

跳频体制雷达导引头干扰仿真研究

Jamming Research on the Simulation of Hopping Radar Seeker

辛静 李朝伟 高静 / 中国空空导弹研究院

摘要: 针对距离拖引、速度拖引以及拖曳式无源诱饵对跳频体制雷达导引头的影响进行了仿真研究, 具体分析了对不同干扰对导引头产生的影响, 并对部分干扰提出了相应的抗干扰策略。

关键词: 跳频, 相参积累, 干扰, 抗干扰

Keywords: random step frequency, coherent integration, jamming, anti-jamming

0 前言

为了防止敌方轻易地检测到雷达的发射信号, 并且发射压制性的噪声干扰信号影响雷达导引头对目标的检测, 跳频体制雷达应运而生。

与普通的多普勒雷达相比, 跳频体制雷达在一定程度上提高了系统的抗干扰能力和抗遮挡水平。信号的随机跳变难以被侦查到, 可以有效地抵抗部分干扰, 如窄带瞄准式噪声干扰和阻塞式干扰等, 采用合成相参处理、距离—速度解模糊, 不仅可以获

得目标的速度信息, 而且可以获得距离信息。

但随着电子战的日趋复杂, 应对跳频体制雷达的干扰形式也不断出现, 如拖曳式诱饵干扰能逼真地模拟载机的航速、航向及雷达反射特性, 使一般雷达和跟踪系统无法通过运动特性来区分目标和诱饵, 形成对导引头的质心转移干扰。本文针对距离拖引、速度拖引以及拖曳式无源诱饵对跳频体制雷达导引头的影响进行了仿真研究。

1 跳频体制原理

导引头系统工作框图如图1所示。

雷达导引系统的工作流程如下: DDS1和DDS2是两个直接数字频率合成器, DDS1产生发射中频信号, DDS2产生参考中频信号, 二者产生的中频之差即为混频后的中频。DDS1产生的中频信号经过2次上变频和镜频抑制后, 滤除差频部分, 和频部分经过功率放大器后, 由天线开关选通天线进行发射。DDS2产生的中频信号经过2次上变频和镜频抑制后, 产生混频用

真技术已在红外成像制空空导弹研制中得到应用, 该仿真系统为红外成像制导导弹提供了一个比较真实的运动环境和红外环境, 大离轴仿真技术和多干扰仿真技术的应用满足了红外成像制导导弹大离轴发射和抗红外诱饵干扰的仿真需求。通过空中靶试试验, 靶试结果与半实物仿真结果一致, 验证了红外成像制导半实物仿真系统的可信度和仿真方法的有效性。 **AST**

参考文献

[1] 吴根水. 基于电阻阵型的红外成像模拟器技术研究[C]. 航空制导

武器航空科技重点实验室论文集. 洛阳: 空空导弹院, 2006.

[2] 屠宁. 红外成像制导半实物仿真系统设计与实现[J]. 测控技术, 2009(增刊).

[3] 赵松庆等. 基于五轴转台红外半实物仿真系统多干扰仿真技术[J]. 测控技术, 2010(增刊).

[4] 刘永昌. 红外成像制导仿真技术分析研究[J]. 红外技术, 1996(1).

[5] 贡学平. 红外成像制导半实物仿真现状与发展[J]. 红外与激光工程, 2000(2).

[6] 姚立新. 飞航导弹红外成像

制导半实物仿真红外场景模拟器[C]. 2003年全国光电技术学术交流会//第十六届全国红外科学技术交流论文集(上), 2003.

作者简介

吴根水, 研究员, 研究方向是系统仿真技术。

屠宁, 高级工程师, 研究方向是仿真建模技术。

赵松庆, 高级工程师, 研究方向是红外仿真技术。

陈海燕, 工程师, 研究方向是红外仿真技术。

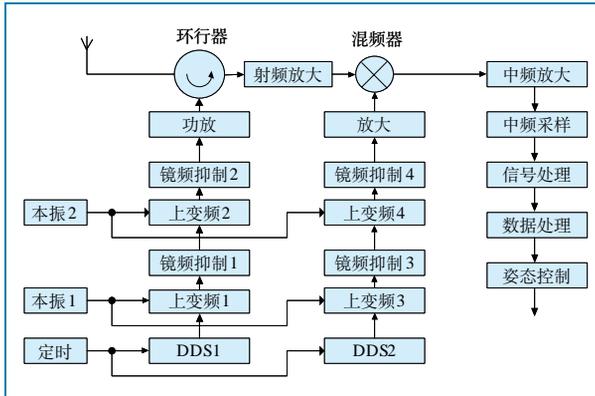


图1 跳频体制导引头系统框图

的参考信号，雷达接收的回波信号经过低噪声放大器后与参考信号混频产生中频信号，此时中频信号已经是瞬时窄带信号。混频后的信号经过中频滤波放大、中频采样后，进入信号处理和数据处理阶段。

在图1所示的随机跳频导引系统中，混频器、功率放大器、天线开关、低噪声前放、中频信号源、中频放大器、采样保持等模块与普通雷达系统基本相同，两者最大的差异在于一个跳变的频综。因此，该雷达与普通的相参雷达系统具有极好的兼容性，当频率捷变的频综设定为不跳变时，它就是一个普通的相参雷达系统，可以完成脉冲多普勒（PD）处理，即该雷达导引头结构兼容了高脉冲重复频率（HPRF）PD工作波形及频率捷变工作波形，二者可以统一应用于一个硬件平台上。

假定脉冲串起始时刻为 $t=0$ ，脉冲重复周期为 T_r ，脉冲串中第 n 个脉冲跳频点为 $\omega_n=m_nF$ ， m_n 是第 n 个脉冲的频点序号，其中 F 为跳频步长，载频为 ω_0 ，则一个积累周期内发射信号的表达式为：

$$s_1(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \cos[(\omega_0 + \omega_n)(t - nT_r)] \text{rect}\left(\frac{t - nT_r}{\tau}\right) \quad (1)$$

其中， τ 为脉冲宽度， N 为脉冲串长度， $\text{rect}()$ 为矩形窗函数。

假设目标的初始距离为 R_0 ，径向速度为 v （定义目标向接收机运动时为正，远离时为负，一个相参处理间隔内相对速度不变）， t 时刻发射信号为 $s(t)$ ，经过 T_d 时间后此信号经目

标反射的回波回到接收机，最终可得回波信号的表达式为：

$$s_2(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \cos[(\omega_0 + \omega_n + \omega_d)(t - T_d) - (\omega_0 + \omega_n)nT_r] \text{rect}\left(\frac{t - T_d - nT_r}{\tau}\right) \quad (2)$$

$$\text{其中 } T_d = \frac{2R_0}{c+v} \text{ 为回波延时；}$$

$$d = \frac{2v}{c-v}(\omega_n + \omega_0) \text{ 为回波多普勒频移。}$$

回波信号与参考信号混频之后，经过中频放大以及中频采样，最后得到目标的回波信号经过采样后的表达式为：

$$z(n) = e^{j2\pi an} e^{-j2\pi bm_n} e^{j2\pi cm_n} e^{jd} \quad (n=0, \dots, N-1) \quad (3)$$

其中，速度项 $a = \eta \frac{\omega_0 T_r}{2\pi}$ ， $\eta = \frac{2v}{c-v}$ ；
距离项 $b = F(T_d - \hat{T}_d)$ ；交叉项 $c = FT_r$ ；
常数项 $d = \frac{\omega_M \tau}{2} + (\omega_0 - \omega_M)(\hat{T}_d - T_d)$ ；

分别估计出相当于 n 、 m_n 前的频率参数 a 、 b ，就能够估计出目标的距离延时 T_d 和相对速度 v 。

2 系统仿真

为研究跳频体制对抗干扰的性能所建立的整个系统的仿真模型的组成如图2所示，主要有信号产生模块、信号处理模块、简单制导模块和导弹目标相对运动模块。

2.1 速度拖引干扰仿真

1) 仿真试验条件

导弹初始位置坐标 $[0, 4000, 0]$ ，目标初始位置坐标 $[10000, 4000, 0]$ ，导弹初始速度 1000m/s ，目标初始速度 300m/s ，高度角为 0° ，方位角为 180° 进入。仿真时间为 4.8s ，干扰开始时间为 0.24s ，结束时间为 4.8s ，拖引期为 0.5s ，停拖期为 0.5s ，速度拖引干扰功率 100W ，拖引范围 15kHz ，转发延迟 100ns ，起始频率跳变 0Hz ，释放方式为自卫式，仿真过程中目标并未发生机动。

如图3所示，在运行到第十帧时，加入速度拖引，由于 100ns 的转发延迟，产生了大约 15m 的距离误差，因而能够在距离-速度二维平面内形成相关峰，从而形成假目标。由于干扰功率非常大，从图4可以看出，一旦实施速度拖引，导引头就会被干扰拖走，但在角度上始终能够稳定跟踪目标，同时由于干扰能量较强，因此导引头角

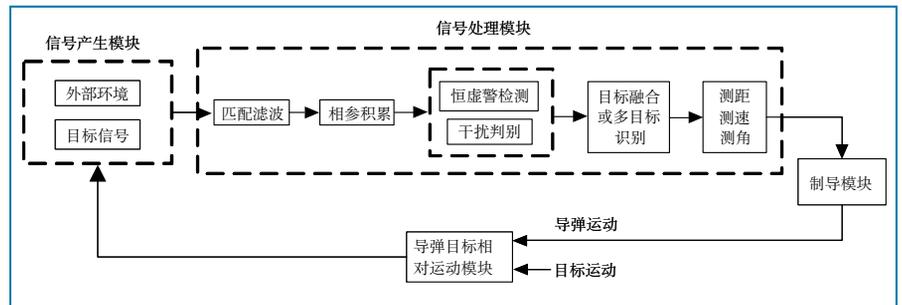


图2 仿真系统主要构成

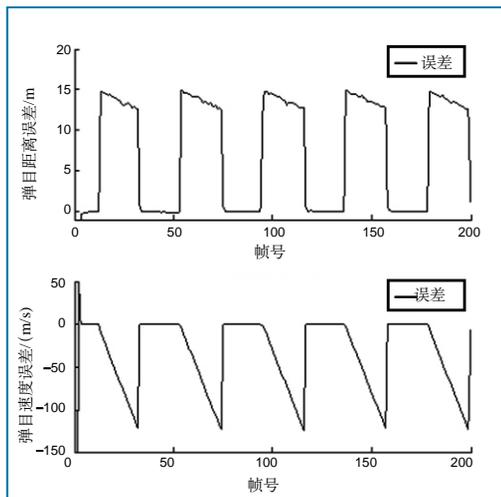


图3 速度拖引下的弹目距离以及弹目速度误差

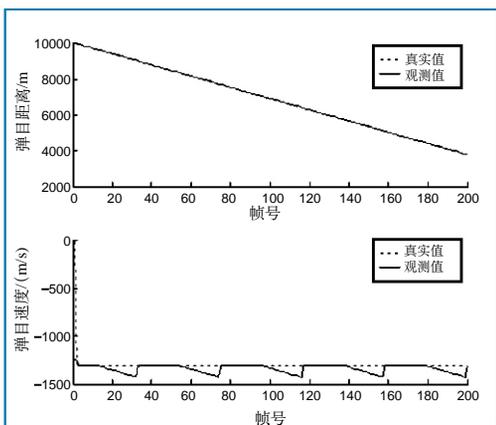


图4 速度拖引下的弹目距离和弹目速度的真实值和测量值

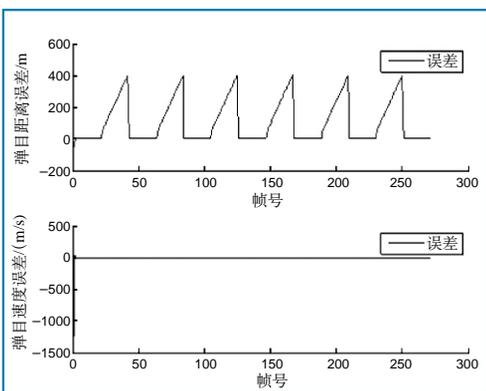


图5 距离拖引下的弹目距离和速度误差

跟踪误差反而比无干扰时大大减小。在停拖期, 导引头能够同时在 $0\sim 500\text{kHz}$ 频率范围内实现不模糊测速, 此时距离跟踪误差在导引头的一个粗分辨单元内, 因此当速度拖引

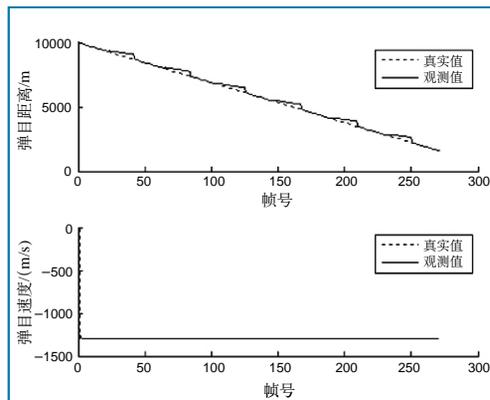


图6 速度距离拖引下的弹目距离和弹目速度的真实值及观测值

停止后, 导引头能够迅速重新截获目标, 保持对目标的稳定跟踪。

2) 判断速度拖引干扰的策略

首先检查幅度上的跳变, 若出现幅度跳变, 则存在干扰, 记录上帧目标的距离、速度信息, 并开始外推, 采信测量结果而不是跟踪结果; 若没有幅度跳变, 通过对比测得的距离的微分和速度, 就可以排除速度拖引干扰。

2.2 距离拖引干扰仿真

1) 仿真试验条件

导弹初始位置坐标 $[0, 0, 4000]$, 目标初始位置坐标 $[0, 10000, 4000]$, 导弹初始速度 1000m/s , 目标初始速度 300m/s , 方位角 180° 进入。距离拖引干扰功率 100W , 拖引范围 $2.5\mu\text{s}$, 拖引周期 1s , 拖引期 0.5s , 停拖期 0.5s , 转发延迟 200ns , 起始跳变 10m , 释放方式为自卫式, 仿真过程中目标并未发生机动。

距离拖引范围 $2.5\mu\text{s}$, 拖引周期 1s , 其对应的距离变化率为 18m/帧 , 加上转发延迟 200ns , 相当于 30m , 起始跳变 10m 。因此, 距离拖引开始起作用时, 相应的距离变化率约为 58m/帧 ,

没有超过距离分辨的粗分辨单元, 可以形成假目标相关峰。由图5所示可得, 当处于距离拖引期时, 导引头被距离拖引干扰拖走, 与真实值相差逐渐增大, 直到 415m ($= 30+10+2.5\times 150$); 当处于停拖期时, 导引头又可以重新寻找到目标。但是因为干扰信号强度较大,

所以一旦进入拖引期, 导引头又会重新跟踪干扰。

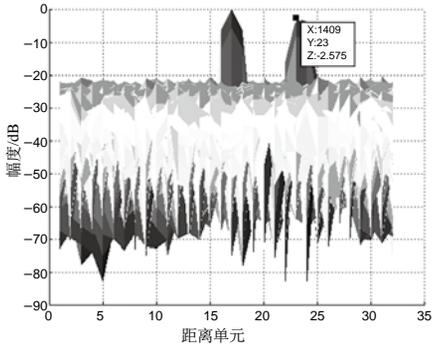
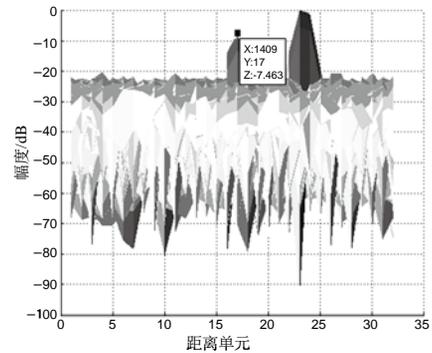
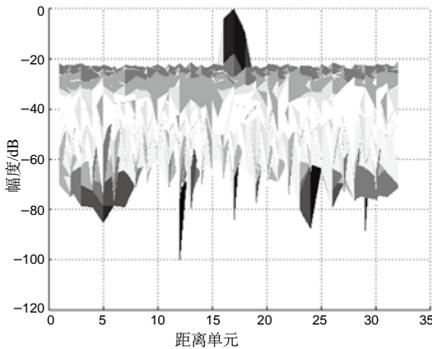
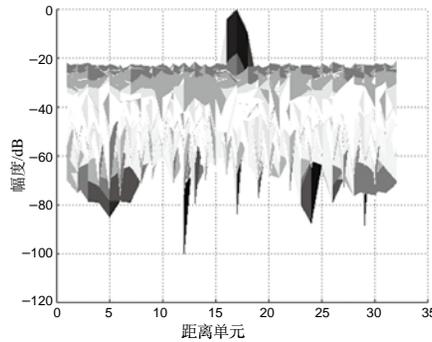
由图6可以看出, 距离拖引使得测量值在拖引期偏离了真实值, 但是一旦进入停拖期, 导引头重新寻找到了真实目标; 在速度方面, 由于距离变化率为 18m/帧 , 也就是通过距离微分得到的速度值为 750m/s , 与测量值有差异。

2) 判断干扰的策略

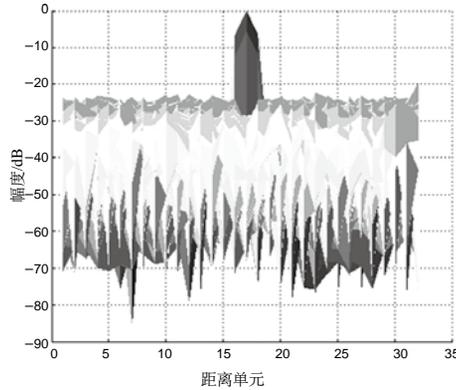
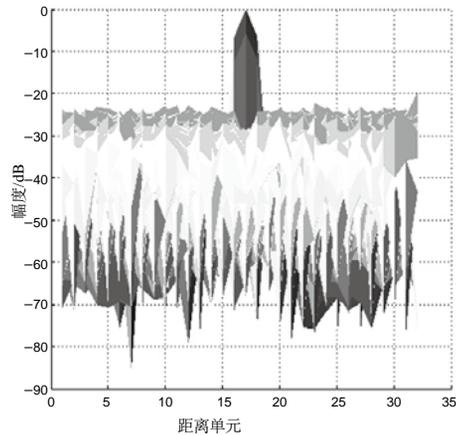
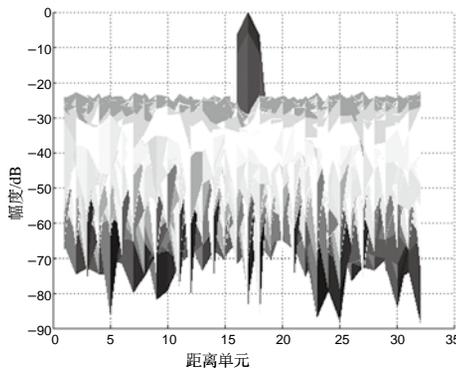
首先检查幅度上的跳变, 若出现幅度跳变, 则存在干扰, 记录上帧目标的距离、速度信息, 并开始外推, 采信测量结果而不是跟踪结果; 若没有幅度跳变, 通过对比测得的距离的微分和速度, 就可以排除距离拖引干扰。

2.3 拖曳式无源诱饵干扰仿真

仿真试验条件为开始运行距离 3km , 目标 $\text{RCS}=5\text{m}^2$, 180° 进入角(对飞), 对应约 2.34km 处, 分别对诱饵长度 $l=30\text{m}$ 时 $\text{RCS}=10\text{m}^2$ 、 100m^2 、 1000m^2 的情况, 诱饵长度 $l=70\text{m}$ 时 $\text{RCS}=10\text{m}^2$ 、 20m^2 、 100m^2 的情况, 以及诱饵长度 $l=100\text{m}$ 时 $\text{RCS}=100\text{m}^2$ 的情况进行仿真, 假设目标速度矢量与诱饵速度矢量保持一致。仿真二维峰图见图7~图13。由于是对飞, 相对于雷达来说, 诱饵比目标远, 峰图中右边的峰为诱饵。由于速度维相同, 为了清晰可见, 所有条件只画出距离维。

图7 诱饵 $l=30\text{m}$, $\text{RCS}=10\text{m}^2$ 距离维图图8 诱饵 $l=30\text{m}$, $\text{RCS}=100\text{m}^2$ 距离维图图9 诱饵 $l=30\text{m}$, $\text{RCS}=1000\text{m}^2$ 距离维图图10 诱饵 $l=70\text{m}$, $\text{RCS}=10\text{m}^2$ 距离维图

由仿真可知,在 180° 进入角(导弹与目标对飞)时,当诱饵长度 l —

图11 诱饵 $l=70\text{m}$, $\text{RCS}=20\text{m}^2$ 距离维图图12 诱饵 $l=70\text{m}$, $\text{RCS}=100\text{m}^2$ 距离维图图13 诱饵 $l=100\text{m}$, $\text{RCS}=100\text{m}^2$ 距离维图

定,随着诱饵雷达反射面积的增大,诱饵回波功率越来越强,平台也越来越高,在 $\text{RCS}=100\text{m}^2$ 时目标被平台淹没;当诱饵雷达反射面积 RCS 一定,随着诱饵长度的增加,信干比增大,这是因为随着诱饵长度的增加,不仅诱饵回波功率越来越强,而且对诱饵距离补偿更不准确而导致诱饵信号被打

散程度增强。由于本仿真研究对应的程序距离粗分辨单元为 $\pm 75\text{m}$,当诱饵长度 $>75\text{m}$ 时,由于超出粗分辨单元,距离维中就只出现目标峰。

3 结论

经过对速度拖引、距离拖引以及拖曳式诱饵干扰的仿真分析可知,单纯的速度拖引和距离拖引,由于干扰能量一般比目标能量强,导引头会被干扰拖引走,因此可以采用一些干扰判别措施来判断干扰的存在,如通过幅度上的跳变,或是比较距离的微分与速度的一致性,从而不受干扰的影响。而在拖曳式无源诱饵干扰中,导引头能够在距离或速度上分辨出干扰的情况下,依旧可以成功跟踪目标。但是在作战时,导弹、目标和诱饵三者形成的三角态势,使导引头无论是从距离、速度或角度上都无法分辨的情况下,导引头将会指向目标诱饵形成的相位中心,此时无法正确跟踪目标。

AST

参考文献

- [1] 毛士艺, 脉冲多普勒雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [2] 白渭雄, 拖曳式诱饵对单脉冲雷达的干扰分析[J], 电子信息对抗技术, 2007, 22(6): 39~42.
- [3] 丁鹭飞, 耿富录编, 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [4] 江钊, 针对末制导雷达干扰的干扰样式研究[D]. 电子科技大学, 2007.

作者简介

辛静, 助理工程师, 主要从事雷达信号处理方面的研究。