

雷达导引头射频注入式仿真关键技术研究

阳贵兵, 向哲, 张伟

(中国人民解放军 92941 部队)

摘要:针对雷达导引头射频注入式仿真系统构建需求,研究系统建设中的关键技术及其解决途径,主要包括仿真系统建模及其校核验证技术、射频目标回波与干扰信号模拟技术、信号通道合并技术、天线方向图匹配技术及系统与靶场试验资源的互联互通技术,研究成果可为此类系统建设提供理论和技术支撑。

关键词:雷达导引头;射频注入;半实物仿真;信号模拟;校核与验证

本文引用格式:阳贵兵, 向哲, 张伟. 雷达导引头射频注入式仿真关键技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(S2): 79-82.

Citation format: YANG Guibing, XIANG Zhe, ZHANG Wei. Research on Key Technology of RF Injection Simulation of Radar Seeker[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(S2): 79-82.

中图分类号: TJ81 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-2304(2020)S2-0079-04

Research on Key Technology of RF Injection Simulation of Radar Seeker

YANG Guibing, XIANG Zhe, ZHANG Wei

(The No. 92941st troop of PLA)

Abstract: RF injection hardware-in-the-loop simulation plays an increasingly important role in radar seeker test because of its low cost and high efficiency. According to the requirements of system construction, the key technologies and their solutions were studied, mainly includes simulation system modeling and verification technology, RF target echo and jamming signal simulation technology, signal channel combination technology, antenna pattern matching technology, interconnection and interworking technology between the RF injection simulation system and range test resources. The research results can provide theoretical and technical support for the construction of such systems.

Key words: radar seeker; RF injection; hardware-in-the-loop simulation; signal simulation; verification and validation

雷达导引头在复杂的电磁环境中能否达到预期的目的,是导弹武器系统试验鉴定中要回答的关键问题。针对导引头的性能考核鉴定,靶场很难在外场构建较为逼真的复杂电磁环境,一方面受限于试验成本,另一方面也是考虑到电磁保密要求,因而,采用内场半实物仿真,是目前雷达导引头在复杂电磁环境下性能考核与验证的主要方式^[1]。内场半实物仿真中,射频空馈式仿真是目前开展雷达导引头性能验证的主要方式,但建立微波暗室的成本较高;相比而言,注入式仿真因其构建和试验成本低、试验方便高效、试验状态充分

以及系统可扩展等优点,越来越受到关注和重视。注入式仿真中,又分为数字注入和射频注入两种方式,数字注入的方式实现简单,成本较低,但由于导引头接收机等全部采用数字仿真模型,系统的可信度不高;而射频注入式仿真,导引头除了接受天线部分用模型替代以外,其余部分全部用实装,且系统可以接收真实物理信号输入,因此其可信度可以最大限度得到保障。

本文针对某型导弹导引头射频注入式仿真系统的建设需求,研究其系统建设的关键技术,为该类型射频注入式仿真

系统的建设提供理论和技术借鉴,同时也为导引头性能考核与验证提供一种新的思路。

1 雷达导引头射频注入式仿真系统组成

雷达导引头注入式半实物仿真试验系统主要由仿真主控机、射频回波信号合成器、导引头射频接收信号处理机等部分组成,如图1所示。

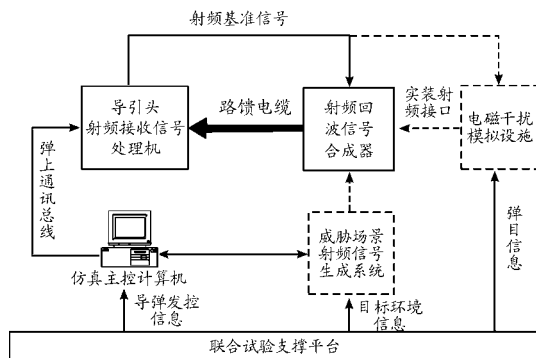


图1 雷达导引头射频注入式模拟系统组成框图

其中,仿真主控计算机包括仿真运行系统和数据分析工具;射频回波信号合成器包括射频接口单元和中频信号处理单元;导引头射频接收处理机包括射频分系统、中频信息处理系统、AD采集及预处理模块、信号处理模块、DDS通用组件等。

2 射频注入式仿真所涉及的关键技术

2.1 仿真系统建模及其校核验证技术

为了提高射频注入式仿真系统的逼真度和可信度,可以尽可能多的使用实装设备参与系统的闭环运行,但导弹动力学和运动学模型、目标环境信息以及电磁干扰需要通过仿真模拟,导弹动力学和运动学模型通过仿真主控计算机进行模拟,目标环境信息通过威胁场景射频信号生成系统进行模拟,电磁干扰信息通过电磁干扰模拟设施产生。其中,目标环境模型最复杂、最具不确定性,也是影响整个注入式仿真系统可信度的重要环节。

为了提高模型的可信度,确保试验结果的准确性,降低系统运行的风险,需要对仿真模型进行V&V(Verification and Validation,校核与验证)^[2],仿真模型校核验证过程如图2所示。

模型的校核与验证过程,就是分析比较仿真模型(仿真代码)与数学公式的描述是否相符,以及相同输入情况下与真实系统的输出是否一致。仿真模型的校核可采用仿真算法的校核、静态检测、动态调试、多人复核、参考基准校核、标准实例测试法等方法进行;仿真模型的验证分为时域验证和

频域验证两部分,目前仿真系统及模型验证中,大多只关注系统或模型时域部分的验证,容易忽略频域部分的验证,而往往频率及谱值是最能反映系统性能和暴露系统问题的重要指标之一。

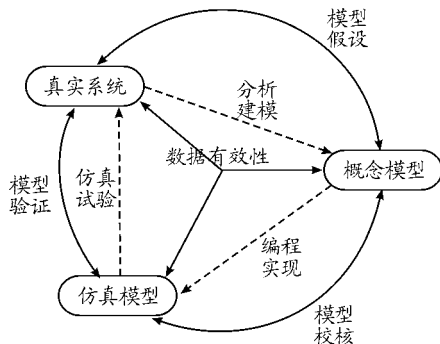


图2 仿真模型校核验证过程示意图

时域验证的方法主要有TIC不等式系数法和灰色关联分析法等,这两种方法应用较广,在这不做具体介绍。频域验证采用基于频谱分析的统计推断验证法进行,如果时间序列 $\{X_t\} = \{X_t; t \in \mathbf{N}\}$ 满足:

- 1) 对任何 $t \in \mathbf{N}, E(X_t^2) < \infty$;
- 2) 对任何 $t \in \mathbf{N}, E(X_t) = \mu$;
- 3) 对任何 $t, s \in \mathbf{N}, E[(X_t - \mu)(X_s - \mu)] = \gamma_{t-s}$,就称 $\{X_t\}$ 是平稳时间序列,简称为平稳序列。称实数列 $\{\gamma_t\}$ 为 $\{X_t\}$ 的自协方差函数。

由定义看出,平稳序列中的随机变量 X_t 的均值 $E(X_t)$,方差 $\text{var}(X_t) = E(X_t - \mu)^2$ 都是和 t 无关的常数。对任何 $t, s \in \mathbf{Z}$ 和 $k \in \mathbf{Z}, (X_t, X_s)$ 和平移 k 步后的 (X_{t+k}, X_{s+k}) 有相同的协方差:

$$\text{cov}(X_t, X_s) = \text{cov}(X_{t+k}, X_{s+k}) = \gamma_{s-t} \quad (1)$$

协方差结构的平移不变性是平稳序列的特性。为此,又称平稳序列是二阶矩平稳序列。设平稳序列 $\{X_t\}$ 有自协方差函数 $\{\gamma_k\}$:

如果有 $[-\pi, \pi]$ 上的单调不减右连续的函数 $F(\lambda)$,使得:

$$\gamma_k = \int_{-\pi}^{\pi} e^{ik\lambda} dF(\lambda), F(-\pi) = 0, k \in \mathbf{Z} \quad (2)$$

就称 $F(\lambda)$ 是 $\{X_t\}$ 或 $\{\gamma_k\}$ 的谱分布函数,简称为谱函数。

如果有 $[-\pi, \pi]$ 上的非负函数 $f(\lambda)$,使得:

$$\gamma_k = \int_{-\pi}^{\pi} f(\lambda) e^{ik\lambda} d\lambda, k \in \mathbf{Z} \quad (3)$$

就称 $f(\lambda)$ 是 $\{X_t\}$ 或 $\{\gamma_k\}$ 的谱密度或功率谱密度,简称为谱密度或功率谱。

如果 $\{X_t\}$ 有谱密度 $f(\lambda)$,则变上限的积分:

$$F(\lambda) = \int_{-\pi}^{\lambda} f(s) ds \quad (4)$$

就是 $\{X_t\}$ 的谱函数。

2.2 射频目标回波与干扰信号模拟技术

射频目标回波与干扰信号模拟是注入式仿真系统的关键及难点技术,原理如图3所示。射频目标回波与干扰信号模拟系统中射频目标回波模拟主要功能是接收来自导引头的路馈射频基准信号,经射频接口单元下变频到可进行处理的中频信号;中频信号处理单元生成三路延时、幅度、多普勒频率及相位均可独立控制的中频信号,这三路信号可分别用

来模拟导引头方位差、俯仰差以及和路信号;最后经过射频接口单元上变频器进行上变频,分别路馈接入导引头射频信号处理机实现比幅和差测角。

干扰信号模拟也是以导引头的路馈射频基准信号,接入到独立的干扰通道,按照目标回波控制模式独立生成三路信号,最终与目标三路信号合成,注入到导引头射频接收信号处理机中。

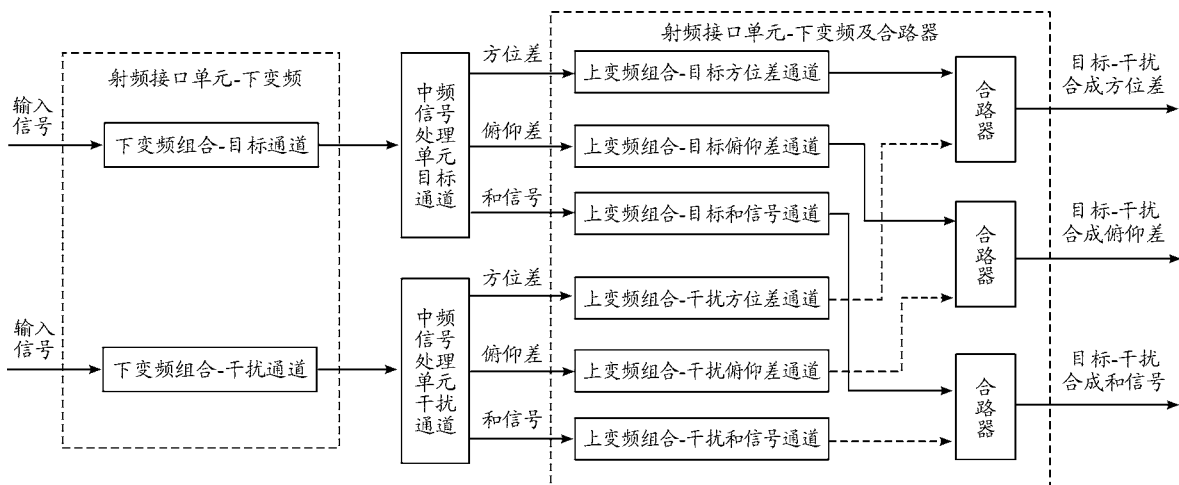


图3 射频目标回波与干扰信号模拟技术原理框图

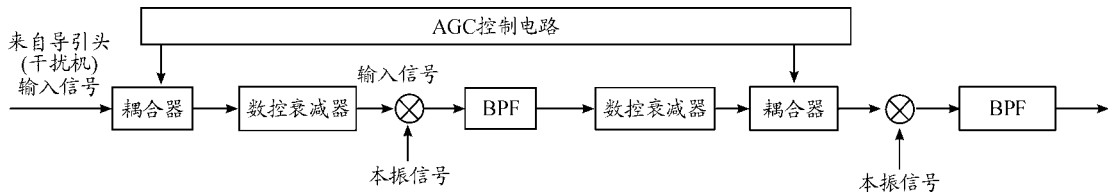


图4 射频接收通道下变频过程框图

射频目标回波与干扰信号模拟技术方案实现过程中,需要解决下变频、时延、多普勒频移、幅相控制等技术^[3]。

下变频采用成熟两级变频模式,按照图4实现。该模式主要考虑保持与上变频模式一致性。而上变频采用两级变频是方便滤波器的设计,保证带宽内信号质量。

对信号的延时操作可通过FPGA内部的双口RAM实现;目标的多普勒频移可以通过直接式数字合成器(DDS)实现,也可以通过高速数字信号处理系统的运算实现^[4]。

和差差3个通道的幅相控制由复域调制器实现,其输入为延时模块输出再经2倍抽取得到的所需采样率数据,该抽取过程可减小复域调制器一半的计算量。复域调制器的调制过程框图如图5,该结构具有极大的灵活性,可根据要求功能的不同,由控制逻辑控制3个调制器的工作状态,实现最终的调幅、调频、调相功能。

2.3 信号通道合并技术

采用通道合并的方式在单个通道中产生多个雷达辐射源信号,可以有效提高通道利用率,节约试验成本。一般情

况下,由于常规雷达辐射信号为脉冲信号,占空比较小,具有采用时分法进行通道合并的条件,从而在单个通道中产生多个特性不同的雷达脉冲信号^[5]。

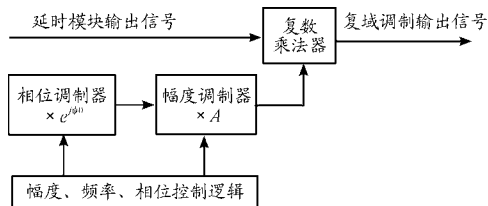


图5 复域调制器调制过程框图

信号通道合并技术需要在既定雷达信号特性的基础上,通过对各种到达时间、信号脉宽的脉冲信号进行交织,得到导引头射频信号处理接收机能够接收到的脉冲信号序列。信号交织主要通过合理排布到达信号的脉冲来实现,其计算过程如图6所示。

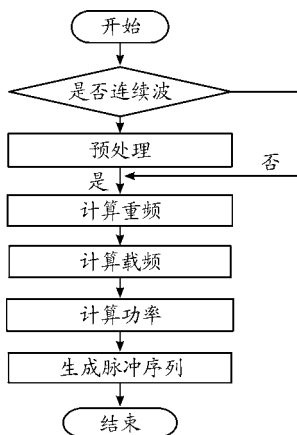


图6 雷达信号交织算法计算过程框图

信号合成算法是把每个辐射源产生的脉冲序列在通道内进行合并,直至同一通道中所有信号全部合成的策略。合成过程中采取两两合成,按优先等级取舍脉冲。

2.4 天线方向图匹配技术

为了逼真模拟导引头末制导雷达的搜索过程,对目标回波功率进行控制,就需要建立导引头天线方向图模型^[6]。所谓雷达天线模拟技术,就是采用仿真模型代替雷达接收天线,并保持注入信号之间严格的相对幅度、相位关系^[7],天线方向图匹配原理如图7所示。

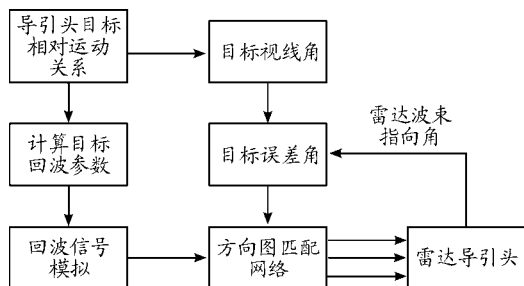


图7 方向图匹配原理框图

天线的特性模拟,可以采用一些常用的函数来近似模拟,比如高斯函数、辛格函数以及余弦函数等,然而采用常用函数近似模拟的方法存在模拟逼真度不高的问题,因为不同类型天线之间的差异,以及工作频率的影响,为此,天线方向图可事先根据天线类型、外形尺寸、加权方式等情况仿真产生若干组方向图数据文件(二维数组)。实际应用中,根据指令实时调用其中的一组数据文件,考虑到雷达波束扫描状态下波束会发生变化,系统实际模拟中每 20° 可变换一个方向图使用。

2.5 注入式仿真系统与靶场试验资源的互联互通技术

为使注入式仿真系统能够应用于靶场内外场联合试验训练中,就必须解决系统与靶场联合试验支撑平台、靶场实装/模拟干扰设备等互联互通问题。通过对系统接口进行定义,明确输入输出数据内容和接口协议以及相关数据梳理要求,实现系统与其他平台之间的信息交互。系统输入主要是想定文件、导弹发射控制指令、导弹初始装订参数信息、目标环境信号、干扰信号;系统输出主要是导弹六自由度飞行参数信息、末制导雷达辐射波束描述字信息、导弹关键时间点事件信息。

3 结论

- 1) 对导弹导引头末制导雷达注入式仿真系统的相关技术难题提出了解决方案。射频注入式仿真具有低成本、可重复和高效性的优点;
- 2) 如何快速突破制约导弹导引头末制导雷达注入式仿真系统建设的关键难题,是目前也是后续雷达导引头仿真研究的重点。

参考文献:

- [1] 习远望,张江华,高文冀. 雷达导引头低成本半实物仿真系统的应用[J]. 火控雷达技术,2010,39(1):11-15.
- [2] 廖英,邓方林,梁加红. 系统建模与仿真的校核、验证与确认(VV&A)技术[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2006.
- [3] 顾振杰,刘宇. 射频仿真系统目标模拟关键技术研究[J]. 雷达与对抗,2010,30(4):5-8.
- [4] 盛川,杨春晓,谢军伟,等. 一种制导雷达射频信号注入系统设计方案[J]. 弹箭与指导学报,2016,36(3):141-146.
- [5] 刘佳琪,吴惠明,饶彬. 雷达电子战系统射频注入式半实物仿真[M]. 北京:中国宇航出版社,2016.
- [6] 徐海,崔连虎. 射频仿真目标回波的天线方向图调制方法[J]. 理论与方法,2017,36(7):31-34.
- [7] 顾振杰,刘宇. 注入式雷达测试系统构建方法研究[J]. 现代防御技术,2016,44(5):155-159.

(责任编辑 周江川)