

基于时分复用技术的组网地基雷达半实物仿真系统

何漫, 张恒, 刘佳, 崔毅楠, 王长庆

(中国运载火箭技术研究院 研发中心, 北京 100076)

摘要: 针对雷达半实物模型在组网仿真中试验复杂、设备成本高且通用性差的问题, 设计了一套基于时分复用技术的组网地基雷达半实物仿真系统; 该系统包括 L 波段雷达半实物系统、P 波段雷达半实物系统以及 P 波段雷达数学模型; 仿真试验过程中, 先通过软件预先仿真得到雷达工作时序文件, 依据该文件控制雷达半实物和数学模型的工作时间, 设定 L 波段雷达半实物系统或 P 波段雷达半实物分时段重复应用, 结合数学模型仿真结果进行分析, 得到组网雷达的目标探测结果; 通过仿真想定验证了该套系统能够正常运行, 并得到正确的仿真结果; 该系统的实现提高了仿真逼真度与可信度, 缩减了设备成本, 简化了试验方法, 降低了试验难度。

关键词: 雷达; 半实物; 仿真系统

A Hardware-in-loop Radar Netting Simulation System Utilizing “time-division Multiplex” Method

He Man, Zhang Heng, Liu Jia, Cui Yinan, Wang Changqing

(Research and Development Center, China Academy of Launch Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the problem that the Hardware-in-loop Radar model is complex in the network simulation, the equipment cost is high and the versatility is poor, a set of Hardware-in-loop simulation system based on time division multiplexing technology is designed. The Simulation system includes L-band Hardware-in-loop radar system, P-band Hardware-in-loop radar system and P-band Functional Mathematical Model. In the simulation experiment, the radar working sequence file is preliminarily simulated by software, and the working time of the Hardware-in-loop Radar model and mathematical model is controlled according to the document. The L band of Hardware-in-loop radar system or the P band of Hardware-in-loop radar system sub-time repetition is applied, and the simulation results of the mathematical model are analyzed to obtain the target detection results of the network radar. In this paper, we prove that the system can run normally and get the correct simulation result. The realization of the system improves the simulation fidelity and credibility, reduces the equipment cost, simplifies the test method, reduces the difficulty of the experiment.

Keywords: radar; hardware-in-loop; simulation system

0 引言

现代战争中, 随着各种新型突防武器、隐身武器和综合电子干扰等技术的发展, 使得雷达的探测能力和战场生存能力面临巨大威胁, 于是分布式组网雷达成为了迫切需求^[1]。与传统单地基雷达相比, 组网雷达通过信号级的融合提高了对高速机动等低可观测目标的探测概率, 提高了探测定位精度; 通过数据级的融合, 可提供更稳定、更高的数据率、更低延迟的目标跟踪信息流^[2]。因此针对未来战场构建仿真想定, 组网雷达必不可少, 本文提出了基于时分复用技术的组网地基雷达半实物仿真系统, 解决了数学模型实时性差逼真度低的问题, 也改善了根据仿真想定全部构建半实物模型成本高的弊端。

1 系统总体架构

根据实际应用需求, 需要构建多部 L 波段雷达和 P 波段雷达, 且部署在不同地点, 相同频段的雷达工作模式基本一致。针对该仿真需求, 出于对仿真准确度以及可信度的考虑, 又兼顾到低成本高效率的原则, 本文建立了一套基于时分复

用技术的组网地基雷达半实物系统。该系统包括 L 波段雷达半实物系统、P 波段雷达半实物系统以及 P 波段雷达数学模型。仿真前先利用 STK 软件进行预仿真, 得到组网雷达在目标探测过程中各自的工作时序文件, 即仿真预处理文件。依据该文件控制雷达半实物和数学模型的工作时间, 设定 L 波段雷达半实物系统或 P 波段雷达半实物分时段重复应用, 实现了雷达半实物的时分复用功能。仿真过程中, 3 种模型均接受外部来袭目标发送的运动数据, 并根据调度系统内的仿真预处理文件在仿真过程中合理调度两部半实物雷达和雷达数学模型, 模型接收到输入数据和调度指令后完成对目标的探测跟踪并将探测结果输出显示, 由仿真试验人员进行结果评估。

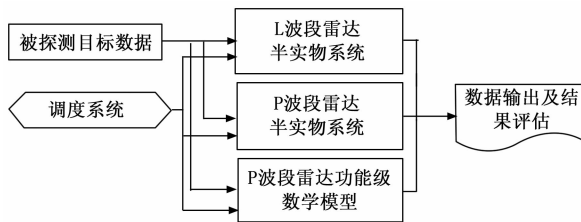


图1 组网雷达半实物系统总体结构图

收稿日期:2017-03-30; 修回日期:2017-05-03。

作者简介:何漫(1985-),女,湖北潜江人,硕士,工程师,主要从事系统仿真方向的研究。

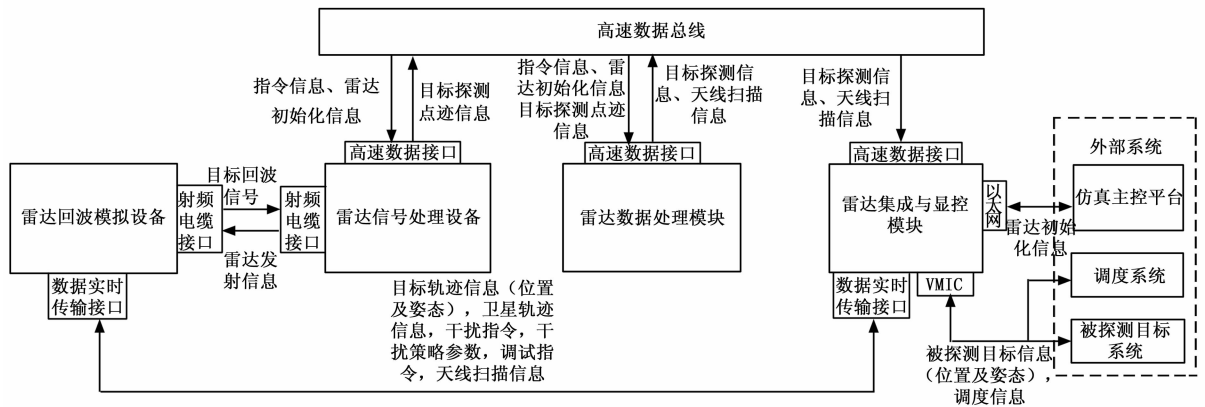


图 2 雷达半实物系统框架

2 L 波段和 P 波段雷达半实物系统硬件设计

两套雷达半实物仿真系统硬件平台是相同的, 均包括 4 个硬件模块: 回波模拟设备、信号处理设备、数据处理模块和集成与显控模块, P 波段雷达半实物还包含了该部雷达的功能级数学模型。两部雷达半实物系统的构建均需要符合各雷达的战技术指标, 并以此为基础各自开展相关的算法实现。

L 波段雷达半实物系统化基本性能如下所示^[3]: 工作频段: 1 215~1 250 MHz (窄带); 1 175~1 375 MHz (宽带); 覆盖范围: 方位 259~19°; 仰角: 0.6~80°; P 波段雷达半实物系统基本性能如下所示^[3]: 工作频段: 420~450 MHz; 覆盖范围: 方位 0~120°; 仰角: 3~85°。

2.1 雷达回波模拟设备

雷达回波模拟设备产生两种波形的中频雷达发射信号, 与频率综合器输出的本振, 混频产生射频雷达发射信号, 放大功分输出 56 路, 对应 56 个相控阵天线子阵。每个子阵再分 32 路输出, 形成一个天线波束, 最多 56 个天线波束。子阵收发共用, 每个子阵输出单脉冲 4 子阵信号, 经单脉冲比较器, 产生和通道、方位差通道和俯仰差通道信号, 56 个子阵产生 56 组和差三通道信号, 经单脉冲组合器, 输出合成后的和通道、方位差通道和俯仰差通道信号, 给后端进行处理。

半实物仿真将相控阵天线用数学模型表示, 在 UHF 波段目标回波模拟中实现。UHF 波段目标回波模拟直接生成输出和通道、方位差通道和俯仰差通道射频目标回波信号, 电缆注入给 UHF 波段雷达, 所以 UHF 波段雷达和 UHF 波段目标回波模拟均包括 3 个通道 (对应搜索、跟踪的和通道、方位差通道和俯仰差通道)。

考虑到抗旁瓣进入的压制干扰, 相控阵天线的仿真需要考虑旁瓣相消、副瓣匿影、干扰置零等因素, 对目标和干扰按照单脉冲 4 子阵进行加权, 合成输出和通道、方位差通道和俯仰差通道窄带信号。回波模拟设备硬件架构如图 3 所示。

2.2 雷达信号处理模块

通过电缆接收回波模拟设备注入的目标回波信号, 先进行模拟下变频, 变至中频后, 进行 AD 变换、数字正交鉴相下变频、脉冲压缩、包络检波、CFAR、测角等操作, 得到目标点迹数据, 输出给数据处理模块。根据集成与显控模块设置的参数, 产生同步时序, 控制其它设备及模块。

信号处理模块采用多核、多板 DSP6678 实现。信号处理

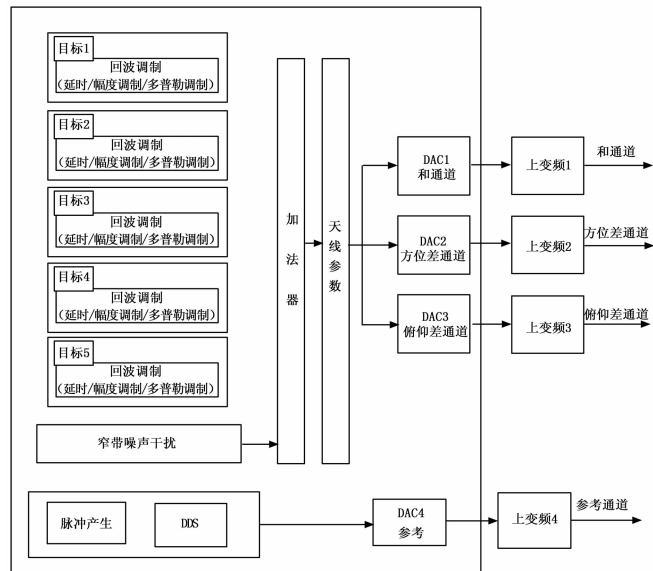


图 3 回波模拟设备硬件架构图

板是以 TI 公司的多核处理器 TMS320C6678 和 Xilinx 公司 Virtex-6 系列 FPGA 为核心构建的高带宽、高性能信号处理卡, 可以广泛应用于雷达信号处理、数字接收机、数字侦察机、电子对抗等领域。

信号处理板采用标准 6U VPX 架构, 其主要包括 4 片八核定浮点 DSP 处理器 TMS320C6678、1 片高性能 FPGA XC6VVSX315T、1 片 PCIe 交换芯片和 1 片 RapidIO 交换芯片。DSP 主要完成高速数字信号处理功能, FPGA 主要实现高速数据接口和数字信号处理功能; 板卡的原理如图 4 所示。

2.3 雷达数据处理模块

雷达数据处理模块对前端信号处理设备输送的点迹检测结果进行后期处理, 使单次探测结果与目标历史信息相融合, 并利用滤波算法进行实时状态估计, 得出可靠性和精度都高于单次探测结果的目标状态估值, 从而完成对目标的连续、稳定的跟踪, 如图 5 所示。

雷达信号处理的整体数据流关系为:

1) 前端 AD 采集到的回波数据, 在 HRVPX6CF2V 板卡的 FPGA V7 节点进行预处理后, 通过 SRIO x4 发送给 HRVPX6678Q 板上的 DSP C6678;

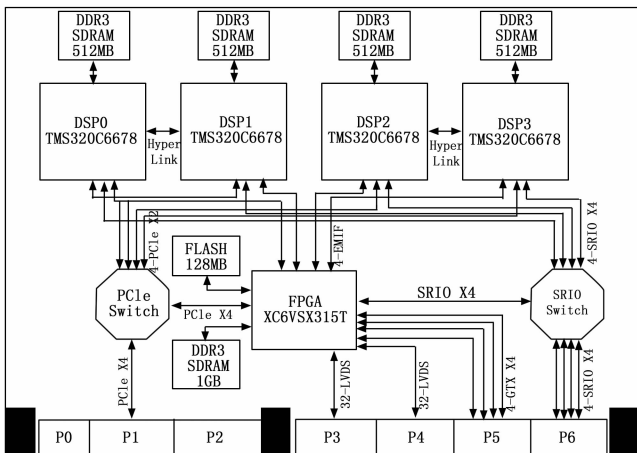


图 4 信号处理及数据处理模块硬件原理框图

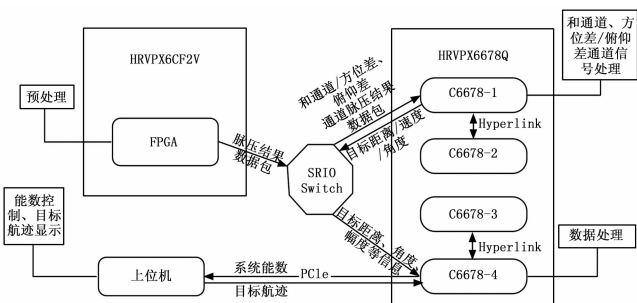


图 5 雷达信号处理验证平台总体设计框图

2) HRVPX6678Q 板的 DSP 经过信号处理 (解包预处理、定转浮、求模、CFAR、测速、测距、测角), 得到目标的距离、速度、角度信息, 并对目标信息进行数据处理进行目标航迹关联, 并将结果通过 PCIe 返回给上位机进行显示。

数据处理模块与信号处理模块在同一块板卡上实现, 故硬件平台架构一致。

2.4 集成与显控模块

通过 VMIC 实时接收并处理仿真想定中被探测目标的姿态位置信息和调度指令, 同时通过以太网接收系统仿真试验调度主控发送的初始化参数以及仿真控制指令。最终将探测结果发送给某系统, 并能够对态势进行实时演示。为保证实时信息与非实时信息的传递, 集成与显控模块应基于 windows+RTX 操作系统开发。

集成与显控模块采用单板机实现。考虑到用户操作的灵活性, 系统拟采用 X86 的单板计算机, 采用 Windows 操作系统。考虑系统中外设备板的数量, 采用 Concurrent 公司 VR737/08 系列单板机。单板机的内部功能结构如图 6 所示。

3 P 波段雷达数学模型

P 波段雷达数学模型, 是一个具有自适应功能的闭环系统。其组成如图 7 所示。它的主要功能是接收外部系统传入的雷达初始化参数, 以及外部其他系统导入的实时信息数据, 还有目标的先验信息, 进而仿真功能级的目标检测、搜索、多目标跟踪以及波束调度功能。P 波段雷达数学模型采用 VC# 程序开发实现, 确

保功能要求和实时性要求。

P 波段雷达数学模型中各组成模块功能描述如下:

1) 发射机模型: 根据资源调度安排的发射信号功率、信号载频、脉冲重复周期等参数仿真发射机功能级功能。

2) 天线模型: 根据初始化的天线参数仿真计算天线方向图, 并根据波束指向和当前的目标、杂波和干扰源位置计算相应的天线增益值。

3) 环境模型: 根据导入的实时目标参数、干扰参数和杂波参数, 用雷达方程求出目标回波功率、干扰回波功率和杂波回波功率 (同时考虑天线增益调制)。

4) 接收机模型: 根据接收机参数仿真接收机对目标、杂波、干扰回波信号功率的线性放大, 并添加接收机噪声功率。接收机模型包括接收机噪声模型和线性放大器模型。其中接收机模型考虑了接收机的内外噪声, 线性放大器模型实现了对目标、杂波、干扰、噪声功率的放大。

5) 信号处理模型: 根据目标真实信息, 计算目标通过信号处理后的峰值功率; 同时运用脉冲压缩、动目标显示 (MTI)、动目标检测 (MTD) 滤波器原理, 并计算信号处理后杂波、干扰、噪声的平均功率。而且考虑了压制式干扰通过自适应旁瓣相消模型后的干扰相消比^[4]。

6) 目标检测模型 (CFAR): 根据检测因子、恒虚警概率等参数和信号处理输出的目标峰值功率、杂波平均功率、干扰平均功率和系统噪声平均功率计算综合信噪比 SNR 和目标检测概率 P_d , 并将检测概率与 (0,1) 均匀分布的随机数作比较, 判定雷达是否发现目标。

7) 测量模型: 若雷达能检测到目标, 则根据测距原理计算当前检测目标的距离误差, 叠加在目标的真实距离上得到目标的距离量测值; 同时利用和差比幅测角原理, 测出目标的角度量测值。

8) 数据处理: 根据初始化的数据处理滤波算法参数, 实现 P 波段雷达对多目标探测数据的滤波和预测 (预测目标下一跟踪周期的位置), 向资源调度模块提出对目标的确认或者跟踪请求 (还有小搜请求)。

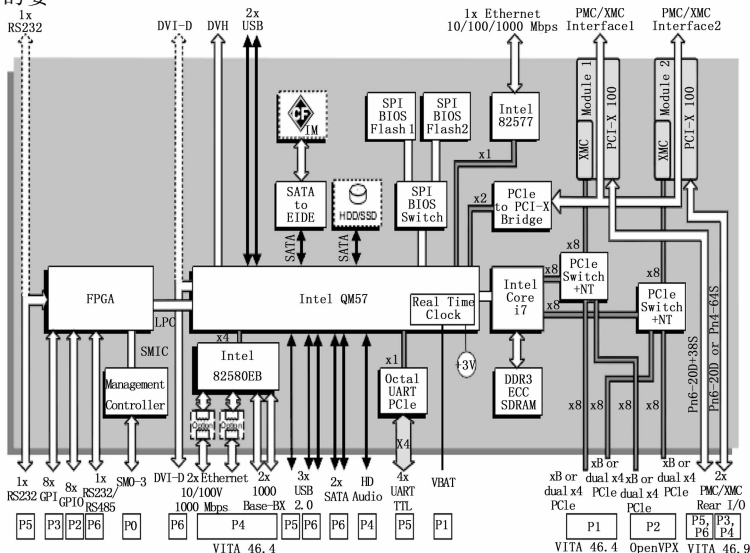


图 6 单板机内部结构框图

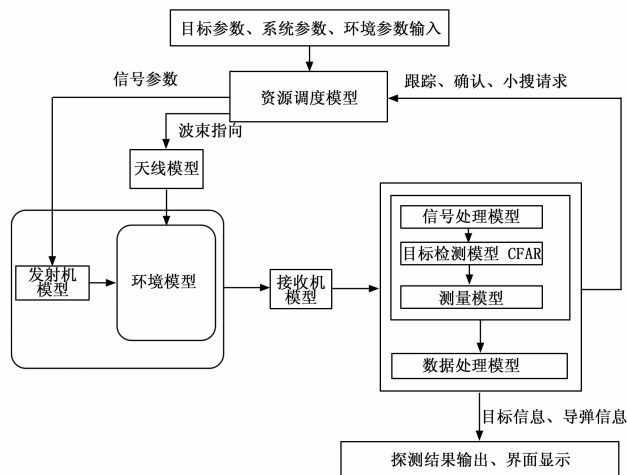


图 7 P 波段雷达数学模型组成框图

9) 调度管理模型: a 实现目标搜索、确认、跟踪、小搜的波束调度管理; b 实现雷达发射信号带宽、信号脉宽等参数选择功能; c 根据外部输入的雷达发射信号功率控制参数实现自适应功率控制(功率管理)或功率分级; d 实现雷达内部时间管理和推进。

P 波段雷达数学模型仿真系统流程如图 8 所示。

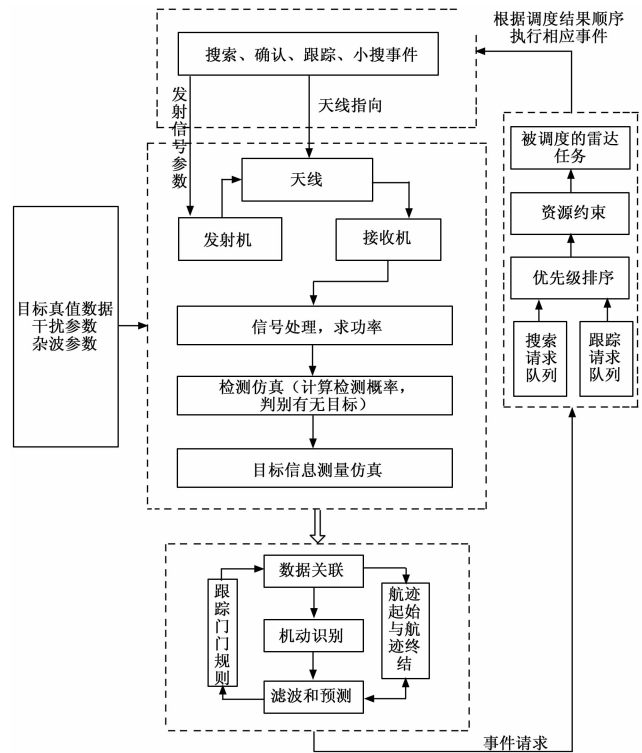


图 8 P 波段雷达信号级仿真流程图

P 波段雷达系统是按照 P 波段雷达的调度间隔进行逐次仿真实现^[4]。仿真系统的控制中心在调度模块, 在每个调度间隔开始时, 调度模块分析上一个调度间隔内数据处理模块发来的请求, 按照一定的调度算法, 确定出本调度间隔内的一组合理的雷达事件序列。同时调度模块将此雷达事件序列参数(如天线指向, 信号参数)送入对应的模块, 经过接收

机、信号处理和测量模块仿真得出雷达测量数据。同时将测量数据送到数据处理模块进行关联、滤波和航迹管理。最后在本次调度间隔内数据处理模块要向调度模块发出下一个调度间隔内的事件请求。

P 波段雷达通常设计有搜索、确认、跟踪及跟踪处理中的小搜 4 种工作方式, 搜索的任务是在指定空域搜索和检测目标, 搜索波束的排列, 应保证雷达在搜索完全空域的时间内目标不会逃离搜索空域构成的监视屏。搜索空域是一个由方位、俯仰、距离组成的立体空域。由于在现实环境中不仅存在杂波(海杂波、地杂波、气象杂波)还有干扰(如噪声压制式干扰), 因此, 要采用相应的信号处理技术(旁瓣相消、脉冲压缩、动目标显示、动目标检测、恒虚警检测), 以便在噪声、杂波和各种干扰背景下检测到目标。

若在某个搜索波束的位置上发现了目标, 雷达随即在该搜索波束的位置上进行一次确认, 以确定检测的目标是有效目标、杂波还是噪声。确认波束一方面可以降低杂波、噪声引起的虚警率, 另一方面, 通过雷达系统波形和信号处理方式的设计, 取得目标更精确的位置测量值和目标位置的变化率。

对已经确认的目标, 再根据目标的速度、距离、回波信号强度等作相关处理, 来防止同一个目标被相邻的搜索波束检测到或者与已经建立跟踪的目标再次被搜索波束检测到而重复启动跟踪。经过验证并作了相关处理的新目标列入跟踪目标的队列, 转入跟踪阶段。雷达计算机根据搜索波束和验证波束获得的测量值, 决定下一个跟踪波束对目标的采样时间和位置, 然后控制雷达波束继续搜索或跟踪其它的目标。在该目标下一个跟踪采样时刻到来时, 雷达在该目标的预测位置上发一跟踪波束。对已经建立跟踪轨迹的目标, 雷达每隔一个时间间隔进行一次跟踪采样, 以保持对目标的跟踪, 直至目标被认为是无效或目标已经跟踪结束为止。

在跟踪保持阶段若没有检测到相应目标信号, 则认为是目标失跟, 则转为小搜, 进行小范围搜索, 并进行一次伪滤波处理作为当前目标滤波值, 更新航迹。

4 仿真算例及结果分析

步骤 1: 建立仿真想定, 某导弹目标于仿真时间 12: 00 从某地点发射, 分别建立 5 部地基雷达, 且部署地点如表 1 所示。

表 1 雷达部署位置表

雷达类型	纬度/(°)	经度/(°)
雷达 1	49	-160
雷达 2	61	-149
雷达 3	85	-50
雷达 4	39	-100
雷达 5	51.75	-177.07

步骤 2: 使用软件进组网雷达探测仿真, 得到仿真预处理文件。根据该时序文件, 确定半实物仿真中雷达 1 为 L 波段雷达半实物系统, 雷达 2 和雷达 4 为时分复用的 P 波段雷达半实物系统, 雷达 3 和雷达 5 为功能级数学模型。

[3] 李鹏杰. 用于微型断路器的交直流剩余电流保护技术的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.

[4] Nazmiye B O, Rosemary D, Martha B, et al. The development of smart homes market in the UK [J]. Energy, 2013, 60 (1): 361 - 372.

[5] 基于 PC104 总线便携式断路器检测仪的研制 [J]. 自动化与仪表 2010, 25 (3): 10 - 12.

[6] 张自峰. 低压断路器智能化的发展趋势 [J]. 电气应用, 2010 (6): 23.

[7] 牟龙华, 朱国锋, 朱吉然. 基于智能电网的智能用户端设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 38 (21): 53 - 56.

[8] 韩 钊. 基于 ADE7758 的多功能电参数测量模块设计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

[9] 张有兵, 翁国庆, 曹一家, 等. 网络化电能质量监测系统中的配电网载波通信 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (6): 116 - 122.

[10] 陈金辉, 韩媛媛, 武文平. 基于单片机 PIC16F877A 和计量芯片

ATT7022A 的三相多功能复费率电能表的设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (2): 98 - 100.

[11] 刘 尧, 黄玉辉, 潘华明. 配电网电缆屏蔽层宽带载波通信技术 [J]. 华东电力, 2007 (12): 60 - 62.

[12] 智志高新. 电力载波通信的革命性颠覆: 宽带载波 [EB/OL]. [2015 - 06 - 05]. http://www.chinasmartgrid.com.cn/news/20150605/605618.shtml.

[13] 孙 哲. 基于宽带通信的实时用电信息采集系统研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.

[14] 陈 可, 胡晓光. 基于电力线宽带载波集中器设计与中继算法 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (9): 115 - 120.

[15] 电力行业电测量标准化技术委员会. 多功能电能表通信协议: DLT 645-2007 [S]. 北京: 中国电力企业联合会, 2007.

[16] 国家电网公司. 电力用户用电信息采集系统通信协议 第 1 部分: 主站与采集终端通信协议: Q/GDW 376. 1-2013 [S]. 北京: 国家电网公司营销部, 2013.



(上接第 119 页)

步骤 3: 对各雷达进行正确的战场参数设置, 包括部署位置以及阵面朝向、发射频率等关键参数, 即可开始仿真。仿真过程中可通过各半实物雷达以及雷达数学模型的 P 显界面观察到各雷达对目标的探测情况, 包括雷达工作方式、波形参数、脉压增益、雷达的波束方位角、俯仰角信息以及目标的位置、速度等。以雷达 1 的状态显示为例, 如图 9 所示。

目标参数信息	
参数项	目标1参数
仿真时刻[s]	326
航迹编号	1
雷达工作方式	跟踪
波形参数	40Hz
脉压增益[dB]	7500
ECEF坐标X[m]	-2981450
ECEF坐标Y[m]	1762650
ECEF坐标Z[m]	7598940
ECEF坐标Vx[m/s]	3201.21
ECEF坐标Vy[m/s]	-1900.64
ECEF坐标Vz[m/s]	960.58
波束方位角[deg]	-5.83
波束俯仰角[deg]	11.83

图 9 被探测目标的状态数据显示

步骤 4: 仿真结束后, 选择各半实物雷达或雷达数学模型生成的过程记录文件, 使用结果分析程序, 回放记录数据, 可以清楚分辨出目标的清晰轨迹, 如图 10 所示。

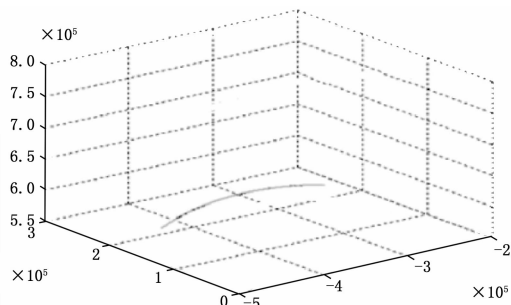


图 10 仿真数据的比较分析图

步骤 5: 选择各半实物雷达和雷达数学模型生成的过程记录文件, 结合 5 部雷达的探测结果, 可针对任意一个被探测的

目标进行组网雷达的覆盖性分析。如图 11 所示。根据时序图可知, 导弹于起飞后 8 分钟陆续被 5 部地基雷达探测到。该仿真数据与 STK 软件仿真数据基本一致。证明该半实物仿真系统可正常运行且分析有效。

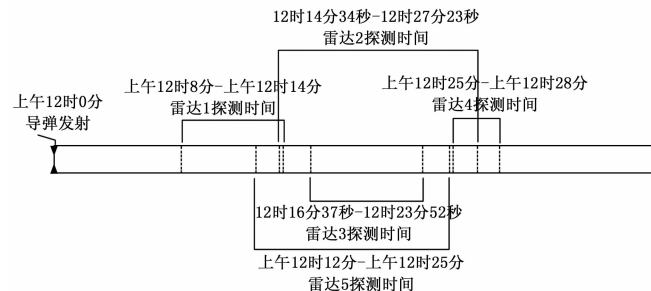


图 11 针对某型导弹的雷达探测仿真覆盖性分析时序图

根据时序图可知, 导弹于起飞后 8 分钟陆续被 5 部地基雷达探测。

5 总结

由该套组网雷达半实物仿真系统的仿真结果可知, 该套半实物仿真系统能有效准确地扫描跟踪到视场内的目标并完成仿真后的数据分析。该系统的建设提高了作战仿真系统的高效性和逼真度, 更加完整地模拟需要的战场环境。此外应用时分复用的技术、半实物模型与功能辅助验证模块相结合的方法, 缩减实际创建的半实物设备成本, 简化试验方法, 降低试验难度。

参考文献:

[1] 宋济慈. 组网雷达仿真与对抗技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

[2] 刘 峰, 曾 涛, 刘 伟. 基于“时间反演”的组网雷达半实物仿真方法 [J]. 计算机仿真, 2004 (6).

[3] Skolnik M I. 雷达手册 (第三版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[4] Jane's radar and electronic warfare systems [Z]. 2005 - 2006: 156.