 46$ dB > 10 dB, 则 $P_{j4} = 1$ 。将表2中抗方位欺骗干扰措施有效概率值代入式(10), 计算得 $P_E = 0.84$, 假定 $P_D = P_B = 1$, 则由式(1)可知, 在上述条件下金达莱雷达系统抗方位欺骗干扰概率为 $K_{FJ} = 0.842$ 。

假设地面固定式侦察干扰机对金达莱雷达系统进行航迹欺骗干扰, 其他参数设置与方位欺骗时相同。那么, $P_{j1} = 0.99$, $P_{j4} = 1$ 。将表2中抗距离和方位欺骗干扰措施有效概率值代入式(10), 计算得 $P_E = 0.69$ 。同样假定 $P_D = P_B = 1$, 则由式(1)可得在上述条件下金达莱雷达系统抗航迹欺骗干扰概率为 $K_{FJ} = 0.693$ 。

从以上计算结果可以看出, 金达莱雷达系统在典型条件下抗欺骗性干扰能力均在较好水平以上, 其中抗方位欺骗能力最强, 抗距离和速度欺骗能力次之, 抗航迹欺骗干扰能力最弱, 评估结果符合专家对金达莱天波雷达系统抗欺骗干扰能力的定性认识。

3 结论

天波雷达抗有源欺骗性干扰能力定量评估是一项复杂而困难的问题, 没有相应的实装对抗条件进行模拟评估, 相关的学术研究也鲜有报道。本文尝试从数学概率的角度来解决这个难题, 对天波雷达与欺骗式干扰机对抗过程中主要环节的概率模型进行了研究, 并在此基础上构建了抗欺骗干扰概率模型, 实例评估表明了评估模型的有效性。本文的评估模型为天波雷达抗欺骗性干扰能力定量评估提供了一条科学途径, 在天波雷达作战效能评估和雷达系统对抗仿真领域有很好的应用前景。天波雷达抗欺骗干扰措施有效概率的估算采用了

半定性半定量的灰色度量方法, 还比较粗放, 不够精确。下一步将在评估条件改善的情况下针对抗欺骗干扰措施有效概率的定量估算进行深入研究。

参考文献

- [1] 周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. (ZHOU W Y, JIAO P N. Over-the-horizon radar technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2008.)
- [2] 雷腾, 胡国平, 金耀东. 基于多级模糊综合评判的雷达抗干扰性能评估[J]. 现代防御技术, 2009, 37(1): 128-132. (LEI T, HU G P, JIN Y D. Evaluation method of anti-jamming performance for radar based on the multi-level fuzzy comprehensive evaluation [J]. Modern Defense Technology, 2009, 37(1): 128-132.)
- [3] 任明秋, 蔡金燕, 朱元清. 基于证据融合的雷达抗干扰性能多指标综合评估[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2336-2341. (REN M Q, CAI J Y, ZHU Y Q. Multi-index synthesis evaluation for radar ECCM capability based on evidence fusion theory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2336-2341.)
- [4] 龙方, 张晓林, 刘湘斌. 基于ECM效果矩阵的雷达ECCM性能评估准则[J]. 现代雷达, 2006, 28(1): 20-22. (LONG F, ZHANG X L, LIU X B. A comprehensive evaluation criterion of radar ECCM performance based on electronic countermeasure effect matrix [J]. Modern Radar, 2006, 28(1): 20-22.)
- [5] 曲长文. 雷达抗欺骗性干扰度量方法[J]. 航天电子对抗, 1995(3): 27-30. (QU C W. Measuring method of radar systems against deception [J]. Aerospace Electronic Warfare, 1995(3): 27-30.)
- [6] 保铮, 谢维信, 朱宾. 雷达系统抗欺骗型干扰性能的测度[J]. 电子学报, 1989, 17(6): 13-19. (BAO Z, XIE W X, ZHU B. ECCM evaluation for radar systems against deception [J]. Acta Electronica Sinica, 1989, 17(6): 13-19.)
- [7] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999. (ZHAO G Q. Radar countermeasures principle [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1999.)
- [8] 王雪松, 肖顺平. 现代雷达电子战系统建模与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. (WANG X S, XIAO S P. Modeling and simulation of modern radar and electronic warfare systems [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2010.)
- [9] 王国玉, 汪连栋. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. (WANG G Y, WANG L D. Mathematics simulation and evaluation of radar and electronic warfare [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.)
- [10] SKOLNIK M. Radar handbook [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2008.