

两点源诱骗反辐射导弹的效能评估模型研究

杨 正, 薛业飞, 曹志耀

(解放军电子工程学院, 安徽 合肥, 230037)

摘 要: 两点源诱骗是对抗反辐射导弹的一种重要手段, 本文首先采用数学方法研究了两点源诱骗反辐射导弹的原理, 接着讨论并给出了相干诱骗和非相干诱骗反辐射导弹的偏角计算模型, 在此基础上, 给出了两点源诱骗反辐射导弹的脱靶距离计算模型。

关键词: 反辐射导弹; 两点源诱骗; 效能评估; 模型

中图分类号: TN972.3 文献标识码: A

Research on Efficacy Evaluation Models of Dual Sources Decoying Anti-radiation Missile

YANG Zheng, XUE Ye-fei, CAO Zhi-yao

(PLA Electronic Engineering Institute, Hefei, 230037)

Abstract: Dual sources decoying is an important way against anti-radiation missile, this paper researches the principle of dual sources decoying anti-radiation missile in mathematics way, then discusses and gives the calculation models of departure angle of anti-radiation missile under correlative decoying and no-correlative decoying. On the basis of which, this paper gives the calculation models of distance between point of fall of anti-radiation missile and radar under dual sources decoying.

Key words: Anti-radiation missile(ARM); Dual sources decoying; Efficacy evaluation; Models

反辐射导弹(ARM)是一种利用对方雷达辐射的电磁波进行导引并攻击该雷达及其载体的导弹。其主要作战使命是实施防空压制作战,摧毁防空系统的制导、警戒和引导雷达,压制防空武器和预警指挥系统。反辐射导弹有一个被动式雷达导引头,用以接收对方雷达辐射的信号,为其提供误差信息,不断修正飞行航线。在攻击过程中,若被攻击的雷达关机,导弹仍可借助于记忆装置,继续飞往目标,因而命中精度极高。随着反辐射导弹在实战中显露出对雷达的巨大威胁,如何对抗反辐射导弹的研究引起了世界各国的重视。当前,受到世界各国重视并付诸实施的对抗反辐射导弹的措施是在雷达站周围设置诱饵。美国“爱国

者”防空导弹系统就配置了对付反辐射导弹从主瓣攻击的诱饵和对付反辐射导弹从副瓣攻击的诱饵。

两点源诱骗反辐射导弹是一种典型的诱骗干扰方法,其实质是利用配置在不同地点的被保护雷达和雷达诱饵同时向空间辐射电磁波,造成空间合成场的畸变。在满足一定条件时,反辐射导弹将无法瞄准任何一个辐射源,至少可以起到保护地面雷达站不受损害。在反辐射导弹飞离飞机时,导弹的导引头不能分辨雷达和诱饵,而飞行到一定距离,导引头已分辨出诱饵与雷达,即调整方向对准雷达的辐射能量中心。此时,由于反辐射导弹的高速飞行惯性和距离雷达太近,扭转飞行后的弹着点还距离雷达有一定的距离,

收稿日期: 2005-12-07

作者简介: 杨正(1976-),男,在读博士研究生,主要研究方向为电子对抗建模与仿真。

从而保护了雷达设备和人员的安全。

1 两点源诱骗反辐射导弹的数学推理

反辐射导弹攻击雷达的原理主要是它的导引头搜寻雷达发射脉冲的辐射能量中心，从而攻击之。雷达配备诱饵系统后，诱饵与雷达合成的辐射能量中心偏离原来的雷达辐射能量中心，以达到诱骗的目的。因此，一种常用的干扰方法就是两点源诱骗干扰。两点源诱骗干扰系统由一部有源诱饵和一部被保护雷达组成，可分为两点源相干诱骗和两点源非相干诱骗两种。反辐射导弹和被保护雷达、诱饵位置关系如图1所示。

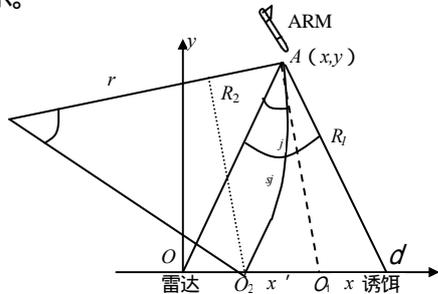


图1 反辐射导弹和雷达、诱饵位置关系图

Fig.1 Location relation of anti-radiation missile to that of radar and decoy

某时刻 t 导弹处于 $A(x,y)$ 点，两点源对导引头的张角为 θ_{sj} ，雷达与诱饵的距离为 d ，导弹跟踪方向与雷达方向的偏角为 θ_o 。

不考虑信号衰减，诱饵和雷达两点源辐射电场到达 ARM 处的场强分别为：

$$E_1(x,y,t)=U_1\cos[\omega_1(t-R_1/C)], \quad t>R_1/C$$

$$E_2(x,y,t)=U_2\cos[\omega_2(t-R_2/C)+\phi_0], \quad t>R_2/C$$

(1) 式中： ω_1, ω_2 为诱饵和雷达辐射源的角频率， ϕ_0 为两者初始相位差， C 为光速。

两个电场的合成电场表达式为：

$$E(x,y,t)=E_0(x,y,t)\cos[\phi(x,y,t)] \quad (2)$$

(2) 式中，电场幅度和相位分别为：

$$E_0(x,y,t)=[U_1^2+U_2^2+2U_1U_2\cos(\phi_1-\phi_2)]^{1/2} \quad (3)$$

$$\Phi(x,y,t)=\arctan\left(\frac{U_1\sin\phi_1+U_2\sin\phi_2}{U_1\cos\phi_1+U_2\cos\phi_2}\right) \quad (4)$$

(3) ~ (4) 式中，

$$\phi_1=\omega_1(t-R_1/C); \phi_2=\omega_2(t-R_2/C)+\phi_0$$

单脉冲导引头跟踪的角度方向是等相位线的法线方向，法线方程为：

$$\frac{y-y_0}{x-x_0}=\frac{(\partial\phi/\partial y)_{x_0,y_0}}{(\partial\phi/\partial x)_{x_0,y_0}} \quad (5)$$

(5) 式中， x_0, y_0 是 ARM 在等相位线上的坐标值，令 $y=0$ 即求出法线同 x 轴的坐标交点，也就是反辐射导弹偏离雷达的距离 x ：

$$\Delta x=\frac{K+\beta K\cos\Delta\phi}{(K+\beta^2)+\beta(K+1)\cos\Delta\phi}\cdot d \quad (6)$$

因为 R_1, R_2 远大于 d ，有 $\frac{\Delta x}{d}=\frac{\Delta\phi}{\theta_{sj}}$ ，因此，导弹瞄准轴与雷达的偏角 θ_j 为：

$$\Delta\theta_j=\frac{K+\beta K\cos\Delta\phi}{(K+\beta^2)+\beta(K+1)\cos\Delta\phi}\theta_{sj} \quad (7)$$

(7) 式中：

$$K=\frac{\omega_1R_2}{\omega_2R_1}, \Delta\phi=\phi_1-\phi_2, \beta=U_2/U_1$$

2 两点源相干诱骗反辐射导弹的偏角计算

雷达和诱饵源辐射的电磁波在频率上保持严格一致，相位保持一定关系，由它们合成的干扰称作两点源相干诱骗。为讨论方便，设雷达和诱饵离导弹的距离差产生的相位差保持恒定，即先不考虑由于它们的路程差而引起的相位差。则由 (7) 式可得导弹跟踪方向与雷达的偏角 θ_j 为：

$$\Delta\theta_j=\frac{1+\beta\cos\Delta\phi}{1+\beta^2+2\beta\cos\Delta\phi}\theta_{sj} \quad (8)$$

(1) 当 $\Delta\phi=0$ 时，即雷达和诱饵同相时，

$$\Delta\theta_j=\frac{\theta_{sj}}{1+\beta} \quad (9)$$

当 $U_1=0$ 时，导弹跟踪方向指向诱饵；当 $U_2=0$ 时，导弹跟踪方向指向雷达；在 $U_1=U_2$ 时，导弹跟踪方向指向雷达和诱饵连线的中间位置；当不为上述特殊情况时，导弹跟踪方向指向雷达和诱饵之间，且靠近信号幅度较大的辐射源。总之，同相相干干扰时，导弹跟踪方向位于雷达和诱饵之间。由于雷达和诱饵对导

弹导引头的最大张角小于导引头分辨角 θ_m , $\theta_m=(0.8\sim 0.9)\theta_{0.5}$ ($\theta_{0.5}$ 为导引头天线半功率波束宽度) , 所以导弹跟踪方向偏离雷达和诱饵中间线的最大角为 $(0.4\sim 0.45)\theta_{0.5}$.

(2) 当 $\beta = -1$ 时, 即雷达和诱饵反相时,

$$\Delta\theta_j = \frac{\theta_{sj}}{1-\beta} \tag{10}$$

当 $\beta = 0$ 和 $\beta = 1$ 时, 导弹跟踪方向分别指向诱饵和雷达; 当 $\beta = 1$ 时, 导弹跟踪方向偏离两点源角度非常大。但实际上产生的偏角是有限的, 约为 $0.5\theta_{sj} + 0.68\theta_{0.5}$, 因此只有在 $\tan\beta = \theta_{0.5}/\theta_{sj}$ 条件下才适用。严格地说, 上述公式的适应范围一般为 $\theta_{sj}/\theta_{0.5} = 0.8\sim 0.9$, $\beta = 0.9$ 或 $\beta = 1.1$. 对反辐射导弹的干扰效果, 即导弹跟踪方向偏离雷达的程度与 β 、 $\Delta\phi$ 关系

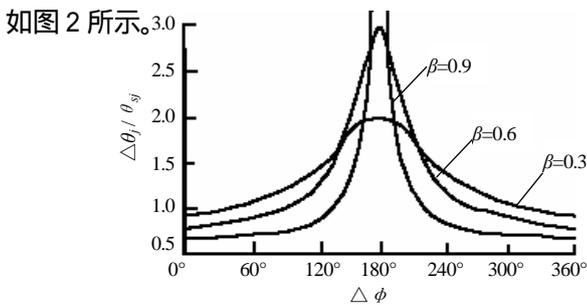


图2 导弹跟踪方向偏离雷达的程度与 $\Delta\phi$ 、 β 的关系图
Fig.2 Relation of deviation degree of missile following from radar to $\Delta\phi$ and β

由图2可知, 当 $\Delta\phi$ 偏离 180° 以很小相位差时, 干扰效果将显著下降。在反辐射导弹的飞行过程中, 其导引头天线面处, 雷达与诱饵辐射波的相位差由两部分组成: 一部分是两点源射频信号初始相位差, 是固定的; 另一部分是两点源至导引头天线口面中心的路程差形成的相位差。后者在导弹飞行过程中是迅速变化的, 而反辐射导弹跟踪某一频率电磁信号时其带宽很窄, 只有几赫兹, 于是两辐射波的相干项被滤除了, 即相干效果消失, 所以在实际情况中是很难形成相干诱骗的。

3 两点源非相干诱骗反辐射导弹的偏角计算

在反辐射导弹单脉冲系统的角度分辨范围之内,

两点源同时施放电波, 但雷达信号和干扰信号各自独立, 彼此不相干, 叫做两点源非相干诱骗。天线受到雷达和诱饵两个辐射源的共同作用, 可能达到平衡, 平衡的位置是在两个目标的联线上, 偏向功率大的目标。

两点源信号共同作用下, 导引头跟踪方向相对雷达的偏离角为:

$$\Delta\theta_j = \frac{1}{1+\beta^2}\theta_{sj} \tag{11}$$

由(11)式知, 当雷达和诱饵等信号强度时, 导引头跟踪方向位于两目标中间; 当只有一个辐射源时, 即 $\beta = 0$ 和 $\beta = 1$ 分别对应雷达关机和诱饵关机的情况, 反辐射导弹理所当然跟踪此辐射源。雷达和诱饵按时间排成顺序断续开机, 就会使导引头跟踪方向在雷达和诱饵之间摆动, 这种干扰也称闪烁式干扰。所以在非相干诱骗时, β 为任意时, 导引头都将跟踪两点源连线间的某个位置, 导引头跟踪方向始终不会偏离到两点源外。

两点源距离 d 的选择既要保证诱骗导弹导引头跟踪点大于雷达安全半径 d_{min} , 又要保证诱饵源和雷达对导弹的张角 θ_{sj} 小于 $(0.8\sim 0.9)\theta_{0.5}$.

4 两点源诱骗反辐射导弹的脱靶距离计算

如图1所示 反辐射导弹飞临临界分辨位置 $A(x,y)$ 之前, 反辐射导弹跟踪雷达和诱饵辐射源能量中心 O_1 点, 横坐标为 x_1 . 反辐射导弹在接近目标的过程中, 雷达和诱饵之间的视角 θ_{sj} 逐渐增加, 当增加到某一角度时, 反辐射导弹能够将两者分辨开, 并且开始跟踪其中一个目标, 悲观的认为跟踪雷达, 此时的角度 θ_{sj} 为分辨角 θ_m . 两个站被分开后, 为了修正初始失误, 反辐射导弹以最大过载 A_m 向雷达飞去, 反辐射导弹的最终弹着点为 O_2 点, 横坐标为 x_2 . 设导弹末速度为 V_m , 若忽略导弹飞行末段重力加速度的影响, 可设 V_m 为常数, 则反辐射导弹转弯半径 r 为 V_m^2/A_m . 在这种情况下, 弹着点 x_2 可用下列方法确定。

导弹至 O_1 点的距离 AO_1 近似为：

$$AO_1 \approx \frac{d/2}{\sin(\Delta\theta_m/2)} \quad (12)$$

导弹落地时间 t 为：

$$t = \frac{AO_1}{V_m} = \frac{d}{2\sin(\Delta\theta_m/2)V_m} \quad (13)$$

导弹侧偏距离 O_2O_1 为：

$$O_2O_1 = \frac{1}{2} A_m t^2 = \frac{1}{2} \cdot A_m \cdot \left(\frac{d}{2\sin(\Delta\theta_m/2)V_m} \right)^2 \quad (14)$$

由于， $\Delta x' = \Delta x - O_2O_1$ ，所以有：

$$\Delta x' \approx \frac{d}{2\sin(\Delta\theta_m/2)} \Delta\theta_j - \frac{1}{2} \cdot A_m \cdot \left(\frac{d}{2\sin(\Delta\theta_m/2)V_m} \right)^2 \quad (15)$$

如果，导弹飞临临界分辨位置之前，雷达和诱饵关机，在这种情况下，诱饵源和雷达对导弹的张角

θ_{sj} 小于导弹的分辨角 θ_m ，导弹脱靶距离为：

$$\Delta x' \approx \frac{d}{2\sin(\theta_{sj}/2)} \Delta\theta_j \quad (16)$$

（上接第 29 页）

大量事实证明，硼/铬酸钡延期药发生在 750 附近的预点火反应为固 - 固相反应，此时发生强烈体积扩散，晶格扩散（内部流动性）显著。对于固 - 固相反应，固体间的扩散是决定反应速度的一个关键因素。从不同配比的硼/铬酸钡延期药的热分析曲线可以发现，粒子间的粘着放热量以及表面扩散放热均非常小，不能从热谱图中体现出来。

3 结论

(1) 硼/铬酸钡延期药的预点火反应为固 - 固相反应，主要反应区的温度范围在 750 附近，反应对应

5 结束语

本文从两点源诱骗反辐射导弹的效能模型出发，定量计算和讨论了两点源诱骗对反辐射导弹效能发挥的影响。可以看出采用两点源诱骗系统对抗反辐射导弹的效果不仅与反辐射导弹的角度分辨力、导弹速度、导弹最大过载、诱饵频率、诱饵辐射功率、诱饵信号形式有关，而且与诱饵布阵间距配置有关，此文为设计、部署对抗反辐射导弹的有源诱骗系统提供了一定的理论依据。

参考文献：

- [1] 李朝伟等. 地空反辐射导弹抗目标关机技术研究[J]. 电子对抗技术, 2004, (7).
- [2] 张肃等. 防空雷达对抗 ARM 生存能力分析[J]. 电光与控制, 2005, (2).
- [3] 林象平. 雷达对抗原理[M]. 电子工业出版社, 1985.6.

于固体间的体积扩散。

(2) 硼/铬酸钡延期药的预点火反应理论上零氧平衡时的组分硼/铬酸钡配比为 14.6/85.4(wt%)，但此配比并非一定为燃烧反应零氧平衡时的化学计量点，因此此时的燃烧速率及燃烧反应热不一定最大。反应产物为 BaB_2O_4 和 CrB_2 。

参考文献：

- [1] Laser-Optics-Technology-Systems. Beta-Barium borate BBO crystals[M]. Products Laser Optics Crystals, 1999.
- [2] Dean, J.A., 兰氏化学手册[M]. 科学出版社, 1991.
- [3] 黄浩川. 兵器工业科学技术辞典·火工品与烟火技术[M]. 国防工业出版社, 1992.