

基于搜索论的远程反舰导弹搜捕概率建模方法*

张建强¹, 刘忠¹, 杨红梅²

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 空军预警学院, 湖北 武汉 430019)

摘要:针对传统捕捉概率模型难以满足远程反舰导弹机动搜捕概率建模计算的问题,提出利用搜索论进行导弹机动搜捕概率计算的建模方法。该方法根据目标机动规律建立其分布概率密度函数,并依据末制雷达发现目标概率的“倒四次方律”及弹目相对运动轨迹,构建其探测函数,通过求取两者之积的积分实现搜捕概率计算。计算结果显示:若远程反舰导弹不采取机动搜捕策略,目标指示误差增加1km时搜捕概率降低0.47,目标速度增加10节时搜捕概率降低0.3,末制雷达搜索半径减小50%时搜捕概率降低0.3;若采取平行搜捕策略,上述因素对其影响大幅下降。可见,该方法综合考虑了目标机动规律、传感器探测规律、导弹搜捕策略,可实现远程反舰导弹机动搜捕概率的解算。

关键词:反舰导弹;末制雷达;搜索论;搜捕策略;搜捕概率

中图分类号:E927 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)04-188-07

The target acquisition probability modeling method of long-range anti-ship missile based on search theory

ZHANG Jianqiang¹, LIU Zhong¹, YANG Hongmei²

(1. Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Since the traditional capture probability model can not solve the problem of long-range anti-ship missile's target capture calculation, a model was put forward to work out its maneuver acquisition probability by using search theory. The target distribution probability density function was established according to the target maneuvering rules. According to "inverted four times square law" of the terminal guidance radar target detection probability and missile target relative motion trajectory, the anti-ship missile's detection function was constructed. The target acquisition probability could be calculated by the integral operation of their multiplication. The calculation results show that, if long-range anti-ship missiles do not take maneuver search strategy, acquisition probability decreases by 0.47 when target indication error increases 1km, acquisition probability decreases by 0.3 when target velocity increases 10 knot, and acquisition probability decreases by 0.3 when terminal guidance radar search radius reduced by 50%. If the anti-ship missile takes parallel search strategy, the impact of above factors on its acquisition probability has fallen dramatically. This method takes the following factors into account, such as target maneuver rules, sensor detection rules and missile acquisition strategy, and the maneuver acquisition probability of long-range anti-ship missile can be figured out accordingly.

Key words: anti-ship missile; terminal guidance radar; search theory; search strategy; acquisition probability

未来战争将主要是信息化的非接触战争,远程精确打击是信息化战争的主要作战样式,反舰导弹远程化趋势日趋明显^[1]。然而,中远程反舰导弹的射击误差、目标机动范围等都随其射程的增大而显著增大^[2],但是远程反舰导弹的末制导搜索区却由于多种因素被限制在一个不大的区域内(方位搜索扇面角在 $\pm 10^\circ \sim \pm 45^\circ$ 之间,距离在10km~30km范围内),难以完全覆盖目标的可能散布区^[3]。要解决这一难题就必须发展更先进

的搜捕技术,其中采用机动搜索方式,充分利用远程反舰导弹自身机动能力,在目标散布区进行某种特定的机动是提高导弹大范围搜索捕获目标能力的有效途径^[4]。因此,有必要建立远程反舰导弹机动搜捕概率模型,为其机动搜捕策略的效果评估提供理论支持。

1 传统导弹捕捉概率模型

目前,导弹捕捉概率计算方法基本采用基于

* 收稿日期:2015-02-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61401493);国家部委基金资助项目(9140A01060113JB11012)

作者简介:张建强(1980—),男,山东昌乐人,博士研究生,E-mail: jianqiang97176@163.com;

刘忠(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: liuzhong0602@163.com

导弹自控终点散布概率的传统搜捕概率模型^[5],该模型假设导弹末制导雷达搜捕范围覆盖目标即认为捕捉成功。如图1所示,当末制导雷达在 A_{zk} 点开锁搜索时,只要目标处于 S 内即被捕捉。换言之,当目标位于 M_{zk} 点时,导弹的自控终点只要散布在矩形 S' 内,目标就被捕捉,称 S' 为导弹自控终点允许散布区, A_{zk} 点是其散布中心,散布区域矩形面积为 $2a \times 2b$ 。

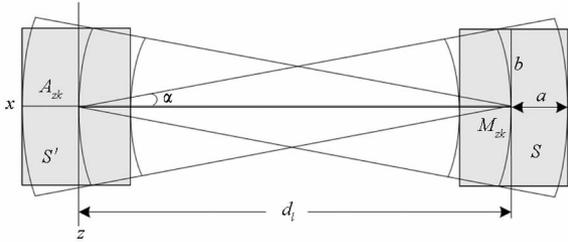


图1 导弹自控终点允许散布区

Fig. 1 Allowed zone of auto-control end-point dispersion

因此,传统导弹捕捉概率模型把捕捉概率计算问题转化为自控终点落在允许散布区内的概率问题^[6],其计算模型为:

$$P[(x, z) \in S] = \iint_{S'} f(x, z) dx dz \\ = \frac{1}{4} \left[\hat{\Phi}\left(\frac{a - mx}{E_x}\right) + \hat{\Phi}\left(\frac{a + mx}{E_x}\right) \right] \cdot \\ \left[\hat{\Phi}\left(\frac{b - mz}{E_z}\right) + \hat{\Phi}\left(\frac{b + mz}{E_z}\right) \right]$$

其中: $\hat{\Phi}(x)$ 为简化的拉普拉斯函数; mx 为自控终点在距离上的系统误差; mz 为自控终点在侧向上的系统误差; E_x 为自控终点在距离上的概率误差; E_z 为自控终点在侧向上的概率误差。

可以看出这种方法存在以下不足:①简单认为导弹搜索区域覆盖目标即捕获目标,未考虑末制导雷达的探测规律;②只考虑了导弹自控终点散布概率误差对捕捉概率的影响,未考虑目标初始位置及其机动导致的目标分布概率;③因难以构建具有航路规划和机动搜索能力的远程反舰导弹不同搜捕策略下的自控终点允许散布区,难以满足此类导弹搜捕概率计算。

2 搜索论模型

搜索论主要研究利用探测手段机动搜索指定目标优化方案的理论和方法,已广泛应用于卫星监视、资源勘探、海空失事救援以及制导武器搜捕目标等各个领域^[7]。文献[8]引入搜索论分析了导弹探测系统对弹道导弹的搜索过程,建立了不同目标指示条件下弹道导弹发现概率模型;文献

[9]利用搜索论建立了对地观测卫星对海洋未知目标的搜索模型,实现卫星在有限的观测时间内最大概率发现目标;文献[10]针对传统捕捉概率计算方法存在的不足,提出了基于搜索论的捕捉概率计算方法,实现了常见目标分布条件下的现在点射击捕捉概率计算模型,但是该模型没有进一步考虑反舰导弹末制导雷达探测规律(探测能力与目标距离关系)对其搜捕概率的影响,没有考虑远程反舰导弹不同搜索模式下其搜捕概率建模计算问题。为此,李建强等综合考虑弹目相对运动规律^[11]、雷达探测规律、导弹搜捕策略,建立基于搜索论的远程反舰导弹捕捉概率模型,实现远程反舰导弹不同搜捕策略下搜捕概率的建模计算,为具备智能机动搜索能力的远程反舰导弹目标搜捕概率提供一种有效的建模计算方法。搜索论模型由目标分布概率密度函数、探测函数、发现潜能及搜索概率四个要素构成。

2.1 目标分布概率密度函数

“搜索”这一概念意味着,被搜索目标的运动要素(t 时刻的位置、方位、航向、航速等)不能准确给出,但存在一定统计规律。在搜索论中,这种规律由某一形式的目标分布概率密度函数描述。假设目标位置空间 V_n 是空间 R_n 的一个子集,这里 $n=1, 2, 3, \dots$ 。当时间 $t=0$ 时,目标位置用向量 $\mathbf{X}(0) = (X_1(0), \dots, X_n(0))$ 表示,则目标概率密度函数 $p(\mathbf{X})$ 定义为^[12]:

$$p(\mathbf{X}) dV_n = \text{prob}[\mathbf{X} \in dV_n | dV_n \subset R^n] + o(dV_n) \quad (1)$$

其中,当 $dV_n \rightarrow 0$ 时 $o(dV_n) \rightarrow 0$,并且满足:

$$\int_{V_n} p(\mathbf{X}) n = 1, p(\mathbf{X}) \geq 0.$$

2.2 探测函数

探测函数是以搜索资源为自变量的探测概率,定义于空间 V_n 的探测函数为:

$$b: V_n \times [0, \infty) \rightarrow [0, 1] \quad (2)$$

由此, $b(V_n, z)$ 表示目标位于空间 V_n 中时,把 z 量的搜索资源施加于 V_n 而探测到目标的条件概率,是一个正则函数^[13]。搜索资源可以是搜索轨迹路程、搜索扫描面积、搜索时间等。特别地,当搜索资源为时间 t 时, $b(\mathbf{X}, t)$ 即为 $[0, t]$ 内在 \mathbf{X} 处发现目标的累积概率,则 $b(\mathbf{X}, t)$ 具有以下性质:

$$1 - b(\mathbf{X}, t + \Delta t) = [1 - b(\mathbf{X}, t)][1 - \gamma(t)\Delta t] \quad (3)$$

其中, $\gamma(t)$ 为 t 时刻的瞬时发现率^[14],在此定义它为:搜索过程执行到时刻 t 尚未发现目标,而在

t 时刻以后的下一个单位时间内发现目标的概率。式(3)在初始条件为 $b(X,0) = 0$ 时的解为:

$$b(X,t) = 1 - e^{-\int_0^t \gamma(u) du} \quad (4)$$

2.3 发现潜能

当搜索者和目标各自相对运动时,它们之间相对位置的变化会影响瞬时发现率 $\gamma(t)$,也就是说 γ 依赖于它们之间的相对位置。假设 C 为其相对运动轨迹, t 时刻目标相对位置为 $x = x(t), y = y(t)$,那么 $\gamma(t) = \gamma(x(t), y(t))$ 。根据探测函数的定义(4)可得:

$$b(X,t) = 1 - e^{-\int_C \gamma(x(t), y(t)) dt} = 1 - e^{-F[C]} \quad (5)$$

其中, $F(C)$ 称为发现潜能,具有可列可加性^[15]。

2.4 搜索概率

若采用探测函数 $b(V_n, z)$ 对空间 V_n 中概率分布密度函数为 $p(X)$ 的目标进行搜索,则成功发现目标的总概率可表示为:

$$P(z) = \int_{V_n} p(X) b[X, z(X)] dV_n \quad (6)$$

3 基于搜索论的反舰导弹搜捕概率模型

反舰导弹虽然发射平台可能不同(空射、舰射、岸射、潜射),射程有所不同(远程、中程、近程),但其使用方式却有许多共同点。通常首先由搜索兵力搜索并发现目标,并进行目标指示;然后,根据目标指示对导弹进行目标参数装定,发射导弹;导弹发射后,在末制导系统工作前进行自控或程序飞行;导弹飞行至自控终点 A_{zk} 时,末制导雷达即开始工作。末制导雷达依靠距离波门和波束的左右转动形成扇形搜索区,以便捕捉目标。如果在搜索区内出现目标,则雷达有可能捕捉目标。当捕获目标后,末制导雷达进入跟踪状态,控制导弹自动导向目标。反舰导弹搜捕目标原理图,如图 2 所示。

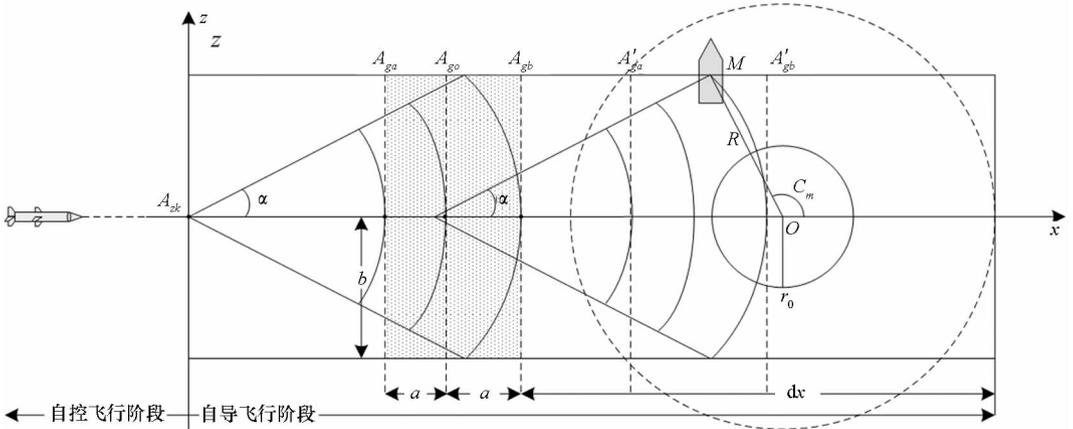


图 2 反舰导弹搜捕目标原理图

Fig. 2 Principle diagram of anti-ship missile search target

3.1 目标分布概率密度函数

假设目标初始位置位于以 O 点为圆心,以 r 为半径的圆内,其分布服从 $N(0, \sigma_r^2)$ 的正态分布;目标航速 V_m 在 $0 \sim V_{max}$ 内服从均匀分布,航向 C_m 在 $0 \sim 2\pi$ 内服从均匀分布, t 为目标规避机动时间。由于 $R = r + V_m t$, R 与 V_m 相互独立,故 R 也是随机变量,其分布密度 $f_{r+V_m t}(R)$ 是 r 和 $V_m t$ 的卷积^[16],即

$$f_{r+V_m t}(R) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}} \cdot \frac{1}{V_{max}t} dr = \frac{1}{V_{max}t} \quad (7)$$

可见,目标规避机动时间 t 后,与原点距离 R 也服从均匀分布,其范围为 $0 \sim V_{max}t$,又因其航向在 $0 \sim 2\pi$ 内服从均匀分布,因此,目标规避机动

时间 t 后均匀散布在如图 1 所示的虚线圆 O 中。

3.2 直航搜捕模式的探测函数

若远程反舰弹道未采取任何机动搜捕策略,而采取与近程反舰导弹相同的直航搜捕目标模式,采用上述基于搜索论的反舰导弹搜捕模型建模方法,建立反舰导弹直航搜捕模式探测函数。

假设:①从导弹末制导雷达开机到捕获目标这一阶段,由于导弹的速度 v 远大于水面舰艇的速度 V_m ,可以近似认为 $V_m \approx 0$,也就是说,目标的规避机动发生在导弹开机之前是最有效的;②由于导引头的末制导雷达作用距离 d_l 远大于距离选择搜索区半长 a ,因此从 A_{ga} 到 A_{gb} 的扇环形导引头扫描区域,可用图 1 中阴影部分的矩形区域代替;③目标舰艇初始位置为 (z_0, x_0) 。

在坐标系 (A_{zk}, X, Z) 中,目标舰船相对于反舰导弹的被发现轨迹 C 即是从 A'_{ga} 到 A'_{gb} 的直线,因此,可表示为时间 t 的函数:

$$C : \begin{cases} x(t) = x_0 - vt \\ z(t) = z_0 \\ t \in [0, 2a/v] \end{cases} \quad (8)$$

假设反舰导弹末制导雷达对目标的探测概率服从“倒四次方律”^[17],即:

$$\gamma(t) = f_r \exp\{-Y_0\} R_0^4 R(t)^{-4} = k \cdot R(t)^{-4} \quad (9)$$

其中: Y_0 为雷达恒虚警时的检测门限; f_r 为雷达脉冲重复频率; R_0 为信噪比为1时的雷达作用距离。

那么,反舰导弹对位于 (z_0, x_0) 舰艇的搜索发现潜能函数 $F[C]$ 可以表示为时间 t 的函数:

$$F[t] = \int_0^{2a} \frac{k}{[(x_0 - vt)^2 + z_0^2]^2} dt \quad (10)$$

令 $x = x_0 - vt$,则 $F[t]$ 变换为 x 的函数:

$$\begin{cases} F[x] = \int_{x_0}^{x_0-2a} \frac{-k/v}{[x^2 + z_0^2]^2} dx = f(x_0 - 2a) - f(x_0) \\ f(x) = -\frac{k}{2vz_0} \left[\frac{x}{x^2 + z_0^2} + \arctan\left(\frac{x}{z_0}\right) \right] \end{cases} \quad (11)$$

根据式(5)、式(11)可得直航式搜索的探测函数为:

$$b(z_0, x_0, x) = 1 - \exp(f(x_0 - 2a) - f(x_0)) \quad (12)$$

3.3 平行机动式搜索的探测函数

目前,在不能获得目标精确定位信息的前提下,反舰导弹一般采用概略定位射击^[18],此时由于远程反舰导弹飞行时间长、目标机动范围较大,导致目标大范围散布,反舰导弹搜捕概率下降明显,为充分利用远程反舰导弹具有的火力机动能力增加搜捕目标概率,其搜索目标模式一般采用平行搜索模式,如图3所示,在一个含有目标的矩形区域内,远程反舰导弹按平行轨道依次向前搜索,平行轨道间的间隔宽度为 W , Z 为轨道长度。

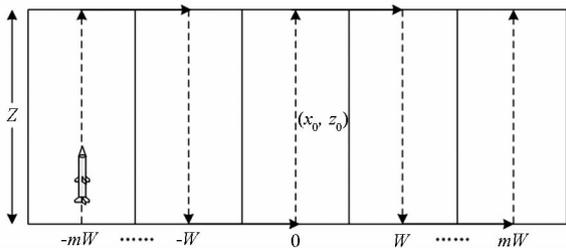


图3 平行搜索模式

Fig.3 Parallel search strategy

由图3可知,平行搜索模式下反舰导弹在 nW ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m$)平行轨道上对 (x_0, z_0) 处目标进行搜索,可等价于反舰导弹对 $(x_0 - nW, z_0)$ 处的目标进行搜索。根据搜索发现潜能的可列可加性,可知平行搜索模式下反舰导弹对位于 (x_0, z_0) 的水面舰艇的搜索发现潜能 $F[x]$ 可以表示为导弹在各个轨道 nW 上的直航式搜索潜能之和,即:

$$F(C) = \sum_{n=-m}^m F(x - nW) \quad (13)$$

令 $x = x_0 - vt - nW$,由式(5)、式(11)、式(13)可得平行搜索模式下的探测函数为:

$$\begin{cases} b(z_0, x_0, x) = 1 - \exp(\varphi(x_0 - 2a) - \varphi(x_0)) \\ \varphi(x) = -\frac{k}{2vz_0} \sum_{n=-m}^m \left[\frac{x}{x^2 + z_0^2} + \arctan\left(\frac{x}{z_0}\right) \right] \end{cases} \quad (14)$$

3.4 基于搜索论的反舰导弹搜捕概率模型

不妨令:

$$\begin{cases} x = x_0 + r \cos C_m \\ z = z_0 + r \sin C_m \end{cases} \quad (15)$$

转化为极坐标系,联立式(5)、式(6)、式(12)或式(14),可得反舰导弹对图1中所示圆 O 内均匀分布的目标的搜捕概率为:

$$P(t) = \frac{1}{\pi V_m^2 t^2} \int_0^{V_m t} \int_0^{2\pi} 1 - e^{-F[C]} dr dC_m \quad (16)$$

4 计算示例

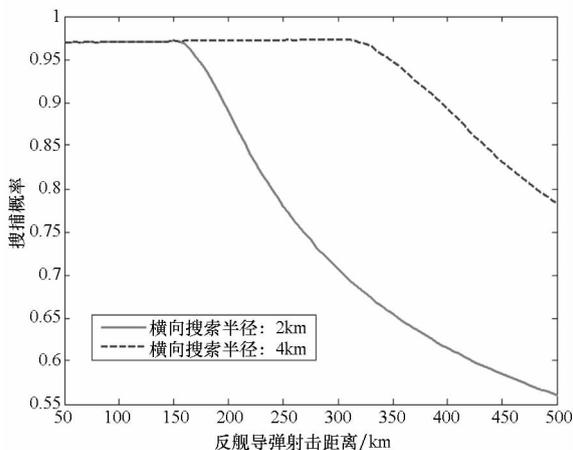
根据文献[6]提供的反舰导弹参考数据,假设远程反舰导弹搜索区纵向搜索半径 $a = 1\text{km}$,横向搜索半径 $b = 2\text{km}$,射程为 500km ,自导距离 $dx = 20\text{km}$,自控飞行距离 50km 后末制导雷达开机搜捕目标,目标最大速度为 30 节。利用搜索论建立远程反舰导弹捕捉概率模型,计算分析直航式搜索模式与平行机动搜索模式下,不同射击距离条件下横向搜索半径 b 、目标机动速度以及目标指示误差对远程反舰导弹目标捕获概率的影响。

4.1 横向搜索半径 b 对捕获概率影响分析

如图4(a)所示,当横向搜索半径为 2km 时,射击距离超过 150km 后反舰导弹搜捕概率大幅下降。与之相比,当横向搜索半径扩大1倍到 4km 时,射击距离接近 350km 时反舰导弹搜捕概率才开始大幅下降,此时捕捉概率与横向搜索半径为 2km 时下降 0.47 。可以看出对于远程反舰导弹而言,随着反舰导弹射程的不断增大,横向搜

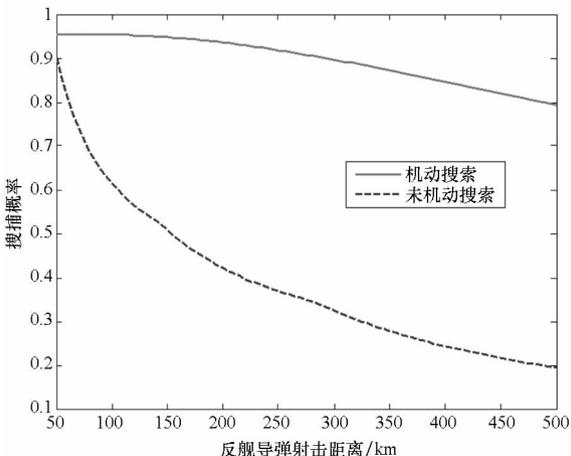
索半径对远程反舰导弹捕捉概率的影响越来越大。因此,扩大末制导雷达搜索扇面区域是提高其搜捕概率,增强作战能力的有效途径之一。

同时,若远程反舰导弹采用机动搜索策略后其机动能力可大大弥补末制导雷达搜索扇面大小的影响,增强其作战能力。如图 4(b)所示为横向搜索半径为 2km、目标速度为 30 节时,目标散布半径随射击距离的增大从 2.5km 增加到 25km 时,远程反舰导弹分别采取平行式机动搜索和直航式未机动搜索两种模式,其捕捉概率随反舰导弹射程的变化趋势,可以看出当远程反舰导弹采用平行式机动搜索策略后其搜捕概率随着射程的增大变化缓慢,与之相反若未采用机动搜索策略其捕捉概率随着导弹射击距离的增大迅速减小。



(a) b 为 2km, 4km 时的搜捕概率变化对比

(a) Acquisition probability change comparison when b is 2 km, 4 km



(b) 机动搜索与未机动搜索捕获概率变化对比

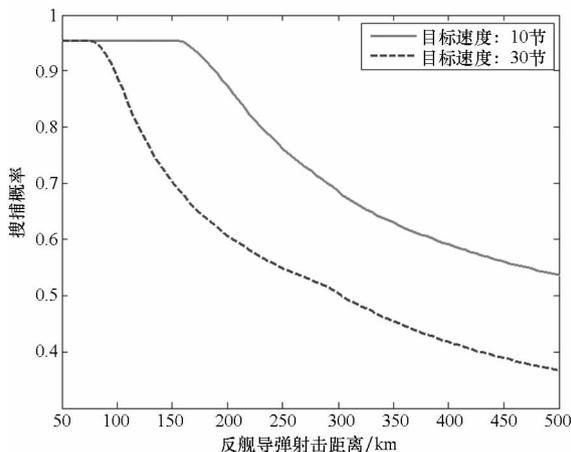
(b) Acquisition probability change comparison when taking maneuver search strategy or not

图 4 横向搜索半径 b 对捕获概率的影响

Fig. 4 Impact of lateral search radius b on acquisition probability

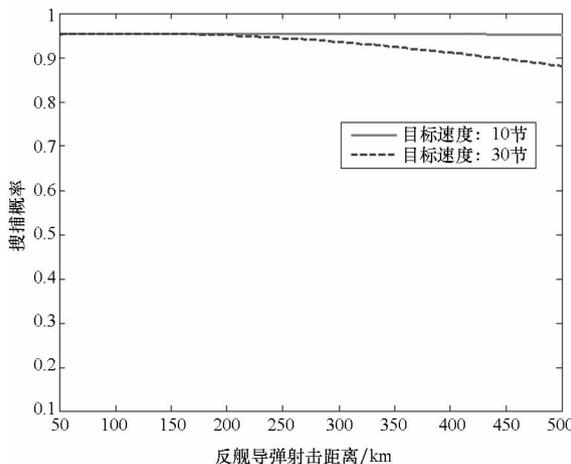
4.2 目标机动速度对捕获概率影响分析

如图 5(a)所示,当横向搜索半径为 2km、目标机动速度为 30 节时,射击距离超过 60km 后反舰导弹搜捕概率大幅下降。相比而言,当目标机动速度为 10 节时,射击距离超过 160km 时反舰导弹搜捕概率才开始大幅下降,此时与目标机动速度为 30 节时的搜捕概率下降 0.29。可以看出对于远程反舰导弹而言,随着反舰导弹射程的不断增大,目标机动对于远程反舰导弹捕捉概率的影响越来越大,反舰导弹会因目标规避机动而迅速丢失目标。因此,为了提高目标规避机动情况下远程反舰导弹的捕获概率,增大反舰导弹速度缩短目标机动时间是一种有效方式。



(a) 未采用机动搜索策略

(a) Not taking maneuver search strategy



(b) 采用机动搜索策略

(b) Taking maneuver search strategy

图 5 目标机动速度对捕获概率的影响

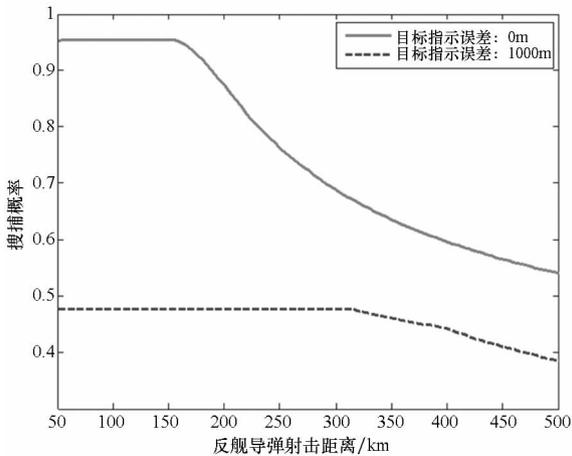
Fig. 5 Impact of target maneuver velocity on acquisition probability

考虑到导弹速度提高的技术复杂性,在不改

变导弹速度的前提下,若远程反舰导弹采用机动搜索策略,其机动能力可大大减少目标规避机动对其搜捕概率的影响。如图5(b)所示,当横向搜索半径为2km、目标机动速度为30节时,射击距离超过300km后反舰导弹搜捕概率才开始缓慢下降,直至射程达到500km时捕捉概率仅下降了0.06。

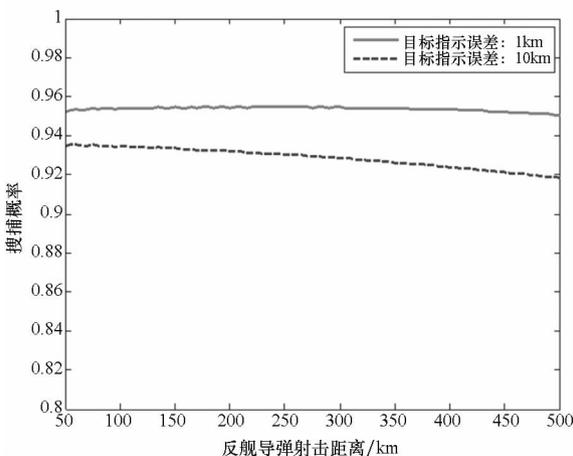
4.3 目标指示误差对捕获概率影响分析

如图6(a)所示,目标指示误差对直航式远程反舰导弹捕捉概率影响较大。当横向搜索半径为2km、目标机动速度为20节时,目标指示误差增加1km,捕获概率大幅下降0.43。因此,在作战使用过程中,要最大程度地降低目标定位误差和时间延时误差,提高远程反舰导弹目标捕获能力。



(a) 未采用机动搜索策略

(a) Not taking maneuver search strategy



(b) 采用机动搜索策略

(b) Taking maneuver search strategy

图6 目标指示误差对捕获概率的影响

Fig.6 Impact of target indication error on acquisition probability

但是,当提供目标指示的探测平台观测精度

不能满足远程反舰导弹精确射击条件,而仅给出目标概略位置信息时,远程反舰导弹若采用机动搜索策略,其机动能力可大大减少目标指示误差对其搜捕概率的影响,大大提高远程反舰导弹概略射击效果。如图6(b)所示,当远程反舰导弹采用平行机动搜索模式,目标指示误差为1km时目标搜捕概率随着射击距离的增加保持0.95基本不变,即便是增加到10km,目标搜捕概率也仅从0.935下降到0.918。

5 结论

1) 基于搜索论的远程反舰导弹机动搜捕概率建模计算方法不仅考虑了目标初始位置及目标机动规律形成的目标分布概率密度,同时还构建了用于描述末制导雷达探测目标规律的探测函数,与传统导弹搜捕概率模型相比,该方法更加贴合实际,计算示例也显示了该方法的合理有效性。

2) 基于搜索论的远程反舰导弹机动搜捕概率建模计算方法采用基于弹目相对运动轨迹的发展潜能函数解决了传统导弹搜捕概率模型难以实现的机动搜捕策略下的搜捕概率建模计算问题。

3) 基于搜索论的远程反舰导弹机动搜捕概率计算结果显示:在未采取机动搜索策略的情况下上述因素对远程反舰导弹目标搜捕概率的影响较大;与之相反,若采取平行搜索策略,上述因素对其影响大幅下降;说明随着反舰导弹射程的不断增大,中远程反舰导弹自控飞行时间越来越长,目标指示精度、目标机动速度和末制导雷达搜索范围等因素对其搜捕概率的影响程度,都随着反舰导弹巡航时间的增长而显著增大,而采用机动搜索方式,是扩大反舰导弹搜捕范围、提高搜索捕获目标能力的有效途径。

参考文献(References)

- [1] 王光辉,滕克难,孙学峰,等.一种中远程反舰导弹机动搜索模型及其捕捉概率研究[J].战术导弹技术,2009,5(3):65-67.
WANG Guanghui, TENG Kenan, SUN Xuefeng, et al. Study of maneuverable search model and acquisition probability of medium and long range anti-ship missile[J]. Tactical Missile Technology, 2009, 5(3):65-67. (in Chinese)
- [2] 胡海,熊峰.反舰导弹对远距离大散布目标的搜索方式[J].战术导弹技术,2005,(4):12-15.
HU Hai, XIONG Feng. Long distance and wide spread targets searching mode of anti-ship missile[J]. Tactical Missile Technology, 2005, (4):12-15. (in Chinese)
- [3] 颜仲新,杨祖快,刘鼎臣.反舰导弹搜捕方式的变革与发展[J].控制与制导,2002,(9):48-51.
YAN Zhongxin, YANG Zukuai, LIU Dingchen. The development and reform of anti-ship missile's search method[J]. Winged

- Missiles Journal, 2002, (9): 48 - 51. (in Chinese)
- [4] 隋先辉, 胡海, 董受全, 等. 基于导弹机动的反舰导弹目标搜索方法[J]. 制导与引信, 2012, 33(1): 12 - 15.
SUI Xianhui, HU Hai, DONG Shouquan, et al. The target acquisition method of atiship missile based on the maneuver of missile[J]. Guidance and Fuze, 2012, 33(1): 12 - 15. (in Chinese)
- [5] 高晓冬, 王光辉, 李传顺. 一种改进的反舰导弹前置点射击方式目标捕捉概率算法[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(2): 228 - 230.
GAO Xiaodong, WANG Guanghui, LI Chuanshun. An improved acquire algorithm of anti-ship missile based on lead-point shoot [J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2012, 27(2): 228 - 230. (in Chinese)
- [6] 邢昌风, 李敏勇, 吴玲. 舰载武器系统效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 248 - 252.
XING Changfeng, LI Minyong, WU Ling. Effectiveness analysis of shipborne weapon system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 248 - 252. (in Chinese)
- [7] 刘军伟, 沙基昌, 陈超. 搜索论研究综述[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(5): 10 - 14.
LIU Junwei, SHA Jichang, CHEN Chao. An overview of research on search theory [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(5): 10 - 14. (in Chinese)
- [8] 乔永杰, 刘金荣, 李承延, 等. 导弹探测系统发现概率的建模[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(10): 2244 - 2248.
QIAO Yongjie, LIU Jinrong, LI Chengyan, et al. Detection probability modeling for missile detection systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(10): 2244 - 2248. (in Chinese)
- [9] 刘伟, 孟新. 卫星对地搜索问题研究——搜索理论的新应用[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(23): 5487 - 5490.
LIU Wei, MENG Xin. Research on satellite searching problem — new application of search theory [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(23): 5487 - 5490. (in Chinese)
- [10] 汪新刚, 谢晓方, 李雪. 基于搜索论的反舰导弹捕捉概率研究[J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(1): 34 - 38.
WANG Xingang, XIE Xiaofang, LI Xue. Research on acquiring probability of anti-ship missile based on search theory [J]. Command Control & Simulation, 2011, 33(1): 34 - 38. (in Chinese)
- [11] 王建江, 徐培德, 王慧林, 等. 导弹打击海上移动目标中的卫星侦察信息精度影响分析[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(1): 180 - 184.
WANG Jianjiang, XU Peide, WANG Huilin, et al. Impact analysis of satellite reconnaissance information precision on missile hitting maritime floating target [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(1): 180 - 184. (in Chinese)
- [12] 朱清新. 离散和连续空间中的最优搜索理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 4 - 11.
ZHU Qingxin. The theory of optimal search in discrete and continuous space [M]. Beijing: Science Press, 2005: 4 - 11. (in Chinese)
- [13] Stone L D. Theory of optimal search [M]. USA: Academic Press, 1975: 7 - 23.
- [14] Wagner D H, Mylander W C, Sanders T J. 海军运筹分析[M]. 姜青山, 郑保华, 译. 北京: 国防工业出版社, 2008: 146 - 156.
Wagner D H, Mylander W C, Sanders T J. Naval operations research [M]. Translated by JIANG Qingshan, ZHEN Baohua. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 146 - 156. (in Chinese)
- [15] Koopman B O. Search and screening [R]. USA: Center for Naval Analysis, 1956: 18 - 46.
- [16] 陈玉文. 海面机动目标散布规律及反舰导弹搜索区的划分[J]. 飞航导弹, 1999, (7): 5 - 10.
CHEN Yuwen. The surface maneuver target spread rule and anti-ship missile search area division [J]. Winged Missiles Journal, 1999, (7): 5 - 10. (in Chinese)
- [17] 张欧亚, 佟明安, 钟麟. 不确定环境下编队协同搜索力最优分配[J]. 电光与控制, 2007, 14(2): 1 - 4.
ZHANG Ouya, TONG Ming'an, ZHONG Lin. Optimal allocation of cooperative search capability in aircraft formation under uncertain environment [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(2): 1 - 4. (in Chinese)
- [18] 卢发兴, 吴玲, 董银文. 带航路规划的反舰导弹盲目射击攻击模型及性能研究[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1956 - 1960.
LU Faxing, WU Ling, DONG Yinwen. Research on the attacking mode for blind launch of anti-ship missiles with route-planning capability [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1956 - 1960. (in Chinese)