

一种防空训练用拖曳式诱饵系统的设计

白渭雄, 付红卫, 张学礼
(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要: 机载拖曳式诱饵对防空雷达的干扰作用十分有效, 严重影响了防空导弹的作战效能, 因此, 研制防空训练用拖曳式诱饵系统、并将其用于防空雷达的跟踪训练是一项十分必要的工作。分析了拖曳式诱饵对单脉冲雷达的干扰机理和干扰效果, 并以拖曳式诱饵的干扰方程为依据, 对防空训练用拖曳式诱饵系统的使用要求和设计要素进行了分析和讨论, 提出了其系统构成和实现方法。仿真结果表明本设计对跟踪雷达所形成的干扰效果较好。

关键词: 训练靶标; 双点源干扰; 拖曳式诱饵; 角度欺骗干扰; 电子对抗

中图分类号: TN972.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)02-0039-05

在空地电子对抗中, 拖曳式雷达诱饵(TRAD)占据着非常重要的地位。拖曳式诱饵主要用于保护载机, 使其免遭防空导弹的攻击。拖曳式雷达诱饵通常由飞机通过拖曳线缆将其拖拽着飞行, 拖曳式诱饵内装有放大转发器, 对雷达探测信号进行放大转发, 与载机回波信号一起对雷达形成双点源干扰, 而且双源共处于防空雷达和导弹导引头的瞬时波束范围内。

拖曳式诱饵可对防空制导雷达的测角系统造成有效的干扰, 使雷达探测的目标角度产生偏差, 从而失去对目标的进攻能力。自上世纪80年代以来, 拖曳式诱饵逐步在作战中显露出优异的防卫效果并得到了外军的高度重视, 目前已发展了多种型号, 并作为其电子战装备的重要组成部分, 在大量的作战飞机上装备使用。防空训练用拖曳式诱饵系统将模仿真实的拖曳式雷达诱饵的功能, 用于防空雷达的跟踪训练。

本文对拖曳式诱饵的干扰机理进行了分析, 对防空训练用拖曳式诱饵系统的使用要求和设计要素进行了分析和讨论, 并提出了其系统构成和实现方法。

1 拖曳式诱饵的设计要素

1.1 拖曳式诱饵的干扰方程

TRAD的干扰方程是拖曳式干扰的基本理论依据。

根据图1所示关系, 雷达信号经载体反射后, 接收的回波信号功率为

$$P_s = \frac{P_i G_i^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

式中: P_i 为雷达的脉冲功率; G_i 为雷达发射/接收天线增益(这里假设发射和接收共用一天线); λ 为雷达工作波长; σ 为目标载体的散射截面积; R 为雷达到飞机的距离。文献[1]给出了“应答式”和“转发式”两种诱饵干扰体制下 TRAD 的等效干扰功率 P_{as} 。

1) 转发式 TRAD 的等效干扰输出功率为

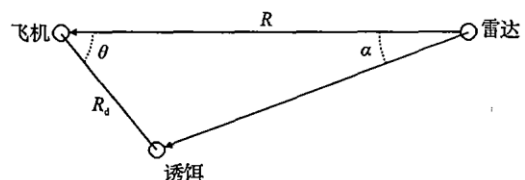


图1 TRAD 保护飞机防卫示意图

Fig. 1 Demonstration of TRAD's application

$$P_{\text{rde}} = \frac{kP_i G_i \sigma}{4\pi \cos^2 \alpha} \left(\frac{1}{R} - \frac{R_d}{R^2 \cos \theta} \right)^2 \quad (2)$$

式中: k 为雷达接收机的干扰压制系数(欺骗干扰时, $k \geq 2$); α 为雷达到载体与雷达到诱饵连线的夹角; θ 为雷达到载体与载体到诱饵连线的夹角; R_d 为载体到诱饵的距离(这里近似等于拖曳线长度)。式(2)为转发式 TRAD 的干扰方程, 这里 R_d 是一常量。由式(2)可以看出, 为了满足干扰功率对目标回波的压制系数达到 k 值, 干扰输出功率将取决于雷达参数及目标面积, 而且干扰输出功率是一个随 R 变化有极值的函数, 当 $R = 2R_d$ 时, 要求的干扰功率最大, 并且由此确定的干扰机参数(包括干扰机最大输出功率、转发放大倍数、天线增益等)将在所有 R 区间满足干扰压制比的要求。

2) 应答式 TRAD 的等效干扰输出功率为

$$P_{\text{ide}} = \frac{kP_i G_i \sigma}{64\pi R_d^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \theta} \quad (3)$$

对比式(3)与式(2), 在应答式工作方式下, 干扰机的输出功率是一常数, 不像式(2)那样随距离 R 变化。对于固定发射功率的情况, 重点是它所需要的最大干扰功率。最大等效干扰功率出现的条件为: $R = 2R_d \cos \theta$, 将其代入式(2)就导出了式(3)。当雷达距载体较远的情况下, 可近似认为 $\alpha = \theta = 0^\circ$ 。此时, 式(3)可以简化为

$$P_{\text{ide}} = \frac{kP_i G_i \sigma}{64\pi R_d^2} \quad (4)$$

式(2)和式(3)、(4)是计算所需的 TRAD 干扰功率的公式, 它们为技术设计和战术使用提供了理论依据。

可以看出, 使 TRAD 的输出功率在 R 的全距离段都满足式(2)和式(3)的目的, 是为了不仅可对地面雷达造成有效的干扰压制比, 而且可对寻的导弹导引头造成有效的干扰压制比, 从而保证载机的安全。

在实际的系统构成上, 为了减轻诱饵的重量、提高收发隔离度, TRAD 通常都采用应答式工作方式。

1.2 拖曳式诱饵拖曳绳的长度 R_d

载机使用拖曳式诱饵的目的, 不仅仅要使雷达对目标产生侧角偏差, 而且还要有效躲避导弹的攻击。为了达到这些目的, 在拖曳式诱饵的设计中, 对拖曳线的长度将会有一定的要求和约束条件。

就拖曳线的长度来说, 在设计中要考虑 3 方面的因素: 导弹的杀伤半径、雷达的距离分辨率及雷达波束宽度。其原则是:

1) 目标距目标与诱饵回波形成的能量重心的距离应大于导弹的杀伤半径, 这样在导弹穿越能量重心时, 如果引信起爆, 可保证目标的安全, 一般选取范围为: $R_d > 2R_k$ (R_k 为导弹的杀伤半径)。

2) 在诱饵使用过程中, 在角度上, 应保证目标和诱饵对雷达所形成的张角始终小于雷达的角度分辨率, 也即始终小于雷达的半功率波束宽度; 在距离上, 应保证目标和诱饵对雷达所形成的距离差小于雷达的距离分辨率, 这样, 雷达将无法从角度和距离上对目标和诱饵进行分辨, 而会将目标和诱饵作为一个目标来跟踪, 并对目标产生测角偏差。这就对诱饵相对于载体的最大横向距离和最大纵向距离提出了限制, 如果超过这个限制, 雷达将可以从方位和距离上对诱饵和载体进行识别。所以拖曳线长度不能过长, 一般性地, 对 R_d 提出的最长限制为: 横向 $R_{d1} \leq 100 \text{ m} - 150 \text{ m}$, 纵向 $R_{d2} \leq 100 \text{ m} - 250 \text{ m}$

2 防空训练用拖曳式诱饵系统的使用要求

用于防空训练中的拖曳式诱饵系统, 可用航模靶机来代替目标载机, 并配备训练用拖曳式诱饵, 来模拟实际拖曳式诱饵的功能。其拖曳绳的长度 R_d 可按上面讨论的原则选取, 由于训练状态下被干扰对象的频率和信号特征是已知的, 因此无需侦查引导接收机, 可简化系统构成。

为了检验地面雷达受拖曳诱饵干扰时的效果, 可在航模内放置信标源, 以便给出航模的真正角坐标, 信标源的回答信号需进行延迟, 以免与航模回波在时间上重叠。这样, 训练中雷达显示屏上将出现两个目标信号, 一个是信标源回波, 其角度信息代表了航模靶机的真实角坐标, 距离坐标是不真实的; 另一个是航模靶机和拖曳式诱饵共同的回波, 其距离信息是真实的, 角度信息是假的, 而且两信号中, 信标源信号始终位于目标运动方向的前方, 通过比较两信号的角度偏差, 就可以看出拖曳式诱饵对雷达的角度诱骗效果。

诱饵的发射功率将要根据具体情况确定。

式(2)和(3)分别是转发式和应答式诱饵的等效输出功率公式,其中的 σ 为目标载体的散射截面积; P_r 为雷达的脉冲功率;这里的雷达,有两个含义:在防空雷达跟踪目标阶段,它代表地面雷达;在导弹发射后的末制导阶段,它代表弹上导引头雷达。而且,TRAD的输出功率应在 R 的全距离段都满足式(2)和(3),使TRAD不仅可对地面雷达造成有效的干扰压制比,而且可对寻的导弹导引头造成有效的干扰压制比。

训练中由于载机被航模替代,因此式(2)和式(3)中的 σ 应为航模的雷达反射面积,比载机的 σ 要小,其次,如果训练中仅考虑对地面雷达进行干扰,由于诱饵和航模距雷达较远,则在航模飞行的全距离段,诱饵的回波功率只要满足对航模回波信号的压制比大于要求的 k 倍即可,这种情况下诱饵的回波功率将比较小,用普通的无源诱饵(如流线型诱饵外壳内放置角反射器或龙伯球)就可实现,甚至用无源干扰绳更为方便。当然为了减小诱饵体积也可用小型转发式有源干扰机实现。如果训练中不仅要考虑对地面雷达进行干扰,而且要对发射的导弹进行干扰,则应根据式(2)和式(3)来计算发射功率,当然,文献[1]提出的导弹脱离距离 R_s 的运用可使TRAD所需的最大干扰功率比用式(2)和式(3)计算的最大发射功率降低很多,这种情况下,由于TRAD所需的最大干扰功率仍然较高,因此诱饵的重量、体积都将增大,对干扰发射机的功率和航模的承重能力都将提出更高的要求。

3 防空训练用拖曳式诱饵系统的构成

3.1 基本组成

防空训练用拖曳式诱饵系统由航模、诱饵、拖曳机构、伞降机构、电源、遥控系统、地面监测设备及信标源等组成,航模作为载荷平台,携所需载荷升空,完成在指定空域、航线的飞行任务,拖曳机构和诱饵在遥控机构的控制下,完成诱饵的投放;干扰模式、频段的切换;干扰信号的发射;拖曳线的切割;伞降机构的开启等,同时,遥控系统还承担航模的起飞与回收控制,地面监测设备监测载机航迹和诱饵系统的状态。

在航模内放置信标源可获知航模(目标)的真正角坐标,以便检验地面雷达受拖曳诱饵干扰时的效果。

3.2 拖曳机构

拖曳机构由诱饵投放器、拖曳线线盘、拖曳线、拖曳线切割装置、诱饵伞降启动器及诱饵降落伞组成,完成拖曳式诱饵的机外固定、升空投放和回收任务。诱饵投放器位于机身下或机身侧面,飞机起飞时,诱饵固定于诱饵投放器内,飞机到达预定空域后,由遥控器控制诱饵投放器松开固定装置,投放诱饵,并解锁拖曳线盘,线盘在阻尼器作用下,释放拖曳线,到达预定长度后,可由遥控器控制,停止线盘的转动,固定诱饵与载机的间距。线盘可由电机驱动,回收拖曳线,减小诱饵和载机的距离。在完成干扰训练任务后,在指定空域可由遥控器控制回收拖曳线,在诱饵与载机小于预定距离后,切断拖曳线、分离载机和诱饵,同时启动置于诱饵内的降落伞张伞,在地面回收诱饵;而载机则可用机降或伞降的方式回收。

3.3 诱饵

1) 无源诱饵。无源诱饵可用于仅考虑对地面雷达进行干扰的情况,由于航模的雷达截面较小,当不满足要求时,可在航模内放置角反射器或龙伯球,当航模的雷达截面满足要求时,可用航模直接作为一目标源;而在流线型诱饵壳体内放置角反射器或龙伯球形成另一目标源。

2) 有源诱饵。有源诱饵可用于需要对地面雷达和发射的导弹都实施干扰的情况,同样,当航模的雷达截面不能满足要求时,可在航模内放置角反射器或龙伯球,当航模的雷达截面满足要求时,可用航模直接作为一目标源;而在流线型诱饵壳体内放置转发式或应答式干扰机形成另一目标源。

当然,为了实现双点源杂波干扰,也可在航模内放置杂波干扰机,与诱饵内的干扰机共同对雷达进行杂波干扰。干扰机可采用转发式干扰机,有两种工作模式:转发干扰模式和杂波干扰模式。

在转发干扰模式,干扰机由接收天线接收到地面雷达的探测脉冲,经接收模块、中间放大级,后经终端放大级放大,由发射天线发出,对原探测信号不作任何处理,只是在信号功率上进行放大。航模内干扰机和诱饵内干扰机的工作原理相同,发射功率可变,功率范围小于诱饵内干扰机一倍以上,在恒定功率情况下,地面雷达在角度上将跟踪两部诱饵的能量重心,在变功率情况下,地面雷达的跟踪角将会出现抖动。

在杂波干扰模式下,由控制器在遥控或程序控制下,控制调制器和振荡器,发出某一频段的杂波干扰,由于航模内和诱饵内干扰机的干扰频率和干扰模式相同,因此,在恒定功率情况下,地面雷达在角度上仍将跟踪两源的能量重心,在变功率情况下,地面雷达的跟踪角将会出现抖动。与转发式干扰不同的是,地面雷达

有可能丢失距离信息。

4 防空训练用拖曳式诱饵对单脉冲雷达的干扰仿真

为了了解拖曳式诱饵对跟踪雷达所形成的干扰效果,对防空训练用拖曳式诱饵给单脉冲雷达造成的干扰进行了仿真,诱饵采用有源转发工作方式。

1) 仿真采用的数学模型。

设载机截面为 σ_1 , 诱饵截面为 σ_2 , 单平面内振幅和差单脉冲雷达的第 1 及第 2 接收支路中, 两个点源的回波信号可表示为

$$E_1 = E_{m1} F(\theta_0 - \theta_1) \exp j\omega t + E_{m2} F(\theta_0 - \theta_1) \exp j(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

$$E_2 = E_{m1} F(\theta_0 - \theta_1) \exp j\omega t + E_{m2} F(\theta_0 - \theta_1) \exp j(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

其中: E_{m1} 、 E_{m2} 分别为载机和诱饵的回波信号振幅; θ_1 、 θ_2 分别为载机和诱饵相对单脉冲雷达天线等信号强度方向的角位置; φ 为两点源相对雷达的径向距离差引起的到达雷达天线时信号的相位差。

单脉冲雷达和差比较器输出的差信号及和信号分别为

$$E_p = (E_1 - E_2) / \sqrt{2} = (E_{m1} (F(\theta_0 - \theta_1) - F(\theta_0 + \theta_1)) \exp j\omega t + E_{m2} (F(\theta_0 - \theta_2) - F(\theta_0 + \theta_2)) \exp j(\omega t + \varphi)) / \sqrt{2} \quad (7)$$

$$E_c = (E_1 + E_2) / \sqrt{2} = (E_{m1} (F(\theta_0 - \theta_1) + F(\theta_0 + \theta_1)) \exp j\omega t + E_{m2} (F(\theta_0 - \theta_2) + F(\theta_0 + \theta_2)) \exp j(\omega t + \varphi)) / \sqrt{2} \quad (8)$$

经混频和中放后, 在相位检波器的输出端得到:

$$S_c(\theta) = \text{Re}(E_c \cdot E_p^*) / E_c \cdot E_c^* \quad (9)$$

令式(9)中的 $S_c(\theta)$ 等于零, 即可求出主被动雷达对双点源目标定向的条件, 也即 θ_1 与 θ_2 间的比例关系。

2) 干扰仿真。

仿真数学模型采用式(9), 天线波束采用辛格函数, 波束宽度为 1° , 仿真结果示于图 2、图 3 中。

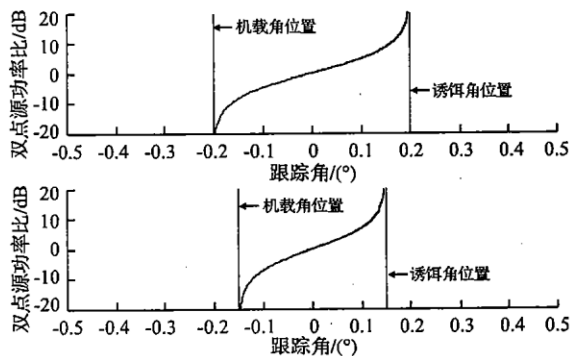


图 2 同功率比条件下的跟踪曲线

Fig. 2 The tracking curves with different power ratio

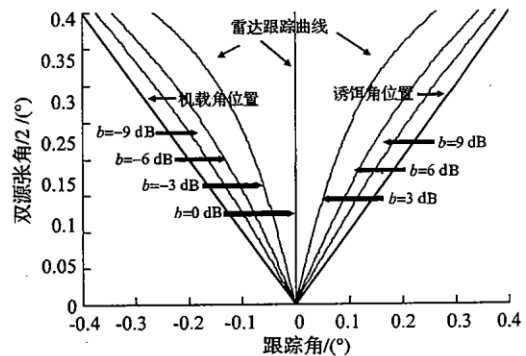


图 3 不同张角条件下的跟踪曲线

Fig. 3 The tracking curves with different open angles

在图 2 中, 上图设定载机与诱饵对雷达形成的张角为 0.4° , 下图设定载机与诱饵对雷达形成的张角为 0.3° , 诱饵与载机信号功率比(双点源功率比)定义为 $b = 20 \log(a)$ dB, 其中 $a = E_{m2}/E_{m1}$, 为诱饵与载机信号的振幅比, 功率比 b 的变化范围设定为 -20 dB -20 dB, 由于诱饵与载机相对雷达径向距离的不确定性, 因而在转发式干扰方式下, 诱饵与载机信号间的相位差 φ 在 $0 - 2\pi$ 均匀分布的随机变量, 由于式(9)中的 $\cos\varphi$ 取值将在 $-1 - +1$ 之间服从随机分布, 均值为 0, 反推 φ 的均值为 $\pi/2$, 也即统计平均意义上, 诱饵与载机信号间的相位差 φ 的均值为 $\pi/2$, 相关的仿真结果也证明了这一结论。因此仿真中 φ 的取值为 $\pi/2$ 。从图 2 可以看出, 如果诱饵信号功率小于载机信号功率, 则雷达的跟踪角将偏向载机, 在载机信号远大于诱饵信号的情况下, 雷达才可能跟踪于载机上; 当诱饵信号功率与载机信号功率相等时, 则雷达跟踪于两源张角中心; 当诱饵信号功率大于载机信号功率时, 雷达的跟踪角将偏向诱饵。

图 3 仿真了载机和诱饵对雷达形成不同张角时的跟踪情况, 张角变化范围设定为 $0^\circ - 0.8^\circ$, 图中, 左边的直线为不同张角条件下载机的角位置, 右边的直线为诱饵的角位置, 两条直线间的曲线为不同张角下雷达的跟踪曲线, 其中左边的 3 条曲线为 $b = -9$ dB、 $b = -6$ dB 和 $b = -3$ dB 时的跟踪曲线, 右边的 3 条曲线为 $b = 9$ dB、 $b = 6$ dB 和 $b = 3$ dB 时的跟踪曲线, 中间的一条曲线为 $b = 0$ dB 时的跟踪曲线。由图 3 可以看出, 无论张角怎样变化, 其跟踪规律仍与图 2 的一致。

上面的仿真虽然是在转发方式得出的,但也同样适应于应答方式,因应答方式下, φ 的均值也为 $\pi/2$ 。

5 结束语

拖曳式干扰实质上是一种双点源干扰,可对防空雷达包括单脉冲雷达造成有效的角度欺骗干扰,从而保护载机免受导弹的攻击,它不但可干扰地面雷达,也可干扰机载雷达及导弹的弹上导引头,因此干扰效果十分显著。通过训练器材在训练中及早识别其欺骗效果,掌握其干扰特点和规律,并在此基础上探讨对抗方法,具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 王万通,庞国荣. 拖曳式有源雷达诱饵[J]. 电子对抗技术, 1998,13(3):21-26.
WANG Wantong, PANG Guorong. Towing Active Radar Decoy[J]. Electronic Countermeasure Technique, 1998, 13(3):21-26. (in Chinese)
- [2] 白渭雄,唐宏,陶建峰. 拖曳式诱饵对单脉冲雷达的干扰分析[J]. 电子对抗技术, 2007,22(6):39-42.
BAI Weixiong, TANG Hong, TAO Jianfeng. Analysis of the Towing Decoy to Mono-pulse Radar[J]. Electronic Information Countermeasure, 2007, 22(6):39-42. (in Chinese)
- [3] (苏)A. И. 列昂诺夫,单脉冲雷达[M]. 黄虹,译. 北京:国防工业出版社,1974.
(SOV) A. И. Translated. Mon-pulse Radar[M]. Huang Hong, Translate. Beijing: National Defense Industry Press, 1974. (in Chinese)
- [4] 陈静. 雷达箔条干扰原理[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
CHEN Jing. Radar Foil Jamming Theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [5] 方有培. 拖曳式诱饵射频诱饵干扰防空导弹研究[J]. 航天电子对抗, 2001, (4):16-19.
FANG Youpei. Study on the Jamming of Towing Decoy and RF Decoy to Air-defence Missile[J]. Space Electronic Countermeasure, 2001, (4):16-19. (in Chinese)
- [6] Pollon G E, Lank G W. Angular Tracking of Two Closely Spaced Radar Targets[J]. IEEE Trans on Aerosp Electron Syst, 1968, 4(4): 541-550.
- [7] Irving Kanter, Varieties of Average Monopulse Responses to Multiple target[J]. IEEE Trans on AES, 1981, 17(1):25-28.
- [8] Kerjins W J. Analysis of Towed Decoys [J]. IEEE Transactions on AES, 1993, 29(4):1222-1227.
- [9] Self A G. Intercept time and its prediction[J]. IEEE Proc - F, 1985, 132(4):215-222.
- [10] William J, Kerins. Analysis of Towed Decoys[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1993, 29(4):1222-1227.

(编辑:田新华)

Design of a Towing Decoy Training System for Air Defence Applications

BAI Wei-xiong, FU Hong-wei, ZHANG Xue-li

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: The jamming effect of airborne towing decoy is very available to air-defence radar and seriously affects the operational ability of air-defence missile. So, it is a necessary work to design and develop the towing decoy system for air defence training and apply it into the tracking training of air-defence radar. The jamming mechanism and jamming effect of the towing decoy to mono-pulse radar are analysed. According to the jamming equation of the towing decoy, the utilization requirement and main design factor of the towing decoy system for air-defence training are analysed and discussed. The construction and realizing method of the system are presented.

Key words: training target; double-point-source interference; towing decoy; angle deception interference; electronic countermeasures