

雷达配置诱饵对抗反辐射导弹的仿真

周伟光^{①②} 罗积润^① 贾玉贵^③ 王华彬^③

^①(中国科学院电子学研究所中国科学院高功率微波源与技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100190)

^③(空军第二研究所 北京 100085)

摘要: 该文在考虑 4 臂平面等角螺旋天线双通道幅相组合测向系统工作原理的基础上, 确立了测向系统在雷达诱饵合成场中导引信号形成模型, 给出了一种简化的反辐射导弹运动模型, 获得了分析诱偏效果的计算公式、动态仿真方法及模拟结果。数值计算表明, 对于雷达诱饵之间距离为 250 m 到 300 m 的情况, 通过合理设置诱饵电平可以使雷达及诱饵获得较高的生存概率, 而诱饵辐射场初始相位对雷达诱饵生存概率影响相对较小。

关键词: 反辐射导弹; 诱饵; 方向图; 诱偏效果

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1370-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00227

Simulation of Radar Equipped with Decoys for Counteracting Anti-radiation Missile

Zhou Wei-guang^{①②} Luo Ji-run^① Jia Yu-gui^③ Wang Hua-bin^③

^①(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Second Institute of Air Force, Beijing 100085, China)

Abstract: Considering the mechanism of two-channel direction-finding systems with four-arm spiral antenna, guidance signal generation model related to the superposed field radiated by the antennae of radar and decoy is presented. A simple and practical movement model of Anti-Radiation Missile(ARM) is introduced. The dynamic simulation methods and formulae for analyzing deception effect are proposed. The simulation results show that high survival probability of the radar and the decoy can be achieved if the decoy level is set to some appropriate values when the distance between the radar and the decoy is set to 250-300 m, and the initial phase of the decoy radiation field has relatively less effect on the survival probability.

Key words: Anti-Radiation Missile(ARM); Decoy; Pattern; Deception effect

1 引言

反辐射导弹(ARM)具有高速、宽工作频带、高灵敏度等优点, 对雷达的生存构成了致命的威胁, 其杀伤效果给雷达操作员造成极大的心理压力。对付 ARM 主要有以下措施: 建立专门的反辐射导弹告警系统^[1]、采用先进的雷达体制^[2]、采用雷达诱饵技术^[3]和实施硬杀伤措施。其中, 雷达诱饵技术不依赖雷达本身性能提高, 是一种经济有效的对抗手段。

目前, 诱饵硬件系统的设计和加工已经比较成熟^[4], 一些实用的诱饵系统已经投入使用, 例如 AN/TPS-59。但是诱偏理论的发展相对滞后, 而且诱偏效果分析方法还不够完善。文献[5]在假设 ARM 测向系统跟踪方向与多辐射源合成场等相位面法线

方向一致的前提下, 给出了多个点源波阵面法线方向计算公式, 从原理上解释了多辐射源对 ARM 测向系统的干扰特性; 文献[6,7] 在和差单脉冲测向模型的基础上研究了两个辐射源对单脉冲测向系统的干扰性能; 文献[8]以 ARM 跟踪雷达诱饵能量加权几何中心为前提给出了多点源诱偏 ARM 时各辐射源间的安全距离; 文献[9,10] 讨论了诱饵配置方式、诱饵电平及 ARM 工作参数对生存概率的影响; 文献[11,12]对雷达配置诱饵抗 ARM 进行了仿真, 得到了系统保护概率的仿真结果, 论证了诱饵方案的可行性。虽然上述文献从多个角度讨论了雷达诱饵的诱偏理论, 但是, 总体来说, 诱偏效果的评估仍只能以试验为主。

本文在考虑了各辐射源方向图、极化方式和辐射场传播特性基础上, 确立了 ARM 在多辐射源合

成场中导引信号形成模型，给出了一种简化的 ARM 运动模型，以雷达周围配置一部诱饵为例完成了雷达、诱饵生存概率的动态仿真，并对结果进行了简要分析。

2 坐标系定义

为了描述雷达诱饵合成场、导引信号形成过程及 ARM 的飞行姿态，引入雷达坐标系 $(O_r X_r Y_r Z_r)$ ，诱饵坐标系 $(O_d X_d Y_d Z_d)$ ，弹体坐标系 $(O_m X_m Y_m Z_m)$ 和参考坐标系 $(OXYZ)$ 。参考坐标系 $(OXYZ)$ 以雷达、诱饵几何中心为坐标原点， OX 轴指向正北方向， OZ 轴与地面垂直且指向上方， OX 轴与 OY 轴， OZ 轴构成右手直角坐标系。雷达坐标系 $(O_r X_r Y_r Z_r)$ 以雷达所在位置为坐标原点，坐标轴 $O_r X_r$ ， $O_r Y_r$ ， $O_r Z_r$ 分别与坐标轴 OX ， OY ， OZ 平行且各坐标轴指向相同。诱饵坐标系 $(O_d X_d Y_d Z_d)$ 以诱饵所在位置为坐标原点，坐标轴 $O_d X_d$ ， $O_d Y_d$ ， $O_d Z_d$ 也分别与坐标轴 OX ， OY ， OZ 平行且各坐标轴指向相同。弹体坐标系 $(O_m X_m Y_m Z_m)$ 原点取在导弹质心 O_m 上， $O_m Z_m$ 轴与弹体纵对称轴一致，指向弹头方向， $O_m Y_m$ 轴垂直于 $O_m Z_m$ 轴，且位于导弹纵对称面内，指向下方， $O_m X_m$ 轴与 $O_m Y_m$ 轴， $O_m Z_m$ 轴构成右手直角坐标系，它是固连于弹体且随导弹一起运动的直角坐标系，轴 $O_m X_m$ ， $O_m Y_m$ 及 $O_m Z_m$ 体现了 ARM 的运动姿态，轴 $O_m Z_m$ 的指向就是 ARM 的进攻方向。由于 ARM 飞行姿态随时间不断变化，弹体坐标系与参考坐标系各坐标轴之间的夹角不断变化，相互转化关系复杂，因此需要引入过渡坐标系 $(O_t X_t Y_t Z_t)$ ，使过渡坐标系成为弹体坐标系与参考坐标系相互转化的桥梁。过渡坐标系 $(O_t X_t Y_t Z_t)$ 将弹体坐标系 $O_m Z_m$ 轴与地面的交点作为过渡坐标系的坐标原点，使过渡坐标系的 $O_t X_t$ 轴、 $O_t Y_t$ 轴和 $O_t Z_t$ 轴分别与参考坐标系的 OX 轴， OY 轴和 OZ 轴平行，且各坐标轴指向相同，这样就能通过过渡坐标系将 ARM 的进攻方向和位置坐标方便的在参考坐标系中表示出来。坐标系定义及弹体坐标系与过渡坐标系关系示意图分别如图 1，图 2 所示。

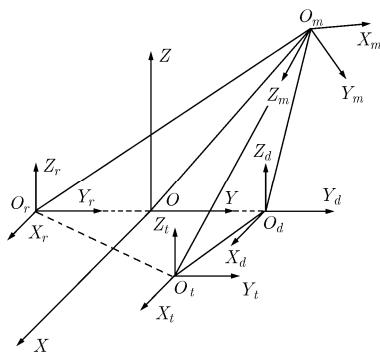


图 1 坐标系定义

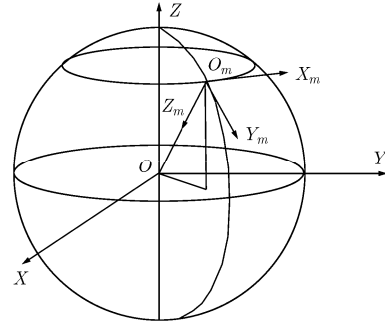


图 2 弹体坐标系定义

3 导引信号形成模型

ARM 测向系统非常复杂，但主要由角传感器和导引信号形成网络组成。4 臂平面等角螺旋天线与频率无关，而且具有体积小、重量轻等优点，是一种常用的角传感器。实际应用中，导引信号的提取常基于单脉冲测向原理，为了突出这一主要物理过程，本文选用双通道幅相组合测向系统模型^[13]。

在雷达、诱饵的合成场中，ARM 测向系统接收到和、差信号分别为

$$\begin{cases} \dot{E}_\Sigma = \dot{E}_{r,\Sigma} + \dot{E}_{d,\Sigma} \\ \dot{E}_\Delta = \dot{E}_{r,\Delta} + \dot{E}_{d,\Delta} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\dot{E}_{r,\Sigma}$ 和 $\dot{E}_{r,\Delta}$ 分别为只有雷达存在时测向系统接收到的和、差信号， $\dot{E}_{d,\Sigma}$ 和 $\dot{E}_{d,\Delta}$ 分别为只有诱饵存在时测向系统接收到的和、差信号。 $\dot{E}_{r,\Sigma}$ ， $\dot{E}_{r,\Delta}$ ， $\dot{E}_{d,\Sigma}$ 和 $\dot{E}_{d,\Delta}$ 如式(2)所示。

$$\begin{cases} \dot{E}_{r,\Sigma} = u_r(t) E_{r,\Sigma} \exp[j\phi_{r,\Sigma}] \\ \dot{E}_{r,\Delta} = u_r(t) E_{r,\Delta} \exp[j\phi_{r,\Delta}] \\ \dot{E}_{d,\Sigma} = u_d(t) E_{d,\Sigma} \exp[j\phi_{d,\Sigma}] \\ \dot{E}_{d,\Delta} = u_d(t) E_{d,\Delta} \exp[j\phi_{d,\Delta}] \end{cases} \quad (2)$$

式中 $u_r(t)$ 为雷达发射信号的复调制函数，可以通过修改其数学形式来模拟连续信号、模拟脉冲压缩信号、数字脉冲压缩信号和频率捷变信号等多种波形， $u_d(t)$ 是诱饵发射信号的复调制函数，一般与 $u_r(t)$ 相同，式(2)中的其它变量表示如下：

$$\begin{cases} E_{r,\Sigma} = C_r f_r(\theta_m^{(r)}, \varphi_m^{(r)}) f_\Sigma(\theta_r^{(m)}, \varphi_r^{(m)}) \\ E_{r,\Delta} = C_r f_r(\theta_m^{(r)}, \varphi_m^{(r)}) g_\Delta(\theta_r^{(m)}, \varphi_r^{(m)}) \\ E_{d,\Sigma} = C_d f_d(\theta_m^{(d)}, \varphi_m^{(d)}) f_\Sigma(\theta_d^{(m)}, \varphi_d^{(m)}) \\ E_{d,\Delta} = C_d f_d(\theta_m^{(d)}, \varphi_m^{(d)}) g_\Delta(\theta_d^{(m)}, \varphi_d^{(m)}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \phi_{r,\Sigma} = \ln(f/f_0)/a \pm \varphi_r^{(m)} \\ \phi_{r,\Delta} = 2\ln(f/f_0)/a \pm 2\varphi_r^{(m)} \\ \phi_{d,\Sigma} = \ln(f/f_0)/a \pm \varphi_d^{(m)} \\ \phi_{d,\Delta} = 2\ln(f/f_0)/a \pm 2\varphi_d^{(m)} \end{cases} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} C_r &= \sqrt{(2/\eta)(P_r G_{r_{\max}} G_{\Sigma_{\max}}) / (4\pi(r_m^{(r)})^2 L_r L_t)} \\ C_d &= \sqrt{(2/\eta)(P_d G_{d_{\max}} G_{\Sigma_{\max}}) / (4\pi(r_m^{(d)})^2 L_d L_t)} \end{aligned} \right\} (5)$$

式中 P_r , $G_{r_{\max}}$, $f_r(\theta_r^{(r)}, \varphi_r^{(r)})$ 和 L_r 分别为雷达的发射功率、天线增益、方向图函数和发射损耗, $\theta_m^{(r)}, \varphi_m^{(r)}$ 分别为 ARM 在雷达坐标系中的俯仰角和方位角, $r_m^{(r)}$ 为雷达与 ARM 的距离, L_t 为传输损耗, $G_{\Sigma_{\max}}$, $G_{\Delta_{\max}}$ 分别为 ARM 和、差波束增益, $f_{\Sigma}(\theta_r^{(m)}, \varphi_r^{(m)})$, $g_{\Delta}(\theta_r^{(m)}, \varphi_r^{(m)})$ 分别为和、差波束方向图, $\theta_r^{(m)}, \varphi_r^{(m)}$ 分别为雷达在弹体坐标系中的俯仰角和方位角, f , f_0 分别为工作频率和参考频率, a 为 4 臂平面等角螺旋天线的螺旋率。 P_d , $G_{d_{\max}}$ 和 L_d 分别为诱饵的发射功率、天线增益和发射损耗, 通常应满足 $P_d \geq (P_r G_{r_{\max}} G_{av} L_d) / (G_{d_{\max}} L_r)$, G_{av} 为平均副瓣电平。 $f_d(\theta_m^{(d)}, \varphi_m^{(d)})$, $\theta_m^{(d)}, \varphi_m^{(d)}$ 和 $r_m^{(d)}$ 的含义与雷达中对应的量类似, $\theta_d^{(m)}, \varphi_d^{(m)}$ 分别为诱饵在弹体坐标系中的俯仰角和方位角。

于是, 可以计算出差信号与和信号的复比为

$$\left. \begin{aligned} \left\| \dot{E}_{\Delta} / \dot{E}_{\Sigma} \right\| &= g_{\Delta}(\theta^{(m)}) / f_{\Sigma}(\theta^{(m)}) \\ \varphi^{(m)} &= \arg(\dot{E}_{\Delta}) - \arg(\dot{E}_{\Sigma}) \end{aligned} \right\} (6)$$

由此可知, 俯仰角和方位角信息可以分别通过式(6)中的两个等式确定, 这样, 就可以求解出 ARM 的期望进攻方向。

4 ARM 的飞行控制过程

ARM 由载机运到预定空域后, 驾驶员根据导引头截获的目标信息操作载机, 使导弹瞄准目标。当满足发射条件后 ARM 发射并进入方案制导段。等到飞行高度降到 5000 m 左右, 并且 ARM 导引头搜索到目标并转入跟踪状态后, 导弹进入导引头制导段。在导引头制导段, ARM 有两种工作状态, 即搜索状态和跟踪状态, 通过角度选择波门和状态转换电路可以实现这两种工作状态的转化。ARM 的视场角一般为 $\pm 4^\circ$, 若目标偏离 ARM 轴线 $\pm 4^\circ$ 时, $|E_{\Sigma} / E_{\Delta}| = K_{th}$, 则 K_{th} 称为状态转换阈值, 这由系统预先设定。当 $|E_{\Sigma} / E_{\Delta}| > K_{th}$ 时, 目标在 ARM 的视场角之内, ARM 处于跟踪状态。若在跟踪过程中丢失目标, 即 $|E_{\Sigma} / E_{\Delta}| < K_{th}$, 则 ARM 进入搜索状态, 此时, ARM 依次打开各角度选择波门, 直到 $|E_{\Sigma} / E_{\Delta}|$ 落入某一角度选择波门, 这样就完成了角度搜索。ARM 根据搜索到的目标角位置以最大过载调整其进攻方向, 直到再次跟踪上目标。通常 ARM 搜索到目标角位置时离地面已经很近, 没有足够的时间再次转换到跟踪状态, 这时, ARM 以最大过载

调整其进攻方向的过程中就会落地引爆。

ARM 的导引头制导飞行属 3 维空间 6 自由度运动, 对其运动过程的精确仿真非常费时、费力, 有时甚至是不可能的。本文忽略方案制导段, 将开始进入导引头制导段作为初始条件, 并采用简化的运动模型, 如图 3 所示。在图 3 中, 飞行速率 v , 最大过载 n_{\max} 和舵机伺服系统时间常数 τ 是 ARM 固有工作参数, 期望进攻方向为导引参量, 由 t_n 时刻 ARM 的位置及进攻方向就可计算出 t_{n+1} 时刻 ARM 的位置及进攻方向。下面分两种情况进行讨论。



图 3 简化运动模型方框图

4.1 ARM 工作在跟踪模式

ARM 工作在跟踪模式时其运动如图 4 所示, O_m 和 $O_m O_t$ 分别表示 ARM 在 t_n 时刻的位置和速度方向, $O_m P$ 表示 ARM 期望进攻方向, 经过一个时间步长 Δt 后, ARM 移动到 O_{mp} , 由于伺服系统的惰性, 其瞄准线指向 O_{tp} , 经伺服系统平滑后, ARM 实际进攻方向与期望进攻方向的关系为^[11]

$$\angle O_t O_m O_{tp} = \angle O_t O_m P [1 - \exp(-\Delta t / \tau)] \quad (7)$$

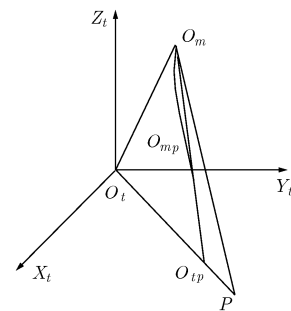


图 4 ARM 在跟踪模式下的运动

通常, τ 和 Δt 的值可取为 0.1 s 和 0.02 s。

这样, ARM 在 $t_n + \Delta t$ 时刻的位置及速度分别为

$$O_t O_{mp} = O_t O_m + O_m O_{mp} \quad (8)$$

$$v(t + \Delta t) = \|v(t)\| \frac{O_{mp} O_{tp}}{\|O_{mp} O_{tp}\|} \quad (9)$$

4.2 ARM 工作在搜索模式

图 5 给出了 ARM 工作在搜索模式时简化运动轨迹, O_m , $O_m O_t$ 和 $O_m P$ 的含义与图 4 相同, 由于 P 在视场之外, ARM 以最大过载调整其进攻方向, 最

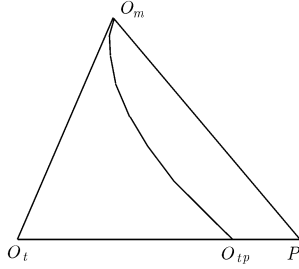


图 5 ARM 在搜索模式下的运动

终的落地点为 O_{tp} ，修正的误差为^[6]

$$\|O_t O_{tp}\| = 0.5 J_{\max} \|O_m P\|^2 / v^2 \quad (10)$$

式中 $J_{\max} = n_{\max} g$ ， g 为重力加速度。

5 仿真分析

基于以上模型，可以通过数值计算的方法来模拟和分析诱偏效果。下面首先以雷达周围配置一部诱饵为例给出仿真算法的描述，并根据工程经验给出仿真初始条件的设置，然后对仿真结果进行简要的分析。

仿真算法方框图如图 6 所示。假设雷达、诱饵及 ARM 在参考坐标系中的位置坐标分别为 (x_r, y_r, z_r) ， (x_d, y_d, z_d) 和 $(r_m, \theta_m, \varphi_m)$ ，过渡坐标系原点在参考坐标系中的坐标为 (x_t, y_t, z_t) ，过渡坐标系原点就代表了 ARM 的进攻方向。根据参考坐标系与各坐标系的转化关系可以得到 ARM 在雷达坐标系中的位置坐标 $(r_m^{(r)}, \theta_m^{(r)}, \varphi_m^{(r)})$ ，雷达在弹体坐标系中的位置坐标 $(r_r^{(m)}, \theta_r^{(m)}, \varphi_r^{(m)})$ ，ARM 在诱饵坐标系中的位置坐标 $(r_m^{(d)}, \theta_m^{(d)}, \varphi_m^{(d)})$ 和诱饵在弹体坐标系中的位置坐标 $(r_d^{(m)}, \theta_d^{(m)}, \varphi_d^{(m)})$ 。将各坐标分别代入式(1)到式(5)后就可以得到 ARM 接收到的和信号 \dot{E}_Σ 与差信号 \dot{E}_Δ ，然后通过式(6)可以计算出 ARM 期望进攻方向。ARM 根据期望进攻方向与瞄准线的夹角确定其工作模式。若 ARM 工作在跟踪模式下，下一时刻的位置坐标和进攻方向可以通过式(8)和式(9)求解；否则，就可以通过式(10)求解出最终落地点。最后根据 ARM 落地点位置与雷达、诱饵的相对距离，判断雷达和诱饵是否安全，并分析命中雷达或诱饵的 ARM 占发射总数的比例，即雷达诱饵的生存概率。

仿真的初始条件设置如下：

(1)雷达工作参数：增益 $G_{r,\max} = 38.5$ dB，发射损耗 $L_r = 2.1$ dB，复调制函数 $u(t) = 1$ ，天线方位角扫描速率 $k_\varphi = 0.2\pi$ rad/s，方向图数学模型为^[14]

$$f_r(\theta, \varphi) = \alpha_p (1 + \cos \theta_p) / 2 \cdot \sin(k \sin \theta_p) / (k \sin \theta_p) \quad (11)$$

式中 $\alpha_p = (10^{-r} + 1) / 2 + \text{sgn}(\theta_p - \theta_0) \cdot (10^{-r} - 1) / 2$ ， $r = 0.05(S - 13.26)$ ， S 为第1副瓣电平(-35 dB)，单

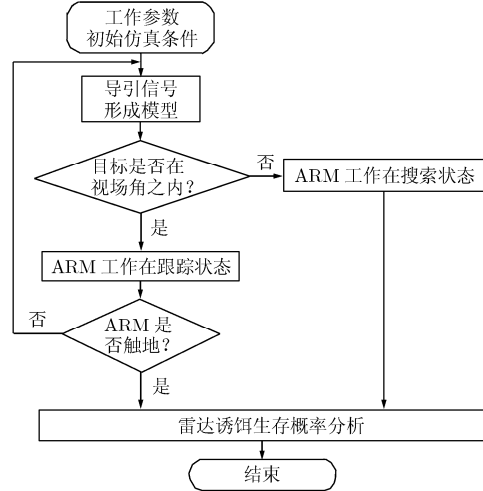


图 6 仿真算法方框图

位用 dB 表示， $\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$ ， $\theta_0 = \sin^{-1}(\pi/k)$

为零点出现的角度， $k \approx 1.3916 / \sin(\theta_b / 2)$ ， $\theta_b = 2^\circ$ 为半功率点波束宽度， $\theta_p = \cos^{-1}(\sin \theta \cos \varphi \sin \theta_t^{(r)} \cdot \cos \varphi_t^{(r)} + \sin \theta \sin \varphi \sin \theta_t^{(r)} \sin \varphi_t^{(r)} + \cos \theta \cos \theta_t^{(r)})$ ， $\theta_t^{(r)}$ ， $\varphi_t^{(r)}$ 为主瓣的角位置。

(2)诱饵工作参数：增益 $G_{d,\max} = 3$ dB，发射损耗 $L_d = 0.2$ dB，方向图数学模型为^[10]

$$f_d(\theta_m^{(d)}, \varphi_m^{(d)}) = (\sin \theta_m^{(d)} \cos \theta_m^{(d)})^q 2^q \quad (12)$$

式中 q 为天顶角覆盖因子，仿真中 q 取 1。

(3)ARM 工作参数：速率 $v = 3$ 马赫，最大过载 $n_{\max} = 10$ ，伺服系统时间常数 $\tau = 0.1$ ，视场角为 $\pm 4^\circ$ ，方向图数学模型为^[15]

$$\left. \begin{aligned} F_\Sigma(\theta^{(m)}, \varphi^{(m)}) &= f_\Sigma(\theta^{(m)}) \exp[\pm j\varphi^{(m)}] \\ F_\Delta(\theta^{(m)}, \varphi^{(m)}) &= g_\Delta(\theta^{(m)}) \exp[\pm j2\varphi^{(m)}] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 $\theta^{(m)}$ ， $\varphi^{(m)}$ 为目标的仰俯角和方位角，和、差方向图分别为 $f_\Sigma(\theta^{(m)}) = M(\theta^{(m)})|_{n=1}$ ， $g_\Delta(\theta^{(m)}) = M(\theta^{(m)})|_{n=2}$ 。

图 7 以雷达诱饵之间的距离为参变量分别给出雷达、诱饵的生存概率与诱饵电平的关系。由于雷达、诱饵的安全半径一般为 50 m 和 30 m，考虑到要留出一定裕量，雷达与诱饵距离的下限大约为 150 m；工程应用中雷达与诱饵距离一般为 300 m 左右，这样可保证 ARM 离地面较近时(例如离地面 3000 m)雷达及诱饵均在 ARM 的视场角内。因此，仿真过程中雷达与诱饵最小距离设置为 150 m，最大距离设置为 300 m。对于图 7 所示的 4 种情况，要达到同样的生存概率，雷达与诱饵的距离为 300 m 时所需诱饵电平最小。由图 7 可以看出，雷达生存概率随着诱饵电平的增加而增加，而诱饵生存概率随

着诱饵电平的增加而减小,当诱饵电平在-75 dB到-62 dB范围内时,雷达、诱饵的生存概率均高于99%。通过计算可知,式(11)所示的雷达平均副瓣大约为-58 dB,所以在保证雷达、诱饵生存概率均高于99%的情况下,诱饵电平至少可以比平均副瓣电平低4 dB。

为了说明上面的结论,假设 $\Omega_1(\theta, \varphi)$ 、 $\Omega_2(\theta, \varphi)$ 分别为高副瓣区域(副瓣电平高于平均副瓣电平)和低副瓣区域(副瓣电平低于平均副瓣电平),被ARM截获的概率分别为 w_1 和 w_2 , $w_1 + w_2 < 1$ 。ARM测向系统实际感知的有效雷达平均副瓣电平为

$$G_{av_eff} = (w_1 M_1 + w_2 M_2) / (N_1 + N_2) < G_{av} \quad (14)$$

式中

$$M_i = \iint_{\Omega} \frac{PG(\theta, \varphi)}{4\pi r^2} r^2 \sin\theta d\theta d\varphi$$

$$N_i = \iint_{\Omega} \frac{P}{4\pi r^2} r^2 \sin\theta d\theta d\varphi$$

$$i = 1, 2$$

由此可知,由于ARM测向系统对高副瓣区域和低副瓣区域的截获概率均小于1,ARM测向系统实际感知的有效雷达平均副瓣电平低于通常意义的雷达平均副瓣 G_{av} 。所以诱饵电平比雷达平均副瓣电平时仍然有较高的生存概率。

为了研究雷达波束扫描对保护概率的影响,图8给出了雷达波束固定及雷达波束扫描两种情况下ARM落地点分布图。由于工程应用中诱饵电平一般要等于或略高于平均副瓣电平,所以在仿真过程中,诱饵电平设置为-57 dB。其它仿真参数设置为:雷达、诱饵分别位于(0, -150)和(0, 150),ARM的进攻范围为方位角 0° 到 360° ,俯仰角 20° 到 60° 。图8(a)和8(b)均为500次仿真的结果,图中圆圈代表雷达和诱饵的安全范围,“+”代表ARM落地点。在图8(a)中,雷达主瓣指向固定在 $(0, \pi/4)$,括号中的坐标分别为方位角和俯仰角,雷达、诱饵毁损概率分别为0.97%和14.31%,3.45%的ARM落在 $-250 \leq x \leq 250, -250 \leq y \leq 0$ 区域内,38.45%的ARM落在 $-250 \leq x \leq 250, 0 \leq y \leq 250$ 区域内,其余58.1%的ARM落在所画区域之外;在图8(b)中,

雷达方位角扫描速率为 0.2π rad/s,初始时刻主瓣指向为 $(0, \pi/4)$,没有ARM落在 $-250 \leq x \leq 250, -250 \leq y \leq 0$ 区域内,诱饵毁损概率为1.53%,2.36%的ARM落在 $-250 \leq x \leq 250, 0 \leq y \leq 250$ 区域内,其余97.64%的ARM落在所画区域之外。仿真结果表明,若雷达波束固定,雷达、诱饵生存概率分别为99%和85.7%,若雷达波束扫描,则其生存概率分别增加为100%和98.47%。在相同条件下做10000次仿真,所得结果差别不大。

表1给出了与图8相对应的雷达诱饵生存概率统计数据。可以看出,当雷达波束固定在 $(0, \pi/4)$ 时,若ARM从方位角 -60° 到 60° ,俯仰角 20° 到 60° 范围内进攻,雷达的生存会受到威胁,而当雷达波束扫描时,则ARM会被诱偏到雷达的安全范围以外。对于诱饵,通过进一步计算表明,只有当ARM从方位角 30° 到 60° ,俯仰角 20° 到 60° 范围内进攻时,诱饵的生存概率略有降低,而从其它方向上进攻时,雷达波束扫描均会使诱饵的生存概率显著增加。因此,从整体上看雷达波束扫描有利于提高雷达和诱饵的生存概率。

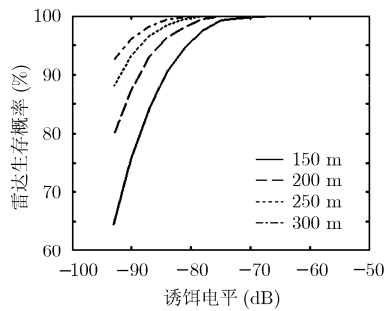
为了说明诱饵辐射场初始相位对生存概率的影响,图9给出了诱饵电平分别为-55 dB, -66 dB和-84 dB的情况下雷达、诱饵生存概率与诱饵辐射场初始相位的关系。由图可见,对于相对最优诱饵电平-66 dB的情况,不论诱饵辐射场初始相位为何值,雷达和诱饵的生存概率保持100%不变;对于相对较高的诱饵电平-55 dB和相对较低的诱饵电平-84 dB,随着诱饵辐射场初始相位的变化,雷达和诱饵生存概率的变化小于0.5%。因此,诱饵辐射场初始相位的变化可以看作是对雷达和诱饵生存概率的微小扰动,与诱饵电平相比其影响很小。

5 结论

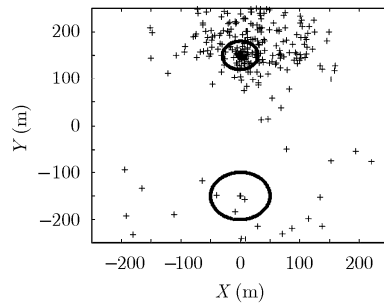
本文从单脉冲测向原理入手,给出了ARM处于雷达诱饵合成场中时导引信号形成模型,并基于典型的雷达、诱饵辐射场给出了动态仿真结果。数值计算表明,对于雷达诱饵距离为300 m的情况,当诱饵电平在-75 dB到-62 dB范围内变化时,雷

表1 进攻方位角对生存概率的影响

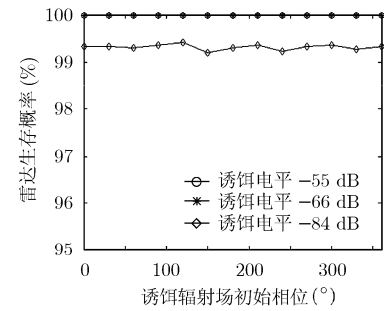
生存概率 (%)		ARM进攻方位角 ($^\circ$)					
		-180 To -120	-120 To -60	-60 To 0	0 To 60	60 To 120	120 To 180
雷达	波束扫描情况	100	100	100	100	100	100
	波束固定情况	100	100	94.98	96.88	100	100
诱饵	波束扫描情况	100	100	100	98.89	87.41	100
	波束固定情况	75.15	97.14	100	100	69.96	59.49



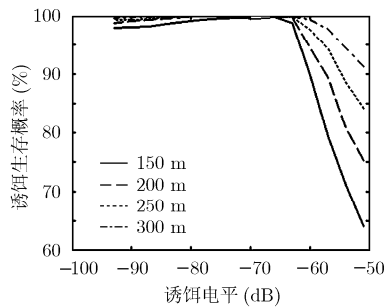
(a) 雷达生存概率与诱饵电平的关系



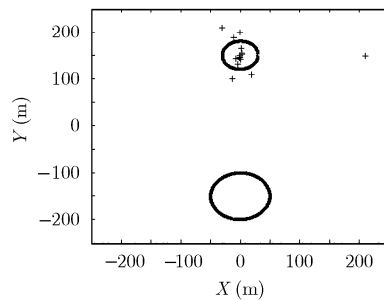
(a) 波束固定时 ARM 落地点分布图



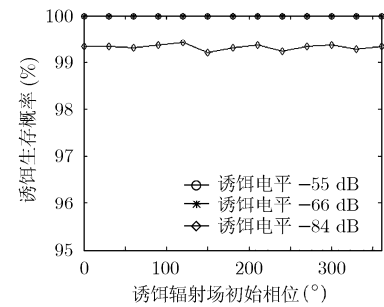
(a) 雷达生存概率与诱饵辐射场初始相位的关系



(b) 诱饵生存概率与诱饵电平的关系



(b) 波束扫描时 ARM 落地点分布图



(b) 诱饵生存概率与诱饵辐射场初始相位的关系

图7

图8

图9

达和诱饵的生存概率均高于 99%，这意味着诱饵电平比平均副瓣电平(-58 dB)低 4 dB 到 17 dB 时仍然可能获得较高的生存概率。将诱饵电平设置为-57 dB，雷达和诱饵距离设置为 300 m，若雷达波束指向固定，雷达和诱饵生存概率分别为 99%和 85.7%；若雷达波束扫描，则其生存概率分别增加为 100%和 98.47%，由此可见雷达波束扫描有利于提高雷达及诱饵的生存概率。另外，诱饵辐射场初始相位对雷达和诱饵生存概率的影响较小。

参考文献

- [1] 王星. 航空电子对抗原理. 北京: 国防工业出版社, 2008: 35-47.
Wang X. Principle of Aeronautics Electronic Countermeasure. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 35-47.
- [2] Gross F B and Chen K. Comparison of detectability of traditional pulsed and spread spectrum radar waveforms in classic passive receivers. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(2): 746-751.
- [3] 柳书高. 反辐射导弹技术研究及仿真. [硕士论文], 哈尔滨工程大学, 2007.
Liu S G. Research and Simulation on the Technology of Confronting Anti-Radiation Missile. [MA dissertation], Harbin Engineering University, 2007.
- [4] 丛敏, 姜雪红. 俄罗斯研制对付哈姆反辐射导弹的诱饵系统. 飞航导弹, 2006, 7(1): 1-2.

Cong M and Jiang X H. The decoy systems against the HARM anti-radiation missile researched in Russia. *Cruise Missile*, 2006, (7): 1-2.

- [5] Shi Zhen, Li Yan, and Yuan Wenliang. Modeling of guidance signal of anti-radiation missile in the case of multiple sources. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang, China, MAIC, 2006: 2264-2268.
- [6] Vakin S A and Shustov L N. Principles of Jamming and Electronic Reconnaissance. USA, Clearinghouse, 1969: 5-123.
- [7] 肖涛, 汤子跃, 季金祥. 相干有源诱偏系统抗ARM分析. 现代雷达, 2007, 29(3): 9-11, 27.
Xiao Tao, Tang Zi-yue, and Ji Jin-xiang. Analysis of coherent active decoying system for Anti-ARM. *Modern Radar*, 2007, 29(3): 9-11, 27.
- [8] 李振卿. 抗ARM诱饵配置分析和系统安全间距计算. 电子工程, 2003, 26(3): 20-25.
Li Z Q. Analysis of the layout topology of the decoys and calculation of the safe distance for counteracting the ARM. *Electronics Engineer*, 2003, 26(3): 20-25.
- [9] 姜铁华, 王国玉, 苏东林, 谭帆. 反辐射导弹技术参数对诱偏系统性能的影响研究. 航空学报, 2007, 28(z1): 146-151.
Jiang Tie-hua, Wang Guo-yu, Su Dong-lin, and Tan Fan. Study on effects of ARM technical property on decoying performances of active decoying system. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(z1): 146-151.

- [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. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 981-984.
Zhou Wei-guang, Luo Ji-run, and Wang Hua-bin. Effects of the electromagnetic-field-combined profile of radar and decoy on direction-finding system of anti-radiation missile. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 981-984.
- [11] 贾玉贵, 张莉芳, 沈齐, 潘健. 对空情报雷达配置诱饵抗反辐射导弹的仿真. 第八届全国雷达学术年会论文集, 合肥, 2002: 134-138.
Jia Y G, Zhang L F, Shen Q, and Pan J. Simulation of air surveillance radar equipping decoys for resisting ARM. 8th National Conference Symposium on Radar, Hefei, 2002: 134-138.
- [12] 王华彬, 周伟光, 罗积润. 雷达抗反辐射导弹诱饵布阵仿真研究. 现代雷达, 2009, 31(7): 1402-1417.
Wang Hua-bin, Zhou Wei-guang, and Luo Ji-run. Simulation of radar equipped with decoys for counteracting anti-radiation missile. *Modern Radar*, 2009, 31(7): 1402-1417.
- [13] Young M. Microwave Passive Direction Finding. Mill Valley, USA: SciTech Publishing, Inc., 2004, Chapter 2.
- [14] Blake L V. Radar Rang-Performance Analysis. Norwood: Academic Press, 1986: 367-379.
- [15] Mclendon R and Turner C. Broadband sensors for lethal defense suppression. *Microwave Journal*, September 1983: 85-101.
- 周伟光: 男, 1981年生, 研究方向为电子对抗.
罗积润: 男, 1959年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为高功率微波源与技术.