

主动雷达抗拖曳式诱饵干扰的角度提取方法*

Acquiring Method of Angle for Active Radar Against TRAD

方群 夏忠楠/西北工业大学航天学院

摘 要:通过对拖曳式有源雷达诱饵干扰的分析,得到了平衡状态下对导引头测角值进行数据积累且取均值后, 导引头将指向大功率辐射源的结论。在诱饵信号从功率上压制载机回波信号的前提下,对导引头处于平衡状态 时的测量角公式进行数学推导进而求得小功率辐射源(载机)的角度。结合比例导引规律,通过飞行弹道仿真 验证了雷达型空空导弹应用上述方法可获得准确的目标角度,进而导引导弹准确地命中目标。

关键词:主动单脉冲雷达;拖曳式有源雷达诱饵干扰;测角数据积累 Keywords:active monopulse radar;towed radar active decoy;angle measure accumulating

0引言

现代空战中,在单机作战的情况 下同样可以运用两点源干扰对抗单脉 冲测角系统,比如拖曳式有源雷达诱 饵(TRAD)干扰。通过诱饵施放与 载机回波相同的非相干信号,可实现 对主动单脉冲测角系统的两点源非相 干干扰。

目前,国内外对于TRAD的研究 主要集中在干扰问题上^[3-6],而对于抗 干扰方法的研究甚少。因此,本文主 要从主动雷达导引头抗TRAD的角度出 发,探讨干扰作用下导引头对目标角 度的提取方法。首先对TRAD进行了 干扰机理分析,然后研究得出在平衡 状态下对导引头测角值进行数据积累 且取均值后,导引头将指向功率较大 的辐射源的结论。而对于TRAD,功 率较大的辐射源对应的是雷达诱饵, 为此,还必须设法找到小功率辐射源 (载机)的角度。在诱饵从功率上压 制目标回波的前提下,再对干扰作用

* 航空科学基金资助项目(20070153003)

式进行数学推导。从而求得小功率辐 射源(载机)的角度。最后,结合比 例导引规律,通过飞行弹道仿真验证 应用上述方法可以获得准确的目标角 度,验证了此方法的有效性。

1干扰机理分析

TRAD主要用于保护载机(目标)。诱饵通过拖曳线与载机配置在一起,处于雷达导引头的瞬时波束范围内。它能逼真地模拟载机的航速、航向及雷达反射特征,使单脉冲雷达跟踪系统无法通过运动特性区分载机和诱饵,从而形成对导引头的两点源干扰。诱饵利用与载机相同的运动特性,欺骗导引头雷达,以提高载机在作战时的存活率,如图1所示。

图1中, θ_1 为载机到导弹雷达的连



图1 拖曳式干扰示意图

线与天线等信号轴指向的夹角, θ_2 为诱 饵到导弹雷达的连线与天线等信号轴指 向的夹角, $\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$ 为载机到导弹雷达 的连线与诱饵到导弹雷达的连线夹角。

在干扰作用下,单次测角后导引 头处在平衡状态时, θ₁和θ₂分别为^[5]:

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{\Delta \theta \cdot (1 + \beta \cos \varphi)}{1 + 2\beta \cos \varphi + \beta^2} \\ \theta_2 = \frac{-\Delta \theta \cdot \beta (\beta + \cos \varphi)}{1 + 2\beta \cos \varphi + \beta^2} \end{cases}$$
(1)

式(1) 中, φ为载机回波与诱饵发 射信号在接收机天线处的相位差; β 为载机回波与诱饵发射信号在接收机 天线处的振幅比。如果以导引头转动 前天线等信号轴的起始方向为参考, 那么在干扰作用下天线等信号轴达到 平衡位置后的角度(测得的目标角 度)为:

$$\theta = \frac{-\Delta\theta \left(1 + \beta \cos\varphi\right)}{1 + 2\beta \cos\varphi + \beta^2} + \theta_1$$

$$\overline{\mathfrak{R}}\theta = \frac{\Delta\theta \cdot \beta \left(\beta + \cos\varphi\right)}{1 + 2\beta \cos\varphi + \beta^2} + \theta_2$$
(2)

式(2) 表明,在干扰作用下,导引头 天线指向将随Δθ、φ、β的变化而变化, 从而破坏导引头对目标的稳定跟踪。

> 2011/2 航空科学技术 MERONAUTICAL SCIENCE & TECHNOLOGY 65



2 导引头测角系统提取诱饵角度的方法

式(2) 已经给出了干扰作用下,单次测角后导引头在平 衡状态时天线指向位置。进一步将对干扰作用下的导引头测 角值进行统计分析。

设φ在[0,2*π*]内均匀分布,导引头指向错误方向的概率 为^[5]:

$$p(\varphi) = [2\pi - 2\arccos(-1/\beta)]/2\pi$$
(3)
由式 (2) 可得:
$$\theta(\pi - \varphi) = \frac{-\Delta\theta(1 - \beta\cos\varphi)}{1 - 2\beta\cos\varphi + \beta^2} + \theta_1 = \theta(\pi + \varphi)$$
(4)

(4) 式表明, 在 β 和 Δ θ 固定的情况下, $\theta(\varphi)$ 以 π 为偶对称。 当 β ≠1时, 由(4)式得到的 $\theta(\varphi)$ 的对称性有:

$$= \lim_{x \to \pi} 2 \int_{0}^{x} \frac{-\Delta \theta \left(1 + \beta \cos \varphi\right)}{1 + 2\beta \cos \varphi + \beta^{2}} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot d\varphi + \theta_{1}$$

$$= \lim_{x \to \pi} \frac{-\Delta \theta}{2\pi} \int_{0}^{x} \left(\frac{2 + 2\beta \cos \varphi}{1 + 2\beta \cos \varphi + \beta^{2}} - 1 + 1\right) \cdot d\varphi + \theta_{1}$$

$$= \frac{-\Delta \theta}{2} - \lim_{x \to \pi} \frac{\Delta \theta (1 - \beta^{2})}{2\pi} \int_{0}^{x} \frac{d\varphi}{1 + 2\beta \cos \varphi + \beta^{2}} + \theta_{1}$$

$$= \frac{-\Delta \theta}{2} - \lim_{x \to \pi} \frac{\Delta \theta (1 - \beta^{2})}{2\pi} \cdot \frac{2}{\left|1 - \beta^{2}\right|} \arctan\left(\sqrt{\frac{1 - 2\beta \cos \varphi + \beta^{2}}{1 + 2\beta \cos \varphi + \beta^{2}}} \cdot tg\left(\frac{x}{2}\right)\right) + \theta_{1}$$

$$= \begin{cases} \theta_{1}, \qquad \beta > 1 \\ \theta_{1} - \Delta \theta = \theta_{2}, \qquad \beta < 1 \end{cases}$$
(5)

因此,在TRAD干扰作用下,诱饵在能量上压制载机回 波,使得载机回波与诱饵发射信号的振幅不等,在平衡状态 下,对测量角进行数据积累并取均值后将指向振幅大的辐射 源,即测量角的均值将指向诱饵角度。

3 导引头测角系统提取载机角度的方法

虽然通过式(5)方法可以实现对诱饵角度的跟踪,但并 没有获取到载机(目标)的角度,为此还必须设法对小功率 源(载机)的角度进行跟踪。

由文献[6]可知,在两表面回波的共同作用下,导引头 测角系统的角度响应具有如下表达形式:

$$\theta = \frac{(\theta_1 + \theta_2)}{2} + \frac{\Delta\theta}{2} \cdot \frac{(1 - \beta^2)}{1 + 2\beta\cos\varphi + \beta^2}$$
(6)

在TRAD干扰作用下,诱饵发射干扰信号与载机回波 只是在相位上不相干,符合式(6)中两表面回波的情况。因 此,干扰下的测角值除了可以表示为式(2)的形式外,还可 由式(6)表示。其中,(*θ*₁+*θ*₂)/2就是两辐射源的角平分线的方 向,因此,在找到均值对应的大振幅辐射源的角度*θ*₁后,再 通过式(6)求出(*θ*₁+*θ*₂)/2,就可以间接地估算出小振幅辐射源的角度,即载机的角度。

在导引头处理时间内,之所以每次的测角值会发生变 化,主要是由于信号相位差φ的随机分布。在处理时间内,对 测量角任意两个采样点*a*和*b*对应的随机相位差 φ_a和φ_b有如下 关系式^[5]:

$$\left|U_{sa}/U_{sb}\right|^{2} = \frac{1+2 \cos_{a} + 2}{1+2 \cos_{b} + 2}$$
(7)

式(7)中,等式左边为采样点*a*和*b*处的和支路振幅比的 平方。在导引头处理时间内,将任意两次采样点*a*、*b*处的测 角值由式(6)表示,则有:

$$\begin{cases} a = \frac{\binom{1}{2} + \binom{2}{2}}{2} + \frac{\Delta}{2} \cdot \frac{\binom{1-2}{2}}{1+2 \cos_{a} + \binom{2}{2}} \\ b = \frac{\binom{1+2}{2}}{2} + \frac{\Delta}{2} \cdot \frac{\binom{1-2}{2}}{1+2 \cos_{b} + \binom{2}{2}} \end{cases}$$
(8)

经整理得:

$$\begin{cases} 1+2\beta\cos\varphi_{a}+\beta^{2}=\frac{\Delta\theta(1-\beta^{2})}{2[\theta_{a}-(\theta_{1}+\theta_{2})/2]}\\ 1+2\beta\cos\varphi_{b}+\beta^{2}=\frac{\Delta\theta(1-\beta^{2})}{2[\theta_{b}-(\theta_{1}+\theta_{2})/2]} \end{cases}$$
(9)

再将式(9)带入式(7)得:

$$\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} = \frac{\theta_a |U_{sa}/U_{sb}|^2 - \theta_b}{|U_{sa}/U_{sb}|^2 - 1}$$
(10)

由此可见,对(*θ*₁+*θ*₂)/2的计算便转化为对采样点*a*和*b*处的和支路振幅比的测量计算,从而可以估算出载机的角度。

4 主动雷达导引头抗TRAD干扰的末制导段攻击 过程仿真验证

应用上述方法,结合比例导引法,将脱靶量作为考核 指标,对导弹迎击和追击目标的末制导段攻击过程进行飞行 仿真验证。

1) 迎击目标

仿真条件:导弹初始位置为x=0,y=0初始速度为700m/s, 且大小不变,初始方向 $\sigma=0^{\circ}$;载机初始位置为x=1000m, y=1000m,载机做水平匀速直线飞行,速度大小为-200m/s;拖 曳线长150m;诱饵初始位置为x=5120m,y=10m,诱饵也做水 平匀速直线飞行,速度大小也为-200m/s;初始位置处压制比 $k=2,\beta\approx1.41$,置信区间宽度0.2°,置信度大于70%,数据积





图3 迎击过程中的测角误差变化





累点数为6366个,载机回波与诱饵发 射信号相位非相干;导引头分辨角为 10°,导航比k=2。假设导弹力学系统 是一个理想的无惯性系统,并认为导 弹是一个质点,不考虑弹体绕质心的 转动,不考虑多种耦合因素的影响, 且弹体结构参数及导弹气动参数不随 时间变化,则运动方程为常系数微分 方程^[5]。

图2为导弹迎击目标的弹道仿真 结果。在这种情况下导弹的脱靶量为 2.084m,可以满足作战需求。

图3为迎击情况下的测角误差变 化图。由图可见,在整个过程中,测 角误差很小,保证了在命中目标时脱 靶量很小,同时也说明了在TARD干 扰下本文所采用的载机角度跟踪方法 是有效的。

2) 追击目标

仿 真 条 件:导 弹 初 始 条 件 同 情 况(1);载 机 初 始 位 置 为 x=5000m,y=100m,做水平匀速直线飞 行,速度大小为200m/s;拖曳线长150m; 诱饵初始位置为x=5120m,y=10m,也 做水平匀速直线飞行,速度大小为 200m/s。其他条件与迎击情况相同。

图4为导弹追击目标的弹道仿真 结果。在这种情况下导弹的脱靶量为 0.8704m,可以满足作战需求。

图5为追击情况下测角误差的变 化图,由图可见,在整个过程中,测 角误差很小,同样说明了在TARD干 扰下本文所采用的载机角度跟踪方法 是有效的。

5 结论

本文对拖曳式有源雷达诱饵干 扰的干扰方式和干扰机理进行了分 析,得到了在干扰作用下,导引头天 线处于平衡状态时的指向角。利用高 速采样,对测角值进行数据积累后取 均值,可得到该均值将指向大功率辐 射源(诱饵)的角度。最后,利用高 速采样所得的任意两次测角值及其对 应的和支路振幅比可以求得载机和诱 饵的角平分线方向,进而间接求得小 功率辐射源(载机)的角度。最后, 结合比例导引规律,通过飞行弹道仿 真验证了雷达型空空导弹应用本文方 法可以在TRAD干扰的作用下获得准 确的飞行制导参数。

⁴AST

参考文献

[1] 王德纯,丁家会,程望东.精密 跟踪测量雷达技术[M].北京:电子工 业出版社,2006:81~82.

[2] 赵国庆.雷达对抗原理[M].西 安:西安电子科技大学出版社,2001: 179-183.

[3] 崔旭.拖曳式雷达有源诱饵干 扰技术研究[D].电子科技大学硕士学 位论文,2005.

[4] Jia-Hsin Yeh.Effects of Towed-Decoys Against a Anti-air Missile With a Monopulse Seeker[D]. Naval Postgraduate School, Monterey. California, 1995: 9~18.

[5] 吕彤光.被动雷达导引头抗干 扰技术研究[D].国防科学技术大学博 士学位论文,2001.

[6] Irving Kanter. Varieties of Average Monopulse Responses to Multiple Targets, IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, 1981, Vol. Aes-17(1): 26~27.

作者简介

方群,教授,主要从事飞行器动 力学与控制研究。

