

基于全通道误差估计的协同反潜效能评估

郭利民, 邱兴业

中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094

摘要 论述了编队协同反潜的必要性。针对一种典型编队反潜场景, 通过反潜全通道误差估计概要计算了火箭助飞鱼雷命中概率, 从不同的参数选择, 可发现编队反潜过程中提升火箭助飞鱼雷命中概率的有效技术途径。

关键词 协同反潜; 全通道误差估计; 效能评估

由于现代潜艇的威胁正在不断增长, 反潜战作为反潜艇战的措施, 正在受到各海军国家的普遍重视。反潜战的意义随着潜艇战意义的增长而增长, 反潜战的地位也随着潜艇战地位的提高而提高。经第二次世界大战几十年的发展, 潜艇已从作为破坏海上交通的战术兵力和战役兵力, 演变为具有强大破坏力的海上战略兵力, 因此反潜战也成为海军的战略措施。

反潜作战系统或网络中机动力量的主体包括: 核动力和常规动力鱼雷潜艇、反潜水面舰艇、飞机和直升机。由这些兵力组成的编队形成了海军机动反潜力量。

由于自身的战术、技术性能和特点, 每一种反潜兵力都有自己的战术特性: 1) 反潜潜艇能够与敌潜艇在同一环境中作战, 能够在任何气象条件下、任何海域长期和隐蔽活动; 2) 反潜水面舰艇装备能可靠毁伤敌潜艇的武器, 具有足够的自给力, 装备了可靠的指挥通信器材, 便于开设反潜兵力群、编队指挥所; 3) 反潜航空兵机动性最好、易达成突然性, 能在短时间内搜索宽阔的海域、能迅速将兵力集中于某一海区。

同时, 每一种兵力又具有自身的弱点: 1) 常规潜艇速度慢, 必须上浮充电, 水下状态时通信能力有限, 难

以及时、全面掌握水面情况; 2) 反潜水面舰艇在很远的距离就可被敌潜艇发现, 无隐蔽性, 且在被发现后很久才可能发现敌潜艇, 易受敌特别是来自空中之敌的打击; 3) 反潜航空兵续航时间短, 对气象条件依赖性强, 易受敌歼击机的攻击。

不同的战术特点、不同的强点和弱点导致: 第一, 在反潜作战中, 各种反潜兵力完成反潜任务的能力不同; 第二, 必须合同使用反潜兵力, 组织战术合同。现代条件下, 因为情况和战场态势的多样化和多变、敌潜艇强大的战斗力、敌为己方潜艇提供的保障, 特别是电子对抗的运用, 任何一种兵力都不可能有效、全面地完成所有任务, 只有运用各种反潜兵力、针对不同目标、海域、时间和敌活动方法, 用统一的意图、计划协同行动和统一指挥, 才能有效地在各种条件下完成搜索、跟踪和消灭敌潜艇的任务。诸种反潜兵力战术合同时, 应给每一种反潜兵力布置最适合其的任务、为完成反潜总任务创造有利的条件。总而言之, 战术合同反潜的效率比各兵力、兵器独立反潜效率之和高出许多。

除反潜兵力外, 反潜兵器广泛用于反潜战, 如固定的搜潜器材和反潜兵器构成的障碍阵地, 反潜水雷障碍就是其中的一种, 还必须使用其他种类的潜艇、水面

收稿日期: 2018-10-20, 修回日期: 2018-12-06

作者简介: 郭利民(通信作者), 高级工程师, 研究方向为综合电子信息系统, 电子信箱: guolimin99@hotmail.com

引用格式: 郭利民, 邱兴业. 基于全通道误差估计的协同反潜效能评估[J]. 科技导报, 2018, 36(24): 53-60; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.24.008

舰艇、歼击机、探测和预警网络或系统、电子战网络或系统等,以提高反潜兵力和兵器的生存力、保障反潜兵力和兵器的行动。综上所述,必须组织和实施协同反潜^[1-2]。

1 协同反潜的基本过程

在网络中心反潜战中,多兵种协同反潜的方式将是:任一种兵力发现敌潜艇后,即可通知另一种兵力,让其对敌潜艇进行搜索、跟踪。两种兵力同时搜索、跟踪敌潜艇,而且在搜索、跟踪过程中,不断交换信息,减小敌潜艇逃脱的可能性。任一种兵力可独立攻击敌潜艇,又可在另一种兵力的引导下实施攻击,甚至两种兵力可同时对敌潜艇发起攻击,这必然增大击毁敌潜艇的可能性。

协同反潜的最终效果是由对潜艇的毁伤概率决定的,而毁伤概率则由鱼雷捕获概率以及鱼雷毁伤概率确定。

在下面的例子中,假定典型反潜过程如下:水面舰艇通过拖曳声纳对潜艇目标远距离探测,并将目标信息上报指挥平台,指挥平台经决策,指挥平台将目标指示信息发给武器平台,武器平台发射火箭助飞鱼雷,并持续向助飞鱼雷发送修正信息,助飞鱼雷达到目标区域,落水并自主搜索目标、实施攻击^[3-5]。

2 全通道圆概率误差估计

估算全通道的圆概率误差(circular error probable, CEP),需考虑的因素包括:探测平台定位误差、传感器探测精度指标、武器节点定位误差、传输时延(全流程时延)、鱼雷航渡时间、鱼雷落点误差等。所谓全通道包括从探测平台到指挥平台、从指挥平台到武器平台以及武器平台到武器的整个信息通道。

3 数学模型

3.1 圆概率误差

圆概率误差是衡量炮弹、导弹等命中精度的一个尺度,又称圆公算误差或圆平均误差。苏联的定义为:落入以散布中心为圆心的某个圆内的概率为0.5时,此圆的半径R称为CEP;西方国家的定义为:有1/2弹着点

落入以平均弹着点为圆心的某个圆内,此圆的半径R称为CEP。前者是从概率的理论定义出发的,后者是从概率的统计定义出发的,两者只是视角不同,其内涵是一致的。在中国,《GJB 102A—1998 弹药系统术语》中对CEP的定义为:表示射击密集度性能的指示,出现概率为50%的圆形误差范围的半径。

3.2 均方差及方差

方差反映随机变量X相对均值的平均偏离程度,记为DX,而 $\sigma = \sqrt{DX}$ 记为X的标准差或均方差。在圆正态分布中,圆概率误差 $CEP = \sqrt{\ln(2)}\sigma$ 。在本算法中,通过均方差来估算圆概率误差。即约定全通道误差符合正态分布。

3.3 探测误差

用目标相对探测平台的距离误差和方位误差来表示:声纳的测距误差一般为1%D(均方根),D为目标到探测平台的距离。方位误差一般小于2°(均方根)。则目标相对探测平台的径向误差为

$$\sigma_{\text{径向探测误差}} = 1\% \times D \text{ (均方根)}, \quad (1)$$

横向误差为

$$\sigma_{\text{横向探测误差}} = \frac{2 \times \pi}{180} D \approx 3.5\% D \text{ (均方根)}, \quad (2)$$

由于其他类型误差的综合效应可以认为是正态分布,在目标相对探测平台的径向/横向上考虑误差。

3.4 探测平台定位误差

一般取 $\sigma_{\text{探测定位}} = 100 \text{ m}$ 。

3.5 武器节点定位误差

一般取 $\sigma_{\text{武器定位}} = 100 \text{ m}$ 。

3.6 全流程传输时延

目标指示时间(鱼雷接收到的最后目标指示信息时戳)至鱼雷到指定位置的时间差,不考虑目指修正,则全流程传输时延包括传输时延、处理时延、发射时延(含决策时延以及发射准备时延)、飞行时延、落水时延及航渡时延等。考虑目指修正则只考虑传输时延、处理时延、缩短的飞行时延、落水时延及航渡时延等,其差别是后者不包含发射时延以及飞行时延缩短。

3.7 鱼雷航渡时间

取鱼雷落水后航渡到攻击点的时间,如果落水点就是目标概略位置,鱼雷航渡时间为0。

3.8 鱼雷落水点误差

一般取 $\sigma_{\text{落水}} = 300 \text{ m}$ 。落水点符合正态分布。

3.9 目标机动误差

假定目标机动方向任意, $(0, 2\pi)$ 间均匀分布, 航速在 $(0, V_{\text{最大航速}})$ 均匀分布, 求目标相对圆心的圆心矩 Δ^2 。

$$\Delta^2 = \frac{1}{\pi \times L_{\text{最大位移}}^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{L_{\text{最大位移}}} r^2 \times r dr d\theta = \frac{L_{\text{最大位移}}^2}{2} \quad (3)$$

所以

$$\sigma_{\text{机动误差}} = \Delta = \frac{L_{\text{最大位移}}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

假定在攻潜期间, 鱼雷发射后, 目标随机运动, 航向在 $(0, 2\pi)$ 间均匀分布, 航速在 $(0, \text{最大巡航速度})$ 间均匀分布, 则目标地最大位移 $L_{\text{最大位移}} = \text{潜艇巡航速度} \times \text{全通道时延}$ 。此时, 目标机动误差的圆心矩

$$\sigma_{\text{机动误差}} = \frac{L_{\text{最大位移}}}{\sqrt{2}}$$

由于均匀分布的 CEP 与均方差 σ 相等, 而正态分布的 $\text{CEP} = \sqrt{\ln(2)}\sigma$, 需对 $\sigma_{\text{机动误差}}$ 作修正,

$$\text{取 } \sigma_{\text{机动误差}} = \sqrt{\ln(2)}\sigma_{\text{机动误差}}$$

3.10 鱼雷命中概率

鱼雷命中概率是估计鱼雷攻击效果最重要的数量指标, 它是反潜平台进行助飞鱼雷攻击的基本依据之一。影响鱼雷攻击效果的因素很多, 其计算公式为

$$P = P_{\text{命中}}^* P_{\text{探测}}^* P_{\text{发现}}^* P_{\text{跟踪}}^* P_{\text{攻击}}^* (1 - P_{\text{干扰}})^* P_k \quad (5)$$

式中, P 为鱼雷武器的命中概率; $P_{\text{命中}}$ 为正确设定鱼雷参数、可靠投下、正常人水的概率; $P_{\text{探测}}$ 为鱼雷自导范围覆盖目标散布误差的概率; $P_{\text{发现}}$ 为鱼雷自导系统发现并能追上目标的概率; $P_{\text{跟踪}}$ 为鱼雷可靠爆炸毁伤潜艇的概率; $P_{\text{攻击}}$ 为潜艇在深度上处于鱼雷搜索范围的概率; $P_{\text{干扰}}$ 为潜艇干扰对抗鱼雷成功的概率; P_k 为鱼雷的技术完好率。

其中:

$$P_{\text{探测}} = 1 - \exp\left(-\rho^2 \left(\frac{R_{\text{自导}}}{E}\right)^2\right) \quad (6)$$

$$P_{\text{攻击}} = \frac{h_{\text{自导}}}{h_{\text{潜}}} \quad (7)$$

式中, $R_{\text{自导}}$ 为鱼雷自导作用半径, 它等于鱼雷的旋回半径与自导作用距离之和; E 为目标散布圆概率误差; $h_{\text{自导}}$ 为鱼雷航行深度; $h_{\text{潜}}$ 为潜艇可能航行的深度; ρ 为常数 0.47694。

需要说明的是, 式(6)是一个简化的计算公式, 其计算条件是假设目标综合散布是一个圆, 实际的散布误差应是个椭圆。

由式(5)可见, 影响鱼雷攻击效果的因素很多, 要求从发现目标到决定使用鱼雷的整个过程的一步(每个环节)都要正确无误, 只要有一个环节出问题, 其攻击成功率将大大下降。但在计算中, 有些因素影响较小, 可近似等于 1。如一般认为只要鱼雷自导系统发现潜艇, 就能追上潜艇, 追上就能毁伤。 $P_{\text{发现}}=1.0, P_{\text{跟踪}}=P_{\text{攻击}}, P_{\text{攻击}}$ 为自导系统的捕获概率; 鱼雷自身的可靠性、投放的可靠性也可认为是 1; 另外, 现在一般鱼雷的工作深度都能达到潜艇的航行深度, 其在深度上的发现捕获概率也近似为 1, 如果潜艇不实施对抗措施, 以上公式可表达为:

$$P \approx P_{\text{命中}} P_{\text{探测}} = \left(1 - \exp\left(-\rho^2 \left(\frac{R_{\text{自导}}}{E}\right)^2\right)\right)^* P_{\text{攻击}} \quad (8)$$

上式说明, 只要鱼雷的自导作用范围大于鱼雷入水点加目标的散布误差, 也就是说只要潜艇位于鱼雷的自导作用范围内, 鱼雷能否命中仅仅取决于自导系统的捕获概率 $P_{\text{探测}}$, 而 $P_{\text{攻击}}$ 的计算较为复杂, 取决于投放参数、目标参数、预设定数据、水文条件以及自导性能等多种因素。在本文中, $P_{\text{攻击}}$ 为预设参量取 $0.95^{[6-8]}$ 。

式(6)存在一个问题, 从字面上分析, 当 $R_{\text{自导}}=E$ 时, $P_{\text{探测}}=0.5$, 但根据(6)式 $P_{\text{探测}}=0.2035$, 需要加一个修正系数。

$$P_{\text{探测}} = 1 - \exp\left(-\rho^2 \left(\frac{R_{\text{自导}}}{\gamma E}\right)^2\right) \quad (9)$$

将 $R_{\text{自导}}=E$ 时, $P_{\text{探测}}=0.5$ 带入(9)得到 $\gamma=0.5730$ 。

因此, 最终的鱼雷命中概率近似为:

$$P \approx P_{\text{命中}} P_{\text{探测}} = \left(1 - \exp\left(-\rho^2 \left(\frac{R_{\text{自导}}}{\gamma E}\right)^2\right)\right)^* P_{\text{攻击}} \quad (10)$$

4 圆概率误差估计

4.1 计算流程

将所有类型的误差均分解为目标相对与探测平台的径线方向误差和横线方向误差。约定探测平台定位误差和武器节点定位误差、鱼雷落点误差、声纳的测距误差、声纳的测向误差符合正态分布, 目标机动误差符合均匀分布, 且误差分布相互独立。其基本计算思路是按径线方向和横线方向分别估算误差, 然后根据误差径横比估算 CEP。由于探测平台定位误差和武器节点定位误差、鱼雷落点误差均符合圆正态分布, 所以其在径线方向和横线方向上的方差为其各自方差的一半, 机动误差也照此处理。

4.2 计算径向总体误差

$$\sigma_{\text{径向总体误差}} = \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{径向探测误差}}^2} \quad (11)$$

4.3 计算横向总体误差

$$\sigma_{\text{横向总体误差}} = \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{横向探测误差}}^2} \quad (12)$$

4.4 计算圆概率分布

定义误差径横比

$$\lambda = \frac{\sigma_{\text{径向总体误差}}}{\sigma_{\text{横向总体误差}}} \quad (13)$$

总体误差

$$\sigma_{\text{总体误差}} = \sqrt{\sigma_{\text{横向总体误差}}^2 + \sigma_{\text{径向总体误差}}^2} \quad (14)$$

4.4.1 当 $\lambda \leq \frac{1}{5}$ 时

横向误差占绝对优势,此时取

$$CEP = 0.70 \times \sigma_{\text{横向总体误差}} \quad (15)$$

4.4.2 当 $\frac{1}{5} \leq \lambda \leq 5$ 时

CEP与总体误差均方差根 $\sigma_{\text{总体误差}}$ 的比例关系为

$$K = \frac{CEP}{\sigma_{\text{总体误差}}} \quad (16)$$

$$CEP = K \times \sigma_{\text{总体误差}}$$

K的取值与λ有关,通过仿真获得K取值(表1)。

表1 CEP与总体误差均方差根 $\sigma_{\text{总体误差}}$ 的比例系数K取值

纵横比λ或1/λ	K值	纵横比λ或1/λ	K值	纵横比λ或1/λ	K值	纵横比λ或1/λ	K值
1.0	0.833	2.0	0.779	3.0	0.729	4.0	0.704
1.1	0.831	2.1	0.772	3.1	0.725	4.1	0.702
1.2	0.828	2.2	0.767	3.2	0.722	4.2	0.701
1.3	0.823	2.3	0.761	3.3	0.719	4.3	0.699
1.4	0.818	2.4	0.755	3.4	0.716	4.4	0.698
1.5	0.812	2.5	0.75	3.5	0.714	4.5	0.697
1.6	0.805	2.6	0.745	3.6	0.712	4.6	0.696
1.7	0.798	2.7	0.741	3.7	0.709	4.7	0.695
1.8	0.792	2.8	0.737	3.8	0.707	4.8	0.694
1.9	0.785	2.9	0.733	3.9	0.705	4.9	0.693

用2段2次曲线来拟合K值曲线,有以下结果:

当 $1 \leq \lambda < 2$ 时, $K = -0.03017 \times \lambda^2 + 0.03191 \times \lambda + 0.8321$,

当 $2 \leq \lambda < 5$ 时, $K = 0.009408 \times \lambda^2 - 0.09357 \times \lambda + 0.9267$,

拟合结果如图1所示。

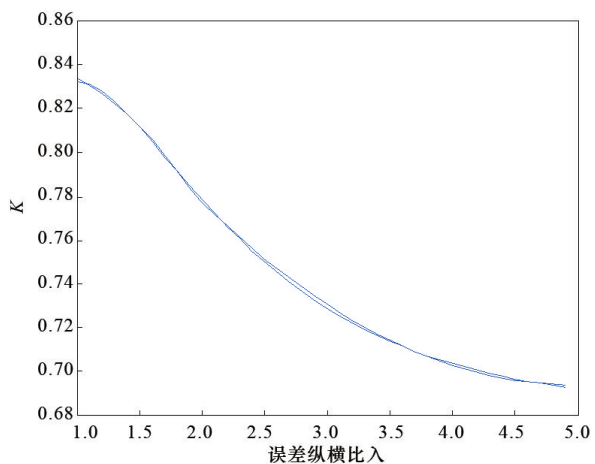


图1 CEP与总体误差均方差根 $\sigma_{\text{总体误差}}$ 的比例系数K值拟合

4.4.3 当 $\lambda \geq 5$ 时。

径向误差占绝对优势,此时

$$CEP = 0.70 \times \sigma_{\text{径向总体误差}} \quad (17)$$

4.5 计算步骤

第一步:计算探测平台、武器平台以及目标的站心平面直角坐标。

第二步:计算目标径向探测误差、横向探测误差。

$$\sigma_{\text{径向探测误差}} = \text{测距误差} \times D_{\text{探-目}}$$

$$\sigma_{\text{横向探测误差}} = \text{测向误差(弧度)} \times D_{\text{探-目}}$$

其中 $D_{\text{探-目}}$ 为探测平台距潜艇目标的距离。

第三步:根据武器平台与目标的距离、鱼雷飞行速度计算鱼雷飞行时间 $t_{\text{飞行}}$,假定武器平台与目标的距离为 $D_{\text{武-目}}$,鱼雷飞行速度为 $V_{\text{鱼雷飞行}}$,那么

$$t_{\text{飞行}} = \frac{D_{\text{武-目}}}{V_{\text{鱼雷飞行}}}$$

第四步:计算全通道时延 $t_{\text{全通道时延}}$ 。

$$t_{\text{全通道时延}} = t_{\text{传输时延}} + t_{\text{处理时延}} + t_{\text{发射时延}} + t_{\text{飞行}} + t_{\text{落水时延}} + t_{\text{航渡时延}}$$

第五步:根据 3.9 计算目标机动误差 $\sigma_{\text{机动误差}}$ 。

$$L_{\text{最大位移}} = \text{潜艇巡航速度} \times \text{全通道时延}$$

$$\sigma_{\text{机动误差}} = \frac{\sqrt{\ln(2)} \times L_{\text{最大位移}}}{\sqrt{2}}$$

第六步:根据 4.2 计算横向总体误差。

$$\sigma_{\text{径向总体误差}} = \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{径向探测误差}}^2}$$

第七步:根据 4.3 计算横向总体误差。

$$\sigma_{\text{横向总体误差}} = \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{横向探测误差}}^2}$$

第八步:当 $\lambda < 1$ 时,取 $\lambda = 1/\lambda$,根据 4.4 计算圆概率误差分布 CEP。

第九步:根据 CEP 计算鱼雷命中概率。

根据式(10)计算鱼雷命中概率。

5 计算仿真

5.1 测试用例

测试用例的参数选择见表 2,武器平台、探测平台相对目标的位置见图 2,武器平台在原点,探测平台在 Y 轴上,另外一个图标为目标。

表 2 测试用例输入数据清单

序号	名称	单位	取值
1	探测平台位置坐标	m	(20000, 0)
2	目标位置坐标	m	(20000,
3	探测平台测距误差	%	25000)
4	探测平台测向误差	°	1
5	探测平台定位误差	m	2
6	武器平台定位误差	m	100
7	武器平台位置	m	100
8	传输时延	s	(0, 0)
9	处理时延	s	2
10	鱼雷发射时延	s	2
11	鱼雷落水时延	s	30
12	鱼雷航渡时延	s	10
13	落点分布均方差	m	10
14	鱼雷飞行速度	m/s	200
15	潜艇目标巡航速度	m/s	200
16	命中概率门限	—	8
17	潜艇位于鱼雷的自导作用范围时,鱼雷自导系统的捕获概率	—	0.75
18	鱼雷的自导作用距离	m	1000
19	鱼雷的旋回半径	m	65

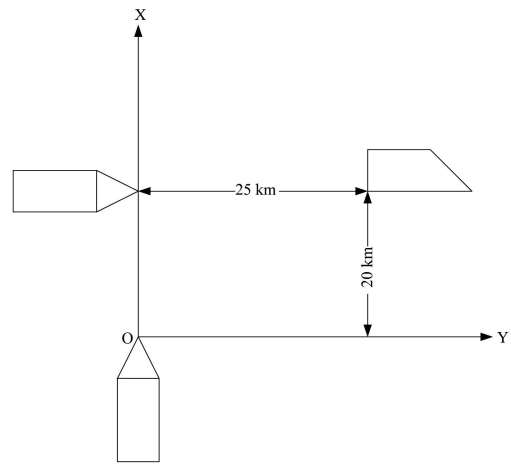


图 2 武器平台、探测平台相对目标的位置

5.1.1 测试用例 1

第一步:计算目标径向探测误差、横向探测误差。

$$\sigma_{\text{径向探测误差}} = \text{测距误差} \times D_{\text{探-目}} = 25000 \times 1\% = 250$$

$$\sigma_{\text{横向探测误差}} = \text{测向误差} \times D_{\text{探-目}} = 25000 \times \frac{2 \times \pi}{180} = 872.7$$

第二步:根据武器平台与目标的距离、鱼雷飞行速度计算鱼雷飞行时间 $t_{\text{飞行}}$ 。

假定武器平台与目标的距离为

$$D_{\text{武-目}} = \sqrt{25000^2 + 20000^2} = 32015.6$$

鱼雷飞行速度为 $V_{\text{鱼雷飞行}} = 200$,那么

$$t_{\text{飞行}} = \frac{D_{\text{武-目}}}{V_{\text{鱼雷飞行}}} = 160$$

第三步:计算全通道时延 $t_{\text{全通道时延}}$ 。

$$t_{\text{全通道时延}} = t_{\text{传输时延}} + t_{\text{处理时延}} + t_{\text{发射时延}} + t_{\text{飞行}} + t_{\text{落水时延}} + t_{\text{航渡时延}} = 214$$

第四步:根据 3.9 计算目标机动误差 $\sigma_{\text{机动误差}}$ 。

$$L_{\text{最大位移}} = \text{潜艇巡航速度} \times \text{全通道时延} = 1712$$

$$\sigma_{\text{机动误差}} = \frac{L_{\text{最大位移}}}{\sqrt{2}} \times \sqrt{\ln(2)} = 1008.2$$

第五步:根据 4.2 计算径向总体误差。

$$\sigma_{\text{径向总体误差}} = \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{径向探测误差}}^2} = 775.1$$

第六步:根据 4.3 计算横向总体误差。

$$\sigma_{\text{横向总体误差}} = \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{横向探测误差}}^2} = 1140.1$$

第七步:根据 4.4 计算圆概率分布 CEP。

$$CEP = 1121.6$$

此时误差的主要因素是目标机动误差。

$$P \approx P_{jg} P_{zd} = \left(1 - \exp\left(-\rho^2 \left(\frac{R_{zd}}{\gamma E}\right)^2\right)\right) P_{zd} = 0.32$$

5.1.2 测试用例2

在用例1中,目标机动误差均方根 $\sigma_{\text{机动误差}}$ 对CEP影响最大,由此可以看出修正目指的重要性。如果包含修正目指,最后一帧目指信息在落水前16 s给出,其他条件不变,则:

$$t_{\text{全通道时延}} = 16 + t_{\text{传输时延}} + t_{\text{处理时延}} + t_{\text{落水时延}} + t_{\text{航渡时延}} = 40$$

$$L_{\text{最大位移}} = \text{潜艇巡航速度} \times \text{全通道时延} = 320$$

$$\sigma_{\text{机动误差}} = \frac{L_{\text{最大位移}}}{\sqrt{2}} * \sqrt{\ln(2)} = 188.4$$

第五步:根据4.2计算径向总体误差。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{径向总体误差}} &= \\ &= \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{径向探测误差}}^2} \\ &= 332.0 \end{aligned}$$

第六步:根据4.3计算横向总体误差。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{横向总体误差}} &= \\ &= \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{横向探测误差}}^2} \\ &= 889.6 \end{aligned}$$

第七步:根据4.4计算圆概率分布CEP。

$$CEP = 710.1$$

$$P = 0.54$$

此时误差的主要因素是测向误差引起的横向探测误差,这是修正目指无法克服的,但通过目指修正,CEP下降依然明显(图2)。

5.1.3 测试用例3

在用例2中将测向误差设定为1°。则

$$\sigma_{\text{横向探测误差}} = \text{测向误差} \times D_{\text{探-目}} = 25000 \times \frac{1 \times \pi}{180} = 436.3$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{横向总体误差}} &= \\ &= \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{横向探测误差}}^2} \\ &= 332.0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{径向总体误差}} &= \\ &= \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{径向探测误差}}^2} \\ &= 488.0 \end{aligned}$$

$$CEP = 480.2$$

$$P = 0.85$$

命中概率提升明显。

5.1.4 测试用例4

在用例1中将测向误差设定为1°。

$$\sigma_{\text{横向探测误差}} = \text{测向误差} \times D_{\text{探-目}} = 25000 \times \frac{1 \times \pi}{180} = 436.3$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{横向总体误差}} &= \\ &= \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{横向探测误差}}^2} \\ &= 853.6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{径向总体误差}} &= \\ &= \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{径向探测误差}}^2} \\ &= 775.1 \end{aligned}$$

$$CEP = 958.1$$

$$P = 0.42$$

由于此时误差的主要因素是目标机动误差,所以目指信息改善有限。

5.1.5 测试用例5

如果探测平台用直升机,探测距离减小到3000 m,吊放声纳的性能同例1,其他条件也同例1。

$$\sigma_{\text{径向探测误差}} = \text{测距误差} \times D_{\text{探-目}} = 3000 \times 1\% = 30$$

$$\sigma_{\text{横向探测误差}} = \text{测向误差} \times D_{\text{探-目}} = 3000 \times \frac{2 \times \pi}{180} = 104.7$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{径向总体误差}} &= \\ &= \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{径向探测误差}}^2} \\ &= 734.3 \end{aligned}$$

根据3.3计算横向总体误差

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{横向总体误差}} &= \\ &= \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{横向探测误差}}^2} \\ &= 741.1 \end{aligned}$$

$$CEP = 868.6$$

$$P = 0.49$$

由于此时误差的主要因素是目标机动误差,所以目指信息改善有限。

5.1.6 测试用例6

如果探测平台用直升机,探测距离减小到3000 m,吊放声纳的性能同例1,采用中继制导,最后一帧目指信息在落水前16 s给出,其他条件也同例1。

$$\sigma_{\text{径向探测误差}} = \text{测距误差} \times D_{\text{探-目}} = 3000 \times 1\% = 30$$

$$\sigma_{\text{横向探测误差}} = \text{测向误差} \times D_{\text{探-目}} = 3000 \times \frac{2 \times \pi}{180} = 104.7$$

$$t_{\text{全通道时延}} = 16 + t_{\text{传输时延}} + t_{\text{处理时延}} + t_{\text{落水时延}} + t_{\text{航渡时延}} = 40$$

$$L_{\text{最大位移}} = \text{潜艇巡航速度} \times \text{全通道时延} = 320$$

$$\sigma_{\text{机动误差}} = \frac{L_{\text{最大位移}}}{\sqrt{2}} * \sqrt{\ln(2)} = 188.4$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{径向总体误差}} &= \\ &= \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{径向探测误差}}^2} \\ &= 220.6 \end{aligned}$$

第六步根据3.3计算横向总体误差。

$$\sigma_{\text{横向总体误差}} = \sqrt{0.5\sigma_{\text{探测定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{武器定位}}^2 + 0.5\sigma_{\text{落水}}^2 + 0.5\sigma_{\text{机动误差}}^2 + \sigma_{\text{横向探测误差}}^2} = 242.3$$

$$CEP=272.3$$

$$P=0.95$$

修正效果非常明显。满足攻击条件。

5.1.7 测试用例7

如果鱼雷自导距离扩大为2000 m,其他条件同用例2,此时

$$CEP=709.6$$

$$P=0.91$$

命中概率提升明显,满足攻击条件。

5.1.8 全通道时延的影响

探测平台与目标间的距离 = 25000 m,鱼雷自导距离在1100~1900 m间变化时,全通道时延对命中概率的影响。其他条件同例1。中继制导的关键作用就是减小全通道时延,进而减小目标机动误差对命中概率的影响(图3)。

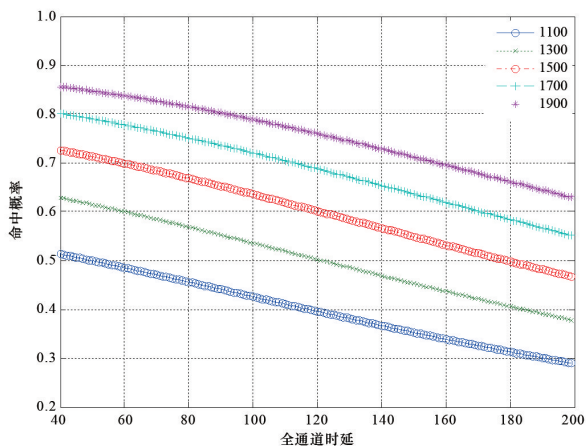


图3 探测平台与目标间的距离 = 25000 m,鱼雷自导距离1100 ~ 1900 m时,全通道时延对命中概率的影响

当探测平台与目标间的距离 = 5000 m,鱼雷自导距离在1100~1900 m间变化时,全通道时延对命中概率的影响。其他条件同例1。减小探测平台与目标间的距离相当于提升探测精度。相比与图3,命中概率基本上提升10%以上,当全通道时延较小时,命中概率提升更为明显(图4)。

5.1.9 仿真验证

采用蒙特卡罗法进行仿真,针对各个用例仿真次数100000,分别统计目标落入CEP对应区域的概率,经统计其概率均在49.5%~50.5%,证明了本CEP估计算法的有效性。计算命中概率,其与蒙特卡罗法计算值相

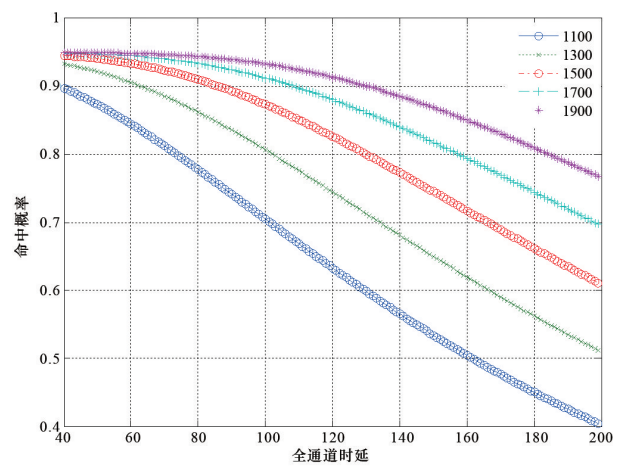


图4 探测平台与目标间的距离 = 5000 m,鱼雷自导距离1100 ~ 1900 m时,全通道时延对命中概率的影响

比,90%以上与蒙特卡罗法的偏移小于2%,65%以上与蒙特卡罗法的偏移小于1%。

5.2 仿真结果讨论

从5.1的仿真例子可以看出,过低的目指信息精度、过大的圆概率误差不足以支持实施编队鱼雷攻击。根据命中概率公式: $P \approx P_{fg} P_{zd} = (1 - \exp(-\rho^2$

$$\left(\frac{R_{zd}}{\gamma E}\right)^2) P_{zd}$$

,如果要提高命中概率P,主要从两个方面入手:降低圆概率误差,提高鱼雷自导作用半径。但鱼雷自导作用半径是由鱼雷自身特性决定的,一旦出厂,其性能就确定了。因此,主要工作将是降低圆概率误差。由式(11)、(12)和(14)可以看出总体误差由探测平台定位误差和武器节点定位误差、鱼雷落点误差、声纳的径向误差、声纳的横向误差以及各类时延引入的目标机动误差等决定。

提高编队鱼雷命中概率可以采用以下措施。

- 1) 缩短探测平台与目标的距离可以有效的降低声纳的径向探测误差和横向探测误差,有效提高命中概率。
- 2) 缩短全通道时延中的各类时延可以有效降低机动误差,有效提高命中概率。
- 3) 中继目指可以有效降低机动误差,有效提高命中概率。
- 4) 降低鱼雷方位误差可以有效降低声纳的横向探测误差,有效提高命中概率。
- 5) 降低鱼雷径向误差可以有效降低声纳的径向探测误差,提高命中概率,但该因素相对影响较小。
- 6) 提高鱼雷自导作用距离可以有效提高命中概

率。

7) 适当提高鱼雷旋回半径可以提高命中概率。

另外,讨论中只是隐含地将决策时间和发射准备时间包含在鱼雷发射时延中,由于反潜探测的特殊性,有可能只能零散地探测到潜艇目标,这时候,快速决策、快速发射就变得至关重要,在举例中鱼雷发射时延假定为 30 s,为此引入的目标机动误差大约是 141.4 m,如果决策时间和发射准备时间加长,鱼雷发射时延变成 300 s,则其引入的目标机动误差是 1414 m,经测试仿真,即便不考虑其他误差的影响,当鱼雷自导作用半径 = 1000 m 时,其命中概率也将低于 0.3。如果鱼雷武器系统能够持续地获取潜艇目标信息,则由于目标机动误差与鱼雷发射前收到最近一个目标的时戳有关,则鱼雷发射时延影响相对较小。

通过以上分析,可以发现以下的反潜策略是可行的:首先,各反潜平台远距离发现目标,然后上报目标信息,指挥平台派出反潜直升机前往目标区精确探测目标并上报目标信息,如果直升机可以攻击就直接攻击,否则,指挥平台向武器平台发出目标指示(或在指挥平台的组织下,直升机向武器平台发出目标指示),武器平台发射火箭助飞鱼雷,期间武器平台向火箭助飞鱼雷发送目标修正信息,火箭助飞鱼雷修正落水点,火箭助飞鱼雷落水实施攻击^[9-10]。

6 结论

从侧面证明了直升机反潜的有效性,假定直升机

同时具备探测和攻击能力,则全通道时延接近于零,基本不会引入目标机动误差,由于直升机距离目标较近,其探测误差也比较小,整体说来,圆概率误差 CEP 很小,命中概率将急剧上升。该结论也适应于直升机双机协同反潜。另外,也从理论及仿真的角度验证了编队协同反潜的必要性和可行性,并且指出了提升反潜效能的有效途径,对于反潜实践和训练有一定的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 洪浩. CEC 在水面舰艇反潜作战中的应用[J]. 舰船电子工程, 2001(5): 10-17.
- [2] 纪金耀, 李明. 从平台中心反潜战向网络中心反潜战的转型[J]. 现代防御技术, 2005(8): 6-9.
- [3] 吴懿鸣, 侯建军, 等. 俄罗斯海军战术研究[Z]. 北京: 海军装备研究院科技信息研究所, 2005.
- [4] 曲东才. 反潜导弹现状和发展[J]. 中国航天, 2001(9): 36-40.
- [5] 岳文娟. 火箭助飞鱼雷武器系统[Z]. 北京: 中国船舶工业集团公司船舶系统工程部, 2002.
- [6] 孙明太. 航空反潜战术[M]. 北京: 军事科学出版社, 2003: 56-58.
- [7] 孙明太. 航空反潜概论[M]. 北京: 军事科学出版社, 1998: 340-342.
- [8] 孟庆玉, 张静远, 宋保维. 鱼雷作战效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 22-45.
- [9] 郭万龙等. 舰载直升机反潜战术与方式[Z]. 北京: 海军装备论证研究中心战役战术论证室, 1988.
- [10] 邓雪. 浅海反潜战[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2002(1): 8-12.

Performance evaluation for cooperative anti-submarine based on error estimation of entire channel

GUO Limin, QIU Xingye

Systems Engineering Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Beijing 100094, China

Abstract This paper briefly introduces the necessity of warship formation cooperative antisubmarine. It then discusses the rocket-assisted torpedo hit probability by entire channel error estimation in a classical warship formation cooperative antisubmarine scenario. Finally, it presents a new method to effectively improve the rocket-assisted torpedo hit probability for the process of warship formation cooperative antisubmarine by means of different selections of parameters.

Keywords cooperative anti-submarine; error estimation of entire channel; performance evaluation ●



(责任编辑 徐丽娇)