

反辐射导引头脉内强信号检测抗诱偏技术研究

李 臣¹, 许 涛², 杨 军¹

(1. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072;

2. 西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

摘要: 针对主瓣持续照射雷达的有源诱饵, 提出了一种脉内强信号检测抗诱偏措施; 首先理论分析了诱饵对反辐射导引头测向的影响; 其次, 利用三诱饵三维空间诱偏误差公式定量计算了雷达主瓣持续照射时的诱饵诱偏误差; 最后给出了脉内强信号检测技术的实现方法; 由理论分析及定量计算结果可知, 采用脉内强信号检测技术可以有效对付主瓣持续照射雷达的有源诱饵, 是一种合理可行的抗诱偏技术。

关键词: 抗诱偏; 脉内强信号检测; 反辐射导引头; 雷达主瓣

Research on Countermeasures of Intrapulse Strong Signal Detection Technology for Anti-radiation Seeker

Li Chen¹, Xu Tao², Yang Jun¹

(1. College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: For the active decoy of mainlobe irradiate, this paper proposed countermeasures of intrapulse strong signal detection against decoy. Firstly, this paper made a theoretical analysis on the effect of decoy against anti-radiation seeker orientation; Secondly, using three decoys three dimensions error formula to make a quantitative calculation of decoy inveigles error under the condition of mainlobe irradiate radar; Finally proposed intra-pulse strong signal detection technology. According to theoretical analysis and quantitative calculation, the intra-pulse strong signal detection technology can deal with active decoy of mainlobes of radar irradiate, and this technology is a reasonable and viable decoy countermeasures.

Keywords: decoy countermeasure; intra-pulse strong signal detection; anti-radiation seeker; mainlobe of radar

0 引言

目前, 越来越多的雷达配备了各种各样的有源诱饵。诱饵通过光缆有线方式接收雷达的基带信号, 辐射出与雷达旁瓣功率相当、特征参数一致的诱饵信号, 雷达在多个诱饵的配合下工作, 使雷达既能够开机工作又能避免反辐射武器攻击; 在设计诱饵时, 雷达的前后沿一定被诱饵覆盖以避免雷达信号被反辐射导引头捕获; 在诱饵布阵方面, 可以根据反辐射武器的速度特性、机动能力、导引头角度分辨门限等进行最佳布阵, 以达到最佳的诱偏效果。

有源诱饵诱偏反辐射武器技术的进步, 使反辐射武器的作战效能面临了更大挑战, 促使推动抗诱偏技术的研究。

很多学者研究了采用有源诱饵诱偏反辐射武器的原理、布阵、作战效能分析等^[1], 对反辐射武器抗诱偏的研究则很少。文献 [1] 研究了非相干两点源诱偏反辐射无人机的的问题, 推导了诱偏公式和两点之间安全距离公式; 文献 [2] 提出采用阵列扩展测向, 提高导引头的角度分辨能力, 使反辐射导弹可将雷达和诱饵较早地从角度上分辨开, 达到抗诱偏的目的; 文

献 [3] 分析了反辐射导弹抗诱偏效能的性能参数, 得出了减小导引头分辨角是实现反辐射导弹抗点源诱偏的有效途径的结论; 文献 [4] 提出采用窄波束被动雷达导引头或多模复合导引头特别是采用超分辨新体制导引头以提高角分辨率, 从而使反辐射导弹具备抗诱偏能力。

采用多模复合制导或其他新体制的反辐射导引头是提高反辐射武器抗诱偏的有效措施; 对于采用传统干涉仪测向体制的反辐射导引头减小其角度分辨阈值可以将雷达和诱饵较早地分开, 然而由于物理条件限制导引头角度分辨阈值减小毕竟有限。如何在现有反辐射导引头测向体制下提高武器系统的抗诱偏能力, 必须从系统的角度对于不同典型诱饵进行相应的对抗策略研究。

本文针对主瓣持续照射雷达(如制导雷达、火控雷达)的有源诱饵提出了一种脉内强信号检测抗诱偏措施。首先分析了有源诱饵对反辐射导引头测向特性的影响; 给出了通用的多诱饵三维空间诱偏误差公式, 并利用该公式定量计算了主瓣照射雷达的有源诱饵的诱偏误差; 计算结果表明采用脉内强信号检测技术可以有效对抗主瓣照射雷达的有源诱饵。

1 诱饵对反辐射导引头测向特性的影响分析

设 A、B 两个辐射源分别为雷达和诱饵, 辐射的信号分别为:

收稿日期: 2013-11-27; 修回日期: 2014-03-11。

作者简介: 李 臣(1978-), 男, 黑龙江人, 硕士研究生, 主要从事飞行器导航制导与控制技术方向的研究。

$$\begin{aligned} S_A &= Ae^{j(\omega_a t)} \\ S_B &= Be^{j(\omega_b t + \varphi_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, A, B 分别为雷达和诱饵的信号幅值, ω_a, ω_b 分别为雷达和诱饵信号的角频率。

反辐射导引头天线接收两个辐射源信号时的基本关系如图 1 所示。

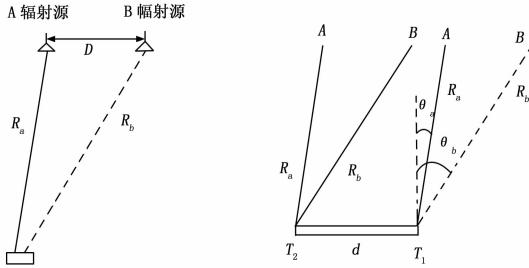


图 1 反辐射导引头测向系统接收两个信号时的基本关系图

将雷达信号和诱饵信号在干涉仪两通道分别求和, 可以得到干涉仪输出的两通道和信号的相位差^[5]表达式:

$$\begin{aligned} \varphi_{12} &= K_a d \sin \theta_a + \arcsin \frac{\beta \sin \varphi_{\theta 2}}{(1 + \beta^2 + 2\beta \cos \varphi_{\theta 2})^{\frac{1}{2}}} - \\ &\arcsin \frac{\beta \sin \varphi_{\Delta}}{(1 + \beta^2 + 2\beta \cos \varphi_{\Delta})^{\frac{1}{2}}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, d 为两天线基线长度; $K_a = \frac{2\pi}{\lambda_a}, K_b = \frac{2\pi}{\lambda_b}$ 分别为雷达和诱饵信号的传播常数; λ_a, λ_b 分别为雷达信号和诱饵信号的波长; θ_a, θ_b 分别为雷达信号和诱饵信号的入射角; $\beta = \frac{B}{A}$ 为诱饵和雷达信号幅值的比; $\varphi_{\Delta} = (\omega_b - \omega_a)t + K_b R_b - K_a R_a + \varphi_0$, 为诱饵和雷达两辐射源到达天线 T_1 输出端信号的相位差; $\varphi_{\theta 2} = \varphi_{\Delta} + K_b d \sin \theta_b$ 。

可见, 由于诱饵的存在, 在两测向通道间产生了附加的相位差:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_{12} &= \arcsin \frac{\beta \sin \varphi_{\theta 2}}{(1 + \beta^2 + 2\beta \cos \varphi_{\theta 2})^{\frac{1}{2}}} - \\ &\arcsin \frac{\beta \sin \varphi_{\Delta}}{(1 + \beta^2 + 2\beta \cos \varphi_{\Delta})^{\frac{1}{2}}} \end{aligned} \quad (3)$$

由于干涉仪测向原理, 干涉仪将测得的相位差 φ_{12} 按式 (4) 计算雷达信号的到达角:

$$\theta_{am} = \arcsin \frac{\varphi_{12}}{K_a d} \quad (4)$$

而雷达信号到达角的真值为:

$$\begin{aligned} \theta_a &= \arcsin \left\{ \frac{1}{K_a d} \left[\varphi_{12} - \right. \right. \\ &\arcsin \frac{\beta \sin \varphi_{\theta 2}}{(1 + \beta^2 + 2\beta \cos \varphi_{\theta 2})^{\frac{1}{2}}} + \\ &\left. \left. \arcsin \frac{\beta \sin \varphi_{\Delta}}{(1 + \beta^2 + 2\beta \cos \varphi_{\Delta})^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

可以看出干涉仪对雷达测向的精度受雷达和诱饵信号的初

始相位、幅值之比、路程差、诱饵信号的入射角及两信号的频率差有关。雷达天线主瓣照射反辐射导引头时, 诱饵和雷达信号幅值的比满足:

$$\beta \ll 1 \quad (6)$$

即此时雷达信号比诱饵信号大的多。由式 (5) 可知雷达信号与诱饵信号的频率相同与否, 诱饵信号的存在对雷达信号的测向精度影响都很小。

2 多诱饵三维空间诱偏误差公式

假设地面雷达位于坐标原点 $(0, 0, 0)$, 第 i 个诱饵 ($i = 1, 2, \dots, n$) 的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 反辐射导弹位于 (x_A, y_A, z_A) 。反辐射导引头接收到的雷达信号为:

$$E_0 = E_{00} \cos \left(\omega_0 t - \frac{2\pi}{\lambda_0} R_0 \right) \quad (7)$$

反辐射导引头接收到的第 i 个诱饵的信号为:

$$E_i = E_{0i} \cos \left(\omega_i t - \frac{2\pi}{\lambda_i} R_i + \varphi_{i0} \right) \quad (8)$$

式中, E_{00} 或 E_{0i} 为雷达或第 i 个诱饵的电场强度幅值; ω_0 或 ω_i 为雷达或第 i 个诱饵的电场频率; λ_0 或 λ_i 为雷达或第 i 个诱饵的波长; R_0 或 R_i 为雷达或第 i 个诱饵与反辐射导弹的距离; φ_{i0} 为第 i 个诱饵同雷达之间的电场初始相位差。

反辐射导引头跟踪方向为雷达和诱饵的信号在反辐射导引头位置处合成场波阵面的法向方向, 因此, 信号合成场波阵面法线与地面的交点即为诱饵诱偏反辐射导弹的坐标。通过推导出通用的多诱饵三维空间诱偏误差^[6]公式:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^n E_{0i} E_{0k} \frac{x_k z_A - x_A z_k}{R_k \lambda_k} \cos(\varphi_i - \varphi_k)}{\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^n E_{0i} E_{0k} \frac{z_A - z_k}{R_k \lambda_k} \cos(\varphi_i - \varphi_k)} \\ y &= \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^n E_{0i} E_{0k} \frac{y_k z_A - y_A z_k}{R_k \lambda_k} \cos(\varphi_i - \varphi_k)}{\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^n E_{0i} E_{0k} \frac{z_A - z_k}{R_k \lambda_k} \cos(\varphi_i - \varphi_k)} \end{aligned} \quad (9)$$

三诱饵系统诱偏反辐射导弹的最佳布局如图 2 所示。其中, 被保护的雷达坐标为 $(0, 0, 0)$, 3 个诱饵坐标分别为 $(x_1, 0.8y_3, 0), (-x_1, 0.8y_3, 0), (0, 0.8y_3, 0)$ 。导引头分辨出雷达和诱饵目标前 (远距离), 假设反辐射导弹到雷达、诱饵的距离相同, 辐射信号波长相同 (频率相同) 且各诱饵功率相同。在此布局下反辐射无人机跟踪偏差公式简化为^[6]:

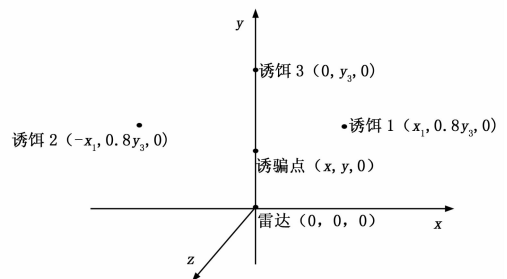


图 2 三诱饵最佳布局诱偏反辐射导弹示意图

$$x = \frac{A}{B}$$

$$y = \frac{C}{B}$$

$$A = \beta r_1 [\cos\Delta\varphi_{01} - \cos\Delta\varphi_{02} + \beta(\cos\Delta\varphi_{13} - \cos\Delta\varphi_{23})]$$

$$B = 1 + 3\beta^2 + 2\beta(\cos\Delta\varphi_{01} + \cos\Delta\varphi_{02} + \cos\Delta\varphi_{03}) + 2\beta^2(\cos\Delta\varphi_{12} + \cos\Delta\varphi_{13} + \cos\Delta\varphi_{23})$$

$$C = \beta y_3 [2.6\beta + 0.8(\cos\Delta\varphi_{01} + \cos\Delta\varphi_{02}) + \cos\Delta\varphi_{03} + 1.6\beta\cos\Delta\varphi_{12} + 1.8\beta\cos\Delta\varphi_{13} + 1.8\beta\cos\Delta\varphi_{23}] \quad (10)$$

式中, $\beta = \frac{E_{0i}}{E_{00}}$, ($i = 1, 2, 3$), E_{00} 为雷达信号的幅值, E_{0i} 为第 i 个诱饵信号的幅值; $\Delta\varphi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j$, ($i, j = 0, 1, 2, 3$), φ_0 为雷达信号在反辐射导引头处的相位, φ_i 为第 i 个诱饵信号在反辐射导引头处的相位。

3 脉内强信号检测抗诱饵技术

3.1 诱饵诱偏位置坐标

作以下假定:

- (1) 第 i 个和第 j 个诱饵信号在反辐射导引头处的相位相位差 $\Delta\varphi_{ij}$ 服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布;
- (2) 三诱饵坐标分别为 (100 m, 200 m, 0 m)、(0 m, 250 m, 0 m)、(-100 m, 200 m, 0 m);
- (3) 诱饵信号与雷达主瓣信号的幅值之比为 β 。

利用多诱饵三维空间诱偏误差公式即式 (10), 采用数字模拟计算得到诱饵诱偏反辐射导弹的位置坐标 (x, y), 计算结果见表 1。

表 1 诱饵诱偏反辐射导弹的位置坐标 (m)

x 的均值	-0.13
x 的均方差	3.25
y 的均值	0.20
y 的均方差	8.91

从诱饵诱偏反辐射导弹的诱偏公式及定量计算结果表 1 可以看出, 雷达主瓣持续照射反辐射导弹时, 反辐射导引头如采用强信号进行测向, 则诱饵诱偏反辐射导弹的位置不断靠近雷达, 即随着反辐射导引头接收到的诱饵信号功率与雷达功率差异变大, 反辐射武器被诱偏的概率降低。

根据此结论, 采用脉内强信号检测技术可以实现对制导雷达、火控雷达等主瓣持续照射雷达的精确打击。另外, 对于相干诱饵要保证雷达信号和诱饵信号同时到达反辐射导引头, 雷达天线主瓣必须经常照射反辐射导弹以精确的测量和跟踪反辐射导弹, 此时采用采用脉内强信号检测技术亦能降低反辐射导弹被诱偏的概率, 确保对雷达较高的毁伤概率。

3.2 脉内强信号检测技术

雷达和诱饵典型叠加信号包络图如图 3 所示。

图 3 (a) 和图 3 (c) 为两个 (多个) 诱饵信号交叠的情况, 4 个信号叠加只可能产生小于 A_0 dB 的信号; 图 3 (b) 和图 3 (c) 为一个 (多个) 诱饵和雷达主瓣信号交叠的情况, 这是一个稳定的、低重频的脉冲信号形式。

诱饵和雷达主瓣信号叠加时, 可产生大于 A_0 dB 的信号。

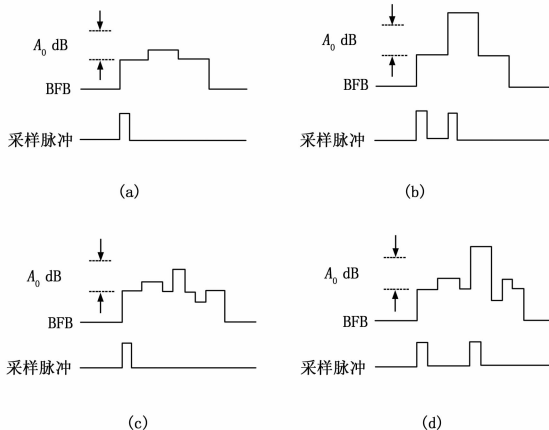


图 3 雷达和诱饵典型叠加信号包络图

采用数字处理对脉冲持续时间内的包络部分进行差分, 可检测出脉内是否有跳变沿信息, 以 A_0 dB 为阈值从而识别出是否有大信号重叠在小信号上, 并且可确定大信号出现和消失的时刻, 利用大信号部分进行测向, 以达到探测雷达目标的作用。

4 结论

本文针对主瓣持续照射雷达的有源诱饵提出了一种脉内强信号检测抗诱偏措施。首先分析了有源诱饵对反辐射导引头测向特性的影响, 得出了一定性的结论: 雷达天线主瓣照射反辐射导引头时, 诱饵信号的存在对雷达信号的测向精度影响很小; 其次, 利用多诱饵三维空间诱偏误差公式定量计算了主瓣照射雷达的有源诱饵的诱偏误差, 可以看出诱偏位置与雷达位置的偏差很小; 最后给出了脉内强信号检测的实现措施, 以 A_0 dB 为阈值从而识别出是否有大信号, 并确定大信号出现和消失的时刻, 利用大信号部分进行测向, 以达到探测雷达目标的作用。

由理论分析及仿真计算结果可以看出, 采用脉内强信号检测技术可以有效对抗主瓣持续照射雷达的有源诱饵, 是一种合理可行的抗诱偏技术。

参考文献:

- [1] 张乐平, 朱振波, 俞志强, 等. 功率非相干两点源诱偏反辐射无人机研究 [J]. 电子对抗技术, 2003, 18 (1): 21-23.
- [2] 刘剑, 王丰华, 黄知涛, 等. 阵列扩展用于反辐射导弹抗诱偏的研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29 (3): 365-367.
- [3] 李彦志, 吴迪军, 侯慧群. 空地反辐射导弹抗点源诱偏全弹道作战仿真 [J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23 (1): 32-35.
- [4] 司锡才, 崔冬槐, 司伟建. 反辐射导弹对抗低截获概率雷达和诱饵技术 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27 (9): 1549-1552.
- [5] 向淑兰, 张杰儒. 干涉仪对两点源信号测向的分析 [J]. 火力与指挥控制, 2005, 30 (5): 65-67.
- [6] 顾尔顺. 有源诱偏反辐射导弹的理论 [J]. 现代防御技术, 1993, (3): 25-34.