

doi: 10.7690/bgzd.2014.01.001

基于平台协同的反舰导弹突防概率模型

张志伟¹, 王光辉¹, 徐振宇², 谢宇鹏¹

(1. 海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空工程学院青岛校区航空装备保障指挥系, 山东 青岛 266041)

摘要: 为计算在平台协同条件下反舰导弹的突防概率, 建立一种基于平台协同的反舰导弹突防概率模型。给出空间位置关系模型, 对舰空导弹拦截系统进行建模, 分析平台协同对反舰导弹入射强度的影响, 提出衡量平台协同效果的评价模型, 利用随机服务理论建立反舰导弹突防概率的计算模型, 并通过实例进行仿真分析。结果表明: 该模型能有效地体现反舰导弹平台协同时间差和入射强度对突防概念的影响, 具有一定的理论意义和实践价值。

关键词: 平台协同; 反舰导弹; 突防概率; 入射强度

中图分类号: TJ761.1⁺4 **文献标志码:** A

Model of Penetration Probability of Anti-Ship Missile Based on the Platform-Coordination

Zhang Zhiwei¹, Wang Guanghui¹, Xu Zhenyu², Xie Yupeng¹

(1. Department of Command, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Department of Aviation Equipment Support Command, Subsidiary Court of Naval Aeronautical & Astronautical University, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to calculate the penetration probability of anti-ship missile based on the platform-coordination, we established a penetration probability model of anti ship missile based on the platform-ollaborative. The spatial position relation was analyzed, the model was built for anti-missile defense system of warship, then we analysis the influence of the platform-coordination to the anti-ship missile's incident intensity, put forwards an evaluation model for the effect on the platform-coordination and get the model of the way to calculate the penetration probability of anti-ship missile depending on stochastic service system. The results show that the model can effectively reflect the effect of cooperative platform anti-ship missile time difference and the incident intensity to the penetration concept, also has a certain theoretical and practical significance.

Keywords: platform-coordination; anti-ship missile; penetration probability; incident intensity

0 引言

在现今的海上作战中, 面对强大的对空防御力量, 保证反舰导弹有效突防的最主要手段就是要进行高强度、多方向、多波次的协同攻击。平台协同是指从不同平台以不同时间发射反舰导弹, 以达到同时突防的目的^[1-2]。无论空中平台还是海上平台, 大多情况下都是以编队形式出现的, 即反舰导弹攻击在绝大多数情况下都是编队多平台对海上多目标进行打击。由于各发射平台的位置不同, 各枚反舰导弹的航路不同, 空中飞行速度也有差异, 需严格控制其发射时间, 才能确保各枚导弹在较短时间间隔内以较大入射密度到达目标反舰导弹杀伤区远界^[3]。笔者以飞机编队和舰艇编队对目标导弹突击为例, 提出基于平台协同的反舰导弹突防模型。

1 空间位置关系模型

为了在三维空间中计算反舰导弹对目标舰空导弹的突防情况, 先建立以舰空导弹体系的布防中心

(一般为被攻击舰)为坐标原点, 以反舰导弹的合成进攻方向的相反方向为 X 轴, 在水平面过原点且垂直 X 轴的直线为 Y 轴, 过原点且垂直 X 轴和 Y 轴组成的坐标平面的直线为 Z 轴(如图 1 所示), 在此坐标系中可以得出飞机编队和舰艇编队相对于目标的位置坐标。

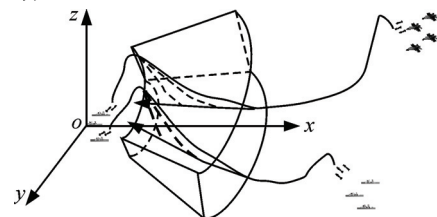


图 1 空间坐标系

2 舰空导弹拦截模型

2.1 舰空导弹杀伤区模型^[4]

舰空导弹体系的杀伤区分布在以上空间坐标系内, 指舰空导弹能以一定概率拦截反舰导弹的作用范围, 这里认为同时满足以下 3 个不等式的空间区

收稿日期: 2013-07-28; 修回日期: 2013-09-09

基金项目: 全军军事类研究生课题(2012JY002-491)

作者简介: 张志伟(1986—), 男, 山东人, 在读硕士, 从事军事运筹研究。

域就是舰空导弹的杀伤区。

$$H_{\min} \leq h_m \leq H_{\max} \tag{1}$$

$$\frac{h_m}{\sqrt{x_m^2 + z_m^2}} \leq \tan \alpha \tag{2}$$

$$R_{\min} \leq \sqrt{x_m^2 + z_m^2 + h_m^2} \leq R_{\max} \tag{3}$$

式中： R_{\min} 、 R_{\max} 分别表示舰空导弹杀伤区的近界和远界； α 为舰空导弹最大仰角。

由于目标编队内舰艇间距远小于舰空导弹杀伤区距离，在协同防空时忽略杀伤区的变化而主要考虑拦截通道数量的增加。

2.2 舰空导弹杀伤区拦截纵深模型

在坐标系中，第 i 枚反舰导弹的飞行轨迹假设为通过点 $M(x_i, y_i, z_i)$ 且具有方向 (p_i, q_i, r_i) ，则第 i 枚反舰导弹的运动模型^[5]为

$$\frac{x-x_i}{p_i} = \frac{y-y_i}{q_i} = \frac{z-z_i}{r_i} \tag{4}$$

通过式 (1)~式 (4)，可以获得反舰导弹飞行轨迹与舰空导弹杀伤区的第一个交点和最后一个交点，两交点之间即为拦截纵深。

2.3 舰空导弹系统拦截次数模型

当计算得出舰空导弹拦截纵深后，可根据拦截纵深、舰空导弹飞行速度、反舰导弹飞行速度以及系统反应时间和杀伤效果判断时间等计算舰空导弹系统的拦截次数，这里假设反舰导弹末端作水平等速直线飞行。单通道拦截次数可由式 (5) 迭代计算得出^[6]，终止条件为 $d < 0$ 。

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(R_{\max}^2 - L^2)}, k=1 \\ d_k = d_{k-1} - v_m \times \left(\frac{\sqrt{h^2 + L^2 + d_k} + t_z}{v_j} \right), k>1 \end{cases} \tag{5}$$

式中： L 为来袭导弹航路捷径； d_k 为第 k 次拦截后剩余的拦截纵深； v_j 为舰空导弹速度； t_z 为舰空导弹拦截周期。

目标编队拦截次数是编队内各成员的协同拦截次数之和。以三舰编队为例，来袭反舰导弹攻击其中一舰时，另两舰即为掩护舰，此时总的拦截次数就由被攻击舰与掩护舰对反舰导弹的拦截次数之和。总的拦截次数 N 由下式^[7-8]求得

$$N = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^J N_i(Q_j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^J (f_o(Q_j) + f_v(Q_j)) \tag{6}$$

式中： J 为目标编队舰艇数； M 为来袭反舰导弹数，第 i 枚反舰导弹攻击第 j 艘舰艇， N_i 为目标编队抗击第 i 枚反舰导弹的拦截次数； Q_j 为抗击第 i 枚反舰导弹的被攻击舰和掩护舰集合。

3 反舰导弹平台协同模型

3.1 平台协同时间差模型

一组反舰导弹群可以用第一个和最后一个反舰导弹之间的时间间隔，以及齐射导弹群中的反舰导弹数量来描述。文献[9]中给出飞机编队和舰艇编队齐射反舰导弹，进入目标编队舰空导弹杀伤区入射流时间间隔模型。在发射平台的位置、各枚导弹的航路、飞行速度以及外界环境不同的情况下，各平台反舰导弹难以同时到达，将各平台第一枚反舰导弹到达时间差定义为协同时间差 t 。将协同时间指标表示为

$$J = \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - T_{EA})^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{J_s^i}{v_i} - T_{EA} \right)^2} \tag{7}$$

式中： t_i 为第 i 枚反舰导弹到达舰空导弹杀伤区远界的实际飞行时间； J_s^i 为第 i 枚反舰导弹的到达舰空导弹杀伤区远界飞行距离； T_{EA} 为反舰导弹预定到达时间，由于在实际作战中准确的 T_{EA} 难以推测，故用平均到达时间 $\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{J_s^i}{v_i} \right)$ 代替； v_i 为第 i 枚反舰导弹飞行速度。

3.2 平台协同的反舰导弹入射强度模型

在反舰导弹总数一定的前提下，合同编队反舰导弹入射强度由反舰导弹入射总时间来衡量^[10-11]。假设飞机编队齐射 m_1 枚反舰导弹，舰艇编队齐射 m_2 枚反舰导弹，反舰导弹入射强度为

$$\lambda = \frac{m_1 + m_2}{\sum_{i=1}^{m_1+m_2} \left(\frac{J_s^i}{v_i} - \frac{J_s^{i-1}}{v_{i-1}} \right)} \tag{8}$$

4 反舰导弹突防的随机服务模型^[5]

在评估持续入侵的反舰导弹对目标编队舰空导弹体系的突防效能时，可利用随机服务理论来进行计算。在拦截过程中，以反舰导弹入射流为输入率，以反舰导弹输入流中未受到拦截和受到拦截但未拦截成功的部分作为反舰导弹的输出率。则第 k 次拦截的反舰导弹输入率和输出率为

$$\begin{cases} \lambda_{\text{ink}} = \lambda \prod_{l=1}^{k-1} (1 - p_{sl} p_{kl}) \\ \lambda_{\text{outk}} = \lambda \prod_{l=1}^k (1 - p_{sl} p_{kl}) \end{cases} \tag{9}$$

当已知每次拦截的反舰导弹输入率和输出率，则第 l 次拦截的反舰导弹未受拦截的概率 p_{cl} 、反舰导弹受到拦截的概率 p_{sl} 和反舰导弹被成功拦截的概率 p_{dl} 为

$$\begin{cases} p_{cl} = \frac{\alpha^{cl}}{cl!} / \sum_{j=0}^{cl} \frac{\alpha^j}{j!} \\ p_{sl} = 1 - p_{cl} \\ p_{dl} = (1 - p_{dl-1})(1 - p_{cl}) p_{kl} \end{cases} \quad (10)$$

式中 α 为舰空导弹一个拦截通道平均拦截周期内进入杀伤区的平均反舰导弹数。

当所有拦截通道都处于忙时，认为反舰导弹将突防，则反舰导弹突防概率 p 为

$$p = 1 - \prod_{l=1}^k (1 - p_{dl}) \quad (11)$$

5 仿真及算例分析

假设：目标编队由 3 艘舰艇组成，反舰导弹杀伤区远界为 50 km，近界为 1 km，速度为 500 m/s，单枚拦截成功率 0.8，拦截时间间隔为 4 s；飞机编队由 4 架飞机组成，每架飞机携带 4 枚反舰导弹，速度为 600 m/s，齐射时间间隔为 4 s。舰艇编队由 3 艘舰艇组成，每艘舰艇携带 6 枚反舰导弹，速度为 300 m/s，齐射时间间隔为 3 s。飞机编队和舰艇编队间距为 40 km，相对方位角为 120°，目标和舰艇距离为 150 km。以相邻两枚舰空导弹发射时间间隔作为拦截时间段，不同协同时间差下各拦截时间段内进入杀伤区反舰导弹数如图 2 所示。协同时间差对反舰导弹突防概率影响如图 3 所示。不同协同时间差对应指标值和入射强度如表 1 所示。

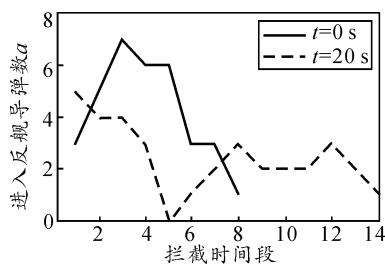


图 2 各拦截时间段内进入反舰导弹数

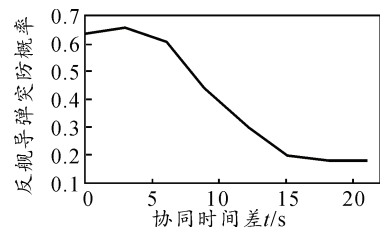


图 3 协同时间差对反舰导弹突防概率影响

从仿真结果可见：在不同拦截时间段内进入杀伤区的反舰导弹数有较大变化，这是由于发射平台的位置、各反舰导弹的航路、空中飞行速度和外界环境的差异造成的。当协同时间差为 0 s 时，前 28 s 的 7 个拦截时间段内至少有 3 枚以上反舰导弹入射，

在较短时间内形成了较大入射流密度，利于反舰导弹的突防；当协同时间差为 20 s 时，入射总时间明显增大，各时间段内反舰导弹入射密度都相对减小，不利于反舰导弹的突防；在其他条件不变的前提下，协同时间差指标和入射强度能较好地衡量平台协同的效果，并在反舰导弹突防概率上得到体现。

表 1 不同协同时间差对应指标值和入射强度

t/s	J	$\lambda/(枚/s)$
0	34.02	1.89
3	31.26	1.89
6	40.52	1.62
9	45.24	1.40
12	61.61	1.13
15	86.83	0.97
18	111.56	0.94
21	122.95	0.87

6 结束语

平台协同是反舰导弹重要的协同样式之一，不同平台在不同的时间发射导弹，以达到同时突防的目的是平台协同的主要研究内容。笔者从反舰导弹突防舰空导弹拦截的角度出发，在分析反舰导弹平台协同时间差和入射强度的基础上，采用随机服务模型计算反舰导弹的突防概率。仿真结果表明，该模型有效地体现了反舰导弹平台协同时间差和入射强度对突防概率的影响，具有理论意义和实践价值。

参考文献：

- [1] 杨飞, 董朝阳, 王青. 实施饱和攻击的反舰导弹武器目标分配[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(2): 316-319.
- [2] 林涛, 刘永才, 关成启. 飞航导弹协同作战使用方法探讨[J]. 战术导弹技术, 2005, 2(3): 8-12.
- [3] 曾家有, 钟建林, 汪浩. 全系统对抗条件下的反舰导弹突防能力计算模型[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 6036-6038.
- [4] 王光辉, 严建钢, 李瑛, 等. 一种舰空导弹拦截方式的效能评价模型[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(18): 4828-4830.
- [5] 陈立新. 防空导弹网络化体系效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 225-226.
- [6] 张壮, 张勇, 张高巍. 反舰导弹突防编队纵深舰空导弹系统模型研究[J]. 软件, 2011, 32(7): 21-22.
- [7] 范英飏, 姚跃亭, 高波, 等. 舰艇编队协同防空连续射击次数仿真分析[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(6): 2092-2095.
- [8] 赵建军, 王毅, 杨利斌, 等. 舰艇编队协同防空射击次数[J]. 兵工自动化, 2012, 31(9): 15-17.
- [9] 唐瑞栋, 王光辉, 严建钢. 反舰导弹入射流的数字特征研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2004, 18(2): 31-35.
- [10] 谢邦荣, 尹健, 宋劲松. 巡航导弹对地空导弹的突防概率仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2687-2691.
- [11] 罗京华, 孙阳, 郑保华. 航空兵对水面舰艇编队突击作战兵力数量需求估算模型[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(6): 700-704.