

一种反舰导弹纯方位攻击捕获概率计算方法

魏海光, 边聚广

(江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222000)

摘要:反舰导弹在进行纯方位发射由于对目标信息的要求比较小,在目标信息的探测比较困难时,是反舰导弹重要的辅助发射方式。有别于传统的纯方位攻击分析中使用的捕捉概率计算方法,在假定导弹自导雷达搜索半径覆盖目标散布的条件下,通过分析导弹与目标的运动过程的特点,考虑目标方位误差,给出了计算模型。

关键词:反舰导弹; 纯方位攻击; 捕捉概率

中图分类号: TP399

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2012)03-0022-04

作为信息获取条件恶劣情况下反舰导弹射击的一种使用方式,纯方位发射具有其独特的特点和重要作用。纯方位发射是指在只获得目标方位信息时,采取导弹自控飞行时间装订最小值,向目标初始方位发射导弹的射击方式^[1]。这种射击方式只需测得目标方位数据,即可满足在信息恶劣的情况下对敌实施导弹攻击的需要,而且通常只需被动探测设备对目标进行搜索,因此能够保证攻击隐蔽性,适应现代战场快速反应的需求。目标捕获概率作为反舰导弹纯方位发射使用的重要评价指标,在反舰导弹使用中具有比较大的作用,因此有效的目标捕获概率计算方法成为这种攻击方式是否可行的关键。

文献[2]中讨论了通过使用末制导雷达覆盖目标的概率来计算导弹的捕捉概率的方法,该方法对传统计算目标捕获概率方式进行了改进,提高了计算的准确性,但该文没有定量分析目标方位误差对捕获概率的影响,影响了计算方法的效果。

在导弹末制导雷达覆盖目标即认为雷达捕获目标的前提下,本文提出一种基于目标和导弹运动分析的捕获概率计算方法,采用解析几何分析方法进行分析,综合考虑目标方位误差,计算反舰导弹纯方位攻击目标捕获概率,仿真结果表明,该方法对方位误差具有较好的鲁棒能力,具有一定应用价值。

1 反舰导弹捕捉概率的计算问题假设条件

本文在进行纯方位攻击研究时,假设在导弹开始攻击时目标处于导弹自导头的作用范围以外(否则导弹可直接捕获目标,此时目标的捕获概率为100%),同时由于目标的运动方向信息未知,因此导弹在未捕获到目标之前,合理的假设是应当沿着目标方位线运动。

2 方位无误差条件下运动分析

假设在开始攻击时,导弹和目标的运动态势情况如图1所

示,目标位于 u_0 点且以速度 V_u 沿着与目标方位成 q_u 做直线运动,此时 V_u 的大小和方向未知;导弹位于 C_0 点,以速度 V_c 沿着目标方位的方向运动。根据前述假设,当导弹自导头捕获目标时应满足下列条件:

$$\begin{aligned} D &\leq R_{cap} \\ q_{cap} &\leq \alpha_r \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中: D 表示导弹与目标之间的距离; R_{cap} 表示导弹自导头的作用半径; q_{cap} 表示导弹的捕获角; α_r 表示导弹自导头在水平面内的半张角。

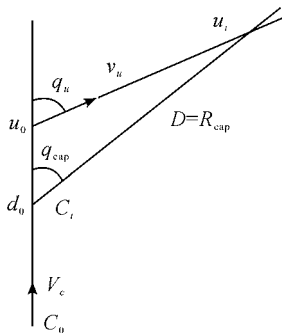


图1 方位无误差条件下导弹捕获目标示意图

根据图1可以得到如下关系式:

$$t_{cap} = \frac{d_0 - R_{cap} \cos q_{cap}}{v_c - v_u \cos q_u} = \frac{d_{0max}}{v_u} \cdot \frac{b - b_{cap} \cos q_{cap}}{a - \cos q_u} \quad (2)$$

式(2)中:

$$a = \frac{v_c}{v_u} \dots b_{ch} = \frac{R_{cap}}{d_{0max}} \dots b = \frac{d_0}{d_{0max}} \quad (3)$$

式(3)中: d_0 为导弹与目标的初始距离; d_{0max} 为导弹与目标的最大初始距离。

式(1)的捕获条件可以描述为:捕获目标的条件是目标的运行轨迹线进入由半径 R_{cap} 和半张角 α_r 确定的扇区,如图2表示。

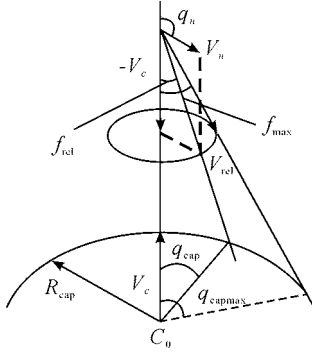


图2 目标相对运动态势

为了分析方便,假设导弹静止不动,而目标以相对速度 $V_{rel} = V_u - V_c$ 运动, ϕ_{rel} 为相对速度角度,这与图1的运动效果一致。显然,此时分析导弹捕获目标,其最差的条件可以描述为:在固定的目标初始距离条件下,导弹捕获目标由 q_u 决定,这时 ϕ_{rel} 角将是最大的。从图2中可以得到

$$q_u = \arccos \frac{v_u}{v_c} = \arccos \frac{1}{a} \quad (4)$$

$$\phi_{max} = \arcsin \frac{1}{a} \quad (5)$$

在初始距离 d_0 不断增大的情况下,目标的相对运动轨迹将逐渐与半径为 R_{cap} 的圆相切。在此情况下相应的捕获角 q_{cap} 将是最大的并等于 q_u 。显然,当水平面内的半张角超过这个值时,导弹捕获目标的概率不会有任何增加,也即:

$$\alpha_r \leq q_u = \arccos \frac{1}{a} \quad (6)$$

3 方位存在误差时计算模型

通常情况下,攻击平台获得的方位信息中必然包含误差,因此,只有分析包含方位误差的态势,目标捕获概率的算法才有意义。

在考虑目标方位测量时的误差 δ_ϕ 时,可以得到 q_u 的角度范围:

$$\left. \begin{aligned} q_u^* &= \arccos \frac{1}{a} - \delta_\phi \\ \phi_{max}^* &= \delta_\phi + \arcsin \frac{1}{a} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由式(7)可知,目标沿着相对轨迹以 ϕ_{max}^* 角运动时,导弹探测目标所需的最大自导半径为

$$R_{cap} \leq d_{0max} \sin \phi_{max}^* = d_{0max} \sin(\delta_\phi + \arccos \frac{1}{a}) \quad (8)$$

在保证水平面内的指向角宽度的基础上,由式(6)和(8)可以得出的自导系统作用半径情况下,位于半径为 d_{0max} 圆内的所有目标都将被导弹捕获。

但是,实际上由于各种限制条件的约束,不是永远都能得到式(6)和(8)求出的最大值 α_{max} 和 R_{capmax} ,由于自导系统动力的限制, α_γ 和 R_{cap} 的值都小于最小值(如图3所示),在这种情况下,百分之百捕获目标只能在由半径如图3所示的 R_1 的圆所限定的区域内得到保证。

$$R_1 = R_{ch} (\cos \alpha_\gamma + \sin \alpha_\gamma \operatorname{ctg} \phi_{max}) \quad (12)$$

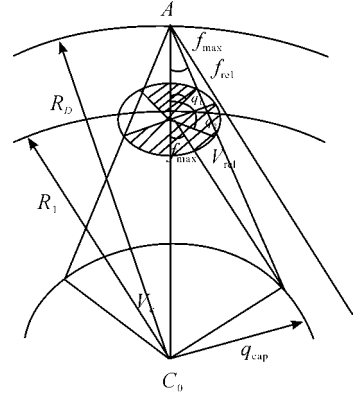


图3 限制条件下目标运动态势

由关系式(12)确定指向图半张角的最优值:

$$\frac{\partial R_1}{\partial \alpha_\gamma} = R_{ch} (-\sin \alpha_\gamma + \cos \alpha_\gamma \operatorname{ctg} \phi_{max}) = 0;$$

$$\operatorname{tg} \alpha_\gamma = \operatorname{ctg} \phi_{max} = \sqrt{a^2 - 1};$$

$$\alpha_\gamma = 90^\circ - \phi_{max}$$

同样可以从百分百最大捕获目标区域条件对导弹的速度进行优化:

$$\frac{\partial R_1}{\partial a} = \frac{\partial R_{cap}}{\partial a} [\cos \alpha_\gamma + \sin \alpha_\gamma \operatorname{ctg} \phi_{max}] + R_{cap} \sin \alpha_\gamma \frac{\partial}{\partial a} \operatorname{ctg} \phi_{max} = 0$$

通过以上两个关系式我们可以得到关于指向图半张角和导弹速度的最优值,但是通过分析可知,该最优值对于整体的导弹搜索不是最有利的。

对于某些位于半径为 $R_p > R_1$ 的圆周内的目标来说,只有在满足以下条件时才能捕获目标: ϕ_{rel} (目标速度与导弹—目标连线夹角)不大于 ϕ_p ,这里:

$$\phi_p = \operatorname{arctg} \frac{R_{cap} \sin \alpha_r}{R_p - R_{cap} \cos \alpha_r} \quad (13)$$

如果考虑到确定初始方位中的误差 δ_ϕ 确定的情况下,可以得出:

$$\phi_p^* = \operatorname{arctg} \frac{R_{cap} \sin(\alpha_r - \delta_\phi)}{R_p - R_{cap} \cos(\alpha_r - \delta_\phi)}$$

$$\phi_p^{**} = \operatorname{arctg} \frac{R_{cap} \sin(\alpha_r + \delta_\phi)}{R_p - R_{cap} \cos(\alpha_r + \delta_\phi)} \quad \text{当 } \delta_\phi < \alpha_p - \alpha_r$$

$$\phi_p^{**} = \phi_{pmax} \quad \text{当 } \delta_\phi \geq \alpha_p - \alpha_r$$

式中:

$$\alpha_p = \arccos \frac{R_{cap}}{R_p}, \quad \phi_{pmax} = \min[\arcsin \frac{R_{cap}}{R_p}, \arcsin \frac{1}{a}]$$

上述条件只是适用于航向角位于阴影区域内的目标,从目标的运动态势可以得出,当 $0 \leq q_u \leq q_1$ 时,目标为规避目标,当 $q_2 \leq q_u \leq 180^\circ$ 时,目标为相遇目标。

根据图2可以得到关于 q_1, q_2 的关系式:

$$q_1 = \arcsin[\sin \phi_p (\cos \phi_p - \sqrt{1 - a^2 \sin^2 \phi_p})] \quad (14)$$

$$q_2 = \arcsin[\sin \phi_p (\cos \phi_p + \sqrt{1 - a^2 \sin^2 \phi_p})]$$

当 $\phi_p \geq \operatorname{arctg} \frac{1}{a}$ 时,

$$q_2 = 180^\circ - \arcsin[\sin\phi_p(\cos\phi_p + \sqrt{1 - a^2 \sin^2\phi_p})];$$

当 $\phi_p < \arctg \frac{1}{a}$ 时,

这里 q_u 的值可以采用等概率分布规律,因此捕获目标概率将为

$$P_{\text{cap}} = 1 - \frac{q_2 - q_1}{180^\circ} \quad (15)$$

由文献[3]可知,导弹和目标在攻击开始时的相互散布属于均方差为 σ_ε 的正态圆周分布,导弹的攻击开始时的位置为散布中心。因此,位于半径为 R_{max} 圆内的目标捕获概率可以根据以下公式计算:

$$P_{\text{cap}} = \int_0^R \frac{R}{\sigma_\varepsilon^2} e^{-\frac{R^2}{2\sigma_\varepsilon^2}} dR + \int_{R_1}^{R_{\text{max}}} P_{\text{cap}} \frac{R}{\sigma_\varepsilon^2} e^{-\frac{R^2}{2\sigma_\varepsilon^2}} dR = P_1 + P_2 \quad (16)$$

式中 P_1 和 P_2 分别对应左侧的 2 项。可以使用渐进法简化式(16)的计算。下面通过例子来验证上述公式的计算。

示例:假设目标和导弹总的散布服从均方差 $\sigma_\varepsilon = 0.33d_{0\text{max}}$ 的正态圆周分布,同时假设 $a = 1.6, \alpha_\gamma = 45^\circ, b_{\text{cap}} = 0.5$, 当 $\delta_\phi = 0$ 时,有:

$$\phi_{p\text{max}} = \arcsin \frac{1}{a} = 38^\circ 40'$$

$$b_1 = \frac{R_1}{d_{0\text{max}}} = 0.8$$

目标位于半径为 b_1 的圆周内的概率为

$$P_1 = \int_0^{b_1} \frac{b}{\sigma_\varepsilon^2} e^{-\frac{b^2}{2\sigma_\varepsilon^2}} db \approx 0.95$$

此时目标位于 b_1 和 $b_{\text{max}} = 1$ 之间的圆环内的概率不超过 4%。不必使用渐进法进行分隔,捕获概率的第 2 项直接进行计算即可。

$$\phi_p = \arctg \frac{b_{\text{cap}} \sin\alpha_\gamma}{b_{\text{max}} - b_{\text{cap}} \cos\alpha_\gamma} \approx 28^\circ 40'$$

$$\phi_p = 28^\circ 40' \leq \arctg \frac{1}{a} = 32^\circ$$

利用式(14)可以求得,

$$q_1 = 21^\circ 20'$$

$$q_2 = 101^\circ$$

因此:

$$P_2 = (1 - \frac{q_2 - q_1}{180^\circ}) \int_{b_1}^1 \frac{b}{\sigma_\varepsilon^2} e^{-\frac{b^2}{2\sigma_\varepsilon^2}} db \approx 0.022$$

因此在方位无误差的情况下,总的捕获概率为 0.97。

4 仿真结果

以示例中的参数进行仿真,其中图 4~8 为在假设其他参数不变的条件下,分别令 a 在 1.2~2.0、 α_γ 在 $15^\circ \sim 60^\circ$ 、 b_{cap} 在 0.2~0.8、 δ_ϕ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 、 σ_ε 在 0.1~0.8 变化的仿真图,图 9 为假设 α_γ 在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 、 δ_ϕ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 变化,其他参数不变化的仿真图。

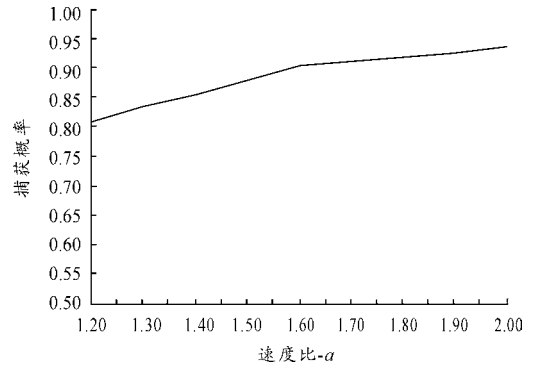


图 4 a 变化条件仿真

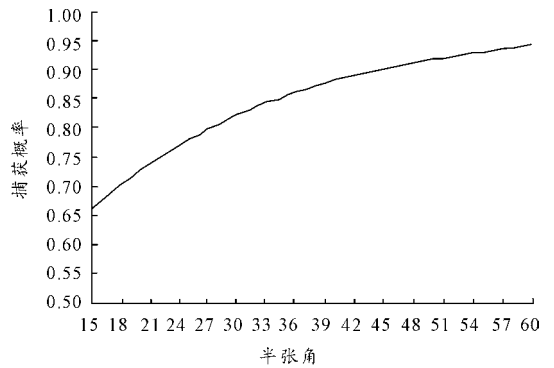


图 5 α_γ 变化条件仿真

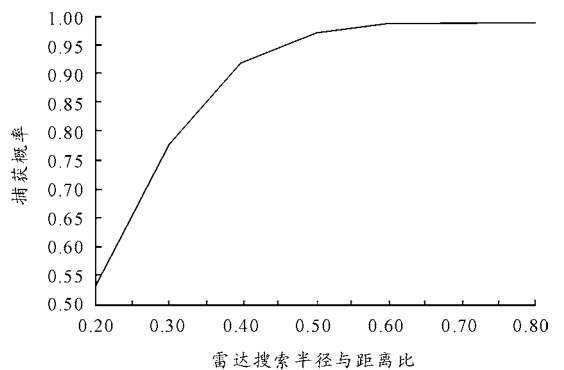


图 6 b_{cap} 变化条件仿真

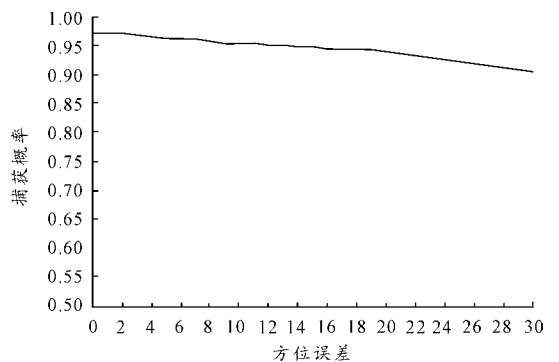
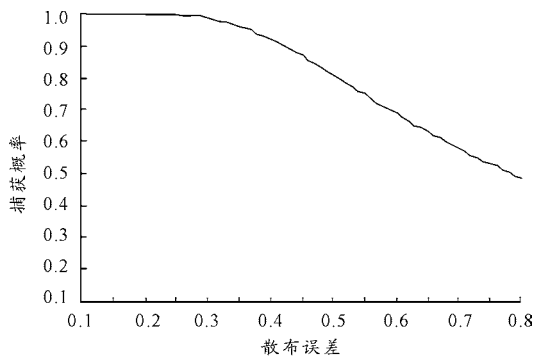
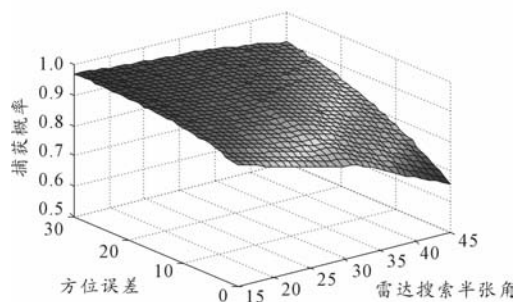


图 7 δ_ϕ 变化条件仿真

图8 σ_e 变化条件仿真图9 α_e 和 δ_ϕ 同时变化条件下捕获概率仿真

5 结束语

在有效验证计算方法有效性的同时,由图4、图5和图6的仿真结果可以得到如下结论,在保证目标捕获概率不小于90%的要求下,单纯提高导弹的飞行速度、末制导雷达的半张角、雷达的搜索半径不会使目标捕获概率带来较大的提高,相反此种情况下会使导弹被对抗的风险增大,因此必须在提高捕获概率和降低被目标对抗的概率之间获得平衡;由图7和图8可知,算法对于目标的方位误差和目标及导弹位置散布具有较大的鲁棒性能。

参考文献:

- [1] 郭峰,董受全.反舰导弹纯方位射击初探[J].飞航导弹,2008(2):15-17.
- [2] 旷志高,刘鼎臣.反舰导弹纯方位发射捕捉概率计算方法[J].火力与指挥控制,2003(10):109-112.
- [3] 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.
- [4] 汪新刚,谢晓方,陈文生.反舰导弹现在点射击捕捉概率的计算方法[J].兵工自动化,2010(11):1-3.

(责任编辑 周江川)

(上接第21页)

3 结束语

本设计针对手动推进装置难以控制,测量不便,功能单一,普适性不强等缺点,参考目前管道机器人的相关知识,设计了一套自动的管道爬行机构,为火炮身管的测量和检测提供了简单有效的工作载体,降低了火炮身管测量的劳动强度及误差,大大提高了其自动化程度。

参考文献:

- [1] 杜小平,曾朝阳,王林安,等.火炮身管静态参数测量系统设

计[J].2009,36(2):74-75.

- [2] 包建东,王昌明.多功能火炮内膛自动检测机器人[J].机械设计,2008,25(12):36-37.
- [3] 蒋渭忠,包建东,王昌明.基于火炮身管内径自动检测机器人的研究[J].传感器与微系统,2009,28(4):9-11.
- [4] 李继祥.火炮身管内孔测量仪自动定心装置[J].装甲兵指挥学院学报.1997,11(2):82-83.

(责任编辑 周江川)