

导弹打击海上移动目标中的卫星侦察信息精度影响分析*

王建江, 徐培德, 王慧林, 李志猛

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:研究卫星侦察信息精度对导弹打击海上移动目标命中概率的影响,对于提高导弹作战效能具有重要意义。根据导弹打击海上移动目标的原理,描述了其作战过程,分析了导弹命中概率影响因素,建立了基于卫星侦察信息精度的导弹命中概率计算模型,并通过蒙特卡洛方法分析了卫星侦察信息精度对导弹命中概率的影响。分析结果表明:在可接受区间内,卫星侦察信息精度对导弹命中概率的影响可以忽略,在可接受区间外,导弹命中概率随着信息精度降低而下降。

关键词:卫星侦察信息精度;计算模型;蒙特卡洛仿真分析

中图分类号: TN971 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)01-0180-05

Impact analysis of satellite reconnaissance information precision on missile hitting maritime floating target

WANG Jianjiang, XU Peide, WANG Huilin, LI Zhimeng

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The impact of satellite reconnaissance information precision on hitting probability of missile hitting maritime floating target was investigated, which is significant for improving the operational efficiency of missile. According to the principle of missile hitting maritime floating target, the operational process was depicted, the impact factors of hitting probability were analyzed, and the calculating model of hitting probability based on satellite reconnaissance information precision was established. The impact of satellite reconnaissance information precision on hitting probability was analyzed by Monte-Carlo method. The results prove that if the satellite reconnaissance information precision is in the acceptable range, the impact is able to be ignored; otherwise, the missile hitting probability descends along with the fall of the information precision.

Key words: satellite reconnaissance information precision; calculating model; Monte-Carlo simulation analysis

导弹打击海上移动目标作为新的作战样式,对于维护海洋权益,争夺战争“制海权”具有重要意义。目前,卫星侦察已成为探测、监视、跟踪海洋移动目标的重要手段^[1],分析卫星侦察信息精度对导弹命中概率的影响能够更好地发挥导弹作战效能。

目前,已有学者在导弹打击海上移动目标相关领域进行了研究:Paul M. Parashk III^[2]在2005年利用MTST模型建立了通信延迟和定位精度与潜舰导弹命中概率之间的解析模型。研究结果表明即使存在较长的通信延迟,在定位精度较高的情况下潜艇仍可发起有效的攻击。Hae-rhee Park和Ick-Ho Whang^[3]利用概率论方法研究了长距离反舰导弹目标选择策略问题。陈超等^[4]建立了双舰无源定位条件下反舰导弹捕获概率解析模型,分析了信息质量对反舰导弹捕获概率的影响。关启成等^[5]采用统计理论,建立了反舰导弹末制

导雷达捕获概率计算模型,分析了影响捕获概率的参数,提出了一种更接近工程实际的捕获概率计算方法。王林等在分析导弹末制导雷达探测能力的基础上,建立了导弹命中概率计算模型^[6]。徐德坤等分析了影响导弹命中概率的误差源,包括主动段误差源、中段误差源、末制导误差源以及目标机动对导弹命中概率的影响,并提出了基于正态分布的命中概率评估方法^[7]。汪新刚通过分析导弹末制导雷达搜索区域,建立了基于导弹自控终点误差散布模型的末制导雷达目标捕获概率计算模型,分析了导弹自控终点误差对导弹命中概率的影响^[8]。导弹打击海上移动目标作战中,由于目标距离远,导弹飞行时间长,对目标信息依赖度高,所以卫星侦察信息精度对导弹命中概率影响显著,而以上研究在计算导弹命中概率时都没有系统地分析卫星侦察信息精度的影响,因此有必要对该问题进行深入研究。

* 收稿日期:2012-06-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61104180, 61361012);国家部委资助项目

作者简介:王建江(1986—),男,新疆乌鲁木齐人,博士研究生,E-mail: jianjiangwang@nudt.edu.cn;

徐培德(通信作者),男,教授,硕士,硕士生导师,E-mail: pdux@21cn.com

1 问题描述

导弹一般采用“自控 + 自导”的制导体制,卫星侦察信息支持下的导弹打击海上移动目标作战过程为:解算卫星侦察信息,获得目标指示信息;将目标指示信息装订到导弹导引部,发射导弹;导弹按照预先设定的轨道飞行,到达自控终点位置,末制导雷达开机;末制导雷达覆盖目标,截获目标信号,对目标定位;导弹对目标进行自动跟踪飞行,直到命中目标。具体过程如图 1 所示。

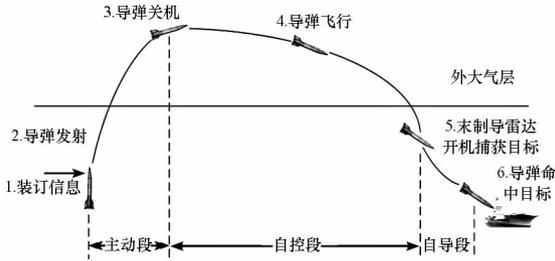


图 1 导弹打击海上移动目标作战过程

Fig. 1 Combating process of missile hitting maritime floating target

卫星侦察信息精度直接影响目标与导弹末制导雷达开机点,即导弹自控终点的相对位置,经过一系列影响传播,最终对导弹命中概率产生影响,具体影响关系如图 2 所示。

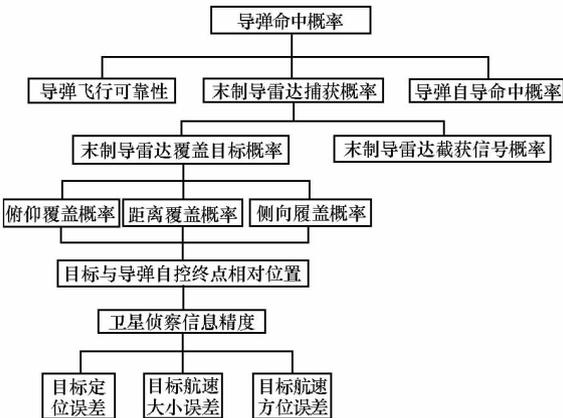


图 2 导弹命中概率与卫星侦察信息精度关系

Fig. 2 Relationship between hitting probability of missile and satellite reconnaissance information precision

2 导弹命中概率计算模型

2.1 导弹命中概率模型

由导弹打击海上移动目标作战过程可知,发射一发导弹命中目标是一个复杂事件,它是由以下几个事件构成的共现事件^[9]:

- 在导弹的全部飞行过程中,导弹各分系统均能正常工作;

- 在导弹正常工作条件下,导弹末制导雷达捕获到目标;
- 由导弹末制导雷达捕获到目标条件下,导弹自动跟踪目标直至命中。

由概率乘法定理可知,发射一发导弹命中目标的概率等于上述各事件概率的乘积,即^[6,9-10]

$$P_{Hit} = P_{Relia} \cdot P_{Capture} \cdot P_{Lead} \quad (1)$$

其中, P_{Relia} 为导弹飞向目标过程中可靠性,是导弹固有性能指标,与卫星侦察信息精度基本无关; P_{Lead} 为导弹自导命中概率,对于不同精度卫星侦察信息, P_{Lead} 变化极小^[11]; 因此,卫星侦察信息精度对导弹命中概率 P_{Hit} 的影响主要体现在对末制导雷达捕获概率 $P_{Capture}$ 的影响。为便于分析卫星侦察信息精度对导弹命中概率的影响,本文假设导弹系统工作可靠并且无目标对抗,即 $P_{Relia} = 1$, 导弹自导命中概率 P_{Lead} 为常量。

2.2 导弹末制导雷达捕获概率模型

导弹末制导雷达能否捕获目标主要取决于^[11-12]: (1) 导弹末制导雷达搜索区能否覆盖到目标; (2) 导弹末制导雷达能否截获目标回波信号。

因此,导弹打击海上移动目标作战中,末制导雷达捕获概率 $P_{Capture}$ 应为导弹末制导雷达覆盖概率 P_{Cover} 与导弹末制导雷达截获目标信号概率 $P_{Intercept}$ 之积,即

$$P_{Capture} = P_{Cover} \cdot P_{Intercept} \quad (2)$$

其中,导弹末制导雷达截获目标信号概率 $P_{Intercept}$ 与雷达信号处理能力和敌方干扰样式、干扰强度有关,卫星侦察信息精度对其影响可忽略不计。因此,卫星侦察信息精度对导弹末制导雷达捕获概率 $P_{Capture}$ 的影响主要是指信息精度对导弹末制导雷达覆盖概率 P_{Cover} 的影响。本文假设不存在敌方干扰,认为末制导雷达能准确截获目标信号,即 $P_{Intercept} = 1$ 。

2.3 导弹末制导雷达覆盖概率模型

导弹末制导雷达的搜索区,是一个圆锥形的立体空间区域。在搜索海上目标时,这一区域可以简化为平面搜索区域,如图 3 所示。其搜索过程为:方位上从左(或右)边界开始向右(或左)搜索到右(或左)边界,再返回为一个周期;同时,距离上由远而近的往返搜索。由于末制导雷达一个搜索周期很短,导弹在一个周期内的位移可忽略不计,因此末制导雷达一个搜索周期内覆盖区域可近似看作扇形带状区域,如图 3 中 ABCD 所示。其中, O 为导弹末制导雷达开机位置,即导弹自控

终点, N 为末制导雷达开机时目标实际位置, N' 为末制导雷达开机时预测目标位置, $L = ON'$ 为末制导雷达开机距离, ω_{\max} 为导弹末制导雷达搜索扇面半角, l_{\max} 和 l_{\min} 分别为末制导雷达最大作用距离和最小作用距离, l 为末制导雷达开机时目标与导弹的距离, ω 为目标方位角。

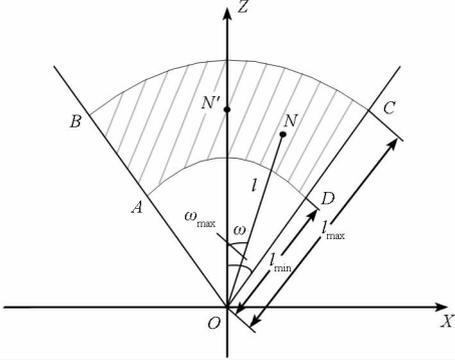


图 3 末制导雷达覆盖目标示意图

Fig. 3 Illustration of terminal guidance radar covering target

导弹末制导雷达覆盖目标就是指目标落在末制导雷达覆盖区域 $ABCD$ 内, 即满足以下条件:

$$\begin{cases} l_{\min} < l < l_{\max} \\ -\omega_{\max} < \omega < \omega_{\max} \end{cases}$$

因此, 末制导雷达覆盖概率为

$$P_{\text{Cover}} = P\{l_{\min} < l < l_{\max}, -\omega_{\max} < \omega < \omega_{\max}\} \quad (3)$$

根据以上分析可知, 影响末制导雷达覆盖目标概率的主要因素是目标与末制导雷达的相对位置 $ON(l, \omega)$, 而卫星侦察信息精度直接影响目标与导弹自控终点的相对位置, 从而影响末制导雷达覆盖概率。

2.4 卫星侦察信息精度影响模型

在导弹打击海上移动目标作战中, 卫星侦察信息主要包括目标位置信息、目标航速信息、目标类型信息、目标形状信息及目标大小信息等。针对导弹作战半径大, 飞行距离远, 时间长的特点, 目标位置信息与目标航速信息对其命中概率影响显著, 因此, 本文所讨论的卫星侦察信息主要是指目标位置信息、航速信息。

如图 4 所示, 卫星侦察信息精度主要包括目标定位误差 $\Delta\rho$, 目标航速大小误差 Δv 及目标航速方位误差 $\Delta\theta$ 。上述误差既包括由固定因素引起的系统误差, 又包括不确定因素引起的随机误差。系统误差在测量条件不变时保持恒定, 而由中心极限定理及相关文献^[5,9,13-16]可知, 随机误差一般服从正态分布。因此, 本文假设目标定位误差 $\Delta\rho$ 、目标航速大小误差 Δv 及目标航速方位误差 $\Delta\theta$ 均服从正态分布, $\Delta\rho \sim N(\mu_{\Delta\rho}, \sigma_{\Delta\rho})$, $\Delta v \sim$

$N(\mu_{\Delta v}, \sigma_{\Delta v})$, $\Delta\theta \sim N(\mu_{\Delta\theta}, \sigma_{\Delta\theta})$, $\Delta\theta$ 以逆时针方向为正。 φ 为目标定位误差偏向角, φ 服从均匀分布, $\varphi \sim U(0, 360)$ 。

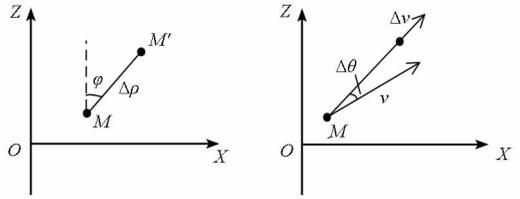


图 4 卫星侦察信息精度

Fig. 4 Satellite reconnaissance information precision

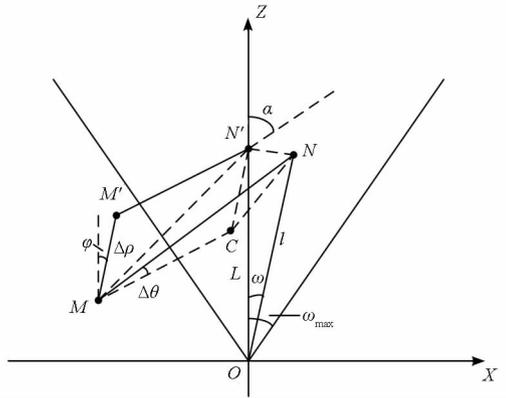


图 5 目标相对位置与卫星侦察信息精度关系
Fig. 5 Relationship between relative position and satellite reconnaissance information precision

为了分析卫星侦察信息精度与目标相对位置的关系, 首先建立末制导雷达覆盖目标坐标系, 以导弹自控终点在水平面的投影 O 为坐标原点, 以导弹航行方向为 Z 轴正向, 垂直于 Z 轴向右为 X 轴正向, 如图 5 所示。其中, M 为卫星侦察时目标实际位置, M' 为卫星侦察时目标侦察位置, $MM' = \Delta\rho$ 为目标定位误差, N 为末制导雷达开机时目标实际位置, N' 为末制导雷达开机时预测目标位置, 假设侦察到目标移动速度为 v , 从卫星侦察到目标到末制导开机经过时间为 t , Δv 为目标航速大小误差, 则 $M'N' = vt$, $MN = (v + \Delta v)t$, $MM'N'C$ 为平行四边形。 $L = ON'$ 为末制导雷达开机距离, α 为导弹航行方向与目标航行方向夹角, ω_{\max} 为导弹末制导雷达搜索扇面半角, $l = ON$ 为末制导雷达开机时目标与导弹的距离, $\omega = \angle NON'$ 为目标方位角。

由图 5 可得

$$\angle MM'N' = \pi - \alpha + \varphi \quad (4)$$

$$MN' = \sqrt{MM'^2 + M'N'^2 - 2 \cdot MM' \cdot M'N' \cdot \cos \angle MM'N'} \quad (5)$$

通过几何关系推导得

$$\angle N'MC = \arcsin \frac{\Delta\rho \sin(\pi - \alpha + \varphi)}{MN'} \quad (6)$$

$$NN' = \sqrt{MN^2 + MN'^2 - 2 \cdot MN \cdot MN' \cdot \cos(\angle N'MC - \Delta\theta)} \quad (7)$$

$$NC = \sqrt{MN^2 + MC^2 - 2 \cdot MN \cdot MC \cdot \cos\Delta\theta} \quad (8)$$

$$\angle NN'C = \arccos \frac{NN'^2 + N'C^2 - NC^2}{2 \cdot NN' \cdot N'C} \quad (9)$$

进一步推导可得到目标相对末制导雷达位置 $\vec{ON}(l, \omega)$ 。

$$l = ON = \sqrt{ON'^2 + NN'^2 - 2 \cdot ON' \cdot NN' \cos \angle ON'N} \quad (10)$$

$$\omega = \angle NON' = \arcsin \frac{NN' \sin(\angle NN'C - \varphi)}{ON} \quad (11)$$

3 仿真分析

由于目标与末制导雷达的相对位置 $ON(l, \omega)$ 与卫星侦察信息精度关系复杂,很难通过严格的解析方法求解 l, ω 的概率分布,计算导弹命中概率,因此本文采用蒙特卡洛仿真方法计算卫星侦察信息精度影响下的导弹命中概率。具体仿真流程如图 6 所示。

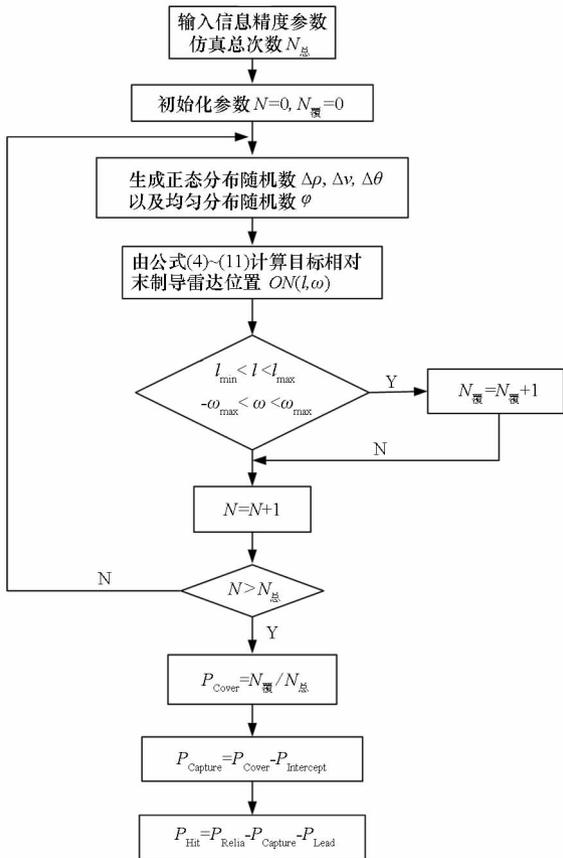
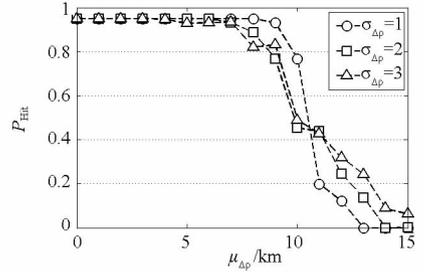


图 6 导弹命中概率计算仿真流程

Fig. 6 Simulation process of calculating hitting probability

假设导弹自导命中概率 $P_{Lead} = 0.95$, 侦察到目标移动速度 v 为 30 节, 即 54km/h, 从卫星侦察发现目标到末制导雷达开机经过 $t = 0.5h$, 导弹航行方向与目标航行方向夹角 α 服从均匀分布, $\alpha \sim U(0, 360)$, 末制导雷达开机距离 L 为 20km, 最大作用距离 l_{max} 为 36km, 最小作用距离为 4km, 搜索扇面半角 ω_{max} 为 $\pi/6$ 。

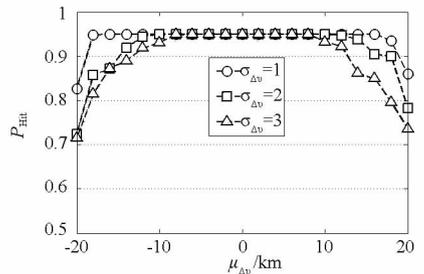


$$\mu_{\Delta v} = 0, \sigma_{\Delta v} = 1, \mu_{\Delta\theta} = 0, \sigma_{\Delta\theta} = 1$$

图 7 目标定位误差 $\Delta\rho$ 影响分析

Fig. 7 Impact analysis of target location error $\Delta\rho$

目标定位误差对导弹命中概率的影响如图 7 所示。当 $\mu_{\Delta\rho}$ 小于阈值 $\mu_{\Delta\rho}^{value}$ 时, 目标定位误差对导弹命中概率影响较小, 可以忽略, 且 $\sigma_{\Delta\rho}$ 越小, $\mu_{\Delta\rho}^{value}$ 越大, 如 $\sigma_{\Delta\rho} = 1, \mu_{\Delta\rho}^{value} \approx 8; \sigma_{\Delta\rho} = 2, \mu_{\Delta\rho}^{value} \approx 6; \sigma_{\Delta\rho} = 3, \mu_{\Delta\rho}^{value} \approx 4$ 。当 $\mu_{\Delta\rho}$ 大于阈值 $\mu_{\Delta\rho}^{value}$ 时, 导弹命中概率随着 $\mu_{\Delta\rho}$ 增加而下降, 并且 $\sigma_{\Delta\rho}$ 越小, 下降幅度越大。



$$\mu_{\Delta\rho} = 0, \sigma_{\Delta\rho} = 1, \mu_{\Delta\theta} = 0, \sigma_{\Delta\theta} = 1$$

图 8 目标航速大小误差 Δv 影响分析

Fig. 8 Impact analysis of target velocity error Δv

目标航速大小误差对导弹命中概率的影响如图 8 所示。当 $|\mu_{\Delta v}| \leq \mu_{\Delta v}^{value}$ 时, 目标航速大小误差对导弹命中概率影响较小, 可以忽略, 且 $\sigma_{\Delta v}$ 越小, $\mu_{\Delta v}^{value}$ 越大, 如 $\sigma_{\Delta v} = 1, \mu_{\Delta v}^{value} \approx 16; \sigma_{\Delta v} = 2, \mu_{\Delta v}^{value} \approx 12; \sigma_{\Delta v} = 3, \mu_{\Delta v}^{value} \approx 8$ 。当 $|\mu_{\Delta v}| > \mu_{\Delta v}^{value}$ 时, 导弹命中概率随着 $|\mu_{\Delta v}|$ 增大而下降。

目标航速相位误差对导弹命中概率的影响如图 9 所示。当 $|\mu_{\Delta\theta}| \leq \mu_{\Delta\theta}^{value}$ 时, 目标航速相位误差对导弹命中概率影响较小, 可以忽略, 且 $\sigma_{\Delta\theta}$ 越小 $\mu_{\Delta\theta}^{value}$ 越大, 如 $\sigma_{\Delta\theta} = 1, \mu_{\Delta\theta}^{value} \approx 15; \sigma_{\Delta\theta} = 2, \mu_{\Delta\theta}^{value} \approx 13; \sigma_{\Delta\theta} = 3, \mu_{\Delta\theta}^{value} \approx 10$ 。当 $|\mu_{\Delta\theta}| > \mu_{\Delta\theta}^{value}$ 时, 导弹命中概率随着 $|\mu_{\Delta\theta}|$ 增大而下降。

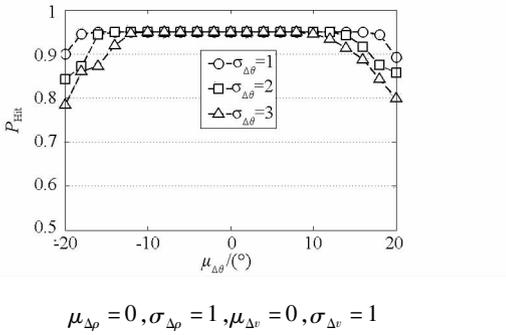


图 9 目标航速相位误差 $\Delta\theta$ 影响分析

Fig. 9 Impact analysis of target direction error $\Delta\theta$

4 结论

本文分析了卫星侦察信息精度对导弹打击海上移动目标命中概率的影响,对于提高导弹作战效能具有重要意义,为卫星及卫星应用装备发展规划、能力提升提供了依据。仿真结果表明,卫星侦察信息精度具有一个可接受区间,在可接受区间内,卫星信息精度对导弹命中概率的影响可忽略,在可接受区间外,导弹命中概率随着信息精度降低而下降,并且卫星信息精度方差越小,可接受区间越大。需要注意的是,本文假设目标做匀速直线运动,并且没有考虑导弹轨道误差对命中概率的影响,因此,仿真结果具有一定局限性。下一步主要研究工作是考虑目标具有不同机动方式以及导弹存在轨道误差的条件下,综合分析卫星侦察信息精度对导弹打击海上移动目标命中概率的影响。

参考文献 (References)

[1] 文江平. 卫星军事应用技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007: 10 - 12.
WEN Jiangping. Satellite military application technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 10 - 12. (in Chinese)

[2] Parashak III P M. The effects of quality and timeliness of targeting information on submarine employment of long range anti-ship cruise missiles [D]. Naval Postgraduate School, 2005.

[3] Park H R, Whang I H. An effective target selection algorithm for ASM (Anti-ship Missile) [C]//SICE-ICASE International Joint Conference, 2006.

[4] 陈超,沙基昌,毛赤龙,等. 双舰无源定位捕捉概率模型及仿真研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 622 - 625.
CHEN Chao, SHA Jichang, MAO Chilong, et al. Study on catch probability model and simulation for two-ship passive locating[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(4): 622 - 625. (in Chinese)

[5] 关启成,杨涤. 反舰导弹捕捉目标概率算法模型[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(7): 91 - 94.
GUAN Qicheng, YANG Di. Algorithm and model of target-catching probability for antiship missile [J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(7): 91 - 94. (in

Chinese)

[6] 王林,李守秀. 反舰导弹末制导雷达捕捉概率的分析计算方法研究[J]. 战术导弹技术, 2007(3): 12 - 15.
WANG Lin, LI Shouxu. Research on the analysis and calculation of acquisition probability of homing radar in anti-ship missile[J]. Tactical Missile Technology, 2007(3): 12 - 15. (in Chinese)

[7] 徐德坤,张士峰,杨华波. 攻击移动目标的末制导导弹命中概率评估方法[J]. 飞行器测控学报, 2008, 27(3): 90 - 94.
XU Dekun, ZHANG Shifeng, YANG Huabo. An assessment method for hit probability of the terminal guidance missile attacking the slow movable target [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(3): 90 - 94. (in Chinese)

[8] 汪新刚. 反舰导弹目标捕捉概率模型分析[J]. 战术导弹控制技术, 2006(3): 104 - 106.
WANG Xingang. Model analysis of target capture probability for anti-ship missile [J]. Control Technology of Tactical Missile, 2006(3): 104 - 106. (in Chinese)

[9] 邢昌凤,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, 2008.
XING Changfeng, LI Minyong, WU Ling. Effectiveness analysis of shipborne weapon systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)

[10] 王光辉,王宏伟,倪宝航. 反舰导弹被动射击方式命中模型研究[J]. 战术导弹技术, 2007(6): 20 - 24.
WANG Guanghui, WANG Hongwei, NI Baohang. Research on the hitting model of anti-ship missile in passive shoot mode [J]. Tactical Missile Technology, 2007(6): 20 - 24. (in Chinese)

[11] 陈力,张树森. 反舰导弹目标捕捉概率影响因素分析[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(6): 86 - 88.
CHEN Li, ZHANG Shusen. Analysis of the factors affecting anti-ship missile's target-acquiring probability [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(6): 86 - 88. (in Chinese)

[12] 来庆福,刘义,赵晶,等. 利用惯导信息的反舰末制导雷达抗干扰方法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(4): 86 - 91.
LAI Qingfu, LIU Yi, ZHAO Jing. The anti-jamming approach of the anti-ship terminal radar aided by INS information[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(4): 86 - 91. (in Chinese)

[13] 任义广. 信息质量对反舰导弹作战效果影响的分析方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
REN Yiguang. Research on methodology for analyzing the impact of information quality on the operational effects of anti-ship missiles[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)

[14] 梁晋文,陈林才,何贡. 误差理论与数据处理[M]. 北京:中国计量出版社, 2001.
LIANG Jinwen, CHEN Lincan, HE Gong. Error theory and data processing[M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 2001.

[15] 皮汉文,周德华. 对目标打击概率的数学模型及分析[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(6): 78 - 82.
PI Hanwen, ZHOU Suihua. Mathematical model of hit probability and its analysis[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2003, 15(6): 78 - 82. (in Chinese)

[16] 王光辉,严建钢,郭荔生,等. 目标位置误差存在条件下反舰导弹命中模型研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(1): 88 - 90.
WANG Guanghui, YAN Jiangang, GUO Lisheng, et al. Hitting model of anti-ship missile under errors of target position[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, 24(1): 88 - 90. (in Chinese)