

反舰导弹红外复合制导电子干扰评估方法研究

刘振兴

(海军大连舰艇学院信息作战系, 辽宁 大连 116018)

摘要:本文首先分析了电子干扰对抗反舰导弹的工作原理及方法,在分析红外复合制导反舰导弹作战使用的基础上,通过建立多维度指标体系描述电子干扰对反舰导弹干扰能力。采用综合评估方法对电子干扰对抗红外复合制导进行评估,给出的相关结论对提高电子干扰对抗反舰导弹作战能力具有指导意义。

关键词:电子干扰;红外复合干扰;多维度

中图分类号:TN976 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.10.019

Evaluation method of electronic jamming against infrared compound guided anti-ship missile

LIU Zhen-xing

(Dept. of Information Combat, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: The working principle and the method of electronic jamming against anti-ship missile are analyzed. Based on this analysis, the electronic jamming capability against anti-ship missile is described through the establishment of multi dimension index system. Electronic jamming against anti-ship missile was evaluated with the comprehensive evaluation method, and the obtained conclusion has a guiding significance to improve the electronic jamming operation ability against anti-ship missile.

Key words: electronic jamming; infrared compound jamming; multi dimension

1 引言

红外复合制导作为反舰导弹制导系统的主要体制之一,在对海攻击任务中担负着重要角色。如何有效利用舰载电子战系统包含的有源、无源、冲淡、质心、箔条、红外和烟幕干扰等多种组合手段,对红外复合制导反舰导弹进行对抗,是现阶段以及以后一段时期内需要重点关注的问题^[1]。通过提高反舰导弹制导系统的抗干扰能力,各国海军在提高反舰导弹的作战使用效能方面取得了长足的进步。而作为防御方的电子干扰“软”杀伤手段,必须不断地发展电子干扰作战使用及效果评估理论,才能有效对抗反舰导弹带来的威胁。

2 电子干扰对抗反舰导弹工作原理及方法

对抗红外复合制导的反舰导弹,最有效的无源干扰方法为采用“箔条质心+烟幕”复合干扰方式。下面分别从烟幕干扰和箔条质心干扰两方面说明对抗红外复合制导工作原理及方法^[2]。

2.1 烟幕干扰对抗复合制导原理

在烟幕干扰对抗红外制导导弹的仿真过程中,设定烟幕弹形成的烟幕墙可以遮蔽舰艇的时间 t_{yz} ,及烟幕墙遮蔽舰船的时间 t_s 和烟幕墙遮蔽舰艇的时间 t_w 。

烟幕遮挡舰艇效果判断准则:

在图1坐标系中,从 $J(X_j, Y_j)$ 点看目标 $A(X_a,$

Y_a) 点方位 F , 则方位 F 求法:

$$\begin{cases} \text{若 } X_j < X_a, & F = \arctan[(Y_a - Y_j)/(X_a - X_j)] \\ \text{若 } X_j > X_a, & F = \pi + \arctan[(Y_a - Y_j)/(X_a - X_j)] \end{cases}$$

在图2所示的坐标系中, 舰艇舰艏坐标为 (X_{ss}, Y_{ss}) , 舰艉坐标为 (X_{sw}, Y_{sw}) , 烟幕头 (S_{mt}) 坐标为 (X_{smti}, Y_{smti}) , 烟幕尾 (S_{mw}) 的坐标 (X_{smwi}, Y_{smwi}) , 导弹 (M) 的坐标 (X_m, Y_m) 。可以求出舰艇舰艏看导弹、看烟幕头、看烟幕尾的方位。

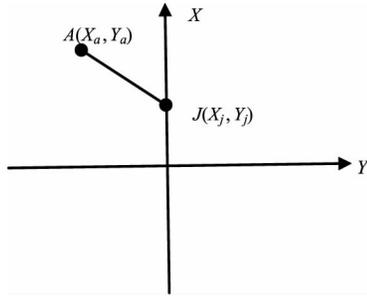


图1 烟幕遮蔽示意图一

Fig.1 Schematic 1 of smoke screen jamming

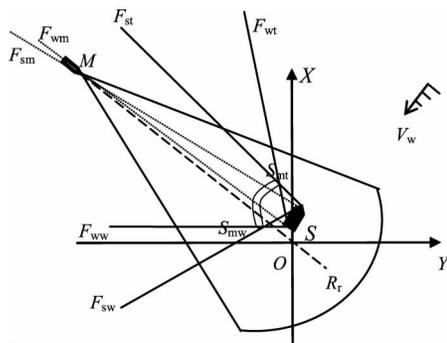


图2 烟幕遮蔽示意图二

Fig.2 Schematic 2 of smoke screen jamming

图中, F_{sm} 为舰艏看导弹的方位; F_{st} 为舰艏看烟幕头的方位; F_{sw} 为舰艏看烟幕尾的方位; F_{wm} 为舰艉看导弹的方位; F_{wt} 为舰艉看烟幕头的方位; F_{ww} 为舰艉看烟幕尾的方位; $J_s = 0$ 为舰艇被烟幕遮蔽; $J_w = 0$ 为舰艇被烟幕遮蔽。

烟幕遮蔽舰艇判断准则:

若: $F_{sm} \leq F_{st}$ 且 $F_{sm} \geq F_{sw}$ 或 $F_{sm} \geq F_{st}$ 且 $F_{sm} \leq F_{sw}$, 则 $J_s = 0$;

若: $F_{wm} \leq F_{wt}$ 且 $F_{wm} \geq F_{ww}$ 或 $F_{wm} \geq F_{wt}$ 且 $F_{wm} \leq F_{ww}$, 则 $J_w = 0$ 。

根据判断准则可以求出烟幕遮蔽舰艇的时间 t_s , 烟幕遮蔽舰艇的时间 t_w 和烟幕遮蔽舰艇的时间 t_{yz} , $t_{yz} = \min(t_s, t_w)$ 。

2.2 箔条质心干扰对抗复合制导原理

假设在整个对抗过程中, 烟幕可以完全遮蔽舰艇, 使红外成像制导系统失去作用, 不能跟踪舰艇,

那么可以认为雷达/红外成像复合制导导弹仅在末制导雷达的引导下跟踪目标, 这样先求出在一定态势下舰艇实施箔条质心干扰的效果和烟幕需要遮蔽舰艇的时间 t_{yx} 及导弹错过舰艇时与舰艇的距离 $D(t)$ ^[3]。

如图3质心干扰示意图所示, 导弹跟踪质心点 Z 时, 即导弹轴线为导弹与质心点的连线, 导弹与舰艇和质心点的连线所成的夹角 θ_1 , 导弹与箔条云和质心点的连线所成的夹角 θ_2 的时间函数 $\theta_1(t)$ 和 $\theta_2(t)$ 。

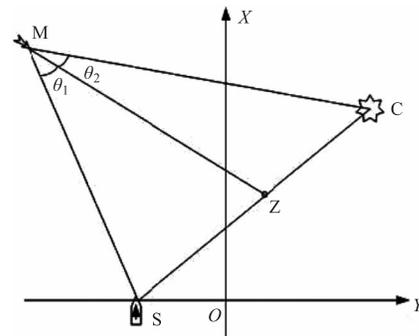


图3 质心干扰示意图

Fig.3 Schematic of centroid jamming

首先求得舰艇 S 、导弹 M 、质心点 Z 、箔条云 C 两两间的距离。

导弹和舰艇的距离:

$$D_{ms} = \{ [X_m(t) - X_s(t)]^2 + [Y_m(t) - Y_s(t)]^2 \}^{1/2}$$

导弹和质心点的距离:

$$D_{mz} = \{ [X_m(t) - X_z(t)]^2 + [Y_m(t) - Y_z(t)]^2 \}^{1/2}$$

导弹和箔条云间的距离:

$$D_{mc} = \{ [X_m(t) - X_c(t)]^2 + [Y_m(t) - Y_c(t)]^2 \}^{1/2}$$

舰艇和质心点的距离:

$$D_{sz} = \{ [X_s(t) - X_z(t)]^2 + [Y_s(t) - Y_z(t)]^2 \}^{1/2}$$

质心点和箔条云的距离:

$$D_{zc} = \{ [X_z(t) - X_c(t)]^2 + [Y_z(t) - Y_c(t)]^2 \}^{1/2}$$

根据余弦公式计算得到:

$$\theta_1(t) = \frac{D_{ms}^2 + D_{mz}^2 - D_{sz}^2}{2D_{ms}D_{mz}}$$

$$\theta_2(t) = \frac{D_{mc}^2 + D_{mz}^2 - D_{zc}^2}{2D_{mc}D_{mz}}$$

烟幕需要遮蔽舰艇的时间:

$$t_{yx} = (D_{yx} - D_{tc})/V_d$$

$$\text{当 } D_m \geq D_h + V_d \times T_f, D_{yx} = D_h;$$

$$\text{当 } D_m < D_h + V_d \times T_f, D_{yx} = D_m - V_d \times T_f$$

式中, D_m 为发现导弹时导弹距离舰艇的距离; D_h 为红外成像最大作用距离; D_{yx} 为烟幕形成时导弹距舰

艇的距离; D_{tc} 为舰艇逃出导弹视场时导弹距舰艇的距离; V_d 为导弹的飞行速度; T_f 为烟幕弹从发射到形成烟幕的时间。

导弹错过舰艇时与舰艇的距离:

$$D(t) = \min(D_{ms})$$

舰艇逃出导弹跟踪视场时刻舰艇与导弹的距离 D_{ms} ,即为 D_{tc} 。

随着导弹的接近,导弹和舰艇、质心点、箔条云之间的距离越来越小,这样 θ_1 和 θ_2 的值就越来越大。当 θ_1 和 θ_2 的值大到一定程度时,也就是当 θ_1 和 θ_2 中较大者大于或者等于导弹末制导雷达跟踪波束角 θ 的一半时,舰艇或者箔条云会溢出跟踪范围。

3 电子干扰对抗红外复合制导多维度评估方法

3.1 多维度指标体系的建立

通过上述电子干扰对抗反舰导弹工作原理可以看出,“箔条质心+烟幕”对抗反舰导弹红外复合制导时,干扰效果评估比较困难。对于箔条质心和烟幕产生的效果不能用简单的相加或相乘来衡量。红外复合制导反舰导弹在一种模式受干扰的情况下或两种模式都受干扰的情况下如何实现制导模式之间的转换,以何种标准判定真假,都是未知的。在以下分析中针对“箔条质心+烟幕”复合干扰,可以归纳出其对抗来袭导弹通常从四个维度实施干扰,包括空域、时域、频域、能量域。那么我们可以在这四个维度来分别描述电子干扰对抗反舰导弹的干扰能力^[4-5]:

(1) 干扰空间分辨能力(空域)

电子干扰对抗反舰导弹的空间分辨能力,是指“箔条质心+烟幕”在末制导搜索范围内的空间分辨率。一般可通过对红外复合制导导弹导引头在搜索区域内探测到的两个或多个目标方位和距离的结果得出空间分辨能力。

根据红外复合制导导弹的制导原理和工作过程,电子干扰对抗反舰导弹的空间分辨能力可以描述为以下两点:

1) 多个箔条目标在搜索区域内对导弹末制导雷达角度分辨力的干扰;

2) 多个红外目标在搜索区域内对导弹末制导红外角度分辨力的干扰;

(2) 持续干扰能力(时域)

在保证一定干扰概率的前提下,计算电子干扰持续时间与反舰导弹末制导雷达开机总时间的比值,得到的结果用来描述电子干扰对抗反舰导弹的

持续干扰能力。规定概率 P_T 用来描述持续干扰能力的计算结果。

在对电子干扰对抗红外复合制导持续干扰能力的评估过程中,需要重点注意的内容应当至少包括如下方面:

- 1) 导弹红外复合制导导引头开机工作时间;
- 2) 箔条质心干扰持续时间;
- 3) 烟幕干扰持续时间;
- 4) 箔条质心干扰投放模式;
- 5) 烟幕干扰投放模式;
- 6) 箔条质心/烟幕干扰投放的先后顺序及时间间隔。

(3) 干扰频率识别能力(频域)

干扰频率识别能力是指“箔条质心+烟幕”干扰对抗红外复合制导导弹识别目标与干扰之间频率差异的能力。在电子干扰对抗红外复合制导导弹频率识别能力的工作过程仿真中,干扰能力可以描述为以下两点:

1) 形成的箔条质心干扰云的反射频率和导弹雷达制导导引头工作频率之间的相关度;

2) 烟幕干扰对于舰艇红外能量辐射的遮蔽能力和导弹红外成像制导导引头工作频率之间的相关度。

(4) 干扰能量压制能力(能量域)

与时域上的持续干扰能力相同,也可以通过干扰概率不低于标准目标概率 P_w 的情况下,计算最大干扰能量和目标能量的比值。

在电子干扰对抗红外复合制导干扰能量压制能力的评估过程中,需要重点注意的内容应当至少包括如下方面:

1) 导弹雷达制导导引头接收雷达反射能量的阈值;

2) 导弹红外成像制导导引头接收红外辐射能量的阈值;

3) 箔条质心干扰有效雷达反射面积(RCS);

4) 烟幕干扰遮蔽能力(消光指数 α)。

3.2 综合评估方法

根据电子干扰对抗反舰导弹工作原理及方法,结合上述四个维度指标体系的建立,可以进行各个维度下的电子干扰能力评估工作。在进行电子干扰能力综合评估时,需要全面考虑各个维度的考核点,才能得到可信度较高的评估结果^[6]。

(1) 根据纬度确定权重

对于电子干扰不同的作战使用方式,各评估要素的权重分配也不同,最终由用户和专家确定这些评估要素在评估指标体系中的权重值,权重设计采用归一化方法。

表1为多维度体系构成及评估要素(或子要素)的权重分配值,满足:

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$$

$$\omega_{i1} + \omega_{i2} = 1 \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

表1 综合评估多维度体系构成及权重

Tab.1 Comprehensive evaluate multidimensional system composition and weight

序号	评要素	子要素	子要素权重	要素权重
1	ω_1	干扰空间分辨能力(空域)	A_{11}	A_1
		箔条质心干扰与舰艇之间的方位差 ω_{11}		
2	ω_2	烟幕干扰遮蔽方位范围是否包含舰艇方位 ω_{12}	A_{12}	A_2
		持续干扰能力(时域)	A_{21}	
3	ω_3	箔条干扰持续时间与末制导导引头开机时间重合度 ω_{21}	A_{21}	A_2
		末制导导引头开机时间与烟幕干扰持续时间重合度 ω_{22}	A_{22}	
4	ω_4	干扰频率识别能力(频域)	A_{31}	A_3
		箔条假目标反射频率和导弹雷达导引头工作频率之间的相关度 ω_{31}		
5	ω_5	烟幕遮蔽能力和导弹红外成像导引头工作频率之间的相关度 ω_{32}	A_{32}	A_3
		干扰能量压制能力(能量域)	A_{41}	
6	ω_6	箔条质心干扰有效RCS与导弹接收雷达反射能量阈值的比值 ω_{41}	A_{41}	A_4
		烟幕干扰遮蔽能力与导弹接收红外辐射能量阈值的比值 ω_{42}	A_{42}	

(2)综合评估方法及结论

1)子要素得分

可以采用两种方法确定子要素得分,一是通过专家对性能指标分析,而是在试验过程中积累的测试数据,然后通过归一化处理,得出各子要素的得分,如表2所示。

表2 综合评估量化打分参考标准

Tab.2 Grade comprehensive evaluation quantitative reference standard

等级	定性评价	评价标准	量化得分区间
1	很强	电子干扰对红外复合制导导引头的工作能力影响显著,搜索、识别、跟踪的基本功能无法保证,反舰导弹无法满足作战使用要求	0.9~1.0
2	较强	红外复合制导导引头的正常工作能力受电子干扰影响较大,跟踪精度和稳定性明显降低,反舰导弹难以满足基本作战使用要求	0.8~0.9
3	一般	在电子干扰影响下,红外复合制导导引头的性能指标有不同程度下降,但在一般情况下,反舰导弹可以满足基本作战使用要求	0.6~0.8
4	较差	在电子干扰影响下,红外复合制导导引头主要性能指标没有明显降低,反舰导弹综合抗干扰能力基本满足作战使用要求	0.4~0.6
5	很差	红外复合制导导引头受电子干扰影响很小,反舰导弹综合抗干扰能力满足性能指标要求	0~0.4

2)要素得分

对于有分项的项目要素得分,各分项得分与权重的乘积求和即为其要素项目得分。例如:空间分辨能力 ω_1 的要素得分 A_1 的计算方法为:

$$A_1 = A_{11}\omega_{11} + A_{12}\omega_{12}$$

3)综合得分

电子干扰对抗红外复合制导干扰能力的综合得分可以由要素得分计算得出,即各项得分与权重的乘积求和,如下:

$$A = A_1\omega_1 + A_2\omega_2 + A_3\omega_3 + A_4\omega_4$$

4 结论

目前,各国海军精确制导和复合制导反舰导弹正在大量研制列装,如何评估电子干扰对抗反舰导弹的干扰效果,仍然有许多重要的问题有待进一步解决。如果仅仅采用从频域、空域等一个或少数几个方面对电子干扰对抗反舰导弹评估,得出的结论往往缺乏全面性和通用性,评估结果置信度无法满足后续装备试验和作战使用的要求。本文采用多维度干扰评估方法,在红外复合干扰模式原理的研究基础上,系统地、全面地对电子干扰对抗反舰导弹的

干扰能力进行了详细的描述。但是,由于复合制导反舰导弹具体的工作过程复杂多变,以及新型干扰弹(如宽频箔条干扰弹和红外面源干扰弹)的使用,电子干扰对抗反舰导弹相关问题将更加复杂,需要进一步研究。

参考文献:

- [1] ZOU Zhenning, LENG Feng, ZHOU Yun. Current situation of electro-optical countermeasure technology and equipment[J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, 11(3): 30-34. (in Chinese)
邹振宁,冷锋,周芸. 光电对抗技术和装备现状评析[J]. *电光与控制*, 2004, 11(3): 30-34.
- [2] SONG Kaiying, YUE Min, YANG Jun, et al. On the disturb effect of baits on infrared imaging anti-tank missiles [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2000, 18(1): 23-25. (in Chinese)
宋凯英,岳敏,杨军,等. 对红外成像制导系统干扰效果的研究[J]. *西北工业大学学报*, 2000, 18(1): 23-25.
- [3] LIU Longhe. Technology of multi-model composite homing guidance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 52-76. (in Chinese)
刘隆和. 多模复合寻的制导技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 52-76.
- [4] LIU Zhenxing, WANG Falong. Simulation of countermeasure of surface vessels against radar/infrared imaging composite guidance[J]. *Infrared Technology*, 2006, 31(11): 650-653. (in Chinese)
刘振兴,王发龙. 水面舰艇对抗雷达/红外成像复合制导仿真[J]. *红外技术*, 2006, 31(11): 650-653.
- [5] WANG Tao, WANG Xiang. An evaluation method with five dimensions for infrared missile anti-jamming[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 573-576. (in Chinese)
王涛,王祥. 红外导弹抗干扰能力多维度评估方法[J]. *红外技术*, 2014, 36(7): 573-576.
- [6] ZHAO Chao, YANG Hao. Integrative evaluation method of anti-jamming capability of anti-ship missiles [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2012, 28(6): 1-4. (in Chinese)
赵超,杨号. 反舰导弹抗干扰性能综合评估方法研究[J]. *航天电子对抗*, 2012, 28(6): 1-4.