

密集假目标 对雷达导引头干扰效果分析与仿真

文◆中国人民解放军 63896 部队 于奎宁 何斌斌 史航宇 杨树涛 孙震宇

引言

在现代战争复杂电磁环境中，雷达导引头是精确制导武器的关键部件，其性能直接影响导弹命中精度和作战效能^[1]。但随着雷达技术发展，传统干扰手段面对高分辨率、高灵敏度且抗干扰算法复杂的现代雷达导引头，效果大打折扣。密集假目标干扰技术作为一种有效的有源欺骗干扰手段，能向雷达导引头发射大量精心设计的假目标信号，利用雷达信号处理的时间和资源限制，扰乱其探测与跟踪系统，降低目标识别和跟踪准确性，甚至让导弹脱靶。当下，国内外对密集假目标干扰技术的研究已有一定进展，但雷达导引头抗干扰能力不断提升，如何提高假目标逼真度、增强干扰信号隐蔽性和适应性，仍是关键问题。因此，本文将通过理论分析与仿真实验相结合的方式，研究密集假目标对雷达导引头的干扰效果，分析影响因素，以期为作战应用提供支持。

1 仿真参数设置

为了更好地研究密集假目标对雷达导引头干扰效果分析

与仿真，本文首先对仿真参数进行设置，仿真参数表如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

序号	参数类别	参数名称	参数
(1)	雷达参数	信号频率	T_1
		发射功率	P_1
		副瓣增益	G_1
		重复周期	τ_1
(2)	干扰机参数	干扰机功率	P_2
		重频	f_1
		干扰脉冲脉宽	τ_2
		载频	T_2
		天线极化	垂直极化
		天线增益	G_2
(3)	导引头参数	天线极化	圆极化
		天线增益	G_3
		接收机带宽	B_1
		系统损耗	L_1
(4)	其他参数	干扰机与雷达距离	D_1

根据表 1 列出的仿真分析参数，本文将构建模拟电子战环境，并在这一环境中进行密集假目标对雷达导引头干扰效果的分析与仿真。

2 仿真方案

2.1 雷达导引头建模

由于雷达导引头的实际物理特性与信号处理机制复杂多样，直接用于仿真会导致计算量过大且难以解析。为了降低仿真复杂度，本文首先针对天线与接收机采用简化建模方式，以此开展雷达导引头的建模工

【作者简介】于奎宁（1998—），男，山东烟台人，研究方向：电子对抗。

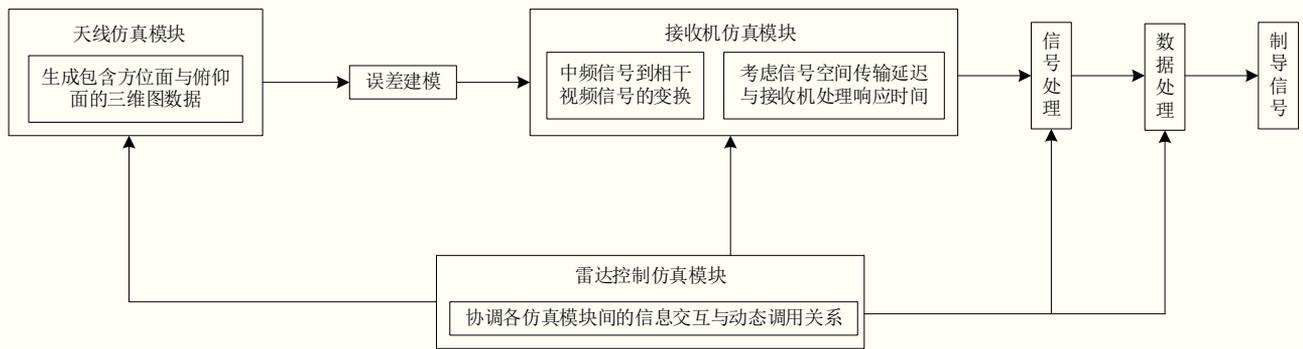


图1 雷达导引头的基本仿真模型

作。雷达导引头的基本仿真模型如图1所示。

天线仿真模块生成包含方位面与俯仰面的三维方向图数据，并通过误差建模将天线方向图偏差、接收机非线性等影响注入接收信号中。接收机仿真模块重点建立正交相干检波模型，实现中频信号到相干视频信号的变换，同时考虑信号空间传输延迟与接收机处理响应时间，确保仿真模型与实际系统的一致性。

信号处理与数据处理仿真模块是雷达导引头建模的核心，基于实际系统算法实现信号检测、目标判决、航迹融合与跟踪等功能。在相干处理间隔内，雷达导引头接收到的射频信号 $s(t)$ 可以表示为式(1)。

$$s(t) = \sum_{k=0}^{M-1} h_r(t) - kT_r + b(t) + z(t) \quad (1)$$

式(1)中， $h_r(t)$ 表示目标回波信号， $b(t)$ 表示杂波信号， $z(t)$ 表示接收机噪声， T_r 表示雷达发射信号的时序间隔， M 表示相干处理间隔内的脉冲个数， k 表示当前脉冲在相干处理间隔内的位置。通过匹配滤波、多普勒滤波与CFAR检测等处理，提取目标参数并生成航迹数据。雷达控制仿真模块协调各模块交互调用，依据任务实时调整参数数据流，让仿真在干扰场景的响应贴近实际雷达。

基于以上分析，结合图1的基本仿真模型和式(1)所示的雷达导引头接收到的射频信号，构建本文提出的雷达导引头模型。这一模型能够在反映实际系统特性的同时，又能大幅简化计算量。

2.2 生成目标回波信号

在雷达实际应用中，获取真实的雷达回波信号比较困难。目标运动会使回波信号频率、幅度等特性发生改变，环境中的杂波、噪声还会与信号叠加，掩盖干扰有效信号，这给直接获取真实有效的雷达回波信号带来了更大的困难^[2]。因此，本文通过仿真的方式来生成目标回波信

号，以模拟实际雷达工作场景下的目标回波情况。

在仿真生成目标回波信号时，首先需要设定目标回波信号的相关参数。目标回波信号的相关参数设定如表2所示。

在实际雷达应用中，目标回波信号不仅受到目标运动和信号处理等因素的影响，还会受到其他多种因素干扰^[3]。因此，在仿真生成目标回波信号时，需要综合考虑以上这些因素。

(1) 目标运动。目标运动会引入多普勒频移，导致目标回波信号的中心频率发生变化。同时，目标运动还会导致目标回波信号的幅度和极化状态发生变化。为了模拟这些影响，在目标回波信号的参数中引入相应的变化量。(2) 信号处理。在雷达信号处理过程中，目标回波信号会经过滤波、放大、混频等处理，这些处理过程也会对目标回波信号产生影响^[4]。为了模拟这些影响，在仿真中对目标回波信号进

表2 目标回波信号的相关参数设定

参数名称	参数符号	参数描述
幅度	$ h_r $	目标回波信号的幅度，它反映了目标反射雷达信号的强弱程度，与目标的雷达散射截面积(RCS)等因素密切相关
中心频率	p_r	目标回波信号的中心频率，通常与雷达发射信号的中心频率相关，但可能会由于目标的运动(多普勒效应)等因素产生频移
极化参数(夹角)	α_r	极化椭圆的长轴与参考轴之间的夹角，用于描述目标回波信号的极化状态
极化参数(相位角)	β_r	极化椭圆上某点的相位角，同样用于描述目标回波信号的极化状态，相位角的变化会影响目标回波信号的极化特性

行相应的处理。

考虑上述因素后，根据设定的参数，目标回波信号 $h_r(t)$ 可以表示为通过式 (2)。

$$h_r(t) = |h_r| \begin{bmatrix} \cos \alpha_r \\ \sin \alpha_r e^{j\beta_r} \end{bmatrix}^T \exp(j(p_r t + \beta_r)) \quad (2)$$

在仿真目标回波信号时，按照式 (2) 和表 2 的参数设定，利用 MATLAB 软件生成时域波形。再通过调整参数，如目标距离、速度、RCS 等，模拟不同目标、距离、速度下的回波信号。

2.3 制定密集假目标干扰策略

在雷达对抗里，密集假目标干扰是高效灵活的电子战办法。它依靠精心设计的干扰信号，在雷达接收端制造多个假目标，让雷达分不清真假目标。本文结合对干扰机制的理解和雷达导引头仿真模型，制定了干扰策略。

密集假目标干扰策略的制定遵循以下基本原则。(1) 信号匹配性。干扰信号需与雷达信号在频域、时域以及极化域上保持高度相似性，以确保干扰信号能够顺利进入雷达接收系统，并充分利用雷达的信号处理增益。(2) 同步与积累。精准把控干扰信号时序，和雷达信号周期同步，获取增益的同时避开抗干扰机制。(3) 能量与密度优化。不仅要增加干扰信号能量以吸引雷达，还要精准控制假目标密度，避免被雷达恒虚警机制过滤。

此外，本文基于宽带数字射频存储 (DRFM) 技术生成干扰信号。(1) 干扰机截获雷达发射信号，用低通滤波器过滤掉无用信号，再经多比特 A/D 量化成数字信号。(2) 数字信号分路后送入数据运算器做多抽头数字延时相加处理，模拟假目标时延差

异。(3) 把处理好的数据存进随机存储器，经数据合路器还原成高速数字流，再经 D/A 转换器还原成模拟信号^[5]。(4) 利用输出低通滤波器处理，输出最终干扰信号。

同时，若想要得到相互关联的假目标，则需要对截获的雷达信号做时延、角度和多普勒调制。具体操作方法为按照雷达波形特性，对信号做距离、方位时延和速度多普勒调制。

为实现假目标的灵活生成，可将长度为 N 的雷达信号以间隔 ΔT 分为若干段，对信号数据进行 ΔT 点延时处理，并根据所需假目标个数进行 M 次延时^[6]。将 M 次延时的数据按时间顺序排列并累加，得到干扰信号。其中，间隔 ΔT 和 M 分别对应假目标之间的时间间隔和数目，用于控制假目标的密度。

结合式 (1) 和式 (2)，假设经过上述生成目标回波信号的雷达导引头接收到的射频信号为 $s(t)$ ，如式 (3) 所示。

$$s(t) = \sum_{k=0}^{M-1} |h_r| A_r(t) \begin{bmatrix} \cos \alpha_r \\ \sin \alpha_r e^{j\beta_r} \end{bmatrix}^T \exp(j(p_r t + \beta_r)) - kT_r + b(t) + z(t) \quad (3)$$

将 $s(t)$ 延时叠加后得到的干扰信号如式 (4) 所示。

$$s_g(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{\frac{N}{M_e} - 1} s(t - m\Delta T - n \frac{\Delta T}{M_e}) \quad (4)$$

式 (4) 中， m 表示延时次数的索引， n 表示在每次延时处理中，对信号进行进一步分段延时的索引， N 表示原始雷达信号的长度， ΔT_n 表示归一化后的时间间隔参数， M_e 表示等效延时因子^[7]。

基于这些策略，干扰信号能造出高密度逼真假目标群，降低雷达导引头能力。由此，本文完成了密集假目标对雷达导引头干扰的仿真方案设计。

3 密集假目标对雷达导引头干扰效果分析与仿真

3.1 密集假目标密度对雷达导引头探测效能的影响

为了深入探究密集假目标密度对雷达导引头探测效能的具体影响，本文通过构建不同密度假目标场景 (从 15 个 / 帧到 105 个 / 帧逐级递增)，并基于雷达信号处理算法模拟其回波与真实目标的叠加干扰，开展了一系列仿真实验，最终基于仿真结果数据绘制了假目标密度对雷达导引头探测概率的影响曲线图 (见图 2)。

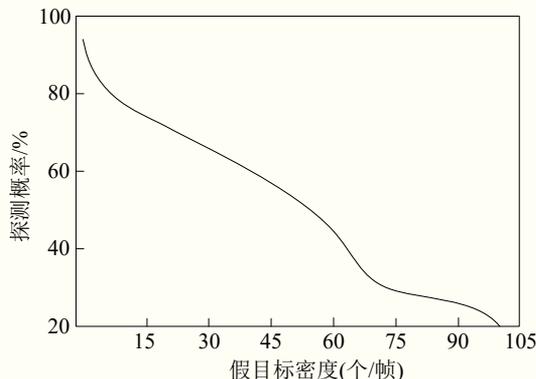


图 2 假目标密度对雷达导引头探测概率的影响曲线图

从图 2 中可以看出，假目标密度越大，雷达导引头探测概率下降得

越明显。低于密度干扰时，雷达导引头能靠先进算法区分真假目标，保持高探测概率。但假目标密度增到中等，探测概率就会明显下降，密度再进一步增大，雷达导引头的探测能力就会面临更大挑战，探测概率急剧下降。

仿真结果显示，密集假目标干扰对雷达导引头探测效能影响大。实际应用时应根据不同干扰密度，制定抗干扰办法。

3.2 假目标与真实目标距离间隔对雷达测距精度的影响

除了上述密集假目标密度对雷达导引头探测效能的影响分析以外，本文还对假目标与真实目标距离间隔对雷达测距精度的影响进行分析。以 15m 为间隔，逐级增加，直到假目标与真实目标的距离间隔达到 150m，并对各个级别距离间隔下雷达的测距精度进行统计。假目标与真实目标距离间隔对测距精度的影响图如图 3 所示。

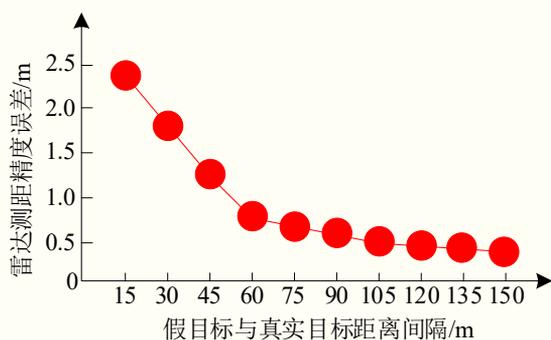


图 3 假目标与真实目标距离间隔对测距精度的影响图

从图 3 可以看出，假目标与真实目标距离间隔越大，雷达测距精度误差越小。假目标与真实目标距离特别近（15m）时，假目标和真目标分不清，测距误差大。距离间隔增加（30m、45m），测距精度受到影响，但相对准确。距离再大时（60m），测距精度明显提高，误差变小。距离极大时（150m），测距精度稳定，误差更小，但有系统上限。

根据这一仿真结果可以看出，假目标和真目标之间的距离间隔对雷达测距精度产生较大的影响。

结语

通过对密集假目标干扰雷达导引头效果的研究，本文重点分析了假目标密度以及假目标与真实目标距离间隔这两个关键因素对雷达导引头的影响。研究可知，假目标密度对雷达导引头探测效能影响极大。随着密度增大，探测概率明显下降，特别是密度达到中等及以上时，探测概率急剧降低，这给雷达导引头在复杂电磁环境下的工作带来极大挑战。此外，假目标与真实目标的距离间隔对雷达测距精度也很关键。距离间隔越大，测距精度误差越小；但距离极近时，两者难以区分，测距精度会受严重影响。基于这些仿真所得到的结果，在实际应用场景中，需要按照不同的干扰密度以及距离间隔这些具体情况，来制定合适的抗干扰方法。例如，对雷达信号处理算法进行优化，让雷达在面对各种情况时，能够更精准地把真实目标和假目标区分开来，还能增加雷达的发射功率。此时，提高了信号的强度，让雷达接收到的信号质量更好。同时，也可以采用更先进的雷达技术，从根本上提升雷达的性能。通过采

取这些措施，雷达导引头在复杂电磁环境中的探测效能和测距精度都能得到有效提升，进而保证雷达导引头稳定运行。^[8]

引用

- [1] 刘伟强,陈莉,黄子纯,等.基于主被动复合导引头的干扰态势构建[J].雷达科学与技术,2024,22(2):187-198.
- [2] 吴兆东,罗亚松,胡生亮,等.多无人艇载舷外有源诱饵组合干扰及评估方法[J].系统工程与电子技术,2024,46(6):1878-1891.
- [3] 韩静雯,杨勇,连静,等.基于极化与距离像特征融合的雷达导引头角反射器鉴别方法[J].系统工程与电子技术,2024,46(11):3658-3670.
- [4] 邱涛,杨勇.高重频PD雷达导引头低空目标检测性能分析[J].现代雷达,2023,45(9):94-99.
- [5] 王资,李槟槟,时满红,等.基于压缩感知的被动雷达导引头信源数估计方法[J].现代雷达,2024,46(1):8-15.
- [6] 杨胜华.一种雷达导引头天线罩误差数字补偿方法[J].电讯技术,2022,62(8):1136-1141.
- [7] 牛亚丽,许京伟,廖桂生,等.HPRF和差天线雷达导引头杂波抑制方法[J].系统工程与电子技术,2023,45(8):2455-2462.

