

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.10.017

基于概率分析的反舰导弹末制导雷达效能评估

宋贵宝¹, 袁洪武², 李红亮²

(1. 海军航空工程学院飞行器工程系, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对干扰环境的复杂性和抗干扰措施的多样性等问题, 提出一种反舰导弹末制导雷达在电子干扰条件下的效能评估方法。运用概率分析方法, 建立电子干扰设备对反舰导弹末制导雷达干扰成功的概率计算模型, 以及反舰导弹末制导雷达抗电子干扰效能评估模型, 并给出了效能评估步骤。评估结果表明: 该模型为实现反舰导弹末制导雷达效能的定量评估提供了基础。

关键词: 反舰导弹; 概率分析; 电子干扰; 末制导雷达; 效能评估

中图分类号: TJ765 **文献标志码:** A

Effectiveness Evaluation of Terminal Guidance Radar of Anti-Ship Missile Based on Probability Analysis

Song Guibao¹, Yuan Hongwu², Li Hongliang²

(1. Dept. of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aimed at the problem of complexity of jamming environment and diversity of anti-jamming measure, a new method of effectiveness evaluation for terminal guidance radar of anti-ship missile was put forward. Successful jamming probability calculation model and effectiveness evaluation model were built by the means of probability analysis, and the effectiveness evaluation steps was given, which set the stage for ration evaluation of terminal guidance radar effectiveness of anti-ship missile. Result shows that the model can offer base for achieve ration evaluation of terminal guidance radar of anti-ship missile.

Keywords: anti-ship missile; probability analysis; electronic jamming; terminal guidance radar; effectiveness evaluation

0 引言

反舰导弹末制导雷达在电子对抗环境中具有的抗干扰能力是导弹武器系统的作战能力和生存能力的基本保证^[1]。如何评定和考核其抗干扰能力是科研、生产和使用部门关心的问题。但是由于干扰环境的复杂性和抗干扰措施的多样性, 在鉴定和度量反舰导弹末制导雷达系统的抗干扰能力时很难定义一个既考虑到各种干扰影响、又能将雷达各部件与抗干扰能力有关因素均估计进去的完善的量^[2-3]。而不管是信息量的损失, 还是能量的改变, 不论采取了多少种抗干扰措施, 不论选择了什么样的体制, 其抗干扰的能力最终都要反应到系统效能上^[4]。因此, 笔者通过运用概率分析的方法, 在考虑反舰导弹武器系统的抗干扰效果时, 以对反舰导弹武器系统最终性能指标影响程度为准则, 达到定量评估反舰导弹末制导雷达的抗电子干扰效能目的。

1 对末制导雷达干扰成功概率计算模型

电子干扰设备要想使反舰导弹末制导雷达受到干扰, 必须满足以下条件:

1) 应提前获得或侦察到所要干扰的反舰导弹末制导雷达的位置、特性参数、抗干扰性能等信息, 满足该条件的概率可用成功侦察的概率 p_a 来表示; 2) 能够采用相应的电子干扰设备, 满足该条件的概率可用 p_b 来表示; 3) 电子干扰机能够产生被干扰反舰导弹末制导雷达接收机所接受的信号, 即在反舰导弹末制导雷达接收机输入端能够产生干扰, 满足该条件的概率可用 p_c 来表示。

由于概率 p_a 、 p_b 、 p_c 是相互独立事件的概率, 因此, 对反舰导弹末制导雷达干扰成功的概率 p_g 为

$$p_g = p_a p_b p_c \quad (1)$$

下面分别建立式 (1) 中的各项概率计算模型。

1.1 对末制导雷达参数的侦察概率

对反舰导弹末制导雷达参数的侦察概率 p_a 取决于所要干扰反舰导弹末制导雷达的类型、工作方式以及干扰设备的性能等因素^[5-6]。例如, 要想用宽波束天线、宽频带的积极干扰设备来干扰非频率捷变反舰导弹末制导雷达, 则只需侦察到所要干扰反舰导弹末制导雷达的频率和位置即可, 并且精度也

收稿日期: 2011-05-26; 修回日期: 2011-07-01

作者简介: 宋贵宝(1964—), 男, 江苏人, 博士, 教授, 从事导弹系统工程、管理科学与工程研究。

不需要特别高。由于所侦察的参数是互相独立的，因此，对反舰导弹末制导雷达参数的侦察概率 p_a 为

$$p_a = \frac{\sum_{i=1}^n p_{ai}}{N} \tag{2}$$

式中： N 为需要侦察的反舰导弹末制导雷达参数总数； p_{ai} 为需要侦察的反舰导弹末制导雷达第 i 个参数被侦察到的概率； n 为所侦察到的需要侦察的反舰导弹末制导雷达参数总的个数， $n \leq N$ 。

实际上，反舰导弹末制导雷达被侦察的概率 p_a 同时也就是反舰导弹末制导雷达的隐蔽使用效能。也就是说，如果反舰导弹末制导雷达隐蔽使用，则被敌方侦察的概率就会变得小。

1.2 能够采用相应干扰设备的概率

针对某反舰导弹末制导雷达，要想采用相应的干扰设备进行干扰，理论上应满足以下 2 个条件^[7]：

- 1) 干扰机的频段能覆盖反舰导弹末制导雷达的工作频率，满足该条件的概率可用 p_{b1} 来表示；
- 2) 干扰机的方向性必须指向反舰导弹，满足该条件的概率可用 p_{b2} 来表示。

由于上述 2 个条件(事件)是相互独立的，因此，敌方采用相应干扰设备的概率 p_b 就可以计算为

$$p_b = p_{b1} p_{b2} \tag{3}$$

概率 p_{b1} 与反舰导弹末制导雷达的性能、干扰设备的数量以及特性有关。如果反舰导弹末制导雷达的工作频率在干扰机的频率范围之内，则有 $p_{b1}=1$ ；如果反舰导弹末制导雷达的工作频率在干扰机的频率范围之外，则有 $p_{b1}=0$ 。对于频率捷变反舰导弹末制导雷达可能工作在 n 个频段上，而敌方可能拥有 m 个窄带干扰机，则依据均匀分配规则，有 $p_{b1}=m/n$ 。

概率 p_{b2} 要由反舰导弹末制导雷达工作频率和干扰设备的数量、相互位置分布关系以及天线波束宽度等因素来决定。例如：现计划用一部波束宽度为 $\Delta\phi_1$ 的干扰机同时干扰 2 枚反舰导弹，2 枚反舰导弹位于不同的方向上，相对干扰机来讲，2 枚反舰导弹与干扰机连线之间的夹角用 $\Delta\phi_2$ 来表示。这样，将会出现 2 种情况：

- 1) 如果 $\Delta\phi_1 \geq \Delta\phi_2$ ，则该干扰机可以同时干扰 2 枚反舰导弹，此时 $p_{b2}=1$ ；
- 2) 如果 $\Delta\phi_1 < \Delta\phi_2$ ，则该干扰机不可能同时干扰 2 枚反舰导弹，此时 $p_{b2}=0.5$ 。

1.3 电子干扰机能够产生干扰末制导雷达信号概率

电子干扰机能够产生干扰反舰导弹末制导雷达

信号的概率 p_c 由 3 个事件构成，即干扰信号频域上通过反舰导弹末制导雷达接收机的概率 p_{c1} 、干扰机天线波束精确指向反舰导弹末制导雷达的概率 p_{c2} 、干扰信号时域上进入反舰导弹末制导雷达天线主瓣的概率 p_{c3} 。由于以上 3 个事件是相互独立的，因此电子干扰机能够产生干扰反舰导弹末制导雷达信号的概率 p_c 为

$$p_c = p_{c1} p_{c2} p_{c3} \tag{4}$$

概率 p_{c1} 主要取决于干扰机调谐到反舰导弹末制导雷达工作频率的精度和干扰频谱宽度 Δf_1 与反舰导弹末制导雷达接收机带宽 Δf_2 的比值 $\Delta f_1/\Delta f_2$ 。其中，干扰机调谐到反舰导弹末制导雷达工作频率的精度由测量反舰导弹末制导雷达频率的误差、干扰发射机调谐到所测频率上的误差值来确定^[8]。通常，测量误差和调谐误差均满足零均值高斯分布，分布密度为 $\omega(f)$ 。这样，频谱宽度为 Δf_1 的干扰信号通过带宽为 Δf_2 的反舰导弹末制导雷达接收机的概率为

$$p_{c1} = 2 \int_0^{\frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2}} \omega(f) df = 2\Phi\left(\frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2\sigma}\right) - 1 \tag{5}$$

式中

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \tag{6}$$

σ 为干扰中心频谱调谐到反舰导弹末制导雷达中心频谱的均方根误差，可以表述为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \tag{7}$$

其中 σ_1 为反舰导弹末制导雷达频率被侦察的均方根误差； σ_2 为干扰机将频率调谐到反舰导弹末制导雷达工作频率的均方根误差。

概率 p_{c2} 主要取决于干扰机天线波束指向反舰导弹末制导雷达的精度和天线波束的宽度；同理，该概率与干扰机的定向精度(方位、仰角)有关，可以通过式 (5) 获得。

概率 p_{c3} 主要取决于干扰系统的快速反应性能以及对反舰导弹末制导雷达干扰的持续时间等。在具体作战中，大多数情况下，任何一枚反舰导弹末制导雷达工作时间都很短暂，因此，要想有效地实施干扰，干扰机必须具有快速反应能力。例如：当反舰导弹末制导雷达工作在单次扫描方式时，若使反舰导弹末制导雷达在单次扫描过程中受到干扰，并且使该干扰从反舰导弹末制导雷达天线波束的主瓣进入，则必须有

$$t_1 = \frac{\Delta\varphi}{\omega} \quad (8)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为反舰导弹末制导雷达天线波束在电平 f_0 点的宽度; ω 为反舰导弹末制导雷达天线旋转的角速度。

如果干扰设备的反应时间 t_2 大于反舰导弹末制导雷达的工作时间 t_1 , 则该干扰设备无法通过反舰导弹末制导雷达天线主瓣对反舰导弹末制导雷达施行干扰, 说明 $p_{c3}=0$ 。例如: 对于频率捷变反舰导弹末制导雷达来讲, 该时间通常在“s”乃至“ms”量级上, 因此, 这就决定了电子干扰设备必须具有快速反应能力。同时也可以看出, 对付这种频率捷变反舰导弹末制导雷达应采用宽带干扰而不应采用窄带干扰。

2 末制导雷达抗电子干扰效能评估模型

在实际工作中, 反舰导弹末制导雷达有时可能工作在干扰状态下, 有时则可能工作在无干扰状态下。则电子干扰条件下反舰导弹末制导雷达总的效能参数计算模型为

$$p = p_n p_g + p_e (1 - p_g) \quad (9)$$

式中: p 为干扰条件下反舰导弹末制导雷达总的效能参数; p_n 为反舰导弹末制导雷达在干扰条件下的效能参数; p_e 为反舰导弹末制导雷达的潜在效能参数(即无干扰条件下的效能参数)。

反舰导弹末制导雷达的抗干扰效能也可以用反舰导弹末制导雷达的抗干扰指数描述。即

$$p' = \frac{p}{p_e} = \frac{p_n p_g + p_e (1 - p_g)}{p_e} = 1 - p_g \left(1 - \frac{p_n}{p_e}\right) \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 如果敌方事先没有明确我反舰导弹末制导雷达已经采用了先进的抗干扰措施, 比如我反舰导弹末制导雷达已经使用了新的各种波段, 则认为 $p_g=0$, 此时, $p'=1$, 说明我反舰导弹末制导雷达工作绝对隐蔽。如果我反舰导弹末制导雷达在干扰条件下使用的效能并没有降低, 则认为 $p_n=p_e$, 此时 $p'=1$, 说明反舰导弹末制导雷达具有绝对生存能力(p_n/p_e 即反舰导弹末制导雷达的生存能力指数)。在实际作战使用过程中, 反舰导弹末制导雷达的抗干扰指数 p' 通常位于 $0 \sim 1$ 之间。

3 末制导雷达效能评估步骤

无论有没有电子干扰, 反舰导弹末制导雷达效能参数的计算都很重要, 它是反舰导弹末制导雷达保障导弹武器系统能否圆满完成给定任务的

基础^[9-10]。

有时反舰导弹末制导雷达可能会受到来自多个不同方向的干扰, 故在给定任务和反舰导弹末制导雷达效能模型时, 一定要考虑到反舰导弹末制导雷达工作环境的复杂性。为了使反舰导弹末制导雷达获得最佳的工作效能, 就必须选择最佳的技术特性参数值、最佳工作方式和制定最佳作战使用方案等。相对被干扰反舰导弹末制导雷达来讲, 干扰机位置等参数的变化也都会引起末制导雷达受干扰程度的变化。因此, 想要定量评估干扰条件下反舰导弹末制导雷达的效能, 一般只能在并不复杂的有限干扰条件, 而且还是在反舰导弹末制导雷达处于工作状态下, 才能有效进行。如果给定的任务是评估反舰导弹末制导雷达在所有可能干扰的变化范围之内, 且处于工作状态下的效能, 就需要首先将总任务划分成若干个子任务, 然后再评估各子任务所完成的效能, 最后定量评估总任务完成的效能。对于每一个子任务来讲, 都将依据特定的反舰导弹末制导雷达工作状态、一定的干扰机数量以及特定的干扰机工作状态等假设条件, 来建立每一个子任务的模型。

在具体研究过程中, 当每个子任务效能定量评估完成之后, 该子任务效能定量评估的结果可以作为建立上一级任务模型的原始数据, 为上一级任务的定量研究提供基础。

例如: 在研究存在主动和被动综合干扰条件下, 采用复合制导的反舰导弹末制导雷达的效能问题时, 一般都可以按如下步骤进行:

- 1) 研究反舰导弹末制导雷达在某种工作体制或工作状态下, 其战术特性与主动或被动综合干扰之间的相互关系。一般情况下, 在每一种工作体制(或状态)下, 反舰导弹末制导雷达的效能都可以用反舰导弹末制导雷达的生存能力指数来表示;
- 2) 研究干扰的动态特性以及反舰导弹末制导雷达的工作流程等问题;
- 3) 将不同工作体制下反舰导弹末制导雷达的生存能力指数作为反舰导弹末制导雷达完成作战任务的基础数据, 对整部反舰导弹末制导雷达的效能进行评估。

4 结束语

尽管现代反舰导弹末制导雷达均采用了一定的抗干扰措施, 但现代雷达侦察机也都采用了先进的雷达信号分析方法, 保证能够获得一系列有关雷达的战术、技术特性参数。