



舷外有源诱饵对雷达末制导目标定位的 干扰动态分析

吴兆东, 胡生亮*, 罗亚松, 吴林罡

(海军工程大学兵器工程学院 武汉 430000)

【摘要】针对舷外有源诱饵对雷达末制导目标定位的干扰动态分析问题, 基于单脉冲雷达测角原理推导了角度定位偏差, 比较了振幅和差法与相位和差法的干扰差异。结合信号与宏观态势, 分析并提出实现有效干扰的导弹干扰临界距离和诱饵临界横向距离计算方法, 作为诱饵干扰策略的量化依据。通过搭建仿真平台, 模拟干扰动态过程, 验证了理论适用性, 并由此提出了机动式舷外诱饵动态干扰效果。结果表明, 有源诱饵实现有效干扰要求诱饵布放横向距离要大于临界横向距离, 诱饵机动特性可提高非合作条件下的干扰鲁棒性。

关键词 角度欺骗干扰; 动态分析; 干扰策略; 单脉冲雷达; 舷外有源诱饵
中图分类号 TN97 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2022282

Dynamic Analysis of Outboard Active Decoy Jamming on Target Location of Terminal Radar Guidance

WU Zhaodong, HU Shengliang*, LUO Yasong, and WU Lingang

(College of Weapons Engineering, Naval University of Engineering Wuhan 430000)

Abstract For dynamic analysis of outboard active decoy jamming on the terminal radar guidance, the angular deviation under active decoy jamming is derived based on the measuring principle of monopulse radar, and the jamming difference between sum-difference method of amplitude and the phase method is compared. Combined with the signal and the macro situation, the calculation methods of the critical jamming distance of missile and the critical lateral distance of decoy to achieve effective jamming are analyzed and proposed as the quantitative basis of decoy jamming strategy. By developing a simulation platform to simulate the dynamic process of active decoy jamming, the applicability of the theoretical analysis are verified. The results show that the requirement for the active decoy to achieve effective jamming during the terminal process of anti-ship missiles is that the decoy deployment distance should be greater than the critical lateral distance, and maneuvering decoy can improve the robustness of non-cooperative jamming.

Key words angular deception jamming; dynamic analysis; jamming strategy; monopulse radar; outboard active decoy

单脉冲雷达测角技术具有较好的测角精度和抗干扰性^[1-2], 被广泛地应用于反舰导弹的末制导阶段。针对雷达导引头, 舷外有源诱饵是一种常用的干扰手段, 可以对单脉冲雷达进行角度欺骗^[3-5]。对反舰导弹而言, 角度欺骗干扰引起的跟踪方位偏差, 可以使被保护舰艇脱离跟踪波束, 这样即使导弹后期重新锁定目标, 也会因过载有限而脱靶。

原理上, 舷外有源诱饵与被保护目标位于同一

跟踪波束中组成了不可分辨多目标^[6-7]。文献 [8] 以无源目标为例, 指出两个不可分辨目标的瞬时角度响应是两个目标角度的复数形式的电压合成质心。文献 [9] 将舷外有源诱饵干扰合成质心等效为箔条质心干扰, 提出了一种“三角形”干扰态势定性分析方法。文献 [10] 基于雷达测向系统模型, 从场的角度分析了舷外有源诱饵对雷达测向系统的影响。

收稿日期: 2022-08-21; 修回日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(61601491); 湖北省自然科学基金(2017CFB377)

作者简介: 吴兆东(1995-), 男, 博士生, 主要从事雷达精确制导与对抗方面的研究。

*通信作者: 胡生亮, E-mail: q13302168921@163.com

应用方面, 文献 [11] 通过将保护雷达与诱饵进行组网, 针对反辐射导引头, 提出了基于优化态势的随机相位及振幅干扰策略。文献 [12-13] 指出脱靶距离始终位于诱饵与目标之间, 提出有效干扰要求干信比应在 5 dB 以上, 并基于功率原则, 通过设置预定干扰对抗仿真场景, 分析得出在左舷或者右舷 70° 至 110° 布放有源诱饵可达到较好的干扰效果。文献 [14] 在“三角形”干扰态势基础上, 考虑诱饵转发延迟的影响, 提出了舷外诱饵干扰预置占位区域。

对于导弹制导过程中态势变化对干扰的影响, 文献 [15-16] 基于空射诱饵提出了一种基于时域信号分析的仿真方法, 考虑飞机机动、导弹制导律、飞机雷达截面变化等要素, 给出了机载平台应在导弹距离 2 km 外发射诱饵的应用策略; 文献 [17] 结合对抗态势变化, 分析指出舷外有源诱饵有效干扰应使诱偏角度大于跟踪波束的一半, 其基于态势变化的分析可定性指导舷外有源诱饵干扰策略。

从导弹制导的动态过程看, 舷外有源诱饵的干扰效果与某一时刻的态势有关, 称之为静态干扰效果; 干扰改变了导弹制导与机动过程, 引起的态势改变反过来影响干扰效果, 由此形成了复杂且互相耦合的反馈回路。以上研究主要集中于静态干扰分析或者态势动态变化其中一个侧面。针对整个末制导阶段舷外有源诱饵对反舰导弹的干扰动态问题, 本文将态势动态变化与静态干扰分析相结合, 首先基于单脉冲测角原理, 推导舷外有源诱饵干扰下的角度定位偏差, 接着从舰船、诱饵与反舰导弹三者的宏观态势层面, 分析反舰导弹距离和导引头跟踪波束方向增益对干扰的影响, 提出了诱饵临界布放距离的计算方法, 最后通过构建仿真环境, 实现反舰导弹制导机动与诱饵干扰的动态推演过程, 验证理论分析合理性与适用性, 分析舷外有源诱饵采取机动手段对干扰效果提升作用。

1 干扰信号分析

单脉冲雷达测角技术是利用单个脉冲获取被测目标的方位角度, 具体可分为相位和差法与振幅和差法。舷外有源诱饵干扰的一般场景如图 1 所示, R_j 表示有源诱饵与反舰导弹的距离, R_t 表示舰船与反舰导弹的距离, θ_0 表示导引头当前的指示角, θ_e 表示诱饵与舰船相对于反舰导弹的半张角。

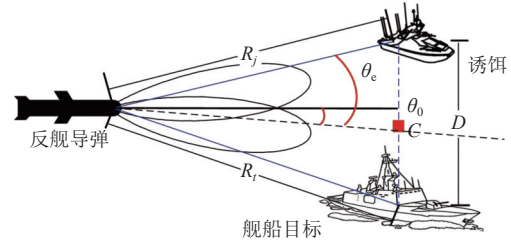


图 1 舷外有源诱饵干扰场景

1.1 振幅和差测角及干扰偏差

振幅和差法测角利用了两个不同空间指向的波束对同一方向信号增益的差异, 从中获取目标的方位信息。假设雷达天线方向图函数的为 $f(\theta)$, 两个不同指向的波束可记为:

$$\begin{cases} f_1(\theta) = f(\theta - \Delta\theta) \\ f_2(\theta) = f(\theta + \Delta\theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 为两个波束等信号增益所在方向; $\Delta\theta$ 为波束最大值偏离等信号增益角度。假设信号形式为 $s(t)$, 和差通道增益表达式为:

$$\begin{cases} S_g(\theta) = s(t)f(\theta + \Delta\theta) + s(t)f(\theta - \Delta\theta) \\ D_g(\theta) = s(t)f(\theta + \Delta\theta) - s(t)f(\theta - \Delta\theta) \end{cases} \quad (2)$$

利用一阶近似, 式 (2) 可以表示为:

$$\begin{cases} S_g(\theta) \approx 2s(t)f(\Delta\theta) \\ D_g(\theta) \approx 2\theta s(t)f'(\Delta\theta) \end{cases} \quad (3)$$

进而可得:

$$\frac{D_g(\theta)}{S_g(\theta)} = \frac{f'(\Delta\theta)}{f(\Delta\theta)}\theta = \kappa\theta \quad (4)$$

振幅和差法的适用范围在天线方向最大增益附近的线性区域, 当目标偏离天线指示角较大时, 由式 (4) 计算得来的角度将与实际情况有较大偏差。

假设舰船所在方位角度为 θ_1 , 舷外诱饵所在方位角度为 θ_2 , 诱饵干扰信号相对于舰船回波信号的归一化电压为 a_s , 相位差为 ϕ_s 。舷外诱饵干扰背景下的和差通道信号分别为:

$$\begin{aligned} S_{\text{jam}} &= \left(\begin{array}{l} f(\Delta\theta + \theta_1) + a_s e^{j\phi_s} f(\Delta\theta + \theta_2) \\ + f(\Delta\theta - \theta_1) + a_s e^{j\phi_s} f(\Delta\theta - \theta_2) \end{array} \right) \approx \\ & 2(1 + a_s e^{j\phi_s}) f(\Delta\theta) \\ D_{\text{jam}} &= \left(\begin{array}{l} f(\Delta\theta + \theta_1) + a_s e^{j\phi_s} f(\Delta\theta + \theta_2) \\ - f(\Delta\theta - \theta_1) - a_s e^{j\phi_s} f(\Delta\theta - \theta_2) \end{array} \right) \approx \\ & 2(\theta_1 + a_s e^{j\phi_s} \theta_2) f'(\Delta\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

根据图 1, $\theta_1 = \theta_0 + \theta_e$, $\theta_2 = \theta_0 - \theta_e$, 进一步可得:

$$\begin{aligned} \frac{D_{\text{jam}}}{S_{\text{jam}}} &= \frac{f'(\Delta\theta)}{f(\Delta\theta)} \left(\frac{\theta_1 + a_s e^{j\phi_s} \theta_2}{1 + a_s e^{j\phi_s}} \right) = \\ & \frac{f'(\Delta\theta)}{f(\Delta\theta)} \left(\theta_0 + \left(\frac{1 - a_s^2}{1 + a_s^2 + 2a_s \cos(\phi_s)} \right) \theta_e \right) \end{aligned} \quad (6)$$

令舷外诱饵干扰下的指示角度 θ_m , 则其结果为:

$$\theta_m = \frac{\theta_1 + a_s e^{j\phi_s} \theta_2}{1 + a_s e^{j\phi_s}} = \theta_0 + \left(\frac{1 - a_s^2}{1 + a_s^2 + 2a_s \cos(\phi_s)} \right) \theta_e \quad (7)$$

1.2 相位和差测角及干扰偏差

相位和差法测角利用多组接收天线接收同一信号时的波程差, 从相位信息中提取目标的角度信息^[18]。对反舰导弹末制导而言, 仅考虑水平面上的接收信号, 两组接收天线的接收信号可表示为:

$$\begin{cases} s_1 = e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_s}{2} \sin(\theta)} f(\theta) \\ s_2 = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_s}{2} \sin(\theta)} f(\theta) \end{cases} \quad (8)$$

式中, d_s 为接收天线的间距; λ 为信号波长; $f(\theta)$ 为接收电压方向的增益函数。和差通道的信号可表示为:

$$\begin{cases} S_p = \left[e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_s}{2} \sin(\theta)} + e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_s}{2} \sin(\theta)} \right] f(\theta) \\ D_p = \left[e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_s}{2} \sin(\theta)} - e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_s}{2} \sin(\theta)} \right] f(\theta) \end{cases} \quad (9)$$

和差通道的信号比值为:

$$\frac{D_p}{S_p} = j \tan\left(\frac{\pi d_s}{\lambda} \sin(\theta)\right) \quad (10)$$

舰船所在方位角度为 θ_1 , 舷外诱饵所在方位角度为 θ_2 , 根据式 (9), 舰船以及诱饵的和差通道电压方向增益可以分别表示为:

$$\begin{cases} S_t = 2 \cos\left(\frac{\pi}{\lambda} d_s \sin(\theta_1)\right) f(\theta_1) \\ D_t = 2j \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d_s \sin(\theta_1)\right) f(\theta_1) \\ S_d = 2 \cos\left(\frac{\pi}{\lambda} d_s \sin(\theta_2)\right) f(\theta_2) \\ D_d = 2j \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d_s \sin(\theta_2)\right) f(\theta_2) \end{cases} \quad (11)$$

根据诱饵信号与舰船回波信号之间的相位与振幅关系, 和通道与差通道的归一化表达形式分别为:

$$\begin{cases} S'_{\text{jam}} = S_t + a_s e^{j\phi_s} S_d \\ D'_{\text{jam}} = D_t + a_s e^{j\phi_s} D_d \end{cases} \quad (12)$$

将 a_s 用天线方向图再次进行归一化, 令:

$$a = a_s \frac{f(\theta_2)}{f(\theta_1)} \quad (13)$$

将式 (11)~式 (13) 代入到式 (10) 中, 由 $\theta_1 = \theta_0 + \theta_e$, $\theta_2 = \theta_0 - \theta_e$, 利用三角函数可以得到在舷外有源诱饵干扰下, 雷达导引头的指示角 θ'_m 有如下关系式

成立:

$$\begin{aligned} \tan\left(\frac{\pi}{\lambda} d_s \sin(\theta'_m)\right) &\approx \tan\left(\frac{\pi}{\lambda} d_s \sin(\theta_0)\right) + \\ \tan\left(\frac{\pi}{\lambda} d_s \cos(\theta_0)\theta_e\right) &\left(\frac{1 - a^2}{1 + a^2 + 2a \cos(\phi_s)}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

当 θ_0 与 θ_e 足够小时, 可得到雷达导引头的指示角表达式为:

$$\theta'_m = \theta_0 + \theta_e \left(\frac{1 - a^2}{1 + a^2 + 2a \cos(\phi_s)} \right) \quad (15)$$

比较式 (15) 与式 (7) 可知, 舷外诱饵干扰对振幅和差法及相位和差法的影响结果都是复电压质心。式 (13) 显示了两种方法是方向增益处理的差异, 对于相位和差法而言, 若诱饵与舰船都在波束主瓣内, $f(\theta_2) \approx f(\theta_1)$, 此时有 $a = a_s$ 。

考虑到雷达导引头跟踪波束通常比较窄, 诱饵与目标容易出现不同时位于主瓣波束内时的情形, 而对振幅和差法而言, 主瓣以外的诱饵会在式 (5) 中引入高阶项, 与天线方向图具体表达形式有关, 无法直接套用式 (13) 来抵消方向增益变化的影响。

尽管形式上存在差异, 但是如果诱饵位于主瓣波束外, 上述推导表明无论导引头采用哪种测角方法, 诱饵都无法起到干扰效果。根据前文舷外诱饵干扰的推导, 为进一步考虑天线方向增益影响, 本文主要基于式 (13) 做进一步的分析。

1.3 非相干信号相位随机性分析

在一段连续的量测过程中, 可假设信号振幅是固定的, 即 a 的幅值恒定, 而由于诱饵干扰信号与舰船的回波信号难以形成相干, a 的相位是随机的。从式 (15) 及式 (7) 可知, 相位的非稳定性会引起指示角处于非稳定的状态。与信号积累处理类似, 通过多个脉冲获得多次角度测量结果, 从平均值和加权均值分析诱饵干扰下的角度测量期望值。令:

$$G(\phi_s) = \frac{1 - a^2}{1 + a^2 + 2a \cos(\phi_s)} \quad (16)$$

若在慢拍测量结果中 a 值保持恒定, ϕ_s 在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 服从均匀分布, 直接从平均值的角度分析即求 $G(\phi_s)$ 的期望值^[8], 满足如下关系:

$$E[G] = \begin{cases} 1 & a < 1 \\ 0 & a = 1 \\ -1 & a > 1 \end{cases} \quad (17)$$

上式结果表明, 当 $a \neq 1$ 时, 多次测角的期望均值会指向振幅较强的信号源, 即会在舰船与诱饵中指向其中一个; 当 $a = 1$ 时, 导引头指向两者的中点, 但是出现 $a = 1$ 的概率可以认为是 0。

加权平均的做法是基于和通道电压大小,给每次测量的结果赋予权重。假设测量过程是连续的,则导引头指示角可以写成差通道信号的积分与和通道信号积分的比值,即为:

$$\overline{\theta_{m'}} = \frac{\int_0^{2\pi} [\theta_1 + \theta_2 a^2 + (\theta_1 + \theta_2) a \cos(\phi_s)] d\phi_s}{\int_0^{2\pi} [1 + 2a \cos(\phi_s) + a^2] d\phi_s} = \frac{\theta_1 + a^2 \theta_2}{1 + a^2} \quad (18)$$

上式表明,在舷外有源诱饵干扰下,测角加权均值是诱饵信号与舰船回波信号的“功率质心”,并且仅和方向图归一化后的电压大小有关,而与相对相位无关。

式(17)与式(18)是基于 a 的幅值相对恒定这一前提,而在实际中, a 通常难以保持一个恒定值。假设 a 为一个随机变量,且与 ϕ_s 相互独立。对于平均值法,若记 $a > 1$ 的概率为 $P(a > 1)$, $a < 1$ 的概率为 $P(a < 1)$,结合式(17),导引头指示角会概率指向其中振幅较大的信号源,期望指示角可写成:

$$\overline{\theta'_m} = P(a < 1)\theta_1 + P(a > 1)\theta_2 \quad (19)$$

对于加权平均法,由于是对和差通道单独取期望值,式(18)可进一步写成:

$$\overline{\theta_{m'}} = \frac{\theta_1 + E[a^2]\theta_2}{1 + E[a^2]} \quad (20)$$

式(19)与式(20)分别表明:平均法测角期望指向与信号振幅起伏的概率分布有关,而加权平均法测角的期望指向与信号的期望功率有关。从干扰与抗干扰的角度看,一般求平均值的方法只需要干扰功率大于目标回波功率的概率较大,更容易使得跟踪波束被诱偏,而加权平均法则对干扰功率期望值达到一定要求,可以起到一定的抗干扰作用。

2 雷达末制导跟踪态势分析

2.1 导弹距离变化影响

在末制导段,为了能够对目标持续跟踪,需将天线方向增益中心位置对准目标。考虑到反舰导弹雷达导引头波束较窄,并且导弹与舰船之间的态势变化快,在舷外有源诱饵干扰下,导引头会形成非稳定跟踪。

根据雷达方程,舰船的方位角度为 θ_1 ,其目标回波功率的表达式为:

$$P_{rt} = \frac{P_t G_t(\theta_1) \sigma}{(4\pi R_t^2)^2} A_e(\theta_1) = \frac{P_t G_t(\theta_1) \sigma G_t(\theta_1) \lambda^2}{(4\pi R_t^2)^2 4\pi} \quad (21)$$

式中, P_t 为雷达辐射功率; $G_t(\theta)$ 为天线方向功率增益; A_e 为天线有效孔径; σ 为舰船的雷达截面积。同理,舷外有源诱饵干扰方程可以写成:

$$P_{rj} = \frac{P_j G_j}{4\pi R_j^2} A_e(\theta_2) = \frac{P_j G_j G_t(\theta_2) \lambda^2}{4\pi R_j^2 4\pi} \quad (22)$$

实现有效角度欺骗的前提是在距离上位于同一跟踪波门中,即 $R_t \approx R_j \triangleq R$ 。在前文测角的分析中,和差通道已经结合了 A_e ,不需要再代入计算。因此,由式(21)和式(22)可以得出 a_s 表达式为:

$$a_s^2 = \frac{P_j G_j (4\pi R^2)^2}{4\pi R^2 P_t G_t(\theta_1) \sigma} = \frac{P_j G_j 4\pi R^2}{\sigma P_t G_t(\theta_1)} \quad (23)$$

当诱饵与舰船均位于雷达导引头的主瓣内时, $G_t(\theta_2) \approx G_t(\theta_1) \triangleq G_r$,且 $a = a_s$,此时归一化干扰信号电压只和反舰导弹的距离呈线性关系。随着导弹距离 R 逐渐减小, a 逐渐减小,舷外诱饵所引起的角度定位偏差会随着导弹距离接近而逐渐减弱。

2.2 导引头指向变化

反舰导弹末制导时间较短,舰船与诱饵之间的位置变化较小,但是由于跟踪波束较窄并且反舰导弹作为高速机动平台,舰船、诱饵和反舰导弹的态势变化迅速,如图2所示。

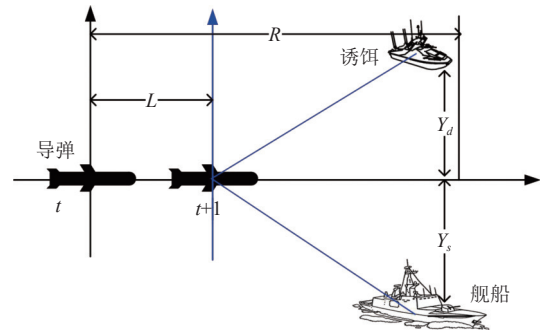


图2 诱饵干扰下的反舰导弹跟踪态势变化示意图

图中,从 t 时刻到 $t+1$ 时刻,反舰导弹经过的距离为 ΔL , θ_d 表示诱饵相对于导引头跟踪波束的偏角, θ_s 表示舰船相对于导引头波束方向的偏角, Y_d 与 Y_s 分别表示诱饵与舰船相对于导弹目标点的距离, $Y_d + Y_s$ 表示为诱饵相对于导弹来袭方位与舰船的横向距离,记为 Y_h 。假设导引头指向为反舰导弹的飞行方向,则 θ_d 与 θ_s 的变化如下:

$$\begin{cases} \theta_d(t) \approx \frac{Y_d}{R} \\ \theta_s(t) \approx \frac{Y_s}{R} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \theta_d(t+1) \approx \frac{Y_d}{R-L} \\ \theta_s(t+1) \approx \frac{Y_s}{R-L} \end{cases} \quad (24)$$

结合式(23)与式(13),将电压增益统一表示为功率增益,可得:

$$a^2 = \frac{P_j G_j 4\pi R^2}{\sigma P_t} \frac{G_t(\theta_2)}{[G_t(\theta_1)]^2} \quad (25)$$

相较于多次测角, 宏观态势的变化发生在极短时间内, 因此, 式(25)在一定程度上可反映某一时刻固定态势下诱饵相对于干扰功率的期望均值。

在导弹机动过程中, 即使导引头指向恒定, 偏角的变化也会引起诱饵以及舰船所在的天线方向增益变化, 从而引起干扰效果变化。从图2可以看出, 若 $Y_d > Y_s$, 则导弹机动后, 诱饵偏角的增量要大于舰船偏角的增量, 其方向增益的衰减程度高于舰船, 会使得导引头波束指向进一步向舰船靠近, 从而导致干扰失效。舷外诱饵要想起到有效干扰, 要求角度偏离程度大于诱饵与舰船相对于反舰导弹的张角一半以上, 相较于文献[17], 本文从态势推导给出了有效干扰态势的定量表述, 是干扰策略推导的前提。

2.3 诱饵干扰策略分析

随着距离接近, 诱饵在信号电压上的优势会逐渐降低, 需要通过反舰导弹、舰船和诱饵相对态势的变化, 尤其是偏角的变化, 使舰船率先脱离跟踪波束, 这要求横向距离不能太小。由前文已知 $a = 1$ 时, $Y_d = Y_s$ 诱饵与舰船相对于跟踪波束呈对称态势, 有 $G_t(\theta_1) = G_t(\theta_2)$ 。将 $a = 1$ 代入式(25), 计算得出此时反舰导弹距离为:

$$R_e(\theta_1) = \sqrt{\frac{\sigma P_t G_t(\theta_1) G_t(\theta_1)}{P_j G_j 4\pi G_t(\theta_2)}} = \sqrt{\frac{\sigma P_t G_t(\theta_1)}{P_j G_j 4\pi}} \quad (26)$$

把它定义为导弹干扰临界距离, 此时诱饵相对于舰船的横向距离为 $\theta_1 R_e(\theta_1)$ 。假设导引头的波束宽度为 $\theta_{0.5}$, 则有:

$$\begin{cases} \theta_1 + \theta_2 = \theta_{0.5} \\ \theta_1 = \theta_2 \end{cases} \quad (27)$$

从而可以进一步得到导弹干扰临界距离下的诱饵横向距离为:

$$Y_e = \theta_{0.5} \cdot \sqrt{\frac{\sigma P_t G_t\left(\frac{\theta_{0.5}}{2}\right)}{P_j G_j 4\pi}} \quad (28)$$

式(28)表征了干扰信号与态势之间的关系。此时的诱饵横向距离定义为临界横向距离。若诱饵与舰船的横向距离 $Y_h < Y_e$, 则临界位置对应的 $\theta_1 + \theta_2 < \theta_{0.5}$, 此时干扰临界距离 $R_e(\theta_1) > R_e(\theta_{0.5})$, 并且诱饵与舰船仍可认为在同一波束内, 在此之后, 跟踪波束会向舰船方位倾斜, 从而导致干扰失败, 反之, 若 $Y_h > Y_e$, 则可以进行有效干扰。

诱饵干扰是一种非合作式的对抗, 一般情况下

难以知道反舰导弹雷达导引头的具体开机时间以及导引头的相关参数。依托机动平台, 动态改变干扰态势是一种可行策略^[19], 只需要在反舰导弹到达 $R_e(\theta_{0.5})$ 以前, 使干扰态势满足式(28)即可。

3 仿真分析

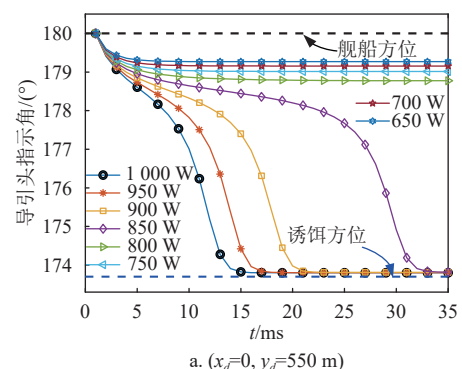
舷外有源诱饵对抗反舰导弹是一个动态过程, 由于导引头测角是基于重复脉冲, 仿真过程具有导引头测角过程的高频采样特点和态势宏观变化的低频采样特点。对此, 基于PyQt5, 搭建了包含干扰角度计算、数据处理、导弹制导等要素的仿真环境。诱饵、舰船和反舰导弹的各个参数如表1所示。

表1 仿真参数

仿真要素	参数	初始值
舰船	位置 (x_s, y_s) /m	(0, 0)
	机动速度 v_s /kn	0
	雷达截面积 σ /dBm ²	40
舷外诱饵	位置 (x_d, y_d) /m	(0, 550)
	机动速度 v_d /kn	0
	机动方向 dir_d (°)	90
	方向增益 G_j /dB	3
	辐射功率 P_j /W	500
	波束宽度/(°)	60
	极化方式	水平极化
反舰导弹	位置 (x_m, y_m) /km	(5, 0)
	脉冲重复周期/ms	0.1
	辐射功率 P_t /kW	10
	载频/GHz	20
	波束宽度 $\theta_{0.5}$ (°)	5
	天线方向函数	高斯波束 ^[20]
	滤波器	$\alpha\beta$
	机动速度/Ma	1
	最大过载/g	10
	制导律	比例导引

3.1 指示角偏移

反舰导弹距离为5 km, 有源诱饵位于不同横向距离上, 以不同的有效辐射功率进行实施干扰时, 雷达导引头指示角调整指向的变化情况如图3所示。



a. $(x_d=0, y_d=550 \text{ m})$

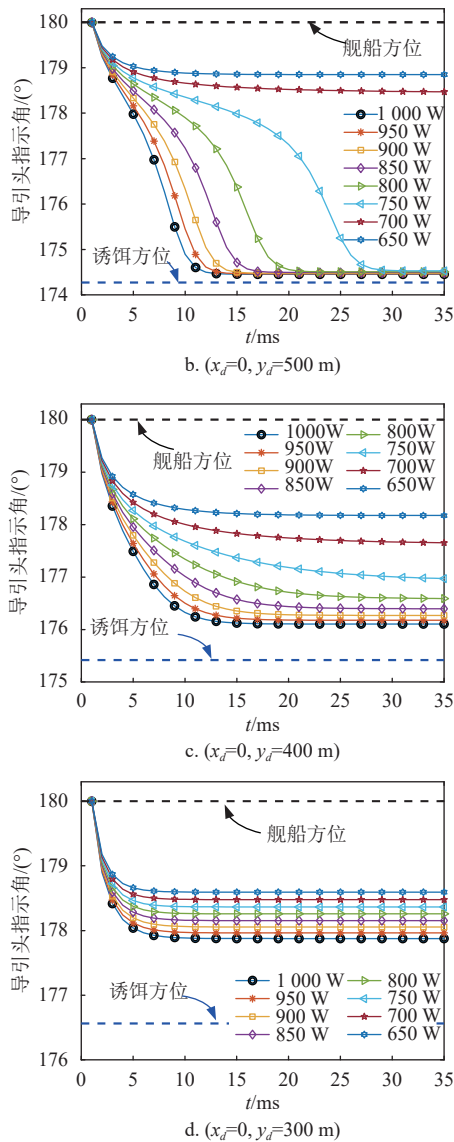


图 3 雷达导引头指示角在不同诱饵干扰功率下的变化

图 3a 和图 3b 中，诱饵横向布放距离较远，指示角收敛过程呈现两种情形，一种情况是当功率较大时，指示角迅速收敛于诱饵方位；另一种情况是当干扰功率下降时，跟踪波束向诱饵方位收敛的趋势变缓，并仅能产生较小的角度欺骗干扰效果。图 3c 和图 3d 中，诱饵横向距离靠近舰船，此时表现出的主要规律是诱饵功率越大，干扰效果越好。诱饵所处的方位是干扰诱偏角度的上限。

结合理论分析可知，反舰导弹导引头跟踪过程中需要将波束中心持续对准目标，要求式 (18) 的输出为 0。在诱饵干扰下，由于波束较窄，调整导引头的波束指向时会引起增益变化。令式 (18) 为 0，并将式 (27) 代入到式 (18) 中，有：

$$\frac{\theta_1 [G_t(\theta_1)]^2}{\theta_2 G_t(\theta_2)} = \frac{P_j G_j 4\pi R^2}{P_t} \quad (29)$$

当诱饵的横向距离确定，在调整导引头指向的过程中， $\theta_1 + \theta_2 = \theta_{\text{const}}$ 。代入式 (29) 中，可定义函数 $h(\theta_1)$ 和符号 K 如下：

$$h(\theta_1) \triangleq \frac{\theta_1 [G_t(\theta_1)]^2}{(\theta_{\text{const}} - \theta_1) G_t(\theta_{\text{const}} - \theta_1)} = \frac{P_j G_j 4\pi R^2}{P_t} \triangleq K \quad (30)$$

可知，在固定态势下， K 仅与导引头和诱饵的功率有关。当功率确定时，诱饵引起的导引头角度的偏差收敛值可通过式 (30) 计算得出。当诱饵位于 (0 m, 550 m) 和 (0 m, 300 m) 的位置时， $h(\theta_1)$ 随 θ_1 变化的图像如图 4 所示。

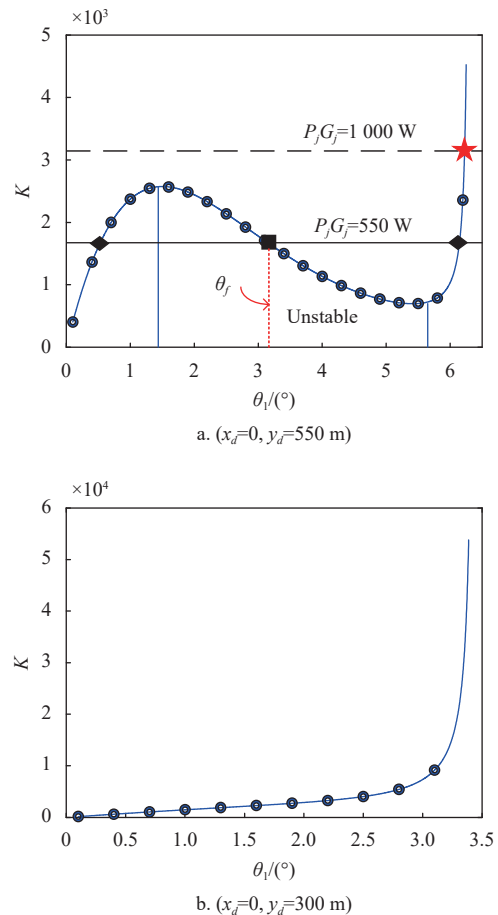


图 4 $h(\theta_1)$ 函数图像

在图 4a 中，诱饵横向距离为 550 m，接近雷达跟踪波束的边缘，此时 θ_1 增加会引起了诱饵方向增益快速变化， $h(\theta_1)$ 曲线变化规律呈现出先增后减的情况；在图 4b 中，诱饵与舰船均位于波束主

瓣内, 方向增益不会发生较大变化, 变化趋势是单调的。

当雷达导引头与舷外有源诱饵的参数固定时, K 的取值是一定的, 根据图4可以确定对应 K 值下的指示角。图4a的横虚线对应于图3a中的 $P_j G_j = 1000 W$ 时的曲线, 最终雷达导引头会收敛于“☆”标注的位置。而当 $P_j G_j = 550 W$ 时, 由图4a中的横实线可知, 存在3个可能的指示角。中间方形“□”位置方向增益梯度变化较大, 是“非稳定”位置, 记为 θ_f 。由此可得推论, 当导引头初始角度小于 θ_f 时, 指向靠近目标所在方位, 当大于 θ_f 时, 指向靠近诱饵所在方位。在此条件下, 通过设置不同初始指示角, 雷达导引头指示角收敛的过程如图5所示, 结果说明了推论的正确性。

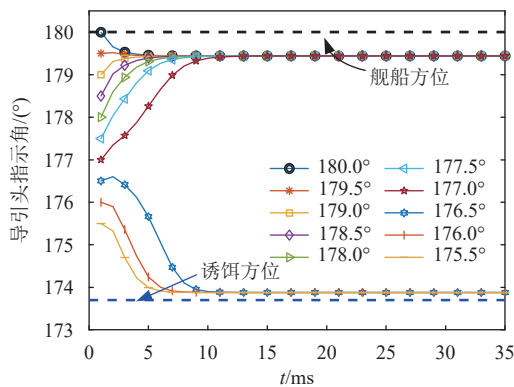
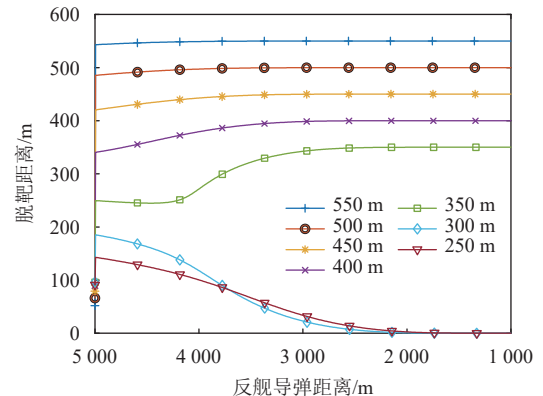


图5 不同初始指示角下导引头指示角变化

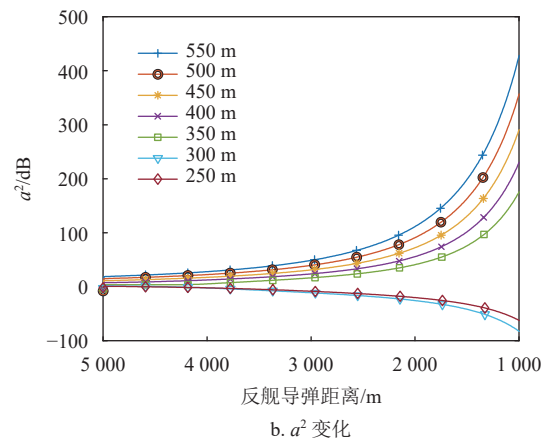
综上, 舷外有源诱饵横向布放位置是影响导引头指示角的重要因素, 当诱饵距离目标较近时, 可以获得相对稳定干扰效果, 但是受限于诱饵方位产生的角度欺骗上限, 无法产生较大的角度欺骗干扰效果; 而距离目标较远布放诱饵时, 因雷达导引头波束较窄, 可以产生的理想干扰效果是使舰船目标远离跟踪波束, 但这种做法存在由于有效干扰功率不足而无法诱偏导引头的风险, 尤其是存在信号噪声、测量误差、极化失配、频谱失配等情况下。

3.2 导弹脱靶距离分析

由导引头定位偏差, 结合反舰导弹机动过程, 仿真分析反舰导弹受干扰后的脱靶情况。根据表1中反舰导弹、诱饵和舰船的初始态势数据, 脱靶距离可看成是反舰导弹经过 y 轴时的纵坐标。当舷外有源诱饵干扰功率 $P_j G_j = 1000 W$, 位于不同的横向距离处进行干扰, 反舰导弹脱靶距离的变化如图6所示。



a. 脱靶距离的变化



b. a^2 变化

图6 脱靶距离及 a^2 随导弹接近的变化

图6a结果显示, 当诱饵横向距离在350 m以上时, 随着导弹距离接近, 舷外诱饵可以将跟踪波束拖引至接近自身所在方位而远离目标; 当诱饵横向距离在300 m以内时, 随着导弹距离接近, 干扰效果逐渐减弱, 脱靶距离会逐渐减少直至导弹命中舰船。图6b中 a^2 的变化表明, 在反舰导弹接近过程中, 诱饵将波束主瓣拖引至其所在方位, 使得舰船脱离跟踪波束, 从而引起了 a^2 迅速增大。

结合理论分析部分, 将导引头与诱饵雷达相关参数代入式(30), 其中 $P_j G_j = 1000 W$, $P_t = 10 kW$, $G_t(2.5^\circ) \approx 33 dB$, 此时可得干扰临界距离 $Y_e \approx 348 m$ 。由此可知, 当有源诱饵布放的横向距离大于348 m时, 可以实现有效干扰, 而当诱饵布放的横向距离小于348 m时, 诱饵最终会干扰失败, 与图6仿真结果一致。

3.3 诱饵机动影响

当前舷外有源诱饵多搭载于无人平台上, 具备可机动性, 舷外有源诱饵可主动改变干扰态势。对此, 结合前文理论, 对机动式诱饵的动态干扰过程进行仿真分析。

在3.1和3.2节参数设置下, 当干扰临界距离为 $Y_e \approx 348 m$ 时, 此时反舰导弹对应的 $R_e \approx 4 km$,

在此次仿真中设置的导弹初始距离为 5 km, 只需要在反舰导弹到达 4 km 之前, 舷外有源诱饵布放的横向距离超过 Y_e , 仍可实现有效干扰。记导弹速度为 v_m , 则诱饵的机动速度应满足如下关系:

$$\frac{v_d}{v_m} > \frac{Y_e - Y_h}{R - R_e} \quad (31)$$

式中, 要求 $R > R_e$, $Y_e > Y_h$ 。设置初始状态下诱饵位置为 (0 m, 320 m), 即 $Y_h = 320$ m, 此时实现有效干扰需要诱饵的机动速度应满足 $v_d > 0.03v_m$ 。分别设置诱饵机动速度为 7.5、10、12.5 m/s, 导弹的速度分别为 0.8、1.0、1.5 Ma, 得到脱靶距离变化曲线如图 7 所示。

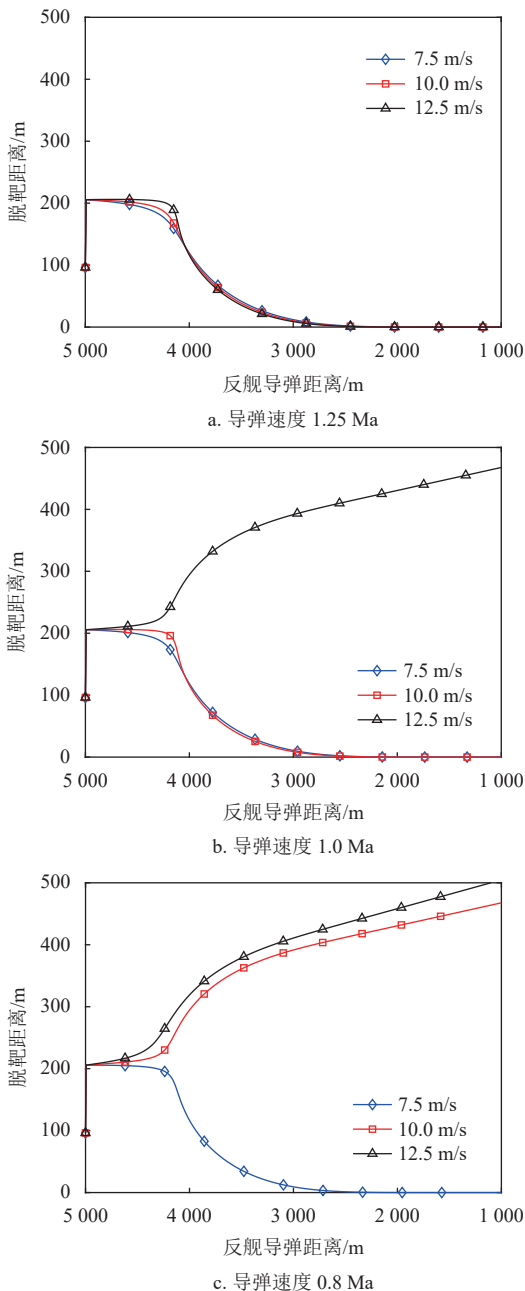


图7 诱饵机动下反舰导弹脱靶距离

理论分析表明, 当 $v_m = 1.25$ Ma 时, 诱饵机动速度应 ≥ 12.75 m/s, $v_m = 1.0$ Ma 时, 诱饵机动速度应 ≥ 10.20 m/s, $v_m = 0.8$ Ma 时, 诱饵机动速度应 ≥ 8.16 m/s。图 7 仿真结果表明, 诱饵机动速度在满足上述理论值时, 可实现有效干扰, 与理论分析结果是一致的。

在实战中, 敌方反舰导弹导引头参数是未知的, 临界横向距离、反舰导弹干扰临界距离均是不确定的。因此, 盲目设置诱饵横向距离容易导致 4.1 中诱饵信号位于主瓣以外的情形或者布放横向距离不足而导致干扰失败。以导引头的发射功率为例, 若发射功率在 10~50 kW 之间分布, 其临界距离如图 8 所示。

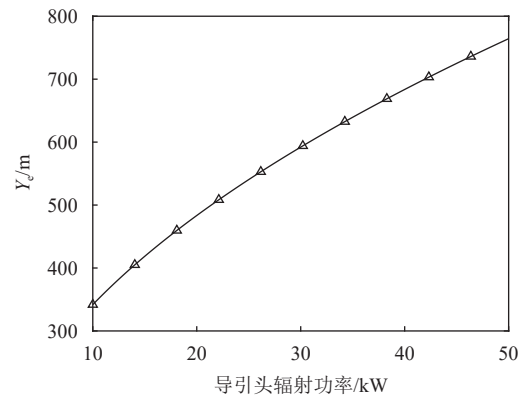


图8 不同导引头辐射功率下诱饵布放临界距离

从图 8 中可知, 导引头辐射功率的不确定性对诱饵布放横向距离产生较大影响, 其功率越大, 要求横向布放距离越大。若反舰导弹满足干扰距离 R_e 要求, 采用机动式有源诱饵可覆盖部分布放临界距离, 在导弹从而实现有效干扰。上述分析进一步说明了理论适用性, 同时表明机动式诱饵可提高实现有效干扰的鲁棒性。

4 结束语

针对舷外有源诱饵对单脉冲工作体制反舰导弹的角度欺骗干扰动态分析问题, 本文基于单脉冲测角原理, 从信号层面推导了舷外有源诱饵角度欺骗干扰效果, 比较相位和差法与振幅和差法的干扰响应差异, 分析了诱饵信号与舰船回波信号的非相干性对角度定位偏差的影响, 并结合反导态势, 提出了反舰导弹干扰临界距离和诱饵临界横向距离的策略量化依据。通过搭建多要素仿真平台, 验证了理论分析适用性及其对干扰策略的指导作用。

舷外有源诱饵实现有效干扰的目标是使被保护舰船脱离跟踪波束, 理论推导与仿真结果表明, 布放诱饵的横向距离应超过干扰临界横向距离, 采取

机动手段主动改变诱饵态势可提高干扰效果,本文方法可对舷外有源诱饵干扰策略制定进行定量指导。本文主要是在第三方视角研究舷外有源诱饵在干扰态势雷达对抗参数已知条件下的理想干扰效果,而实战中是非合作对抗。下一步将重点考虑反舰导弹各参数未知情形下,结合本文所提量化计算方法,评估舷外有源诱饵干扰效能,分析研究多舷外有源诱饵干扰策略,提高实战中诱饵干扰的有效性。

参 考 文 献

- [1] WANG S L, XU Z H, YANG X, et al. Efficient and unambiguous two-target resolution via subarray-based four-channel monopulse[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 885-900.
- [2] AN D J, LEE J H. Performance analysis of amplitude comparison monopulse direction-of-arrival estimation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1246.
- [3] JIANLU W, XIONG X, HUANYAO D, et al. Method for four-channel monopulse radar to resist dual-source angle deception jamming[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(21): 7493-7497.
- [4] KANTER I. Varieties of average monopulse responses to multiple targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1981(1): 25-28.
- [5] 齐鸿坤, 张海峰, 姬正一, 等. 反舰导弹抗舷外有源质心干扰仿真研究[J]. *电光与控制*, 2022, 29(7): 57-61.
 QI H K, ZHANG H F, JI Z Y, et al. Simulation study on anti-ship missile against outboard active centroid jamming[J]. *Electronics Optics and Control*, 2022, 29(7): 57-61.
- [6] 马佳智, 施龙飞, 徐振海, 等. 单脉冲雷达多点源参数估计与抗干扰技术进展[J]. *雷达学报*, 2019, 8(1): 125-139.
 MA J Z, SHI L F, XU Z H, et al. Overview of multi-source parameter estimation and jamming mitigation for monopulse radars[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(1): 125-139.
- [7] SONG Z, CAI F, FU Q. A joint detection and tracking algorithm for unresolved target and radar decoy[J]. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2019, DOI: 10.2528/PIERB18103101.
- [8] SHERMAN S M, BARTON D K. Monopulse principles and techniques[M]. [S.l.]: Artech House, 2011.
- [9] 许政, 王强, 于勇, 等. 舷外有源诱饵干扰作战使用研究[J]. *现代电子技术*, 2010, 33(21): 61-64.
 XU Z, WANG Q, YU Y, et al. Operational application method of outboard active decoy interference[J]. *Modern Electronics Technique*, 2010, 33(21): 61-64.
- [10] 周伟光, 罗积润, 王华彬. 雷达诱饵合成场对反辐射导弹测向系统的影响[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(4): 981-984.
 ZHOU W G, LUO J R, WANG H B. Effects of the electromagnetic-field-combined profile of radar and decoy on direction-finding system of anti-radiation missile[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2009, 31(4): 981-984.
- [11] EMADI M, JAFARGHOLI A, MOGHADAM H S, et al. New anti-ARM technique by using random phase and amplitude active decoys[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2008, 87: 297-311.
- [12] LAKSHMI E V, SASTRY N N, RAO B P. Optimum active decoy deployment for effective deception of missile radars[C]//Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar. [S.l.]: IEEE, 2011: 234-237.
- [13] LAKSHMI E V, SASTRY N N, RAO B P. Effect of errors on miss distance of missile trackers in active decoy environment[J]. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019, 9(6): 4696.
- [14] LUO Y, FENG C, XIA Q, et al. Study on the jamming-position maneuver algorithm of off-board active electronic countermeasure unmanned surface vehicles[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 61184-61192.
- [15] RIM J W, KOH I S. Effect of beam pattern and amplifier gain of repeater-type active decoy on jamming to active RF seeker system based on proportional navigation law[C]//2018 19th International Radar Symposium (IRS). [S.l.]: IEEE, 2018: 1-9.
- [16] RIM J W, KOH I S. Survivability simulation of airborne platform with expendable active decoy countering RF missile[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 56(1): 196-207.
- [17] 张军涛, 李尚生, 徐晓霞, 等. 降雨衰减下的舷外有源诱饵对反舰导弹效能影响分析[J]. *电光与控制*, 2022, 29(6): 102-107.
 ZHANG J T, LI S S, XU X Y, et al. An analysis of effect of outboard active bait on performance of anti-ship missile under Rainfall attenuation[J]. *Electronics Optics and Control*, 2022, 29(6): 102-107.
- [18] du PLESSIS W P. A comprehensive investigation of retrodirective cross-eye jamming[D]. Pretoria: University of Pretoria, 2010.
- [19] 汤建龙, 郭立博, 董阳阳. 基于到达时间和到达方向联合定位的机动有源诱饵方法[J]. *兵工学报*, 2020, 41(10): 2088-2095.
 TANG J L, GUO L B, DONG Y Y. Maneuvering active decoying method based on joint TOA-DOA localization[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(10): 2088-2095.
- [20] 杨青, 余国文, 沈薇薇. 振幅和差式雷达导引头天线设计与仿真[J]. *空军雷达学院学报*, 2011, 25(5): 325-326.
 YANG Q, YU G W, SHEN W W. Design and simulation of seeker antenna of radar with sum and difference by amplitude[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2011, 25(5): 325-326.

编辑 税红