

基于最大效能的目标机动策略研究

刘昌云, 刘进忙, 冯有前
(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:在地面防空作战中,地空导弹和空中目标的对抗是一个动态的对抗过程。目标通过对自身和导弹的状态估计,估计出相对导弹作不同机动时所获得的效能,并以最大效能为最优机动形式。通过对目标机动方式的分析,提出了一种基于最大效能的机动策略,并进行了仿真试验,结果表明效果良好。

关键词:导弹;建模;仿真;效能

中图分类号:E274.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)04-0041-04

在地面防空作战中,信息对抗系统建模是复杂的问题。在模型中如何体现导弹攻击和目标逃避攻击,真正体现战场的对抗性,是信息对抗系统建模的关键技术。一般的建模,基本上都是在假定了目标运行航迹的基础上进行研究的,没有真正体现导弹-目标之间的动态对抗过程,没有体现目标机动的主动性、目的性。本文从信息的角度研究了目标被导弹攻击时,目标机动的策略,提出了一种基于最大效能的目标机动策略。经过仿真,得到了较好的结果。

1 状态模型

状态模型分为目标状态模型和导弹状态模型。在空中,目标和导弹都可以视为一个点,因而,把目标和导弹的运动视为一条航迹。这样,可用状态描述目标、导弹的运动,状态主要有位置、速度、加速度等。由于目标和导弹在相互预测估计对方的状态,因而,应增加目标对导弹的量测模型。目标作机动策略选择时,还应知道自身的状态和对导弹状态的估计,因此,增加了目标对自身的量测模型和导弹的状态模型。对模型的建立都统一在同一个地理坐标系,状态采用地理坐标描述。

空中目标状态模型^[1]

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1,k} X_k + \Gamma_{k,k} w_k + B_{k,k} U_k \quad (1)$$

目标对导弹的量测模型:

$$\bar{Z}_k = \bar{h}(\bar{X}_m) + n_k \quad (2)$$

目标对自身的量测模型:

$$Z_k = h(X_k) + n_k \quad (3)$$

导弹状态模型描述如下:

$$\bar{X}_{m+1} = \bar{\Phi}_{m+1,m} \bar{X}_m + \bar{\Gamma}_{m,m} \bar{w}_m + \bar{B}_{m,m} \bar{U}_m \quad (4)$$

其中:

$X_{k+1} = [x_{k+1}, \dot{x}_{k+1}, \ddot{x}_{k+1}, y_{k+1}, \dot{y}_{k+1}, \ddot{y}_{k+1}, z_{k+1}, \dot{z}_{k+1}, \ddot{z}_{k+1}]$ 描述空中目标的位置、速度、加速度信息。

$\bar{X}_{k+1} = [\bar{x}_{k+1}, \bar{\dot{x}}_{k+1}, \bar{\ddot{x}}_{k+1}, \bar{y}_{k+1}, \bar{\dot{y}}_{k+1}, \bar{\ddot{y}}_{k+1}, \bar{z}_{k+1}, \bar{\dot{z}}_{k+1}, \bar{\ddot{z}}_{k+1}]$ 描述空中导弹的位置、速度、加速度信息(在

收稿日期:2002-06-15

基金项目:国家高等学校骨干教师资助计划资助项目(GG-810-90039-1003)

作者简介:刘昌云(1973-),男,四川泸州人,讲师,主要从事信号与信息处理研究;

刘进忙(1958-),男,陕西渭南人,教授,主要从事信号与信息处理研究;

冯有前(1960-),男,陕西富平人,教授,博士,主要从事小波理论及其应用研究。

仿真中,设 $m \neq k$,表明目标和导弹不同的机动调整速度,即在仿真时,目标和导弹的状态调整采用不同的仿真步长。)

$\bar{\Gamma}_{k,k}$ 为目标的干扰矩阵; $\bar{\Gamma}_{m,m}$ 为导弹的干扰矩阵;

w_k 是目标状态噪声; U_k 是空中目标机动激励输入(由飞行员操纵或自动系统输入);

\bar{w}_m 是导弹状态噪声; \bar{U}_m 是导弹机动激励输入(由地面制导或自寻的输入);

$\bar{Z}_k = [\bar{r}_R, \bar{\beta}_k, \bar{\gamma}_k, \bar{r}_R]$ 描述空中目标对导弹的测量信息,主要信息有导弹的距离、方位角和仰角以及距离变化率(测量信息是在同一个地理坐标系内)。

$Z_k = [r_R, \beta_k, \gamma_k, r_R]$ 描述空中目标对自身的测量信息,主要信息有目标的距离、方位角和仰角以及距离变化率(测量信息在同一个地理坐标系内)。

在进行仿真时,忽略地形地貌及环境的影响,飞机作机动飞行时无须作地形规避。由于在对抗中,把导弹和飞机的运动都看作是质点的运动,因而,仅考虑飞机和导弹的速度性能、加速性能和转弯性能,同时在对抗中认为二者的重量不变,在仿真步长内,飞机和导弹的参数保持不变^[2]。

2 基于最大效能的目标机动策略

在目标逃避导弹攻击的模型中,机动策略就是空中目标在各种态势下相对导弹的机动决策。在空中,目标和导弹常用一些特征参数来描述,如位置、速度、加速度、相互间的距离等信息。这些值可由空中态势得出,并通过一维效能函数求出其效能值,最后,合并一维效能值以评估不同机动状态的优先级。效能函数表示了决策者的偏好,效能函数的加权系数代表对导弹威胁程度的权衡^[3]。最后的机动策略根据最大效能值的决策标准而定,在决策时,选择各备选机动方案中机动效能值最大的机动动作^[4]。

2.1 空中目标逃避攻击的机动策略

假设空中目标通过自身的探测系统探测到有导弹攻击时,有 5 种机动方式可供选择:按原方向机动;在水平方向向左、向右转弯机动;在垂直方向向上、向下转弯机动^[5-6]。为了分析方便,定义如下变量:

$U_k(1)$:空中目标 k 时刻在原方向的机动; $U_k(2)$:空中目标 k 时刻水平左转弯机动;

$U_k(3)$:空中目标 k 时刻水平右转弯机动; $U_k(4)$:空中目标 k 时刻垂直方向向上转弯机动;

$U_k(5)$:空中目标 k 时刻在垂直方向向下转弯机动;

据此,由式(1)、(3),空中目标可以估计其在不同机动情况下一步测量周期的状态估计值:

$$\hat{X}_{k+1|k}(n) = \Phi_k \hat{X}_{k|k} + K_k U_k(n) \quad (n=1,2,\dots,5) \quad (5)$$

并假设此时目标探测到有两发导弹的攻击:

$$\bar{Z}_k(i) = h(\bar{X}_m(i)) + n_k \quad (i=1,2) \quad (6)$$

根据测量信息,由式(4)估计出导弹的一步状态信息(此时把导弹的机动调整时间步长统一到 k):

$$\hat{X}_{k+1|k}(i) = \bar{\Phi}_{k+1,k}(i) \hat{X}_{k|k}(i) + \bar{B}_k(i) \bar{U}_k(i) \quad (7)$$

根据对导弹状态信息的估计,在机动形式下,空中目标可得到与每发导弹在空间的五个预测距离差:

$$\Delta r_{ni}(k+1|k) = \|\hat{X}_{k+1|k}(n) - \hat{X}_{k|k}(i)\| \quad (n=1,2,\dots,5; i=1,2) \quad (8)$$

以及与两发导弹间的距离差变化率信息:

$$\Delta r_i(k+1|k) = (\Delta r_i(k+1|k) - \Delta r_i(k|k))/T \quad (i=1,2) \quad (9)$$

即目标进行机动策略选择时,目标所得到的主要信息有:

1) 目标对导弹 1 的 5 个位置距离差估计 $\Delta r_{n1}(k+1|k)$ 和距离差变化率 $\Delta r_1(k+1|k)$,此时目标与导弹间的距离差为 $\Delta r_1(k|k)$ 。

2) 目标对导弹 2 的 5 个位置距离差估计 $\Delta r_{n2}(k+1|k)$ 和距离差变化率 $\Delta r_2(k+1|k)$,此时目标与导弹间的距离差为 $\Delta r_2(k|k)$ 。

2.2 目标机动效能估计

由以上分析可知,目标在进行机动策略选择时,可利用的信息有: $r_{n1}(k+1|k)$ 、 $\Delta r_1(k+1|k)$ 、 $r_1(k|k)$;

$r_{n2}(k+1|k)$ 、 $\Delta r_2(k+1|k)$ 、 $\Delta r_2(k|k)$ 。我们主要利用这些信息计算5种机动方式下,目标分别相对于导弹1、2所取得的效益,并根据对导弹的威胁程度的估计,对估计效益进行加权求和,从而估计出目标相对多导弹作机动时所得到的总效能值,即机动效能与 $\Delta r_{n1}(k+1|k)$ 、 $\Delta r_1(k+1|k)$ 、 $\Delta r_1(k|k)$ 、 $\Delta r_{n2}(k+1|k)$ 、 $\Delta r_2(k+1|k)$ 、 $\Delta r_2(k|k)$ 6个物理量有关。

2.2.1 导弹威胁度权值的计算

在实战中,目标机动时,首先估计来袭导弹的威胁程度,且威胁程度大的导弹优先考虑。在此,我们考虑的是目标与导弹间的距离差和距离差的变化率反映了目标对导弹威胁度的估计,反映了对导弹加权系数的权衡。利用 $\Delta r_1(k|k)$ 、 $\Delta r_2(k|k)$ 和 $\Delta r_1(k+1|k)$ 、 $\Delta r_2(k+1|k)$,可以得到导弹加权系数:

$$a_1 = \frac{\Delta r_2(k|k)}{(\Delta r_1(k|k) + \Delta r_2(k|k))}, \frac{\Delta r_1(k|k)}{(\Delta r_1(k|k) + \Delta r_2(k|k))} \tag{10}$$

$$b_1 = \frac{\Delta r_2(k+1|k)}{(\Delta r_1(k+1|k) + \Delta r_2(k+1|k))}; \frac{\Delta r_1(k+1|k)}{(\Delta r_1(k+1|k) + \Delta r_2(k+1|k))} \tag{11}$$

a_i 表示目标对导弹1、2的距离差加权值; b_i 表示目标对导弹1、2的距离差变化率加权值。由式(8)、(9)可得,由位置距离差 Δr 和距离差变化率 Δr 所引起的威胁度权值可由下式得到:

$$a = \frac{\alpha a_1 + \beta b_1}{\alpha(a_1 + b_1) + \beta(a_2 + b_2)}; b = \frac{\alpha a_2 + \beta b_2}{\alpha(a_1 + b_1) + \beta(a_2 + b_2)} \tag{12}$$

其中: a 表示对导弹1的威胁度权值; b 表示对导弹2的威胁度权值;且 $\alpha + \beta = 1$ 。 α 、 β 反映了目标对来袭两发导弹威胁度的重视程度。通过调整 α 、 β 可使目标获得最大的机动效能(这需要大量的仿真得到),即目标能以最大可能逃避导弹的攻击。

2.2.2 预测距离差 $\Delta r_{ni}(k+1|k)$ 权值

预测距离差反映了目标相对导弹作不同机动方式的优先级。目标机动的目的是使自身逃避导弹的攻击,预测距离差越大表明此机动的优先级大,即权值大。由于层次分析法的思想是将系统分层并量化,通过专家群来给指标评定其重要程度,并能在一定程度上检验和减少主观影响,使评价更趋科学化,是一种实用的多目标决策方法^[4]。因而,目标通过5个机动选择得到的距离差 $\Delta r_{ni}(k+1|k)$ 的权值采用层次分析法。先对距离差进行大小排序,假设按降序排序的关系为

$$\Delta r_{1i}(k+1|k) > \Delta r_{2i}(k+1|k) > \Delta r_{3i}(k+1|k) > \Delta r_{4i}(k+1|k) > \Delta r_{5i}(k+1|k)$$

按照实际情况,距离差越大,表明该机动方式优先级越高,并且,综合防空作战指挥专家的评判结果为: $\Delta r_{1i}(k+1|k)$ 与 $\Delta r_{2i}(k+1|k)$ 相比,明显重要,为3:1; $\Delta r_{1i}(k+1|k)$ 与 $\Delta r_{3i}(k+1|k)$ 相比,很重要,为5:1; $\Delta r_{1i}(k+1|k)$ 与 $\Delta r_{4i}(k+1|k)$ 相比,极其重要,为7:1; $\Delta r_{1i}(k+1|k)$ 与 $\Delta r_{5i}(k+1|k)$ 相比,极其重要,为9:1; $\Delta r_{2i}(k+1|k)$ 与 $\Delta r_{3i}(k+1|k)$ 相比,明显重要,为3:1; $\Delta r_{2i}(k+1|k)$ 与 $\Delta r_{4i}(k+1|k)$ 相比,很重要,为5:1; $\Delta r_{2i}(k+1|k)$ 与 $\Delta r_{5i}(k+1|k)$ 相比,极其重要,为7:1; $\Delta r_{3i}(k+1|k)$ 与 $\Delta r_{4i}(k+1|k)$ 相比,明显重要,为3:1; $\Delta r_{3i}(k+1|k)$ 与 $\Delta r_{5i}(k+1|k)$ 相比,很重要,为5:1; $\Delta r_{4i}(k+1|k)$ 与 $\Delta r_{5i}(k+1|k)$ 相比,明显重要,为3:1。根据上述评估值,可得判断矩阵如表1所示。

表1 预测距离差判断矩阵

	Δr_{1i}	Δr_{2i}	Δr_{3i}	Δr_{4i}	Δr_{5i}
Δr_{1i}	1	3	5	7	9
Δr_{2i}	1/3	1	3	5	7
Δr_{3i}	1/5	1/3	1	3	5
Δr_{4i}	1/7	1/5	1/3	1	3
Δr_{5i}	1/9	1/7	1/5	1/3	1

将矩阵进行归一化处理^[7],可得到由五个预测距离差所得的权值向量为

$$W_{ni} = [0.503 \quad 0.260 \quad 0.134 \quad 0.067 \quad 0.034 \quad 6] \tag{13}$$

此向量比较客观的反映了预测距离差对目标机动效能的贡献。

2.2.3 目标机动效能

设目标机动时所获得的效能参数为 $E_n(n=1,2,\dots,5)$,表示5种机动策略选择时所获得的逃避效能,该效能值反映了目标逃避导弹攻击的能力; E_{1n} 表示目标对导弹1机动所获得的逃避效能; E_{2n} 表示目标对导弹2机动所获得的逃避效能。目标机动效能的计算有和式法、积式法,在本文中采用了和积式混合法计算机动效能。

对 E_{1n} 、 E_{2n} 采用积式法计算,由式(10)、(11)可得:

$$E_{1n} = W_{n1} \times a; E_{2n} = W_{n2} \times b \quad (14)$$

目标对两导弹作机动时所获得的总效能采用和式法计算,由式(14)得:

$$E_n = E_{1n} + E_{2n} \quad (15)$$

综合式(12)、(13)、(15)得到目标机动效能函数为

$$E_n = W_{n1} \times \frac{\alpha a_1 + \beta b_1}{\alpha(a_1 + b_1) + \beta(a_2 + b_2)} + W_{n2} \times a \frac{\alpha a_2 + \beta b_2}{\alpha(a_1 + b_1) + \beta(a_2 + b_2)} \quad (16)$$

其中, a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 可由式(8)、(9)得到。式(16)即为目标对导弹 1、2 机动选择时所获得的效能估计,它客观反映了目标在不同的机动方式下,对来袭导弹作机动所获取的效益。效能大的机动,表明此机动能对目标逃避导弹攻击带来的效益大,即逃避能力强;效能小的机动,表明此机动对目标逃避导弹攻击带来的效益小,即逃避能力弱。

2.2.4 目标机动策略选择

在多导弹攻击的情况下,目标通过对不同机动形式得到的机动逃避效能值的估计、比较,选取最优的机动方式以逃避导弹的攻击。由式(16)所获得的目标机动效能估计,选取使目标所得机动效能最大的机动策略:

$$U = f(\max(E_n)) \quad (n = 1, 2, \dots, 5) \quad (17)$$

$f(\cdot)$ 表示取最大机动效能的机动输入,得到最大效能的机动方式,从其相对应的机动方案中得到该机动的控制输入。此时的机动输入为最优的机动方式,即该机动方式能使目标以最大可能逃避导弹攻击。

3 仿真实验

据此思想,对飞机在两发导弹的攻击下其机动逃避飞行进行了仿真研究。

假设防御方两导弹阵地,阵地 1 坐标(0,0,0),阵地 2 坐标(50 km,50 km,0 m)(以阵地 1 为中心坐标),飞机的初始位置(20 km,20 km,6 km),初始速度 $V_0 = 300$ m/s,朝我方导弹阵地 1 飞行,飞机的最大速度为 750 m/s,最大加速度性能为 10 g,机动响应周期 $T_1 = 0.5$ s。阵地 1 发射的导弹,初始速度 $V_1 = 350$ m/s,方向为指向目标,导弹 1 的最大速度为 1 600 m/s,其最大加速度性能为 30 g,机动响应周期为 0.1 s;阵地 2 发射的导弹,初始速度 $V_2 = 350$ m/s,方向为指向目标,导弹 2 的最大速度为 1 600 m/s,其最大加速度性能为 30 g,机动响应周期为 0.2 s。得到的目标机动仿真曲线如图 1 所示。根据大量仿真确定: α 的取值范围为 0.6~0.8; β 的取值范围为 0.4~0.2。在本仿真中,取 $\alpha = 0.65$, $\beta = 0.35$ 。

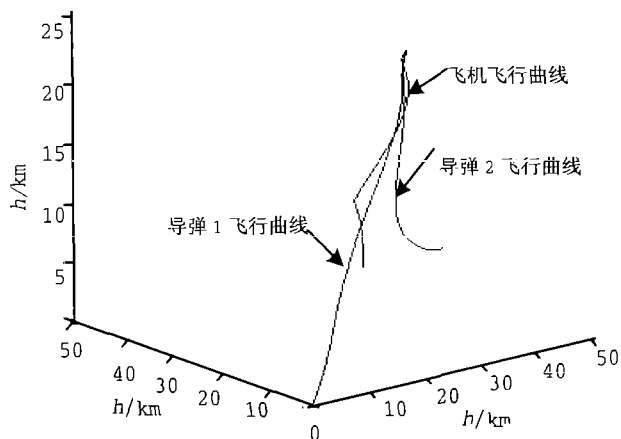


图 1 目标机动逃避飞行曲线

4 结束语

空中目标逃避导弹的攻击是一个复杂的问题,考虑的因数很多,如目标机动性能、导弹性能、环境等。本文在进行地面防空作战信息系统建模的条件下,从信息的角度对目标的机动策略进行了研究,提出一种基于最大效能的机动策略。从仿真曲线可以得出:目标在多发导弹的攻击下,目标的机动逃避飞行仿真曲线较好的体现了目标对导弹的对抗性、机动性,并体现了目标机动的主动性。

(下转第 68 页)