

海洋大气波导环境下反舰导弹作战效能评估

熊 威, 车梦虎

(中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为有效评估反舰导弹在海洋大气波导环境下的作战效能, 真实反映作战能力发挥, 更好地服务于作战使用, 针对大气波导会改变雷达电磁波传输途径的问题, 研究了反舰导弹攻击水面舰艇和敌舰采取软硬对抗过程中, 海洋大气波导对反舰导弹突防能力和制导能力的影响; 并在此基础上, 运用概率分析方法, 引入大气波导影响因子, 建立了海洋大气波导环境下反舰导弹作战效能评估模型; 最后进行了该模型的实例计算, 计算结果与海洋大气波导对反舰导弹作战效能有提升作用的实际情况相符, 较好地反映了反舰导弹在海洋大气波导环境下作战效能发挥的实际情况, 证明了该模型的合理性和实用性, 为有效评估反舰导弹在海洋大气波导环境下的作战效能提供了新思路。

关键词: 反舰导弹; 大气波导; 作战效能; 概率分析; 评估模型

Combat Effectiveness Evaluation of Anti-ship Missile in Ocean Atmospheric Duct Environment

Xiong Wei, Che Menghu

(91550 Troops of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to effectively evaluate the combat effectiveness of anti-ship missile in ocean atmospheric duct environment, truly reflect its combat capability, and better serve the combat use, aiming at the problem that atmospheric duct will change the transmission path of radar electromagnetic wave, the influence of ocean atmospheric duct on the penetration and guidance capability of anti-ship missile in the course of attacking surface ship and confrontation is studied and analyzed. Then on the base of these, the combat effectiveness model of anti-ship missile in ocean atmospheric duct environment is established by using probability analysis method after introducing atmospheric duct influence factor. Finally, an example of the model is calculated, and the calculation results are consistent with the actual situation that the ocean atmospheric duct can enhance the operational effectiveness of anti-ship missile, that prove the rationality and practicability of the model which well reflects the actual situation of the anti-ship missile's operational effectiveness in ocean atmospheric duct environment and provides a new way for combat effectiveness evaluation of anti-ship missile in ocean atmospheric duct environment.

Keywords: anti-ship missile; atmospheric duct; combat effectiveness; probability analysis; evaluation model

0 引言

反舰导弹作战效能评估是促进反舰导弹武器系统性能和战术改进, 有效发挥反舰作战能力, 提升作战效能不可缺少的重要环节^[1-2]。在反舰导弹作战效能评估过程中, 除了要结合敌我双方武器系统性能和战术使用等情况外, 还应当考虑自然环境影响。海洋大气波导作为一种常见自然现象, 由于其对雷达电磁波传播途径的影响, 会使反舰导弹及目标舰艇防空系统设备某些技术性能和战术使用效果发生改变。因此, 在评估反舰导弹作战效能时, 海洋大气波导影响不容忽视。

1 作战效能评估基本模型建立

反舰导弹攻击水面舰艇的一般作战流程主要包括技术准备、装载出航待机、导弹发射准备、导弹发射、导弹飞行和制导命中几个阶段。目标舰雷达发现来袭导弹后, 会

立即进行目标识别跟踪和威胁判断, 在来袭反舰导弹距离较远时, 通常会发射防空导弹进行拦截; 当防空导弹拦截失效, 反舰导弹已突破防空导弹拦截范围时, 目标舰通常使用防空火炮进行近距离射击。在整个拦截过程中还可以使用电子干扰设备对来袭导弹实施电子干扰或布放诱饵反射体欺骗来袭导弹导引头, 使其偏向或飞向假目标。反舰导弹在突防过程中, 一般会进行大机动变轨飞行, 躲避拦截弹, 例如水平蛇形机动、垂直跃升俯冲机动或螺旋机动等^[3]; 对于电子干扰, 现代反舰导弹一般都采用了主、被动雷达、红外和电视复合制导等先进技术, 具备一定的抗干扰能力。

根据作战过程分析, 在不考虑作战平台生存能力的前提下, 反舰导弹作战效能发挥主要体现在导弹准备状态好、导弹成功发射、可靠飞行、成功突防、成功制导、成功命中和成功毁伤目标等环节。根据导弹作战效能概率分析法, 分别对反舰导弹作战效能发挥的每个环节进行分析, 计算每个环节的成功概率。由于任何一个环节失败都会导致作战效能 $E=0$, 因此, 反舰导弹作战效能应该为所有环节成

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-06-14。

作者简介: 熊 威(1985-), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 助理工程师, 主要从事作战效能评估方向的研究。

功概率的乘积。在不考虑大气波导影响情况下, 基于概率分析法的反舰导弹作战效能评估模型可以抽象表示为:

$$E = P_Y \cdot P_S \cdot P_F \cdot P_T \cdot P_Z \cdot P_M \cdot P_H \quad (1)$$

式中, P_Y 为导弹武器系统在执行发射时处于正常可用状态的概率, P_S 为导弹武器系统成功可靠发射反舰导弹的概率, P_F 为导弹发射后可靠飞行的概率, P_T 为导弹成功突破敌舰防空火力网的概率, P_Z 为导弹成功制导的概率, P_M 为反舰导弹命中目标的概率, P_H 为导弹命中目标后成功毁伤目标的概率。

反舰导弹突破目标舰防空导弹拦截的成功概率用 P_D 表示, 突破目标舰防空火炮拦截的成功概率用 P_p 表示。用 P_d 和 P_p 分别表示目标舰单枚防空导弹和单门防空火炮成功拦截反舰导弹的概率, 用 n 和 m 分别表示防空导弹和防空火炮的拦截使用数量, 则反舰导弹突破防空火力拦截的概率 P_T 可以表示为:

$$P_T = P_D \cdot P_p = (1 - P_d)^n \cdot (1 - P_p)^m \quad (2)$$

电子干扰主要影响反舰导弹制导环节, 使反舰导弹偏离目标或者飞向假目标, 反舰导弹要实现成功制导, 除了具备捕选跟踪目标的能力外, 还需要成功抗干扰。因此, 反舰导弹成功制导的概率为成功捕选目标概率 P_B 和成功抗干扰概率 P_K 的乘积。假设目标舰对反舰导弹干扰成功概率为 P_g , 则反舰导弹成功制导概率可以表示为:

$$P_Z = P_B \cdot P_K = P_B \cdot (1 - P_g) \quad (3)$$

那么, 反舰导弹作战效能评估基本模型可以表示为:

$$E = P_Y \cdot P_S \cdot P_F \cdot (1 - P_d)^n \cdot (1 - P_p)^m \cdot P_B \cdot (1 - P_g) \cdot P_M \cdot P_H \quad (4)$$

该模型可以很好的描述反舰导弹在整个作战过程中作战效能的发挥, 但不能直接用来评估大气波导环境下反舰导弹作战效能。因此, 下文将分析海洋大气波导给反舰导弹作战能力带来的影响, 并基于具体影响, 对以上模型进行改进, 给出大气波导环境下反舰导弹作战效能评估模型。

2 海洋大气波导影响分析

电磁波在大气中传播时, 受大气折射和地球曲率影响, 传播路径往往会弯向地球一侧, 当电磁波弯向地球传播路径的曲率大于地球曲率时, 电磁波向前传播过程中, 将碰到地面并经地面反射向前传播, 在后续弯向地球传播过程中, 会反复碰到地面并经地面反射, 使电磁波在地面和某层大气之间, 依靠地面不断反射向前传播, 形成大气波导传输。大气波导分为蒸发波导、表面波导和悬空波导^[4]。其中, 蒸发波导由水蒸气蒸发形成, 在海上几乎随时随地都有可能出现, 而且在某些海域出现概率高达 85% 以上^[5]。由于大气波导主要影响雷达电磁波, 因此, 下面将从导弹突防和制导两方面进行具体分析。

2.1 对导弹突防的影响

从前人的相关研究^[6-8]来看, 在大气波导条件下, 目标舰艇防空能力会在一定程度上受到抑制, 主要表现在以下几方面:

1) 电子干扰能力减弱。大气波导条件下, 使反舰导弹雷达接收目标回波功率提前高于干扰信号功率, 雷达烧穿距离增大, 从而降低了目标舰电子干扰效果;

2) 防空雷达测量误差增大。敌舰防空雷达电磁波在大气波导环境下, 传播路径会发生弯曲, 使得舰载雷达对来袭导弹的位置, 特别是高度测量产生较大偏差, 影响有效拦截;

3) 拦截反应时间缩短。大气波导环境下, 目标舰雷达探测到的海杂波信号会大大增强, 使雷达散射面积本来就很小的反舰导弹回波信号, 很容易被淹没, 使舰载雷达对反舰导弹有效作用距离减小, 防空拦截反应时间缩短。然而对于反舰导弹来说, 敌舰雷达散射面积较大, 因此海杂波影响较小;

4) 防空雷达探测盲区改变。雷达本身就存在着可以确定的探测盲区, 但在大气波导环境下, 雷达电磁波被囚获在波导层传播, 会形成波导顶盲区, 同时由于受电磁波波束宽度限制, 在波导层内还会形成跳跃盲区, 增加了舰载雷达对反舰导弹的搜索困难。

由于上述负面影响的存在, 海洋大气波导环境下, 目标舰艇防空拦截成功率势必会降低, 从而提升了反舰导弹的突防成功率。由于在目标舰使用防空导弹和防空火炮进行拦截的过程中, 都会受到大气波导对雷达造成的不良影响。在此, 引入大气波导影响因子 φ , 反舰导弹成功突破目标舰防空火力拦截的概率表示可以改进为:

$$P_T' = (1 - \varphi_d P_d)^n \cdot (1 - \varphi_p P_p)^m \quad (5)$$

式中, $\varphi_d \leq 1, \varphi_p \leq 1$, 分别为大气波导对防空导弹和防空火炮拦截成功概率的影响因子。

2.2 对导弹制导的影响

地球曲率的存在, 将雷达的目标探测能力限制在直视范围内。要想扩大探测距离, 需要提升导弹飞行高度和弹载雷达功率, 但这同时也使得反舰导弹容易暴露, 不利于导弹突防。然而, 由于海洋大气波导现象的存在, 使电磁波传输发生了改变, 特别是反舰导弹雷达发现距离和接收目标雷达回波功率都得到了提升。

在没有大气折射情况下, 反舰导弹雷达电磁波在水平和垂直方向上均匀辐射, 反舰导弹制导雷达探测距离 D (km) 可以表示为:

$$D = \sqrt{(R + h_1)^2 - R^2} + \sqrt{(R + h_2)^2 - R^2} \approx \sqrt{2R} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 4.11 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (6)$$

式中, $R = 6\,370$ km, 为地球曲率半径; h_1 为反舰导弹弹载雷达的高度 (导弹的飞行高度); h_2 为目标舰的高度。若不计算电磁波传输损耗, 反舰导弹雷达接收目标舰回波功率为:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 d^4} \quad (7)$$

式中, $P_t, G, \lambda, \sigma, d$ 分别是雷达发射功率、增益、工作波长、目标有效散射面积、目标与雷达间的距离。由于雷达电磁波在大气中实际传播时, 会发生大气折射现象, 使雷达电

磁波实际传波路径向下弯曲,而非直线传波。大气折射情况下,计算雷达直视距离,通常使用等效地球曲率半径 $R_0 = KR$ 来代替地球曲率半径 R 。

$$K = 1 + R \frac{dn}{dh} \quad (8)$$

因此,大气折射下,雷达探测距离 D_0 (km) 为:

$$D_0 = \sqrt{(R_0 + h_1)^2 - R_0^2} + \sqrt{(R_0 + h_2)^2 - R_0^2} \approx \sqrt{2R_0} (\sqrt{h_1(\text{km})} + \sqrt{h_2(\text{km})}) \quad (9)$$

考虑设备性能和人员实际操作水平等因素,需乘以系数 φ_D ,通常取 $\varphi_D \approx 0.6^{[9]}$ 。在标准大气情况下, $K = 4/3$,经计算可得:

$$D_0' = 0.6 \times 4.12 \times (\sqrt{h_1(\text{m})} + \sqrt{h_2(\text{m})}) \quad (10)$$

很明显,大气折射使雷达实际发现距离增大。在反舰导弹作战过程中,若雷达电磁波受大气折射,使其传输路径曲率半径小于地球曲率半径,即 $\frac{dn}{dh} < -15.7 \times 10^{-8} \text{m}^{-1}$ 时^[10],雷达电磁波在传输过程中会碰到海面,经海面折射后向前传播,之后会在海面和某层大气之间,反复碰到海面并经海面折射向前传播,形成大气波导传输。这时,雷达电磁波传播距离仅与雷达本身的性能和传输损耗相关,而不再受地球曲率影响,雷达发现距离会明显增大。在大气波导环境下,反舰导弹雷达接收目标舰回波功率为:

$$P_r' = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{16\pi^3 d^2 h_b^2} \quad (11)$$

式中, h_b 为波导层高度。通过比较式 (7) 和式 (11),很明显, $P_r' > P_r$,这说明在大气波导环境下,反舰导弹收到目标敌舰的回波将大大增强。

由此可见,在海洋大气波导环境下,反舰导弹在飞行高度和制导雷达开机功率不变时,弹载雷达目标探测距离和目标回波功率都会增大,反舰导弹成功捕获目标概率也将会随之增加。因此,大气波导条件下,反舰导弹捕获目标概率可以表示为:

$$P_B' = \varphi_B P_B, \varphi_B > 1 \quad (12)$$

φ_B 为大气波导环境对捕获概率的影响因子。另外,考虑到大气波导环境对目标舰电子干扰效果有一定抑制作用,大气波导环境下,反舰导弹抗电子干扰成功概率应表示为:

$$P_K' = (1 - \varphi_K P_K) \quad (13)$$

φ_K 为大气波导对电子干扰成功概率的影响因子。那么,大气波导环境下,反舰导弹成功制导概率应表示为:

$$P_Z' = P_B' \cdot P_K' = \varphi_B P_B \cdot (1 - \varphi_K P_K) \quad (14)$$

3 海洋大气波导环境下作战效能评估模型

综合以上分析,考虑大气波导对反舰导弹突防概率和制导概率的影响,根据式 (1) (5) (14),反舰导弹作战效能评估模型应该表示为:

$$E = P_Y \cdot P_S \cdot P_F \cdot P_T' \cdot P_Z' \cdot P_M \cdot P_H = P_Y \cdot P_S \cdot P_F \cdot (1 - \varphi_d P_d)^n \cdot (1 - \varphi_p P_p)^m \cdot \varphi_B P_B \cdot (1 - \varphi_K P_K) \cdot P_M \cdot P_H \quad (15)$$

该模型充分考虑了反舰导弹作战过程中,海洋大气波

导环境对作战双方的影响,更加符合反舰导弹作战使用实际情况。

4 应用实例

现在的新型反舰导弹武器系统的可用性和可靠性一般都比较较高。可假设 $P_Y = 0.99, P_S = 0.99, P_F = 0.99$; 目标舰发射 2 枚防空导弹拦截,每枚防空导弹击毁来袭反舰导弹的概率 $P_d = 0.06$; 使用 2 门近程防空火炮进行拦截,每门火炮成功击毁反舰导弹的概率为 $P_p = 0.06$; 目标舰干扰系统成功实施干扰的概率 $P_g = 0.06$; 无对抗、无大气波导条件下的捕获概率 $P_B = 0.9, P_M = 0.95, P_H = 0.95$; 取 $\varphi_d = 0.7, \varphi_B = 1.05, \varphi_p = 0.75, \varphi_K = 0.8$ 。

在不考虑大气波导影响情况下,可根据公式 (4) 计算得出反舰导弹作战效能为:

$$E = P_Y \cdot P_S \cdot P_F \cdot (1 - P_d)^n \cdot (1 - P_p)^m \cdot P_B \cdot (1 - P_g) \cdot P_M \cdot P_H = 0.99 \times 0.99 \times 0.99 \times (1 - 0.06)^2 \times (1 - 0.06)^2 \times 0.9 \times (1 - 0.06) \times 0.95 \times 0.95 \approx 0.5784$$

考虑大气波导环境影响时,可根据公式 (15) 计算出反舰导弹作战效能为: $E = P_Y \cdot P_S \cdot P_F \cdot (1 - \varphi_d P_d)^n \cdot (1 - \varphi_p P_p)^m \cdot \varphi_B P_B \cdot (1 - \varphi_K P_K) \cdot P_M \cdot P_H = 0.99 \times 0.99 \times 0.99 \times (1 - 0.7 \times 0.06)^2 \times (1 - 0.75 \times 0.06)^2 \times 1.05 \times 0.9 \times (1 - 0.8 \times 0.06) \times 0.95 \times 0.95 \approx 0.6636$

从计算结果来看,大气波导环境下的反舰导弹作战效能评估数值,要高于无大气波导影响的计算结果,这与海洋大气波导对反舰导弹作战能力有一定提升作用的实际情况相符,验证了该模型能够较好的描述反舰导弹在大气波导环境下的作战效能,具有一定的合理性。另外,根据本文分析可见,如果能充分把握和利用大气波导对敌我双方的影响,合理优化航路设计和攻击程序,就能够更好的提升反舰导弹作战能力,成功击毁目标舰。

5 结论

通过上文分析可知,海洋大气波导对反舰导弹突防和制导能力发挥具有一定的积极作用,而对目标舰防空反导能力具有一些不良影响,从而提升反舰导弹作战效能。本文采用概率分析法,结合大气波导对作战双方具体影响环节,引入大气波导影响因子,建立了大气波导环境下的评估模型,并用实例证明了合理性和实用性,为反舰导弹作战效能评估提供了新途径。但更为复杂的敌我作战态势,还需要进一步分析。大气波导影响因子的确定也需要进一步研究,以便更好的应用。

参考文献:

- [1] 刘刚, 邹自力, 胡焰智, 等. 指挥信息系统作战运用效能评估指导模式研究 [J]. 兵工自动化, 2015, 34 (7): 65-70.
- [2] 肖阳, 吕卫民, 江式伟. 某型反舰导弹作战效能评估及仿真分析 [J]. 兵工自动化, 2017 (1): 83-87.
- [3] 隋先辉, 张翼飞, 毕开波. 舰载导弹作战使用技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.

(下转第 259 页)