

doi: 10.7690/bgzd.2025.07.005

一种雷达实装训练目标保障系统设计与实现

杨军佳¹, 张永贵², 李 涛¹

(1. 陆军炮兵防空兵学院郑州校区信息保障系, 郑州 450052; 2. 中国人民解放军 69260 部队, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 为解决雷达实装训练过程中存在的空中目标保障难题, 设计一种雷达实装训练目标保障系统。分析具有任意航迹特征模拟目标回波信号产生的基本原理, 对系统的结构组成以及各模块进行具体的分析与设计。试验测试结果表明, 该系统能为雷达实装训练提供满足实战条件下的空中目标训练环境。

关键词: 雷达训练; 目标保障; 航迹特征

中图分类号: TN959.1+7 **文献标志码:** A

Design and Implementation of Target Support System for Radar Real Equipment Training

Yang Junjia¹, Zhang Yonggui², Li Tao¹

(1. Department of Information Assurance, Zhengzhou Campus of PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Zhengzhou 450052, China; 2. No. 69260 Unit of PLA, Urumqi 830000, China)

Abstract: In order to solve the problem of air target support in the process of radar real equipment training, a target support system for radar real equipment training is designed. This paper analyzes the basic principle of simulated target echo signal generation with arbitrary track characteristics, and analyzes and designs the structure and modules of the system in detail. The test results show that the system can provide an air target training environment for radar real equipment training under actual combat conditions.

Keywords: radar training; target support; track feature

0 引言

雷达作战效能^[1-4]能否有效发挥与操作人员的水平紧密关联。为充分发挥雷达装备的作战性能以提升战斗力, 必须通过经常性的、贴近实战的训练来提高操作人员的水平。而雷达的实装训练需要有空中的目标保障, 不论是训练用的无人飞行器, 还是有人驾驶的军用飞机, 在保障训练的过程中都需要耗费大量的人力和物力。考虑到效费比, 通常情况下, 将民航客机作为训练用目标; 然而, 民航客机的航线相对固定和单一, 与实战情况下的飞行航迹差距较大, 训练效率和针对性大打折扣。针对雷达实装训练过程中存在的空中目标保障难题, 通过分析具有机动飞行航迹特征的模拟目标产生原理, 对目标保障系统进行了设计与实现, 通过模拟多批次、多方向、不同航迹的雷达目标射频回波信号, 构建贴近实战的空中目标训练环境, 以达到扩展训练手段、提高训练效率和效果的目的。

1 基本原理

雷达向外辐射电磁波, 当遇到空中真实飞行目

标时, 目标会在来波方向形成后向散射, 部分反射回波能量被雷达接收, 如果该回波能量大于雷达接收机的灵敏度, 雷达就能够检测到该目标。依据该探测原理, 要想使模拟产生的目标回波信号能够被雷达所接收并形成航迹, 必须要知道雷达辐射射频信号参数, 以便构建与雷达辐射射频信号一致的模拟目标回波信号; 而且要知道雷达天线扫描规律, 以便确定模拟目标回波信号发射时机, 控制模拟目标方位上的变化; 还要使被雷达接收的模拟目标信号能量大于接收机灵敏度。

如图 1 所示, 当模拟目标信号只从雷达天线波束主瓣进入时, 就会产生抵近雷达站飞行或者远离雷达站飞行的径向飞行目标; 当模拟目标信号能够从雷达天线波束副瓣进入时, 通过改变模拟目标信号被雷达接收的时间, 可以产生方位可控的模拟飞行目标, 通过改变模拟目标信号的脉冲延迟时间, 可以产生距离可控的模拟飞行目标, 通过改变模拟目标信号的多普勒频移, 可以产生速度可控的模拟飞行目标。要想模拟出的目标回波信号被雷达站接收之后在雷达终端上形成稳定的航迹, 必须解决好

收稿日期: 2024-09-15; 修回日期: 2024-10-18

基金项目: 军内科研项目 (LJ20212A011039)

第一作者: 杨军佳(1987—), 男, 河南人, 硕士。

模拟目标回波信号脉冲的发射时间、脉冲延迟的时间以及多普勒频移量。同时,由于目标与雷达站相对位置的变化,其回波信号能量也会发生相应的变化,模拟目标回波信号的幅度也需要调整。

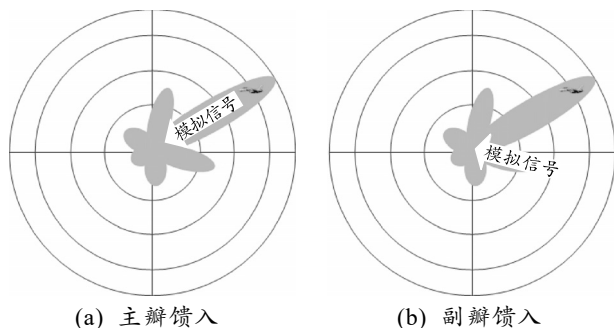


图 1 天线波束馈入模拟目标回波信号

1.1 模拟目标回波信号脉冲发射时间的确定

如图 2 所示,假设雷达站位于 O 点,某一时刻探测到模拟目标时,模拟目标位于 A 点,且距离为 r_A ,雷达天线下一扫描周期探测到模拟目标时,模拟目标位于 B 点,且距离 r_B ,点 A 、点 B 与雷达站之间形成的夹角为 θ 。

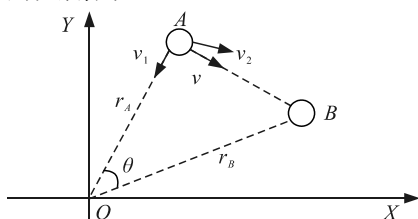


图 2 相邻 2 次模拟目标的位置与雷达相对位置

当雷达天线转速为 v_{radar} 时,模拟目标回波信号 2 次发射的时间间隔 Δt 为:

$$\Delta t = \theta \cdot v_{\text{radar}} / 360. \quad (1)$$

式中: θ 可以预先设置;雷达天线转速 v_{radar} 可以通过侦察系统接收雷达辐射信号能量的变化规律获得。

1.2 模拟目标回波信号脉冲延迟时间的确定

如图 2 所示,依据雷达测距基本原理^[5],模拟目标从点 A 到点 B 时,2 次发射模拟目标回波信号脉冲延迟时间分别为:

$$\left. \begin{aligned} \tau_A &= 2r_A/c \\ \tau_B &= 2r_B/c \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

式中: c 为电磁波传播速度; r_A 、 r_B 可以预先设置。

1.3 多普勒频移量的确定

如图 2 所示,依据上述模拟目标回波信号 2 次发射的间隔时间 Δt ,可以获取模拟目标从 A 点飞到 B 点的飞行速度 v :

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta &= (r_A^2 + r_B^2 - r_{AB}^2) / 2r_A r_B \\ \Delta \tau &= |\tau_A - \tau_B| \\ v &= r_{AB} / (\Delta t + \Delta \tau) \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

而一般情况下, $\Delta \tau \ll \Delta t$, 则上式中的 $v \approx r_{AB} / \Delta t$ 。

在计算出模拟目标飞行速度的情况下,可以通过余弦定理计算出 $\angle OAB$,进而可以利用余弦定理计算出模拟目标相对于雷达的实时速度,具体公式如下:

$$\left. \begin{aligned} \cos \angle OAB &= (r_A^2 + r_{AB}^2 - r_B^2) / 2r_A r_{AB} \\ v_1 &= v \cdot \cos \angle OAB \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

依据上式中模拟目标相对于雷达的实时速度,可以通过如下公式计算出模拟目标信号相对于雷达发射信号的多普勒频率偏移量 Δf :

$$\Delta f = 2v_1 / \lambda. \quad (5)$$

式中 λ 为雷达工作波长,且模拟目标靠近雷达飞行时,频率偏移量为正,远离雷达飞行时,频率偏移量为负。

1.4 模拟目标回波信号幅度的确定

依据雷达方程^[6],目标回波信号能量 p_r 与雷达发射信号能量 p_t 之间的关系为:

$$p_r = k \cdot p_t / r^4. \quad (6)$$

式中: k 与天线增益、雷达反射截面积以及损耗等因素有关; r 为目标与雷达之间的距离。

在不考虑目标飞行姿态改变导致目标反射截面积变化的情况下,模拟目标回波信号脉冲幅度随着距离的变化而改变。

如图 2 所示,若点 A 处模拟目标回波信号为 $S_A = a \cdot \cos(2\pi f t + \varphi)$,则点 B 处模拟目标回波信号为:

$$\left. \begin{aligned} S_B &= b \cdot \cos(2\pi f t + \varphi) \\ b &= a \cdot r_A^2 / r_B^2 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

2 系统设计

根据以上分析,为产生能被雷达接收且具有任意航迹特征的模拟目标信号,该系统必须能够侦收、处理雷达辐射信号,获取雷达工作频率、雷达天线扫描周期等相关参数;同时,还能够根据获取到的雷达辐射信号进行模拟目标回波信号的重构。其具体组成如图 3 所示。天线包括接收和发射 2 部分,主要完成雷达辐射射频信号的接收以及射频模拟目标信号的发射;射频模块包括射频接收、频率综合器以及射频发射部分,主要将天线接收的雷达射频

信号下变频至中频并送至信号处理部分进行采集，同时将来自于信号处理部分的中频信号上变频至射频并送至天线向外辐射；信号处理部分主要根据采集到的信息以及相应的算法获取雷达天线扫描规律以及辐射信号的相关参数，同时依据显控终端的指令以及相应的算法完成模拟目标信号的产生；电源与接口部分主要为射频部分和信号处理部分的正常工作提供所需的电压，同时通过网口完成指令接收、解析、下发以及各部分状态、数据获取上报等。

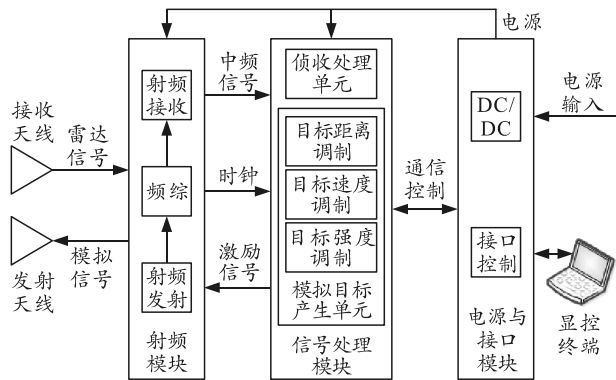


图3 系统结构组成

2.1 射频模块

射频模块主要完成雷达辐射射频信号以及模拟

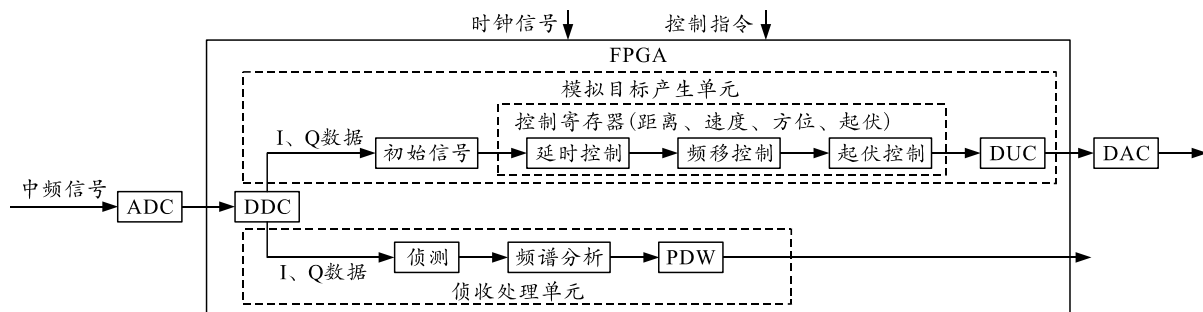


图5 信号处理模块组成

图5中，模数转换(ADC)用于对来自射频部分的中频信号进行采样，形成数字中频信号；数字下变频(DDC)用于对来自ADC的数字中频信号进行正交解调^[8]，形成I、Q基带数字信号；基带数字信号延时单元用于对来自DDC的基带数字信号进行距离调制；基带数字信号多普勒频移单元用于对来自基带数字信号延时单元的基带数字信号进行速度调制；基带数字信号起伏控制单元用于对来自基带数字信号多普勒频移单元的基带数字信号进行幅度调制；DUC(数字上变频)用于对来自基带数字信号多普勒频移单元的I、Q基带数字信号进行上变频至数字中频信号；DAC(数模转换)用于对来自DUC的数字中频信号进行数模转换为模拟中频信号；侦

测以及频谱分析主要是获取雷达射频信号的脉冲描述字以及雷达天线扫描规律等。

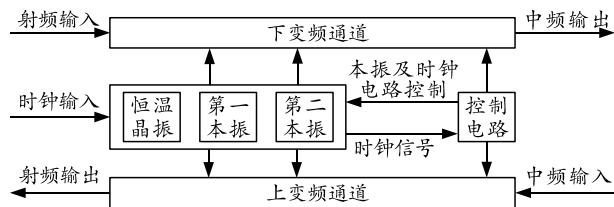


图4 射频模块组成

图4中，恒温晶振用于为系统各部分的正常工作提供时钟信号，并为模拟下变频通道以及模拟上变频通道提供一本振和二本振信号；一本振和二本振用于下变频通道中雷达射频输入信号的混频(降频)以及上变频通道中中频输入信号的混频(升频)。

2.2 信号处理模块

信号处理模块主要完成雷达相关参数的测量以及模拟目标信号的产生，因此，该模块主要包括信号侦察接收处理单元以及模拟目标信号产生单元，而该部分的功能主要通过FPGA实现，其组成如图5所示。

2.3 电源与接口控制模块

电源与接口控制模块由DC/DC电源和控制接口2部分组成。DC/DC电源主要是将外部输入电源转换为主机内各模块需要的电源；控制接口提供RS422、以太网2种接口，用于接收显控终端控制指令及上报系统工作状态。同时，为降低输入输出线的传导共模和差模噪声，外部直流输入在通过射频混合大电流连接器后，接入滤波器。为使该模块在高压力的工作条件下具有极高的可靠性，模块内部采用隔离式DC/DC转换器。

2.4 显控终端

该系统显控终端硬件部分采用市面常规笔记本电脑, 软件部分主要包括综合显控、场景设置、信号侦收设置、目标模拟设置、训练库等功能模块。其中, 综合显控包括系统设置、状态回显、初始化以及复位自检等; 场景设置包括室内信号源与系统直连的线馈以及外场雷达与系统之间的空馈; 信号侦收包括雷达信号重频-时间、频率-时间、幅度-时间和脉宽-时间、频谱态势、雷达方向等; 目标模拟包括目标速度、起始距离、相对 RCS、起伏类型、飞行航迹等; 训练库包括预先设置好的场景、信号侦收、目标模拟参数等训练模式, 也可以根据需要进行自定义并加入库。

3 试验验证

为验证该目标保障系统的实用性, 将该目标保障系统配置于距离某型雷达 100 m 处, 在雷达开机工作的状态下, 通过该目标保障系统设置多批次、多航向的模拟目标, 在雷达终端界面可以看到模拟目标回波信号, 并形成了相应的航迹。图 6 为该系统的原理样机, 图 7 为该系统显控终端对于 4 批目标的规划航迹, 图 8 为雷达录取航迹与系统规划航迹对比。



图 6 目标保障系统原理样机

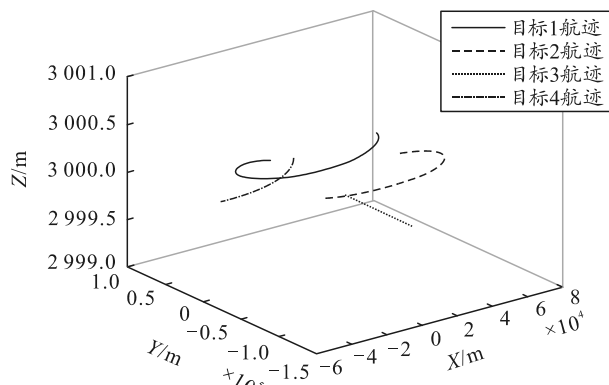


图 7 目标保障系统显控终端对于 4 批目标的规划航迹

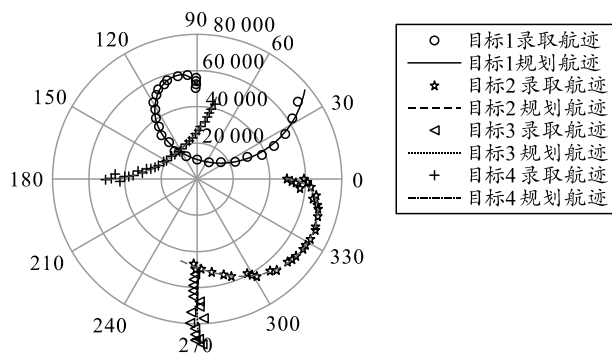


图 8 雷达终端采样航迹与系统规划航迹对比

从结果可以明显看出, 该系统能够为雷达训练提供具有航迹特征的模拟目标。由于该系统提供的模拟目标信号需要通过副瓣进入雷达系统, 而雷达天线波瓣之间存在凹口, 导致雷达接收模拟回波信号的过程中会出现有些点迹未被录取的现象, 但该现象并不影响雷达的操作训练。

4 结束语

雷达操作人员的操作水平直接影响装备作战效能的正常发挥; 因此, 逼真环境下的操作训练就显得尤为必要。笔者深入分析了目标保障的基本原理, 通过系统设计和试验验证, 证实了该系统能够为雷达实装训练提供逼真的空中目标环境, 能够解决目前雷达实装训练过程中缺乏空中目标保障的难题, 对于提高部队装备训练效果具有重要意义。

参考文献:

- [1] 杨啸天, 冯金富, 钟麟, 等. 不确定信息下雷达系统效能评估[J]. 兵工自动化, 2012, 31(10): 40-43.
- [2] 刘万祥, 滕文志, 杨玉剑, 等. 基于改进 AHP 和熵权法的新型雷达作战效能评估[J]. 空军预警学院学报, 2020, 34(1): 27-30.
- [3] 董家隆, 李桂祥, 陈辉. 基于改进 ADC 模型的天波雷达作战效能评估[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(2): 126-130.
- [4] 赵志宏, 张晓慧, 夏宏森, 等. 复杂作战试验环境下军用雷达作战效能评估[J]. 火控雷达技术, 2020, 49(1): 19-24.
- [5] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 222-223.
- [6] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012: 92-95.
- [7] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 28-30.
- [8] 张欣, 叶灵伟, 李淑华, 等. 航空雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 75-84.