

雷达被截获距离的等效试验方法研究*

曾小东

(中国电子科技集团公司第十研究所,四川 成都 610036)

摘要: 针对雷达在对抗特定的 ESM 侦察设备时被截获距离难以直接测试的问题,研究了雷达被 ESM 侦察设备截获距离的等效试验方法。首先,推导了期望试验条件和替代试验条件下被截获距离的等效模型。然后,针对不同的试验场景,将等效模型细分为四种不同的类型。最后,通过某型雷达被截获距离外场试飞的实测数据对等效模型进行了验证。试验结果表明等效模型的误差为 7.26%,满足试验大纲误差小于 10% 的要求。

关键词: 雷达;ESM 侦察设备;被截获距离;等效模型

中图分类号: TN957

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200882

中文引用格式: 曾小东. 雷达被截获距离的等效试验方法研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(3): 111-114.

英文引用格式: Zeng Xiaodong. The research of radar intercepted distance by equivalent test[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(3): 111-114.

The research of radar intercepted distance by equivalent test

Zeng Xiaodong

(The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to directly test the intercepted distance between radar and specific ESM reconnaissance equipment, the equivalent test method of radar intercepted distance by ESM reconnaissance equipment is studied. Firstly, the equivalent model of intercepted distance under the expected test condition and the substitute test condition is deduced. Then, according to different test scenarios, the equivalent model is subdivided into four different types. Finally, the equivalent model is verified by the measured data. The data is from the intercepted distance of a certain radar in the outfield flight test. The test results show that the error of the equivalent model is 7.26%, which meets the requirement that the error of the test outline is less than 10%.

Key words: radar; ESM reconnaissance equipment; intercepted distance; equivalent model

0 引言

雷达被 ESM 侦察设备截获距离试验是考核鉴定雷达低截获性能的重要试验内容之一^[1-3]。在现代战场电磁对抗条件下,雷达所面临的电磁环境异常复杂,侦收雷达信号的 ESM 侦察设备十分繁多。要考核雷达被各种 ESM 侦察设备截获距离,无论从效率还是从耗费都不可能用“穷尽法”来选用各种 ESM 侦察设备来做实装对抗试验。与此同时,往往要选用所期望的 ESM 侦察设备来进行被截获距离试验是极其困难的,甚至是不可能的。

雷达可以采用功率控制、复杂调制波形^[4-5]、灵活的扫描样式和超低副瓣等低截获概率设计^[6-7],所以 ESM 侦察设备可能侦收不同功率控制量的雷达信号,也可能侦收不同副瓣的雷达信号。因此想要考核雷达在不同工作状态下的被截获距离,亦是不现实的。

本文研究的等效试验方法是在选定同样的试验条

件下的等效折算^[8-10],如假定两次试验,雷达的发射功率相同,对一次试验的被截获距离试验结果折算到其他条件下的等效被截获距离。等效试验方法可以解决解决空中试飞中,由于配试设备的条件限制,如 ESM 侦察设备的系统灵敏度等限制,条件与研制要求的规定不一致,将现有配试条件下得到的雷达被截获距离等效折算到研制要求配试条件下的雷达被截获距离。

1 等效模型

雷达的低截获技术不断演化,通常 ESM 侦察设备得到高的信号强度,使得截获接收机可以采用门限检测来获取每部雷达的脉冲,然后估计其参数^[11]。雷达被截获距离是表征雷达低截获概率技术是否有效的关键参数。在雷达鉴定时,需要通过试验验证其被截获距离是否满足设计指标,试飞是最直接的手段,然而考虑到运行成本以及试验的完备性,通常首先需要以地面试验进行等效测试。本文建立了雷达被期望 ESM 侦察设备截获距离和替代 ESM 侦察设备截获距离的等效模型,可以支撑

* 基金项目: 十三五预研项目

等效测试中的雷达被截获距离折算。

雷达被期望 ESM 侦察设备截获距离为：

$$R_i = \frac{\lambda_i}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{t_i} \cdot L_{t_i} \cdot G_{t_i} \cdot G_{r_i}}{L_{atm_i} \cdot L_{pol_i} \cdot L_{else_i} \cdot L_{r_i} \cdot \delta_{min_i}}} \quad (1)$$

同理可得，雷达被替代 ESM 侦察设备截获距离为：

$$R_s = \frac{\lambda_s}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{t_s} \cdot L_{t_s} \cdot G_{t_s} \cdot G_{r_s}}{L_{atm_s} \cdot L_{pol_s} \cdot L_{else_s} \cdot L_{r_s} \cdot \delta_{min_s}}} \quad (2)$$

式中， λ_i 和 λ_s 分别为期望试验和替代试验中的雷达信号波长， P_{t_i} 和 P_{t_s} 分别为期望试验和替代试验中的雷达信号发射功率， L_{t_i} 和 L_{t_s} 分别为期望试验和替代试验中的雷达发射损耗， G_{t_i} 和 G_{t_s} 分别为期望试验和替代试验中的雷达发射天线增益， G_{r_i} 和 G_{r_s} 分别为期望试验和替代试验中的 ESM 侦察设备接收天线增益， L_{atm_i} 和 L_{atm_s} 分别为期望试验和替代试验中的大气衰减， L_{pol_i} 和 L_{pol_s} 分别为期望试验和替代试验中的极化损耗， L_{else_i} 和 L_{else_s} 分别为期望试验和替代试验中的其他损耗， L_{r_i} 和 L_{r_s} 分别为期望试验和替代试验中 ESM 侦察设备的接收损耗， δ_{min_i} 和 δ_{min_s} 分别为期望试验和替代试验中 ESM 侦察设备的接收机灵敏度。

两式相除，得到等效模型为：

$$\frac{R_i}{R_s} = \frac{\lambda_i}{\lambda_s} \sqrt{\frac{P_{t_i} \cdot L_{t_i} \cdot G_{t_i} \cdot G_{r_i}}{P_{t_s} \cdot L_{t_s} \cdot G_{t_s} \cdot G_{r_s}}} \cdot \sqrt{\frac{L_{atm_s} \cdot L_{pol_s} \cdot L_{else_s} \cdot L_{r_s} \cdot \delta_{min_s}}{L_{atm_i} \cdot L_{pol_i} \cdot L_{else_i} \cdot L_{r_i} \cdot \delta_{min_i}}} \quad (3)$$

在试验过程中，使用同一部被试雷达，使得期望试验中的雷达参数和替代试验中的保持一致，即发射损耗，工作波长等参数一致， $L_{t_i} = L_{t_s}$ ， $\lambda_i = \lambda_s$ 。

同时，假定极化损耗和其他损耗也近似相等， $L_{pol_i} = L_{pol_s}$ ， $L_{else_i} = L_{else_s}$ 。于是，式(3)简化为：

$$\frac{R_i}{R_s} = \sqrt{\frac{P_{t_i} \cdot G_{t_i} \cdot G_{r_i}}{P_{t_s} \cdot G_{t_s} \cdot G_{r_s}}} \cdot \sqrt{\frac{L_{atm_s} \cdot L_{r_s} \cdot \delta_{min_s}}{L_{atm_i} \cdot L_{r_i} \cdot \delta_{min_i}}} \quad (4)$$

在理想情况下，不考虑大气衰减，式(4)进一步简化为：

$$\frac{R_i}{R_s} = \sqrt{\frac{P_{t_i} \cdot G_{t_i} \cdot G_{r_i}}{P_{t_s} \cdot G_{t_s} \cdot G_{r_s}}} \cdot \sqrt{\frac{L_{r_s} \cdot \delta_{min_s}}{L_{r_i} \cdot \delta_{min_i}}} \quad (5)$$

因为 ESM 侦察设备的系统灵敏度 S_{min} 和接收机灵敏度 δ 有如下转换关系：

$$S_{min} = \frac{L_r \cdot \delta}{G_r} \quad (6)$$

式(6)可改写为：

$$\frac{R_i}{R_s} = \sqrt{\frac{P_{t_i} \cdot G_{t_i}}{P_{t_s} \cdot G_{t_s}}} \cdot \sqrt{\frac{S_{min_s}}{S_{min_i}}} \quad (7)$$

式中， S_{min_i} 和 S_{min_s} 分别为期望试验和替代试验中 ESM 侦察设备的系统灵敏度。

对于式(7)，在试验过程中，一方面需要判断期望 ESM 侦察设备和替代 ESM 侦察设备截获时，雷达是否进行功率控制；另一方面需要区分期望 ESM 侦察设备和替代 ESM 侦察设备分别截获的是雷达主瓣、副瓣以及第

几副瓣。因此，在试验过程中，需要实时记录雷达的功率控制量，以计算等效模型中的 P_{t_i} 和 P_{t_s} 。同时，还需要实时记录雷达的扫描角度、天线方向图、雷达平台经纬高、雷达平台姿态角以及 ESM 侦察设备平台的经纬高，以计算等效模型中的 G_{t_i} 和 G_{t_s} 。 G_{t_i} 和 G_{t_s} 统称为 ESM 侦察设备平台方向的雷达发射增益 G_i ，其计算步骤如下：

- (1) 获取雷达的扫描角度；
- (2) 根据雷达的扫描角度，查询该雷达的扫描角度对应的天线方向图；
- (3) 根据雷达平台经纬高、雷达平台姿态角以及 ESM 侦察设备平台的经纬高，计算 ESM 侦察设备平台相对于雷达平台的方位角和俯仰角^[12]。

首先计算 ESM 侦察设备平台相对雷达平台的位置矢量在大地直角坐标系下的表示 $[x, y, z]$ 。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ z_1 - z_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中：

$$\begin{cases} x_i = (R_N + h_i) \cos \lambda_i \cos \gamma_i \\ y_i = (R_N + h_i) \cos \lambda_i \sin \gamma_i \\ z_i = [R_N (1 - e_1^2) + h_i] \sin \lambda_i \end{cases}, i = 0, 1 \quad (9)$$

式中， (x_0, y_0, z_0) 和 (x_1, y_1, z_1) 分别为雷达平台和 ESM 侦察设备平台的大地直角位置坐标。 $(\gamma_0, \lambda_0, h_0)$ 和 $(\gamma_1, \lambda_1, h_1)$ 分别为雷达平台和 ESM 侦察设备平台的经度、纬度和高度， e_1 表示地球第一偏心率， R_N 表示卯酉圈地球曲率半径^[13-14]。

然后根据雷达平台的经度、纬度、高度 $(\gamma_0, \lambda_0, h_0)$ 和姿态角 (Ψ, θ, ϕ) 计算由大地直角坐标系到雷达平台机体直角坐标系的旋转矩阵 C_e^b ：

$$C_e^b = \begin{bmatrix} c\theta c\Psi & c\theta s\Psi & -s\theta \\ -c\phi s\Psi + s\phi s\theta c\Psi & c\phi c\Psi + s\phi s\theta s\Psi & s\phi c\theta \\ s\phi s\Psi + c\phi s\theta c\Psi & -s\phi c\Psi + c\phi s\theta s\Psi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -s\lambda_0 c\gamma_0 & -s\lambda_0 s\gamma_0 & c\lambda_0 \\ -s\gamma_0 & c\gamma_0 & 0 \\ -c\lambda_0 c\gamma_0 & -c\lambda_0 s\gamma_0 & -s\lambda_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中， $c()$ 表示 $\cos()$ ， $s()$ 表示 $\sin()$ ， (Ψ, θ, ϕ) 为雷达平台的偏航角、俯仰角和横滚角。

最后将 ESM 侦察设备平台相对雷达平台的位置矢量在大地直角坐标系下的表示 $[x, y, z]$ 通过旋转矩阵 C_e^b 转换到雷达平台机体直角坐标系下的表示 $[x_b, y_b, z_b]$ 。

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = C_e^b \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (11)$$

依据 $[x_b, y_b, z_b]$ ，计算得到 ESM 侦察设备平台相对雷达平台的方位角 β 和俯仰角 ε 。

$$\beta = \tan^{-1}(y_b, x_b) \quad (12)$$

$$\varepsilon = \arctan \left(\frac{-z_b}{\sqrt{x_b^2 + y_b^2}} \right) \quad (13)$$

(4) 根据期望试验和替代试验中的天线方向图、方位角和俯仰角, 得到 G_{Lj} 和 G_{Ls} 。

根据不同的试验场景, 式(7)有不同的应用, 可以解决相应的等效折算问题^[15]。

试验场景 1: 期望 ESM 侦察设备和替代 ESM 侦察设备为同一设备, 雷达不进行功率控制, 主瓣被截获距离和副瓣被截获距离折算。

$$\frac{R_m}{R_l} = \sqrt{\frac{G_{\text{Lm}}}{G_{\text{Lj}}}} \quad (14)$$

式中, R_m 为主瓣被截获距离, R_l 为副瓣被截获距离。

试验场景 2: 期望 ESM 侦察设备和替代 ESM 侦察设备为同一设备, 雷达进行功率控制, 不同功率控制量下的主瓣被截获距离折算。

$$\frac{R_{\text{nc}}}{R_c} = \sqrt{\frac{P_t}{(P_t - \Delta p)}} \quad (15)$$

式中, R_{nc} 为满功率时主瓣被截获距离, R_c 为功率控制时主瓣被截获距离。

试验场景 3: 期望 ESM 侦察设备和替代 ESM 侦察设备为不同设备, 雷达发射功率和发射增益相同, 不同 ESM 侦察设备下的被截获距离折算。

$$\frac{R_l}{R_s} = k \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{min},s}}{S_{\text{min},j}}} \quad (16)$$

试验场景 4: 以上场景的组合。实际试验中, 用到了两种场景的组合, 为主瓣 ESM 侦察设备和副瓣 ESM 侦察设备为不同设备, 截获接收机灵敏度分别为 S_m 、 S_l , 进行主瓣被截获距离 R_m 和副瓣被截获距离 R_l 折算。

$$\frac{R_m}{R_l} = k \cdot \sqrt{\frac{S_l \cdot G_{\text{Lm}}}{S_m \cdot G_{\text{Lj}}}} \quad (17)$$

转换成常用的 dB 表达式为:

$$\frac{R_m}{R_l} = \sqrt{\frac{10^{\frac{S_{\text{Lm}}/10}{S_{\text{m,dB}}/10}} \cdot 10^{\frac{G_{\text{Lm,dB}}/10}{G_{\text{Lj,dB}}/10}}}{10^{\frac{S_{\text{Lj}}/10}{S_{\text{m,dB}}/10}} \cdot 10^{\frac{G_{\text{Lj,dB}}/10}{G_{\text{Lj,dB}}/10}}}} = 10^{(S_{\text{Lj,dB}} - S_{\text{m,dB}} + G_{\text{Lm,dB}} - G_{\text{Lj,dB}})/20} \\ = 10^{(S_{\text{Lj,dB}} - S_{\text{m,dB}} - L_{\text{s,dB}})/20} \quad (18)$$

式中, $L_{\text{s,dB}}$ 为副瓣电平, 单位 dB。

当考虑大气衰减时, 等效模型为:

$$L_{\text{atm},\text{sm}} + 20\log_{10}(R_m) + S_{\text{m,dB}} = L_{\text{atm},\text{sl}} + 20\log_{10}(R_l) + S_{\text{l,dB}} - L_{\text{s,dB}} \quad (19)$$

式中, $L_{\text{atm},\text{sm}}$ 和 $L_{\text{atm},\text{sl}}$ 分别为主瓣和副瓣的大气衰减。展开后, 可得:

$$(\gamma_o + \gamma_w) \cdot R_m + 20\log_{10}(R_m) + S_{\text{m,dB}} \\ = (\gamma_o + \gamma_w) \cdot R_l + 20\log_{10}(R_l) + S_{\text{l,dB}} - L_{\text{s,dB}} \quad (20)$$

式中, γ_o 和 γ_w 分别为干燥空气的吸收衰减率及水汽的吸收衰减率, 均和水汽密度、温度、气压、频率有关。

2 模型验证

验证中, 需要进行多次真实试验, 修正替代模型的参数, 待模型稳定后, 可作为期望试验的被截获距离计

算依据。具体的实施步骤如下。

- (1) 根据指标的理论推导公式, 建立等效模型;
 - (2) 开展多次真实试验, 任取两次试验, 得到试验 1 的真实被截获距离和试验 2 的真实被截获距离;
 - (3) 在等效模型中代入试验 1 的真实被截获距离, 试验 1 的被试和配试设备参数, 试验 2 的被试和配试设备参数, 推导得到试验 2 的等效被截获距离;
 - (4) 将试验 2 的真实被截获距离和试验 2 的等效被截获距离对比, 得到等效模型误差;
 - (5) 根据等效模型误差, 迭代修改等效模型参数, 减小等效模型误差;
 - (6) 当等效模型误差满足用户需求时, 停止迭代, 固化等效模型参数;
 - (7) 在等效模型中代入替代试验的真实被截获距离, 替代试验的被试和配试设备参数, 期望试验的被试和配试设备参数, 推导得到期望试验的等效被截获距离。
- 某型雷达的外场被截获距离的处理数据如表 1 所示。

表 1 被截获距离

序号	截获接收机灵敏度/dBm	截获距离/m
试验 1 的真实被截获距离	-79	9 700
试验 2 的真实被截获距离	-33	49.6
试验 2 的等效被截获距离	-33	53.2
期望试验 1	-70	4 100
期望试验 2	-90	29 500

验证不考虑大气衰减和考虑大气衰减的对比情况。副瓣电平 $L_{\text{s,dB}}$ 取 -10 dB, 大气衰减率 $\gamma = (\gamma_o + \gamma_w) = 0.02$ dB/km。主瓣被截获距离的验证结果如表 2 所示。

表 2 有无大气衰减的对比情况

序号	截获接收机灵敏度	截获距离/km
副瓣被截获距离	-70 dBm	4.1
不考虑大气衰减	-80 dBm	41.0
考虑大气衰减	-80 dBm	37.9
等效模型的误差	8.18%	

试验 1 数据的试验场景是前文描述的“替代试验”, 在空中试飞开展, 被试飞机平台和挂载 ESM 侦察设备的配试飞机相向飞行, 随着距离的抵近, 在 9.7 km 时, 到达临界截获状态。试验 2 数据的试验场景同样是前文描述的“替代试验”, 在机场地面开展, 被试飞机平台和车载 ESM 侦察设备相距 49.6 m, 通过调节 ESM 侦察设备的前端衰减器, 等效降低其灵敏度, 达到临界截获状态。试验 3 和试验 4 的数据是通过试验 1 和试验 2 数据固化等效模型参数后, 将截获接收机灵敏度代入等效模型, 得到被截获距离。

通过试验 2 的真实被截获距离和试验 2 的等效被截获距离核算可以得到等效模型误差为 7.26%, 小于试

验大纲要求的 10%，满足固化等效模型参数的要求。将期望试验 1 和期望试验 2 的截获接收机灵敏度代入等效模型后，可分别得到被截获距离为 4.1 km 和 29.5 km。

3 结论

本文研究的雷达被截获距离的等效模型方法已应用于某型雷达的低截获性能评估和鉴定考核中。利用了机场地面和空中试飞的多次试验数据，通过迭代优化的方式，建立了被截获距离的等效模型。被截获距离等效模型的正确性、可行性已在实际试验中得到了初步的检验。等效模型具有一定的通用性，可推广应用于数据链等射频信号的被截获距离测试。在等效模型的推导过用中，各种系统损耗和大气衰减需要准确测算和标定，必要时需要单独进行建模和验证。下一步，需要在更多的试验实践中进行数据积累，完善等效模型，提高模型的准确度。

参考文献

[1] VANKAYALAPATI N, KAY S. Asymptotically optimal detection of low probability of intercept signals using distributed sensors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(1): 737-748.

[2] 王国玉, 汪连栋, 阮祥新, 等. 雷达对抗试验替代等效推算方法与模型[C]. 中国电子学会电子对抗分会第十二届学术年会论文集, 2001: 199-205.

[3] KOOKAMARI F H, NOROUZI Y, NAYEBI M M. Using a moving aerial platform to detect and localise a low probability of intercept radar[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2017, 11(7): 1062-1069.

[4] SACHIN A R, AMBAT S K, HARI K V S. Analysis of intra-pulse frequency modulated low probability of interception radar signals[J]. Sadhana, 2017, 42(7): 1-14.

[5] TANG B, TANG J, PENG Y. Low probability of interception

of an advanced noise radar waveform with Linear-FM[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2): 1351-1356.

[6] VANHOY G, SCHUCKER T, BOSE T. Classification of LPI radar signals using spectral correlation and support vector machines[M]. Kluwer Academic Publishers, 2017.

[7] 韩俊, 陆晓飞, 吕明久, 等. 相位编码调频步进信号及其性能分析[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(4): 371-377.

[8] 谢飞, 周德召, 胡磊力, 等. 红外搜索跟踪系统探测距离缩比测试方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(4): 90-94.

[9] 赵晔, 张丹萌, 曹屹. 海面电磁缩比测量的替代模型[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(3): 26-31.

[10] 赵辉. 预警机雷达天线辐射特性的缩比模型测试法[J]. 微波学报, 2014(S1): 318-321.

[11] PHILLIP E P. Detecting and classifying low probability of intercept radar (Second Edition)[M]. Artech House, Boston and London, 2009.

[12] 李品, 龚泽华. 时差无源定位测高性能分析[J]. 现代雷达, 2019(8): 38-40.

[13] 史忠亚, 吴华, 沈文迪, 等. 考虑射频隐身的雷达功率自适应管控方法[J]. 现代雷达, 2017, 39(10): 6-10.

[14] 曾小东. 机载雷达高度表被截获性能分析[J]. 现代雷达, 2019, 41(6): 20-22.

[15] HUA W U, ZHONG Y S, WEN D S, et al. Radar LPI performance assessment method based on extended G-GIFSS algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(6): 1256-1260.

(收稿日期: 2020-09-04)

作者简介:

曾小东(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 信号与信息处理、航空电子与射频隐身。

(上接第 101 页)

[14] 代传堂. 一种宽带低相噪频率合成器的设计方法研究[J]. 电波科学学报, 2018, 33(6): 746-751.

[15] 宋雪莹, 崔永俊, 张祥, 等. 基于 DDS+PLL 的低相噪频率合成器设计[J]. 电子器件, 2019, 42(4): 947-952.

(收稿日期: 2020-09-21)

作者简介:

胥伟(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向: 射频系统设计与仿真。

潘明海(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 射频仿真与信号处理。

张艳晴(1997-), 女, 硕士, 主要研究方向: 雷达信号识别与分选。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所