文章编号：1673–1522（2007）05-0581–03

目标机动对反舰导弹目标捕捉概率的影响

王瑞琪 [1a]，王光辉 [1b]，朱兴邦 [2]，欧邦东 [3]

（1. 海军航空工程学院 a. 外训系；b. 指挥系，山东 烟台 264001；
2. 91315 部队，辽宁 旅顺 116041；3. 92029 部队，福建 福鼎 355206）

摘　要：根据反舰导弹末制导雷达捕捉目标和舰艇机动的原理，建立了目标机动条件下末制导雷达捕捉目标的计算模型，仿真结果显示，对中远程反舰导弹而言，目标机动对目标捕捉概率有显著影响。

关键词：反舰导弹；水面舰艇；机动；捕捉概率

中图分类号：TN929.2　　**文献标志码**：A

1 末制导雷达捕捉目标原理分析

反舰导弹一般采用主动雷达寻的模式，目标舰的位置和导弹的位置是影响捕捉概率的主要因素，理想的情况是自控终点时刻导弹在其理想位置 O 点，且目标舰在末制导雷达搜索区域的中心 W_1[1]，如图 1 所示，得到的理想结果是捕捉概率为 100%。因为捕捉目标这一事件取决于目标的位置和导弹的位置，因此任何一个事件的变化均会影响最终的结果——捕捉目标事件的发生；在这两个事件中，导弹的位置服从一定的散布规律，一般认为反舰导弹自控终点的散布服从二维正态分布[2]，对于已定型的导弹，其自控终点的散布是确定的、无法改变的，但改变目标的位置来影响反舰导弹末制导雷达捕捉目标事件的发生是完全可行的，机动是唯一改变舰艇位置的手段，文献[3]的模型正是基于这一概念建立的。

图 1 中，O 点为导弹自控终点的理想位置，OX 为导弹平均飞行方向，OZ 为 OX 的正横方向，我们称 XOZ 为理论捕捉坐标系，四边形 ABCD 为末制导雷达在第一个方位搜索周期的近似搜索区域。根据前置射击原理[3]，若反舰导弹在火控系统精确跟踪目标条件下发射，末制导雷达开机时刻，目标正好运动到 W_1 点，因此，末制导雷达捕捉目标的问题已转化为反舰导弹自控终点的散布问题，目标不机动时被捕捉的概率是反舰导弹自控终点落在图 1 中阴影区域的概率。

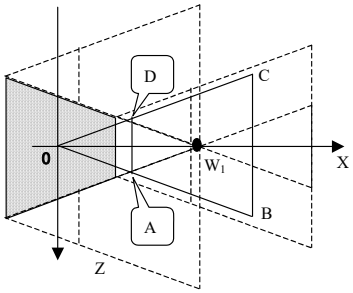


图 1　反舰导弹自控终点有效落点区域示意图

2 机动目标捕捉概率模型

若目标舰在发现来袭导弹后改变航向，末制导雷达开机时刻（自控终点时刻），目标舰将不会在 W_1 点，而是机动到点 W_3。[3, 4]反舰导弹自控终点的有效区域可近似为图 2 中的四边形 $O_1'O_2'O_4'O_3'$，在末制导雷达开机时，只有反舰导弹在四边形 $O_1'O_2'O_4'O_3'$ 内，才能在第一个方位搜索周期捕捉到目标。四边形 $O_1'O_2'O_4'O_3'$ 各特征点的坐标为

$$\begin{cases} z_{O_1'} = z_{W3} - r_{d2}\sin(\alpha+\beta) \\ x_{O_1'} = x_{W3} - r_{d2}\cos(\alpha+\beta) \end{cases}, \tag{1}$$

$$\begin{cases} z_{O_2'} = z_{W3} - r_{d1}\sin(\alpha+\beta) \\ x_{O_2'} = x_{W3} - r_{d1}\cos(\alpha+\beta) \end{cases}, \tag{2}$$

$$\begin{cases} z_{O_3'} = z_{W3} + r_{d2}\sin(\alpha+\beta) \\ x_{O_3'} = x_{W3} - r_{d2}\cos(\alpha+\beta) \end{cases}, \tag{3}$$

$$\begin{cases} z_{O_4'} = z_{W3} + r_{d1}\sin(\alpha+\beta) \\ x_{O_4'} = x_{W3} - r_{d1}\cos(\alpha+\beta) \end{cases}, \tag{4}$$

式中：r_{d1} 为雷达搜索波门近界；r_{d2} 为雷达搜索波

收稿日期：2007-03-07
作者简介：王瑞琪（1961–），男，讲师，硕士。

门远界；β 为雷达波束方位半宽；α 为雷达天线扇扫角度。

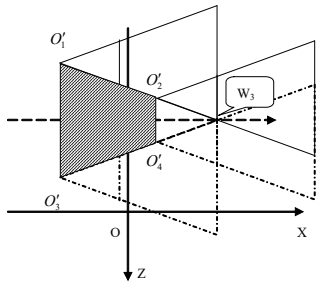


图 2　反舰导弹对机动目标有效自控终点位置示意图

为便于利用服从正态分布的概率计算公式，可将四边形 $O_1'O_2'O_4'O_3'$ 简化为长方形 $O_1O_2O_4O_3$，如图 3 所示，$O_1O_2O_4O_3$ 四点的坐标为

$$x_{O_2}=x_{O_4}=x_{O_2'}=x_{W3}-r_{\mathrm{d}1}\cos(\alpha+\beta), \tag{5}$$

$$x_{O_1}=x_{O_3}=x_{O_1'}=x_{W3}-r_{\mathrm{d}2}\cos(\alpha+\beta), \tag{6}$$

$$z_{O_2}=z_{O_1}=\frac{1}{2}(z_{O_1'}+z_{O_2'})=\frac{1}{2}\left[2z_{W3}-(r_{\mathrm{d}_1}+r_{\mathrm{d}_2})\sin(\alpha+\beta)\right], \tag{7}$$

$$z_{O_4}=z_{O_3}=\frac{1}{2}(z_{O_3'}+z_{O_4'})=\frac{1}{2}\left[2z_{W3}+(r_{\mathrm{d}_1}+r_{\mathrm{d}_2})\sin(\alpha+\beta)\right]。 \tag{8}$$

自控终点时刻，反舰导弹自控终点落在 $O_1O_2O_4O_3$ 内的概率（捕捉目标的概率）为

$$P_{\text{捕}}=\frac{1}{4}\left[\Phi\left(\frac{x_{\mathrm{O}_2}-\overline{\mathrm{X}}}{E_{\mathrm{x}}}\right)-\Phi\left(\frac{x_{\mathrm{O}_1}-\overline{X}}{E_x}\right)\right]\cdot\left[\Phi\left(\frac{z_{\mathrm{O}_3}-\overline{\mathrm{Z}}}{E_z}\right)-\Phi\left(\frac{z_{\mathrm{O}_1}-\overline{Z}}{E_z}\right)\right], \tag{9}$$

式(9)中：$\Phi(x)=\int_0^x\frac{2\rho}{\sqrt{\pi}}\times\mathrm{e}^{-\rho^2\mathrm{t}^2}\mathrm{dt}$ 为简化拉普拉斯函数，$\overline{Z}$ 为自控终点侧向系统误差，$\overline{X}$ 为自控终点纵向系统误差，E_z 为自控终点侧向散布标准差，E_x 为自控终点纵向散布标准差；考虑到反舰导弹自控终点在 $O_1'O_3'$ 左侧时，末制导雷达会在后续方位搜索周期捕捉到目标，所以可将式(9)改为

$$P=\frac{1}{4}\left[\Phi\left(\frac{x_{\mathrm{O}_2}-\overline{\mathrm{X}}}{E_x}\right)-\Phi\left(\frac{a'-\overline{X}}{E_x}\right)\right]\cdot\left[\Phi\left(\frac{z_{\mathrm{O}_3}-\overline{\mathrm{Z}}}{E_z}\right)-\Phi\left(\frac{z_{\mathrm{O}_1}-\overline{Z}}{E_z}\right)\right], \tag{10}$$

式中：$a'=-r_{\mathrm{zk}}+r_{\min}$；$r_{\mathrm{zk}}$ 为导弹自控飞行距离；$r_{\min}$ 为寻的雷达最小开机距离。

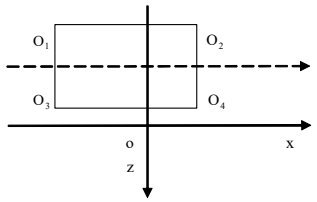


图 3　反舰导弹有效自控终点区域简化图

3 舰艇机动模型

根据上一节的分析，只要确定自控终点时刻目标舰的位置 W_3，即可求得目标舰被捕捉的概率。设在导弹距目标舰 f_{r} km 处被发现，此时目标舰在点 W_0，其在导弹捕捉坐标系 ZOX 中的坐标为（z_{W0}, x_{W0}），如图 4 所示。

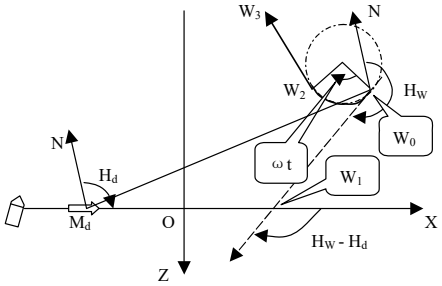


图 4　舰艇机动过程示意图

因为舰艇的速度远小于导弹的速度，可近似认为目标舰得到来袭导弹的信息时，导弹与目标舰的距离 f_{r} 是导弹到前置点 W_1 的距离。W_0 的坐标为：

$$z_{W0}=-\frac{f_{\mathrm{r}}-r_{\mathrm{zd}}}{V_{\mathrm{d}}}V_W\sin(H_W-H_{\mathrm{d}}), \tag{11}$$

$$x_{W0}=r_{\mathrm{zd}}-\frac{f_{\mathrm{r}}-r_{\mathrm{zd}}}{V_{\mathrm{d}}}V_W\cos(H_W-H_{\mathrm{d}}), \tag{12}$$

式中：H_W、V_W 分别为目标舰的航向、航速；H_{d}、V_{d} 分别为来袭导弹航向、航速。

目标舰得到来袭导弹的信息后，立即满舵改变到最佳规避航向。目标舰满舵规避的轨迹可近似为圆弧，见图 4。设目标舰的旋回半径为 r、旋回角速度为 ω。那么，目标舰旋回完毕时刻的坐标为：

$$z_{W2}=z_{W0}+\left|2r\times\sin(\omega t/2)\right|\times\sin(H_W-H_{\mathrm{d}}+\omega t/2), \tag{13}$$

$$x_{W2}=x_{W0}+\left|2r\times\sin(\omega t/2)\right|\times\cos(H_W-H_{\mathrm{d}}+\omega t/2), \tag{14}$$

式中：t 为目标舰旋回的时间；ω 为目标舰旋回角速度，顺时针为正。

旋回完毕，目标舰保持航向直行，目标舰在导弹自控终点时刻的坐标 W_3 为：

$$z_{W3}=z_{W2}+\left(\frac{fr\text{-}r_{zd}}{v_d}-t\right)V_W\sin(H_W+H_b-H_d)\text{，}\quad(15)$$

$$x_{W3}=z_{W2}+\left(\frac{fr\text{-}r_{zd}}{v_d}-t\right)V_W\cos(H_W+H_b-H_d)\text{，}\quad(16)$$

式中：H_W+H_b 为目标舰旋回完毕后的航向，$H_b=\omega t$。

4 仿真分析

设导弹参数：270 m/s，$r_{d1}=4$ km；$r_{d2}=24$ km；$\alpha+\beta=45^\circ$；$E_z=E_x=1$ km（对远程反舰导弹而言，这是相当小的散布），$\overline{Z}=\overline{X}=0$，$H_d=135^\circ$。目标舰参数为：$V_w$=30 kn，$H_w$=180°，$\omega$=1.5 (°)/s，$r$=0.4 km，$H_w$=180°，$f_r$=110 km。对上述模型进行仿真，结果如图 5 所示。

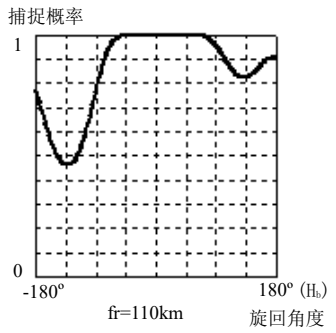


图 5　不同机动航向的捕捉概率

5 结论

从仿真结果可以看出，目标机动对反舰导弹目标捕捉概率有显著的影响，该影响与规避的方向和旋回角度密切相关。由于对目标的自导命中概率变化不大，一般接近 1，文中的目标捕捉概率可近似为目标命中概率。总之，依靠侦察卫星和预警飞机在较远距离上预警来袭反舰导弹是可行的，这使舰艇机动规避远程反舰导弹成为可能。因此，研究目标机动对反舰导弹目标捕捉概率的影响很有必要。

参考文献：

[1] 范洪达, 李向民, 朱德明, 等. 导弹火控系统分析与设计[M]. 北京: 海潮出版社, 1999:64-72.

[2] 纪永清, 董文洪, 唐金国. 海军兵种武器系统作战效能评估[M]. 北京: 海潮出版社, 2000:35-70.

[3] 王光辉, 严建钢, 杨根源. 规避反舰导弹最佳机动航向的模型与计算[J]. 军事运筹与系统工程, 2002(4): 34-37.

[4] 王光辉, 严建钢, 纪永清, 等. 一种改进的末制导雷达目标捕捉概率解析算法[J]. 海军航空工程学院学报, 2002,17(5):521-524.

The Influence of Target Maneuver on the Acquiring Probability of Anti-ship Missile

WANG Rui-qi[1a]，WANG Guang-hui[1b]，ZHU Xing-bang[2]，OU Bang-dong[3]

（1．Naval Aeronautical Engineering Institute

a. Department of Foreign Training；b. Department of Command，Yantai Shandong 264001，China；

2．The 91315th Unit of PLA，Lvshun Liaoning 116041，China；

3．The 92029th Unit of PLA，Fuding Fujian 355206，China）

Abstract: According to the principle of anti-ship missile homing radar acquiring target and the principle of ship maneuvering, the model of homing radar acquiring maneuver target was established. For middle and long-range anti-ship missile, emulating shows that target maneuver can affect the acquiring probability of anti-ship missile considerably.

Key words: anti-ship missile; warship; maneuver; acquiring probability