

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.10.001

反舰导弹最优末端变轨机动策略

武志东¹, 顾文锦², 毕兰金¹, 张培珍¹

(1. 海军航空工程学院 研究生3队, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 为了在与水面舰艇攻防对抗过程中获得较好的突防效果, 对反舰导弹最优末端变轨机动策略进行研究。首先对水面舰艇的反导防御体系进行建模, 研究反舰导弹和舰空导弹的攻防对抗过程, 然后在此基础上研究反舰导弹的机动突防方法, 最后以拦截弹平均脱靶量最小为评价指标选择最优的末端变轨机动突防策略。实例证明, 采用该策略能使反舰导弹取得最佳突防效果。

关键词: 反舰导弹; 末端机动; 最优策略

中图分类号: V448; N945.12 **文献标识码:** A

Optimal Variable-Trajectory Tactic of Terminal Maneuver for Anti-Ship Missile

Wu Zhidong¹, Gu Wenjin², Bi Lanjin¹, Zhang Peizhen¹

(1. No. 3 Brigade of Graduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Dept. of Control Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to acquire the optimal purpose in ship counterwork, research the optimal end variable-trajectory tactic of anti-ship missile. Firstly, the model is built for anti-missile defense system of warship, and has researched the attack-defense countermeasure course of anti-ship missile and ship-air missile. Based on this, the terminal maneuver method of anti-ship missile is given. At last, the penetration tactic of the optimal terminal maneuver is conclude according to the principle of minimal ship-air missile's average miss distance. The experiment shows that the best penetration effect can be got with the tactic.

Keywords: anti-ship missile; terminal maneuver; optimal tactic

0 引言

目前, 水面舰艇主要依赖舰空导弹和反舰炮对来袭反舰导弹实施拦截, 而末端机动是反舰导弹规避目标舰艇反导武器系统拦截的最有效途经。反舰导弹末端机动方式主要有: 1) 跃升机动, 如美国的“捕鲸叉”(AGM84A); 2) 蛇行机动, 如俄罗斯的“白蛉”(3M80)^[1]; 3) 摆式机动^[2]; 4) 螺旋机动^[3]。文献[3]指出了螺旋机动对弹道导弹再入弹头提高突防概率的有效作用。文献[4]研究了摆动式机动策略, 分析了拦截弹动力学特性对机动突防效果的影响。文献[5]和文献[6]从导弹防御的角度, 研究了目标作正弦机动(即蛇行机动)对拦截导弹拦截效果的影响。文献[7]以反舰导弹蛇行机动为例, 分析了反舰导弹对舰空导弹的突防规避策略, 并通过仿真计算对比分析了反舰导弹“蛇行机动”和传统导弹攻击的优劣。文献[8]采用伴随技术对基于过载控制技术^[9]的反舰导弹末端非平面机动进行研究。文献[10]采用过载控制技术, 建立了反舰导弹末端机动的一体化控制模型, 并且利用该控制模型控制导弹实现了末端跃升、蛇行、摆式和螺旋等机动方

式。上述文献指出了机动突防有效性, 并依据反舰导弹末端机动的数学原理, 建立了一体化控制模型。故在此基础上, 以攻防态势和工程设计需求为背景, 从研究目标水面舰艇的反导防御能力入手, 研究各种末端变轨机动方式的最佳作战使用方法, 得出某一给定攻防态势下的反舰导弹最优变轨机动策略。

1 水面舰艇弹炮结合反导防御能力分析

水面舰艇对来袭反舰导弹的拦截作战区域可分为: 导弹作战区、弹炮皆能作战区和舰炮作战区 3 部分^[11], 如图 1。

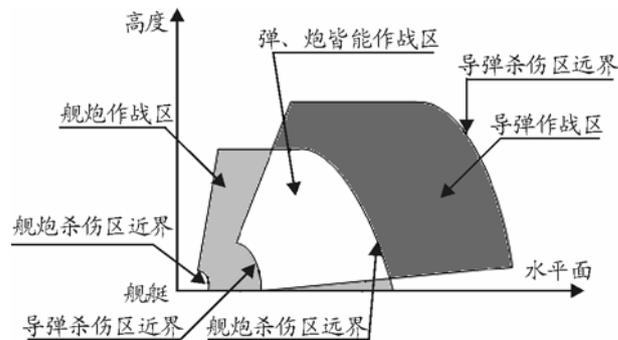


图 1 水面舰艇反导作战区示意图

收稿日期: 2009-04-12; 修回日期: 2010-06-29

作者简介: 武志东(1980-), 男, 山西人, 博士研究生, 从事海军兵种及武器系统仿真研究。

首先分析舰空导弹对来袭反舰导弹的杀伤区范围。假设反舰导弹航路捷径为 P ，飞行高度为 H ，飞行速度为 V_m ，舰空导弹最大射程为 R_y ，最小射程为 R_j ，则反舰导弹飞行弹道与舰空导弹杀伤区近界和远界的交点离舰空导弹发射平台的水平距离分别为：

$$D_{\max} = \sqrt{R_y^2 - H^2 - P^2}, \quad (H_{\max} > H > H_{\min} \text{ 且 } 0 \leq P \leq \sqrt{R_y^2 - H^2} \cdot \sin(q_{\max})) \quad (1)$$

$$D_{\min} = \begin{cases} \sqrt{R_j^2 - H^2 - P^2}, & (H_{\min} \leq H \leq R_j \cdot \sin(\varepsilon_{\max}) \text{ 且 } 0 \leq P \leq \sqrt{R_j^2 - H^2} \cdot \sin(q_{\max})) \\ P / \tan(q_{\max}), & (H_{\min} \leq H \leq R_j \cdot \sin(\varepsilon_{\max}) \text{ 且 } P > \sqrt{R_j^2 - H^2} \cdot \sin(q_{\max})) \\ \sqrt{\left(\frac{H}{\tan(\varepsilon_{\max})}\right)^2 - P^2}, & (H_{\max} \geq H > R_j \cdot \sin(\varepsilon_{\max}) \text{ 且 } 0 \leq P \leq \frac{H}{\tan(\varepsilon_{\max})} \cdot \sin(q_{\max})) \\ P / \tan(q_{\max}), & (H_{\max} \geq H > R_j \cdot \sin(\varepsilon_{\max}) \text{ 且 } P > \frac{H}{\tan(\varepsilon_{\max})} \cdot \sin(q_{\max})) \end{cases} \quad (2)$$

其中， D_{\min} 为反舰导弹飞行弹道与舰空导弹杀伤区近界的交点离舰空导弹发射平台的水平距离； D_{\max} 为反舰导弹飞行弹道与舰空导弹杀伤区远界的交点离舰空导弹发射平台的水平距离； H_{\max} 为舰空导弹最大射高； H_{\min} 为舰空导弹最小射高； ε_{\max} 为舰空导弹最大高低角； M 为空袭反舰导弹。如图 2、图 3。

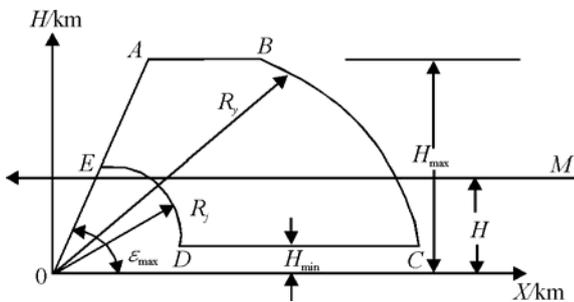


图 2 舰空导弹垂直面杀伤区

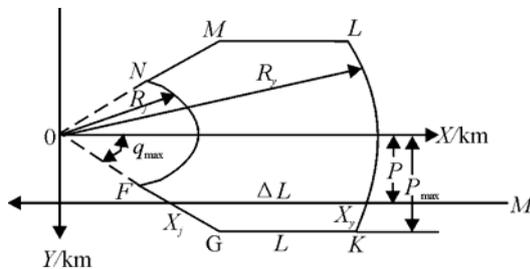


图 3 舰空导弹水平面杀伤区

因此，舰空导弹对反舰导弹的杀伤区纵深为：

$$\Delta L_{dd} = D_{\max} - D_{\min}$$

同理，可得舰炮对来袭反舰导弹的杀伤区纵深为：

$$\Delta L_{jp} = D_{\max}' - D_{\min}'$$

其中， D_{\min}' 为反舰导弹飞行弹道与舰炮杀伤区近界的交点离舰空导弹发射平台的水平距离； D_{\max}' 为反舰导弹飞行弹道与舰炮杀伤区远界的交点离舰空导弹发射平台的水平距离。

综上所述，水面舰艇弹炮结合反导防御系统对掠海飞行的反舰导弹拦截区纵深为：

$$\Delta L = D_{S\max} - D_{S\min}, \quad (H_{\max} \geq H \geq H_{\min} \text{ 且 } H'_{\max} \geq H \geq H'_{\min}) \quad (3)$$

$$\text{其中： } D_{S\max} = \max(D_{\max}, D'_{\max}); \quad (4)$$

$$D_{S\min} = \min(D_{\min}, D'_{\min}). \quad (5)$$

2 反舰导弹与舰空导弹对抗模型

反舰导弹和舰空导弹处于三维空间内运动，为了计算方便，将三维对抗问题在航向平面和纵向平面上解耦，分别对其研究，重点注意空间几何角度关系。

2.1 舰空导弹截击反舰导弹航向平面模型

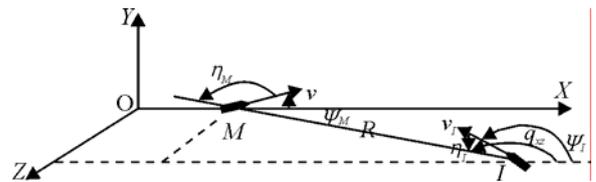


图 4 舰空导弹截击反舰导弹的航向平面图

如图 4，OXYZ 为地面坐标系，反舰导弹 M 点的位置为 $(x \ y \ z)$ ，拦截弹 I 点的位置为 $(x_I \ y_I \ z_I)$ ，实际的弹（拦截弹 I ）目（反舰导弹 M ）之间的距离大小为：

$$R = \sqrt{(x - x_I)^2 + (y - y_I)^2 + (z - z_I)^2}$$

在航向平面内各角度的正方向，规定相同航向平面内的拦截几何关系为：

$$\dot{R}_{xz} = v \cos(q_{xz} - \psi_M) - v_I \cos(q_{xz} - \psi_I)$$

$$R_{xz} \dot{q}_{xz} = v_I \sin(q_{xz} - \psi_I) - v \sin(q_{xz} - \psi_M)$$

式中：

$$R_{xz} = \sqrt{(x - x_I)^2 + (z - z_I)^2}$$

$$q_{xz} = \pi - \text{atan}\left(\frac{z - z_I}{x - x_I}\right), \quad (x < x_I)$$

当 $x > x_I$ ，即拦截导弹尾追反舰导弹情况时，

$$q_{xz} = -\text{atan}\left(\frac{z - z_I}{x - x_I}\right)$$

2.2 舰空导弹截击反舰导弹纵向平面模型

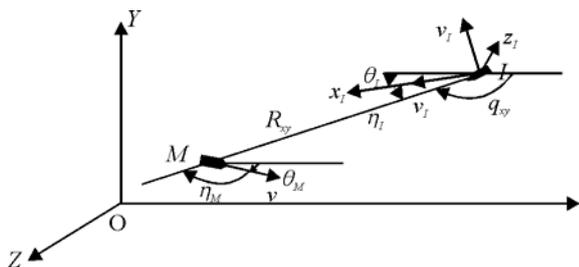


图 5 舰空导弹拦截反舰导弹的纵向平面图

图 5 中 z_I 轴的指向与 OZ 轴指向相反, 这是因为拦截弹弹道偏角 $|\psi_I| > \pi/2$ 。 θ_I 为弹道倾角 (顺时针转动为正, 其它角度都是逆时针转动为正), $\theta_I < 0$ 。 视线角 $q_{xy} < 0$, 这 2 个角度的正方向相反。 前置角 η_I 、 η_M 如图 4 所示, 由拦截弹、 反舰导弹的速度矢量方向转到视线方向所要旋转的角度, $\eta_I > 0$ 、 $\eta_M < 0$ 。

纵向平面内的拦截几何关系为:

$$\dot{R}_{xy} = v \cos \eta_M - v_I \cos \eta_I$$

$$R_{xy} \dot{q}_{xy} = v_I \sin \eta_I - v \sin \eta_M$$

式中:

$$R_{xy} = \sqrt{(x - x_I)^2 + (y - y_I)^2}$$

$$\eta_I = q_{xy} + \pi + \theta_I, \quad \eta_M = q_{xy} - \theta_M$$

$$q_{xy} = \text{atan} \left(\frac{y - y_I}{x - x_I} \right) - \pi \quad (x < x_I)$$

当 $x > x_I$, 即拦截导弹尾追反舰导弹情况时,

$$q_{xy} = \text{atan} \left(\frac{y - y_I}{x - x_I} \right)$$

3 反舰导弹最优末端变轨机动策略仿真分析

基于攻防对抗态势和工程设计需求, 将反舰导弹各种机动方式下所有可能的控制参数组合应用到反舰导弹与水面舰艇的攻防对抗仿真中, 采用蒙特卡罗法计算出各种参数组合下的舰空弹拦截平均脱靶量和脱靶量均方差, 认为舰空弹平均拦截脱靶量最大的反舰导弹控制参数组合, 即为该攻防态势下反舰导弹最优末端变轨机动策略对应的弹道控制参数组合, 采用该控制参数组合能使反舰导弹取得最佳突防效果。

反舰导弹变轨机动起止时间主要取决于反舰弹自身的战技性能和目标水面舰艇的反导拦截区大

小, 对于确定飞行速度、 高度和航路捷径的反舰导弹而言, 变轨机动时间取决于目标水面舰艇反导拦截区纵深。 此外, 水面舰艇对来袭反舰导弹的有效杀伤区大小还受舰载雷达的探测能力、 系统反应时间以及制导系统动态特性的影响。

3.1 机动开始时间

假设反舰导弹末制导雷达开机时刻为 0 时刻, 则机动开始时间为:

$$t_b = \max \left[(R_{ZD} - D_{S \max}) / V_M, 0 \right]$$

其中, R_{ZD} 为反舰导弹末制导雷达自导作用距离; $D_{S \max}$ 由式 (4) 解算得到; V_M 为反舰导弹飞行速度, 假定为常量。

3.2 机动结束时间

由式 (5) 可知, 反舰导弹变轨机动结束点的距离为 $D_{S \min}$ 。 则机动结束时间为:

$$t_e = (R_{ZD} - D_{S \min}) / V_M$$

因此, 当机动周期 T_m 、 机动次数 N_s 确定后, 实际机动结束时间为:

$$t_e = t_b + N_s T_m$$

3.3 机动周期和机动次数

反舰导弹机动周期和机动次数不仅与机动方式和飞行速度有关, 且受最大可用过载的制约。 依据文献[12]可知, 导弹以最大法向过载进行末端变轨机动能够取得最好的突防效果, 此外, 依据文献[12]可知, 在实际作战使用和工程设计中, 一般将导弹变轨机动次数设定为整数, 以抵消变轨机动导致的跟踪目标误差。 因此, 下面假设导弹始终以最大法向过载进行末端变轨机动, 针对不同的机动方式分别进行分析。

1) 反舰导弹蛇形机动时, 最少机动次数为:

$$N_{S \min} = \left\lceil \frac{\Delta L}{A_{\max}} \right\rceil \quad (6)$$

其中, A_{\max} 为导弹一个机动周期的纵向位移最大值, 且 $A_{\max} = \frac{4 \cdot V_M^2}{a_{MN \max}}$ 为最大可用法向加速度, V_M 为反舰导弹的飞行速度; $\lceil \cdot \rceil$ 为取整符号; ΔL 为目标舰艇的反导杀伤区纵深。 可见, 导弹机动次数为 $N_{S \min}$ 时, 机动幅度最大, 当导弹仍然以最大过载机动, 但机动次数增加时, 即 $N_s > N_{S \min}$ 时,

导弹的机动幅度将变小。

反舰导弹以最大法向过载蛇形机动过程中，弹道曲率半径 R_M 和机动角速度 ω_M 的大小始终保持不变，分别为：

$$R_M = \frac{V_M^2}{a_{MN \max}}, \quad \omega_M = \frac{a_{MN \max}}{V_M}$$

因此，导弹机动次数为 N_S ($N_S \geq N_{S \min}$) 时的机动周期为：

$$T_m = 4 \cdot \arcsin\left(\frac{\Delta L}{4 \cdot N_S \cdot R_M}\right) / \omega_M$$

2) 反舰导弹以螺旋圆柱包络半径 R_M 进行最大法向过载螺旋机动时，存在最小螺距（即导弹一个机动周期的纵向位移）：

$$h_{\min} = 2 \cdot \pi \cdot R_M \cdot \text{tg} \delta_{\min}$$

$$\text{其中：} \delta_{\min} = \arccos \sqrt{\frac{a_{N \max} \cdot R_M}{V_M^2}}$$

$$a_{N \max} = \min\left(V_M^2 / R_M, a_{MN \max}\right)$$

则机动次数为：

$$N_S = \begin{cases} \left\lceil \frac{\Delta L}{h_{\min}} \right\rceil, & a_{MN \max} < V_M^2 / R_M \\ +\infty, & a_{MN \max} \geq V_M^2 / R_M \end{cases} \quad (7)$$

可见，反舰导弹以最大法向过载进行螺旋机动时，螺旋圆柱包络半径存在最小值 $R_{M \min} = V_M^2 / a_{N \max}$ ，当反舰导弹以 R_M ($R_M \geq R_{M \min}$)

进行最大法向过载螺旋机动时，均存在最小螺距，则机动周期为：

$$T_m = \frac{2\pi R_M}{V_M \cdot \cos\left(\arctg \frac{\Delta L}{2\pi \cdot R_M \cdot N_S}\right)}$$

3) 反舰导弹以摆动最大角 θ_0 ，螺旋圆柱包络半径 R_M 进行最大法向过载摆式机动时，则存在最小摆距（即导弹一个机动周期的纵向位移）为：

$$h_{\min} = 4 \cdot \theta_0 \cdot R_M \cdot \text{tg} \delta_{\min}, \quad (\pi > \theta_0 > 0)$$

其中： δ_{\min} 、 $a_{MN \max}$ 的定义同式 (6) 一致。

导弹最大法向过载摆式机动次数 N_S 的解算模型同式 (7) 一致，则机动周期为：

$$T_m = \frac{4 \cdot \theta_0 \cdot R_M}{V_M \cdot \cos\left(\arctg \frac{\Delta L}{4 \cdot \theta_0 \cdot R_M \cdot N_S}\right)}$$

3.4 仿真分析

设反舰导弹飞行马赫数 Ma 为 2.2，飞行高度为 25 m，最大可用法向过载为 10 g，反舰导弹末制雷达作用距离为 25 km，目标水面舰艇采用舰空弹对来袭反舰弹进行拦截，舰空弹飞行马赫数 Ma 为 3.0，最远射程为 40 km，最近射程为 1 km，最大可用法向过载为 100 g，系统反应时间为 0 s，则舰空导弹对来袭反舰导弹的杀伤区纵深为 32.927 km。

1) 反舰导弹以最大法向过载蛇形机动突防时，机动次数 10 以内的可能参数组合及突防效果，如表 1 和图 6、图 7。

表 1 导弹蛇形机动的弹道控制参数取值组合

机动次数	2	3	4	5	6	8	10
机动周期/s	16	10	8	6	5	4	3
机动幅值/m	766.88	303.85	195.10	110.00	76.46	48.96	27.56
周期纵向位移/km	11.43	7.35	5.92	4.46	3.72	2.98	2.24
平均脱靶量/m	6.12	6.08	5.95	5.84	5.86	5.81	5.70
脱靶量均方差/m	3.97	3.89	3.96	3.94	3.95	3.89	3.98

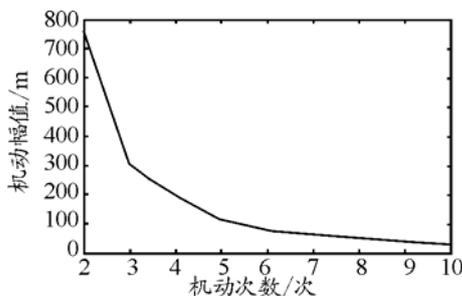


图 6 蛇形机动幅值变化曲线

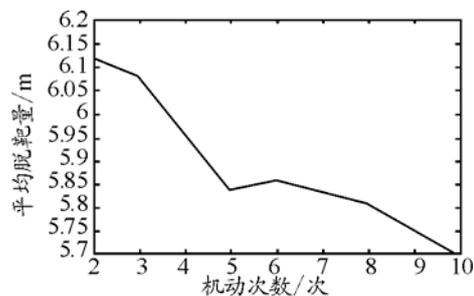


图 7 蛇形机动平均脱靶量变化曲线

2) 反舰导弹以最大法向过载螺旋机动突防时, 螺旋机动圆柱包络半径为 100~1 000 m 范围内的可能参数组合及突防效果, 如表 2 和图 8、图 9。

表 2 导弹螺旋机动的弹道控制参数取值组合

圆柱包络半径/m	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
机动次数	5	3	3	2	2	2	2	1	1	1
机动周期/s	6	10	10	16	16	16	17	32	32	33
周期纵向位移/km	4.44	7.74	7.24	11.70	11.55	11.36	11.93	23.40	23.26	23.87
平均脱靶量/m	8.82	8.75	8.89	8.78	8.88	8.85	8.78	8.84	8.04	8.03
脱靶量均方差/m	4.03	3.96	3.92	3.94	3.97	3.94	3.94	4.07	3.94	3.87

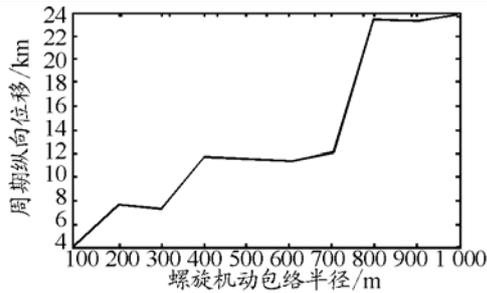


图 8 螺旋机动周期纵向位移变化曲线

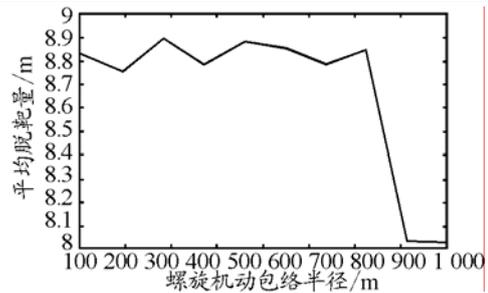


图 9 螺旋机动平均脱靶量变化曲线

反舰导弹以最大法向过载摆式机动突防时, 摆动最大角分别取 45°、90°和 135°, 摆式机动圆柱包络半径为 100~1 000 m 范围内的可能参数组合及突防效果, 如表 3、表 4、表 5 和图 10。

表 3 导弹摆动最大角为 45°时的摆式机动的弹道控制参数取值组合

圆柱包络半径/m	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
机动次数	10	8	5	5	4	4	4	3	3	3
机动周期/s	3	4	6	6	8	8	8	11	11	11
周期纵向位移/km	2.22	2.92	4.39	4.31	5.77	5.68	5.56	7.83	7.72	7.61
平均脱靶量/m	6.65	6.67	6.59	6.66	6.94	6.76	6.77	6.90	6.85	6.81
脱靶量均方差/m	4.00	4.11	3.97	3.80	4.12	3.95	3.91	3.96	3.93	3.97

表 4 导弹摆动最大角为 90°时的摆式机动的弹道控制参数取值组合

圆柱包络半径/m	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
机动次数	5	3	3	2	2	2	2	1	1	1
机动周期/s	6	10	10	16	16	16	17	32	32	32
周期纵向位移/km	4.44	7.37	7.24	11.70	11.55	11.36	11.93	23.40	23.26	23.87
平均脱靶量/m	8.81	8.84	8.71	8.71	8.56	8.91	8.86	8.86	8.96	8.92
脱靶量均方差/m	4.01	3.93	4.02	4.02	3.98	4.13	3.99	4.01	3.96	4.00

表 5 导弹摆动最大角为 135°时的摆式机动的弹道控制参数取值组合

圆柱包络半径/m	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
机动次数	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1
机动周期/s	10	16	32	32	32	32	33	33	34	34
周期纵向位移/km	7.42	11.82	23.77	23.64	23.47	23.26	23.78	23.50	23.97	23.62
平均脱靶量/m	7.58	7.81	7.86	7.77	8.11	7.78	7.87	7.75	7.84	7.96
脱靶量均方差/m	4.01	3.93	3.91	4.03	4.07	3.93	3.97	3.97	4.00	3.91

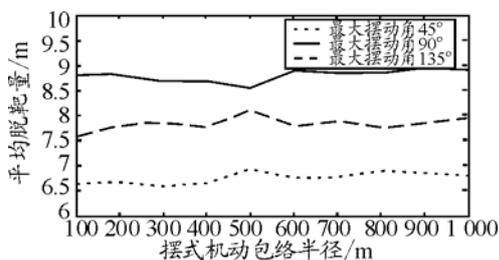


图 10 摆式机动平均脱靶量变化曲线

4 结束语

若在导弹发射之前能够依据舰载雷达、数据链或超视距目标指示等手段获取到满足一定精度的目标运动要素信息, 则可依据该算法给反舰导弹预先装订末端机动策略, 使反舰导弹在与拦截舰空导弹对抗过程中获得最优的突防效果, 进而获得较好的作战效能。

(下转第 12 页)

2 总舰尾流扰动速度

在舰载飞机进舰速度为 65 m/s, 稳态风速为 18 m/s, 舰船纵摇幅值为 1.05°, 频率为 0.62 rad/s 的条件下, 总的紊流扰动如图 8, 水平扰动速度受各个分量的影响均较为显著, 而垂直扰动速度则主要受周期性空气尾流分量和随机尾流分量的影响, 而另外两个分量的影响并不太明显。

3 结束语

通过计算机仿真得出了总的舰尾流在水平方向和垂直方向产生的扰动速度, 可为后续舰载飞机着舰控制系统的设计提供一定的理论依据。

(上接第 5 页)

参考文献:

[1] 吕俊军. 白蛉导弹战斗能力辨识[J]. 飞航导弹, 1999(8): 13-17.

[2] 顾文锦, 赵红超. 超声速反舰导弹末端非平面机动研究[J]. 飞行力学, 2003, 21(3): 36-40.

[3] 陈万春, 聂蓉梅, 刘佳琪, 等. PAC-3爱国者拦截弹末制导精度仿真研究[J]. 飞航导弹, 1999, 19(7): 57-62.

[4] 崔静, 姜玉宪. 拦截导弹动力学特性对摆动式机动策略突防效果的影响[J]. 宇航学报, 2001, 22(5): 33-38.

[5] Ohlmeyer EJ. Root-mean-square miss distance of proportional navigation missile against sinusoidal target. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1996, 19(3): 563-568.

[6] Takehira T, Vinh N X and Kabamba P T. Analytical solution of missile terminal guidance. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21(2): 342-348.

(上接第 8 页)

相干振荡器的不稳定性会造成相参信号幅度和相位的偏移, 影响视频信号的质量, 进而影响后续 MTI 系统性能。

3 结束语

仿真实验表明, 用数字混频滤波法获得相参信号, 并用数字正交解调代替模拟相位检波器能够明显提升检波精度, 增强后续 MTI 处理的效果。该方法对传统接收相参体制雷达接收机的数字化改造和现代雷达信号处理系统设计都具有一定参考价值。

参考文献:

[1] 杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.

[2] 刘东红, 张永顺, 田海林. 全数字 MTI 正交双通道的实现[J]. 无线电通信技术, 2004, 30(5): 53-55.

参考文献:

[1] 耿建中, 姚海林, 张宏. 舰尾流对舰载飞机下滑特性影响研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 18(21): 5940-5943.

[2] David J. Moorhouse, Robert J. Woodcock. Background Information and User Guide for MIL-F-8785C, Military Specification Flying Qualities of Piloted Airplanes[S]. 1981, 189-193.

[3] 军用规范有人驾驶飞机的飞行品质(MIL-F-8785C)[S]. 陕西: 飞行力学杂志社, 1982, 48-52.

[4] 肖亚伦, 金长江. 大气扰动中的飞行原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 70-71.

[5] 王文涛, 张志春. 直升机着舰动力学特性仿真[J]. 四川兵工学报, 2009(11): 68-70.

[7] 马良, 姜青山, 等. 反舰导弹对舰空导弹的机动突防模型研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(2): 185-188.

[8] 顾文锦, 毕兰金, 武志东. 基于伴随技术的超音速反舰导弹末端机动突防的脱靶量分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(4): 400-404.

[9] 顾文锦. 反舰导弹的过载控制[J]. 弹箭与制导学报, 2002, 22(1): 14-18.

[10] 顾文锦, 赵红超, 等. 导弹末端机动的一体化控制模型[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 677-680.

[11] 马春茂. 弹炮结合防空武器系统总体设计[M]. 国防工业出版社, 2008.

[12] 顾文锦. 变轨与突防概率研究报告[M]. 海军航空工程学院, 2005.

[13] 崔静. 导弹机动突防理论及应用研究[M]. 北京航空航天大学, 2001: 41-58.

[14] 唐震, 王希全, 包小林. 潜射战术导弹模拟训练系统的设计[J]. 四川兵工学报, 2009(4): 30-32.

[3] 宋玉清, 黑立相. 相参雷达接收机建模与仿真分析[J]. 兵工自动化, 2009, 28(2): 36-38.

[4] 马晓岩, 向家彬, 等. 雷达信号处理[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999.

[5] Mitola J. The software radio architecture[J]. IEEE Communication Magazine, 1995, 33(5): 26-38.

[6] 吴顺君, 梅晓春, 等. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[7] 黄婷. 雷达信号处理系统的设计与 FPGA 实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

[8] 刑燕. 中频采样和数字正交器的原理及工程实现[J]. 现代雷达, 2003, 25(9): 42-44.

[9] 范文晶, 王海, 周渭, 等. 基于 MATLAB 的数字下变频器的设计与仿真应用[J]. 测试测量技术, 2009(3): 37-40.

[10] 魏永豪, 袁晓, 安红. 带通采样定理与中频采集数字正交检波[J]. 现代雷达, 2006, 28(12): 36-38.

[11] 杨井胜. 基于 Labview 的雷达接收自动测试系统设计[J]. 四川兵工学报, 2009(7): 24-27.