

雷达综合试验台仿真设计

宫海波 徐 茜 彭瑞元

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要:为了解决大型雷达系统的工程验证评估难题,设计了一套雷达综合试验台仿真系统。针对大型雷达工作模式多样化以及电磁环境复杂的特点,利用数字化仿真技术,设计了雷达探测空间目标和干扰的稀疏分布、雷达环境在雷达探测空间的面分布或体分布以及雷达环境回波建模,构建了一套雷达综合试验台仿真系统。试验结果表明,利用数字化仿真技术所设计的雷达综合试验台仿真系统通用性强、成本低、使用方便,解决了现实生活中大型雷达系统评估验证的复杂度和成本逐步上升的问题。

关键词: 雷达;试验台;数字化;仿真

中图分类号: TB22 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.4099

Simulation design of radar integrated test bed

Gong Haibo Xu Qian Peng Ruiyuan

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to solve the problem of engineering verification and evaluation of large radar system, a simulation system of radar integrated test bed is designed. In view of the diverse radar working mode and characteristics of large complex electromagnetic environment, the use of digital simulation technology, the design of radar detection space target and interference of the sparse distribution, radar environment in radar detection space distribution or distribution environment and radar echo modeling, constructs a set of comprehensive test platform of radar simulation system. The test results show that the simulation system of radar integrated test design using digital simulation technology of the strong versatility, low cost, convenient use, solves the complexity and cost of large radar system evaluation in real life gradually rising problem.

Keywords: radar; test bench; digital; simulation

1 引言

雷达系统评估和验证是个复杂工程,尤其是现代大型雷达系统性能先进,具有多种工作模式和极强的复杂电磁环境适应能力,雷达系统评估验证的复杂度和成本逐步上升,甚至达到几乎无法完全构建评估环境的程度^[1-3]。例如对于机载预警雷达来说,其探测空域内可能包含几十架甚至上百架飞机、几十枚导弹、若干舰船、若干电子战飞机,构建如此复杂的验证环境无异于一次大型军事演习,一方面需要付出高昂的验证成本,另外还需要考虑到诸多地缘政治因素。这种情况下,如何评估和验证雷达系统就成为一大难题^[4-6]。

随着仿真技术和器件水平的发展,数字仿真的逼真度和实时性都大幅提高^[7],基于数字仿真方式构建雷达评估环境具有通用性强、成本低、使用方便等优点^[8],在雷达系

统评估和验证方面具有广泛的应用前景^[9]。当然,数字仿真的逼真度与实现复杂度成正比,需要根据评估需求和评估的复杂度综合选择评估方式^[10]。雷达系统评估一共需要具备4个因素,即目标、环境、干扰和平台。

本文设计了一套雷达综合试验台仿真系统,在考虑静止平台的前提下,考虑了雷达探测空间目标和干扰的稀疏分布,对目标和干扰采用数字化建模仿真,同时考虑雷达环境在雷达探测空间中呈面分布或体分布以及考虑雷达环境回波建模的局限性,系统注入目标、干扰和环境回波,搭建了一套雷达综合试验台仿真系统。

2 系统总体方案设计

雷达综合试验台由两部分组成,一部分是场景建模与参数解算服务器,另一部分是实时回波模拟系统。场景建模与参数解算服务器由仿真计算机加环境建模软件组成,

用于产生雷达工作环境的特征参数,如地面背景参数、云雨杂波参数、目标运动轨迹、目标 RCS 参数等。场景建模与参数解算服务器产生的仿真环境参数通过专用光纤链路传输给实时回波模拟系统。实时回波模拟系统用于实时产生目标回波,其仿真环境参数由场景建模与参数解算服务器提供,系统自身配备高速磁盘阵列,用于存储仿真环境参数和实测数据,本系统可以脱离场景生成与计算系统独立工作。整体系统组成如图 1 所示。

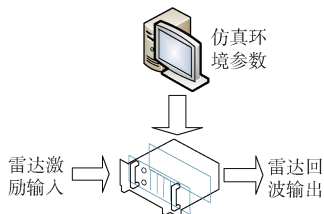


图 1 整体系统组成

3 试验台建模设计

3.1 系统应用流程设计

系统应用流程如图 2 所示,大体可以分为建模、参数解算和评估 3 个阶段。

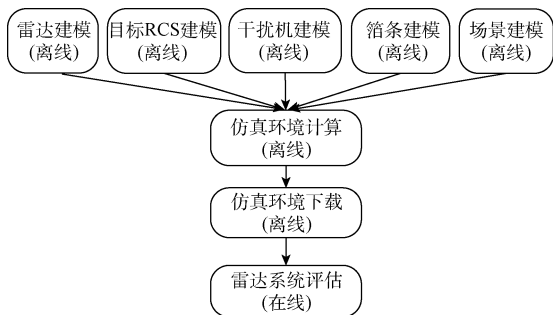


图 2 系统应用流程

建模阶段需要进行雷达建模、目标 RCS 建模(包括轻重诱饵建模)、干扰机建模、空间箔条建模、仿真场景建模(包括地面背景、云雨背景、目标及运动轨迹)。其中雷达建模主要设计雷达天线方向图、雷达信号形式、雷达峰值功率等参数。目标 RCS 建模可以导入电磁测量或计算得到的 RCS 模型也可以基于 Swerling 模型建立点目标统计模型。干扰机建模主要是指指定干扰机体、载体和干扰机具体参数。空间箔条建模主要输入箔条量(决定箔条 RCS)、箔条散开速度(假设箔条展开后呈椭圆形分布,长轴方向为箔条运动方向)。目标场景建模包括地面背景配置、云雨杂波背景配置、目标及干扰配置及各元素运动轨迹配置。其中雷达模型、目标 RCS 模型、干扰机模型、箔条模型、背景模型和轨迹模型都以库文件的形式输入,而仿真场景则以工程方式管理。

在参数解算阶段,场景建模与参数解算服务器根据仿

真环境配置计算实时仿真系统运行需要的参数配置文件,该文件包括每个时刻的目标/干扰/背景相对于雷达的空间位置及姿态、扩展目标的瞬时 RCS、有源干扰机配置参数、各种背景杂波配置参数。配置文件生成后,场景建模与参数解算服务器通过以太网或专用光纤将配置文件导入至实时仿真系统中。

在评估阶段,实时仿真系统实施产生目标、干扰、背景杂波等回波信号,将其中有源干扰机的工作状态用户可以在线更改,用于评估系统实际抗有源干扰能力。

3.2 实时模拟系统流程设计

实时模拟系统由雷达命令接口模块、仿真参数存储模块、各种实时回波模拟模块、雷达回波注入模块和主控及评估数据录取模块组成,这些模块分别负责激励(输入)、仿真参数配置、实时回波模拟(处理)、回波注入(输出)、监控及评估等功能。实时模拟系统功能如图 3 所示。

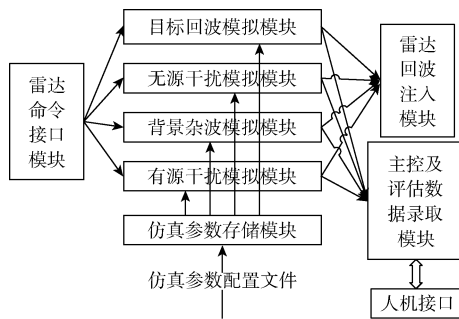


图 3 实时模拟系统功能

雷达命令接口模块用于产生系统激励。该模块接收雷达命令表,实时产生雷达激励波形和雷达波束指向,将这些数据发送给各个实时回波模拟模块。

仿真参数存储模块用于存储仿真参数配置文件。在仿真过程中,实时回波模拟模块需要高速读取仿真时刻场景的配置参数,这些参数的数据量很大,需要单独的大容量高速存储模块存储并回放这些参数。

各种实时回波模拟模块为系统的处理核心,这些模块内置了目标、无源干扰、背景杂波、有源干扰的运算模型或行为模型。在仿真过程中,实时回波模拟模块从仿真参数存储模块中实时读取模型配置参数,根据配置参数和雷达波束指向实时处理雷达激励信号,产生各种目标、干扰、背景的回波,并送给雷达回波注入模块。为了便于评估雷达系统指标,实时回波模拟模块还同时将仿真过程中各个雷达波束覆盖的目标信息上报给主控及评估数据录取模块。

雷达回波注入模块即为实时回波模拟系统的信号输出口。该模块接收各个实时回波模拟模块的处理结果并进行合成,配合雷达工作时序及接口速率将模拟回波注入雷达。

主控及评估数据录取模块为系统的控制中枢,该模块

监控系统工作状态,提供人机接口,另外分别通过以太网和内部管理总线录取雷达处理结果及仿真过程中雷达各波束覆盖的目标信息,用于后续雷达系统评估分析。

3.3 雷达建模设计

本系统注入方式为中频或射频注入,因此需要模拟雷达发射机、天线和接收机特性。由于大型相控阵雷达接收通道数很多,直接采用阵元级注入的设备量和接线难度都很大,因此本系统使用波束域注入的方式。

雷达发射机建模主要是雷达发射信号形式和功率建模。其中发射信号形式借助雷达通信接口发送给综合试验台,另外还要同时发送天线指向信息。

雷达天线模拟较为复杂,需要模拟相控阵雷达天线扫描引起的增益和方向图变化。相控阵雷达电压方向图可以按下式描述^[11]:

$$g(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi)E(\theta, \varphi)e(\theta, \varphi) \quad (1)$$

式中: $g(\theta, \varphi)$ 为天线方向图, θ, φ 分别是阵面球坐标系下的俯仰角和方位角; $G(\theta, \varphi)$ 为方向性因子, 主要影响因素是斜视口径损失、天线加权效率、馈电损耗和驻波损耗, 对于大多数情况可以仅考虑天线口径损失; $E(\theta, \varphi)$ 为阵因子, 为理想阵列合成方向图因子; $e(\theta, \varphi)$ 为阵元因子, 即阵元方向图, 大多数情况下可以认为 $e(\theta, \varphi) \approx 1$ 。

对于一个由 $(2N_x + 1) \times (2N_y + 1)$ 个阵元组成的平面阵, 阵因子 $E(\theta, \varphi)$ 为^[12-13]:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{m=-N_x}^{N_x} \sum_{n=-N_y}^{N_y} \omega_{nm} e^{j \cdot 2\pi / \lambda [nd_x (\sin\theta \cos\varphi - \sin\theta_0 \cos\varphi_0) + nd_y (\sin\theta \sin\varphi - \sin\theta_0 \sin\varphi_0)]} \quad (2)$$

式中: d_x, d_y 为 x, y 方向上相邻阵元的间隔, ω_{nm} 为加权系数, (θ_0, φ_0) 为波束指向。对式(2)中的 θ 求导, 可以证明波束方向图指向 (θ_0, φ_0) 时, 其半功率点波束宽度为 $B_\theta = \frac{B_0}{\cos\theta_0}$, 其中 B_0 为波束指向法向时天线半功率波束宽度。因此可以通过对天线方向图放缩仿真波束指向变化引起的天线方向图变化。

3.4 目标建模设计

目标回波模拟方式有两种, 一种方式是基于目标电磁特性模拟, 另外一种方式是基于传统点散射模型模拟^[14]。第1种方式可以精确模拟目标回波特性, 包括 RCS 起伏特性、微多普勒特性, 但仿真运算量较大; 第2种方式适用于普通窄带雷达, 仅能仿真目标 RCS 起伏的统计特性, 不能用于目标识别, 仿真运算量相对较小^[15]。为了兼顾评估过程中的目标容量、回波的保真度、以及设备量等因素, 我们采用大批量目标采用传统点散射模型模拟, 而部分敏感目标基于电磁散射特性模拟。

目标模拟包含以下参数: 目标 RCS、距离调制、多普勒、微多普勒、天线加权值。其中目标 RCS 通过电磁仿真或暗室测量获得。目标参数计算可以用下图表示。根据目标运动轨迹形成目标距离、速度、雷达视线角、姿态等一级参数。

根据目标距离及雷达载频计算出距离衰减量和回波初相和回波延迟; 根据目标速度和雷达载频计算出多普勒频偏; 根据雷达视线角及天线方向图计算出天线对回波的加权值; 根据目标姿态及雷达视线角得到目标 RCS。目标参数的计算过程如图4所示。

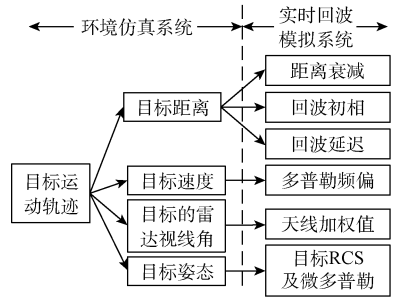


图4 目标参数计算过程

3.5 建模与解算软件架构

建模与解算软件架构设计按照功能层次结构分为4层: 驱动层、算法层、文件管理层、业务层。

驱动层包括 PCI 及硬盘接口读写相关的接口驱动, 以动态链接库 (DLL) 的方式进行管理。算法层主要是调用 MATLAB 算法库对各种目标、干扰进行建模及环境解算。文件管理层实现服务器本地仿真环境参数文件的管理, 将生成的仿真环境参数写入服务器本地硬盘, 在下载仿真环境参数时从本地硬盘中读出参数文件, 通过 PCI 接口发送到磁盘真理模块。业务层主要包括用户界面 (UI) 及调度算法模块、文件管理模块来实现数据通信和数据处理等功能。

业务层软件包括建模与解算、仿真环境参数下载两个主要功能。场景建模与环境解算的输入参数来自用户界面, 通过调用 MATLAB 算法库产生仿真环境参数文件。当用户选择“仿真环境下载”时, 业务层软件响应 CPU 主控模块的查询命令并返回仿真环境参数文件列表, 并将选择下载的文件通过 PCI 接口发送到磁盘阵列模块。

MATLAB 有完善的信号处理库, 建模与解算以 m 文件的方式进行管理, 方便算法的调试、维护及升级, 算法层软件根据用户界面选择的仿真场景调用相应的建模与解算函数, 即生成仿真环境参数。

4 仿真结果与分析

利用所设计的雷达综合试验台进行某雷达系统性能综合评估验证, 评估监控软件运行于实时回波模拟系统上, 这部分软件负责监控实时回波模拟系统状态、显示评估进度、录取评估结果。另外为了便于评估雷达抗干扰能力, 干扰机工作模式可以编辑。雷达综合试验台验证监控显示如图5所示。

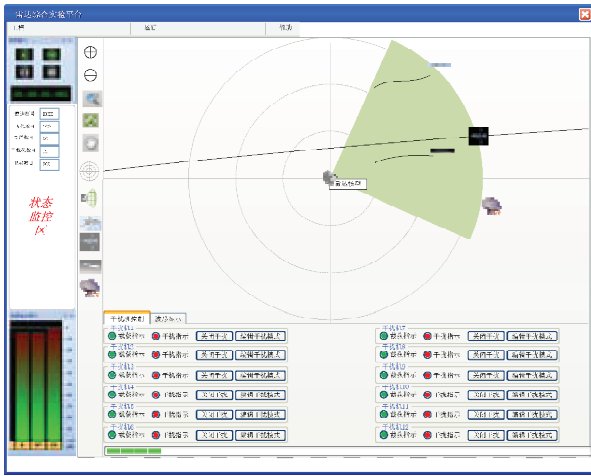


图5 雷达综合试验台验证监控图

仿真结果显示,该套仿真系统软件可以完成雷达系统自检监控、雷达系统运行状态监控;实时显示仿真场景及仿真进度,可以分类显示场景目标;实时监控系统输出波形;实时监控干扰机状态,可在线更改干扰机工作模式;通过以太网和内部管理总线录取雷达处理结果及仿真过程中雷达各波束覆盖的目标及干扰信息,可完整评估雷达系统性能。该系统具有4套雷达波束通道和4个匿影波束通道,可模拟多批次目标回波和有源干扰回波,采用中频数字注入方式;雷达系统模拟目标范围可达5 000 km;统计模型点目标可同时模拟64个探测区间的雷达目标,能模拟目标运动特征、弹道、RCS起伏统计特征、多普勒,30 m以下高机动真实电磁散射特性目标可同时模拟8个目标,120 m低机动真实电磁散射特性目标可同时模拟4个目标;可实现机载或地面有源干扰,其中最大干扰机数量为12个;基于Swerling模型模拟轻/重诱饵;空间箔条模拟箔条最大展开距离范围可达24 km;有效模拟典型地杂波和云雨杂波。试验结果表明,利用数字化仿真技术所设计的雷达综合试验仿真系统通用性强、成本低、使用方便,解决了现实生活中大型雷达系统评估验证的复杂度和成本逐步上升的问题。

5 结 论

现代大型雷达系统性能先进,工作模式及电磁环境复杂,雷达系统评估和验证复杂度和成本逐步上升,本文基于数字仿真方式构建雷达评估环境,考虑了雷达探测空间目标和干扰的稀疏分布,同时考虑雷达环境在雷达探测空间中呈面分布或体分布以及考虑雷达环境回波建模的局限性,系统注入目标、干扰和环境回波,搭建了一套雷达综合

试验台仿真系统。搭建的雷达综合试验系统通用性强、成本低、使用方便,在雷达系统评估和验证方面具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 任明秋,严革新,朱勇,等. 复杂电磁环境下雷达抗干扰性能测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6):1277-1282.
- [2] 周敏,蔡红维,阮航. 海南发射场测控雷达海杂波建模与仿真[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2): 31-35.
- [3] 王磊,于超鹏,刘平. 机载相控阵天气雷达回波仿真与分析[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(8):1869-877.
- [4] 袁兴鹏. 基于DRFM组件的宽带雷达抗干扰仿真测试系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9): 81-85.
- [5] 温宗周,刘焱,段俊瑞,等. 基于DSP的LFMCW雷达信号处理技术研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5):101-104.
- [6] 宋吟龄. 雷达微波模块通用测试平台设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1):49-51.
- [7] 刘利民,程呈,韩壮志,等. 实时机载雷达告警仿真系统设计与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(4):812-820.
- [8] 张娟. 雷达系统仿真、评估与实测数据分析[D]. 西安:西安电子科技大学, 2006.
- [9] 高建栋,韩壮志,何强,等. 雷达回波模拟器的研究与发展[J]. 飞航导弹, 2013, 1:63-66.
- [10] 宋杰,何友,关键. 非合作双基地雷达测距方法与精度分析[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(2):170-173.
- [11] 肖圣兵. 某型雷达通用自动测试系统的设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4):96-100.
- [12] 卢铮,李超,方广有. 调频连续波太赫兹雷达方案研究及系统验证[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8):58-63.
- [13] 赵继承,顾宗山,吴昊,等. 雷达系统测试性设计[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(3):174-179.
- [14] 郭建明,谭怀英. 雷达技术发展综述及第5代雷达初探[J]. 现代雷达, 2012, 34(2):1-7.
- [15] 黎湘,范梅梅. 认知雷达及其关键技术研究进展[J]. 电子学报, 2012, 40(9):1863-1868.

作者简介

宫海波,1982年出生,工程师,硕士,研究方向为机载测试技术研究。

E-mail:gonghaiho82312@163.com