

# 基于 Simulink 的电子对抗分布式仿真系统研究

康祥熙<sup>1</sup>, 杜增<sup>1</sup>, 张云涛<sup>1</sup>, 王雷<sup>2</sup>

(1. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036;

2. 西安飞机工业集团有限责任公司, 陕西 阎良 710089)

**摘要:** 航空领域常进行电子对抗仿真, 为获得更高的仿真置信度, 一个分布式、高效、兼容性好、能应对复杂场景仿真的系统很有必要; 通过对 Simulink 进行研究, 提出一种既能解决 HLA (high level architecture) 架构下模型兼容性问题, 还能保证模型运行效率的分布式仿真系统创建方法; 该方法利用 M 语言脚本实例化 Simulink 模型, 动态适配想定场景, 并在 RTW (real time workshop) 的帮助下将模型编译为可执行程序, 在 MTC (main time control) 统一调度下完成时间同步和仿真推进; 最后, 通过红蓝电子对抗想定场景仿真, 进一步验证了按此方法搭建的仿真系统是可信的, 基于该系统构建作战需求仿真平台的想法是可行的。

**关键词:** 分布式仿真; 主时间控制; 平台指挥控制; 电子对抗

## Research on EW Distributed Simulation System Based on Simulink

Kang Xiangxi<sup>1</sup>, Du Zeng<sup>1</sup>, Zhang Yuntao<sup>1</sup>, Wang Lei<sup>2</sup>

(1. Southwestern China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China

2. Xi'an Aircraft Industry Group Company, Yanliang 710089, China)

**Abstract:** EW simulation is often applied in the aviation field. In order to obtain higher simulation confidence degree, distributed, efficient and compatible system is necessary that can deal with complex scene simulation. Through the research on Simulink, a new method is proposed that solves both problems of model compatibility in the HLA and the models' running efficiency. Method is that M-script instantiated model and dynamically adapted scenario, RTW compiled models to exe, besides MTC scheduled the time synchronization and simulation process of models. Finally, the scenario simulation of red and blue countermeasures further verified that the simulation system built by this is credible, and the idea of constructing the simulation platform of warfare requirement based on this system is feasible.

**Keywords:** distributed Simulation; main time control; platform command control; electronic war

## 0 引言

Simulink 是 Matlab 软件重要组件, 是交互式动态系统建模仿真和分析的图形环境<sup>[1]</sup>, 虽然 Simulink 是进行系统仿真开发的重要工具软件, 但是对于复杂的机载传感器系统, 仅依靠 Simulink 单一模型很难做到全系统基于场景的动态仿真, 为此可以通过组建分布式仿真系统解决大规模复杂系统的仿真问题。

如今大规模系统仿真方法有基于 HLA 开发的分布式仿真系统。虽然 HLA 分布式仿真系统具有良好的结构层次, 但对于底层模型要求较高, 很难实现 Matlab/Simulink 模型的调用, 即使通过 S 函数、Matlab 引擎的方法调用, 也很难保证模型运行效率。也有通过 C 语言开发专用模型仿真程序, 在仿真时序的调度下, 通过 UDP 或者中间件的形式相互通信, 虽然此种仿真系统运行效率较高, 但需要投入较大人力开发, 且联试费时费力, 需求变更时只能通过修改代码完成, 不如图形化的建模方式直观快捷。

因此基于 Simulink 搭建分布式仿真系统, 并通过 RTW 编译模型生成可执行文件即解决了 Matlab/Simulink 模型兼容问题又解决了仿真系统运行时效上的问题, 同时还能保留 Simulink 图形化建模的直观性、便捷性、易维护性等优点<sup>[2]</sup>。

## 1 系统组成

Simulink 分布式仿真系统如图 1 所示由传感器及环境分系统、环境部署分系统、数据记录及显示分系统 SLD、主控分系统构成。

传感器及环境分系统: 由飞机平台模型、射频环境模型、雷达, ESM, XX 链通信传感器模型构成; 其中, 飞机平台运动模型为六自由度模型, 射频环境模型提供空间衰减、杂波、多径模拟; 雷达模型模拟机载相控阵雷达工作流程及功能; ESM 模型完成信号分选、方向测量、频率测量、到达时间和脉冲宽度测量, 最终输出 PDW 及信号分选识别信息; XX 链通信模型完成长机和僚机间数据通信功能。

收稿日期: 2020-08-20; 修回日期: 2020-09-08。

作者简介: 康祥熙(1984-), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事机载设备自动测试及系统仿真方向的研究。

引用格式: 康祥熙, 杜增, 张云涛, 等. 基于 Simulink 的电子对抗分布式仿真系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 187-191, 198.

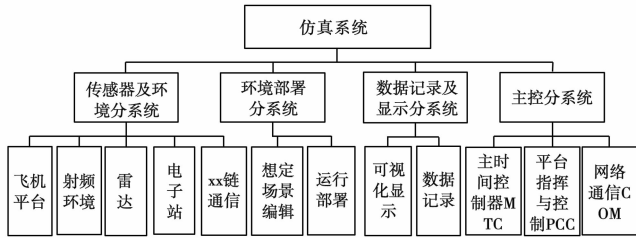


图 1 系统组成

环境部署分系统：由想定场景编辑、运行部署软件构成；其中，想定场景编辑进行战场态势环境的编辑，飞机航路规划，目标部署等；运行部署软件对系统中各个模型进行网络部署，运行资源部署。

数据记录及显示分系统 SLD：由可视化显示、数据记录软件构成；其中，可视化显示软件进行仿真可视化信息回放，包含二维、三维及传感器探测分析结果信息；数据记录软件记录系统仿真过程数据，支撑仿真可视化回放。

主控分系统：由主时间控制 MTC、平台指挥与控制 PCC、网络通信 COM 构成；其中，主时间控制 MTC 组件控制系统整体仿真时序，保证各个模型时间同步同步；平台指挥与控制 PCC 组件控制模型、平台运行；网络通信 COM 组件负责系统底层通信（TCP/IP 通信）。

## 2 系统架构

想定场景的多样性会带来场景规模可变，系统模型接口尺寸可变等特性。如何在即不修改模型，又不采用全集建模和固定接口等粗放方法前提下完成仿真，是系统架构构建的关键因素。系统通过引入平台模型—系统模型概念（类似 C++ 中类和对象），自动适配想定场景生成模型，不仅保证了仿真的正常运行，还实现了资源的零浪费。

系统模型间的通过 4 种类型数据流通道相互交互<sup>[3]</sup>。

- 1) 数据记录数据流通道：仿真过程中的系统运动数据、模型仿真数据；
- 2) 时间控制数据流通道：确定仿真时间，控制与同步各个模型间的仿真时序；
- 3) 数据请求及交互数据流通道：仿真模型间的交互数据；
- 4) 运动控制数据流通道：载体模型的运动轨迹、姿态等控制，传感器模型的工作参数控制，包括波束方位、俯仰、模式等。

系统底层通信方式采用 TCP/IP，TCP 为可靠的通信链路方式，客户端与服务器端通信链路建立时，需进行“三次握手”，对通信数据包进行校验，对丢包，错误包等情况进行重传，保证了通信可靠，数据完整。

其中，数据记录及显示模块中负责通信的部分为服务器端，与之交互的飞机平台、射频环境、雷达、ESM、机间数据链通信模型中负责通信的部分为客户端；主控时间模块中负责通信的部分为服务器端，与之交互的飞机平台、射频环境、雷达、ESM、机间数据链通信模型中负责通信

的部分为客户端。

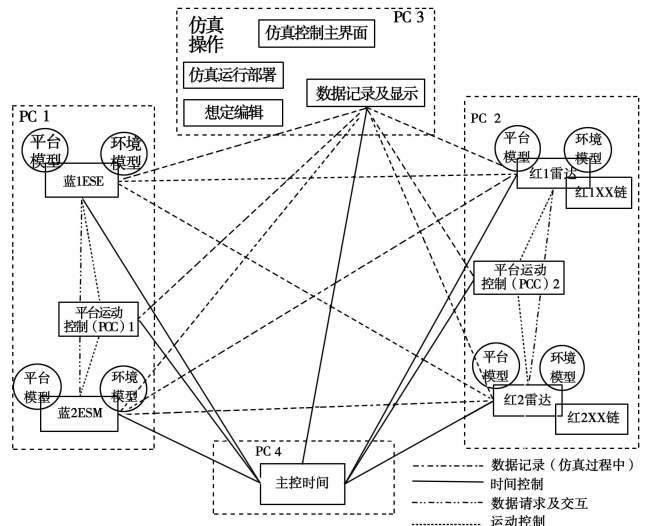


图 2 Simulink 分布式仿真系统架构

## 3 工作流程

添加 Simulink 模型到指定文件路径，并打开仿真主控界面完成仿真环境设置，包括模型添加、交互参数填写等。

选定要创建红蓝双方对抗想定场景地图区域，同步加载高程数据。对抗要素为搭载电子战模型的蓝方两架飞机平台对抗搭载雷达模型的红方两架飞机平台。依据仿真时间在系统模型对应 PCC 模块完成飞机平台的航迹、姿态规划，雷达模型的开机时间、工作模式、波束范围等的设置。

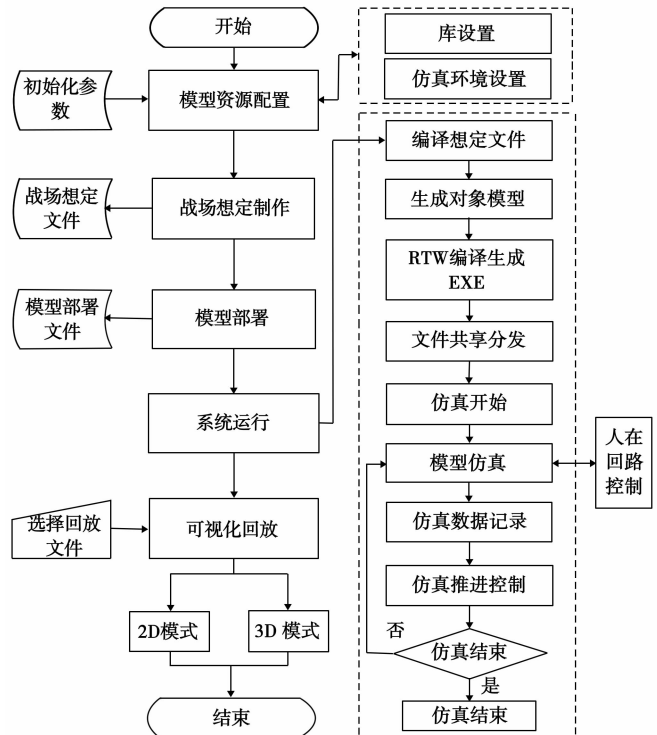


图 3 系统工作流程

依据创建分布仿真的计算机配置, 将蓝方平台及模型部署在 PC1 上, 将红方平台及模型部署在 PC2 上, 将主时间控制 MTC 部署在 PC4 上, 数据记录及显示 SLD 部署在 PC3。最后生成想定文件和模型部署文件 (.mat)。

编译想定文件, 生成对象模型, RTW 将上述对象模型编译生成可执行程序, 并将其复制到网络中的计算机。开始仿真运行和数据记录, 在仿真过程中可随时暂停、运行和停止。打开 SLD 模型加载仿真数据, 完成回放, 回放同时支持二维图形数据显示及 3D 场景显示。

## 4 关键技术

### 4.1 标准模型架构

复杂想定场景中有多传感器模型和平台模型, 模型间交联关系复杂, 数据传输量大。因此从仿真系统总体设计的角度考虑, 需对模型的建模方式、外部接口形式进行规范化约束, 以保证模型能够被迅速集成到仿真系统中。

通过开发标准模型模板, 可以实现快捷规范的模型嵌入、集成和测试。图 4 为模型架构的顶层视图。

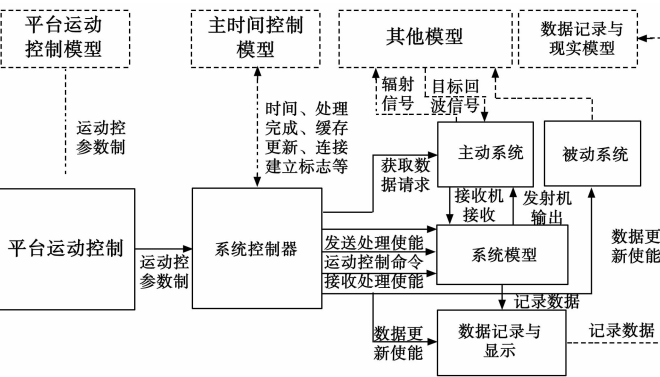


图 4 模型标准架构

虚线框为仿真系统中其他节点, 通过 TCP/IP 与模型通信。

1) 平台运动控制模型送运动控制参数给平台运动控制模块, 在参数控制下实现飞机平台预定航迹和雷达等工作方式切换;

2) 系统控制器模块在主时间控制模型的统一调度下, 完成本模型的时序、收发处理使能等控制;

3) 如果模型为传感器一般为主动系统, 如果为平台模型则设定为被动系统。被动系统一般只输出参数, 如飞机的航迹和姿态。主动系统则可以进行信号的辐射和目标回波信号的接收处理;

4) 系统模型模块即算法模型, 是完成运算处理的核心。如雷达的发射机模型、接收机模型均置于此;

5) 数据记录与显示模块将待记录的数据通过以太网传输至数据记录与现实模型, 由它汇总记录。

### 4.2 基于 Stateflow 的时间同步机制

时间同步机制的好坏是确保分布式仿真系统能够整齐、统一运行的关键。该系统采用 Stateflow 状态机控制时间的

运行。Stateflow 是有限状态机的图形化实现工具, 主要用于控制和检测逻辑关系的表示和状态切换<sup>[4]</sup>。系统通过设置输入/输出将 Stateflow 模块直接嵌入到 Simulink 模型, 从而实现连续系统与离散事件系统的混合。

仿真时间主控 (MTC) 同步整个仿真系统中所有模型的运行。MTC 针对每一个模型都内建服务器端与客户端, 客户端置于每一个模型的系统控制器内, 服务器端置于仿真时间主控内, 主控 MTC 通过接入仿真时钟, 在每个仿真步长, 通过 TCP/IP 实现模型间握手交互, 具体流程如下。

- 1) 在 MTC 服务器端与客户端建立通信连接;
- 2) 初始化模型;
- 3) 时间脉冲分发及同步;
- 4) 使能和等待模型处理完成;
- 5) 更新所有模型缓存;
- 6) 下一个仿真步长重复 3) 至 5) 步骤直到仿真结束。

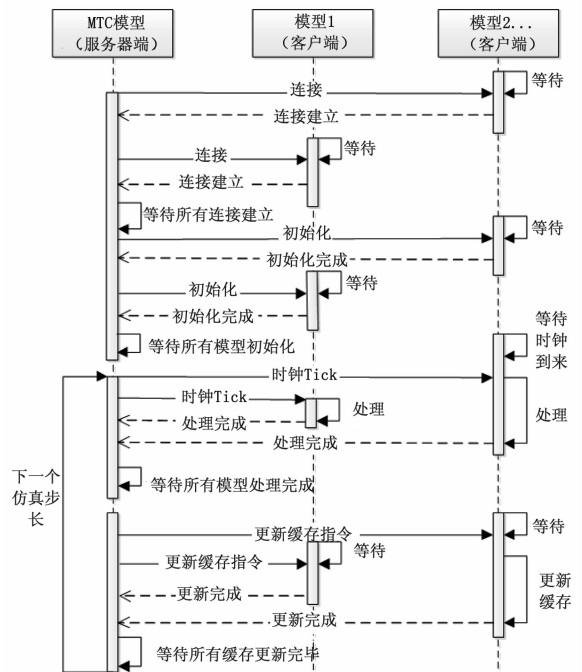


图 5 模型时间同步机制

## 5 系统建模

### 5.1 飞机平台模型

飞机平台模型主要由动力学和自动驾驶仪模型组成。其中动力学模型为六自由度 (DOF) 模型<sup>[5]</sup>, 包括沿着 X 轴 (东)、Y 轴 (北)、Z 轴 (天) 的直线运动, 绕着 X 轴 (俯仰)、Y 轴 (横滚)、Z 轴 (航向) 旋转的运动。

惯性坐标系下的飞机运动学方程如下所示:

$$\sum F = \frac{d}{dt}mv \quad (1)$$

$$\sum M = \frac{d}{dt}H \quad (2)$$

其中:  $F$  为飞机的受合力矢量,  $m$  为飞机的瞬时质量,  $v$  为飞机的合速度矢量,  $M$  为瞬时力矩矢量。

机体坐标系下的角速度 ( $p q r$ ) 和惯性坐标系下的欧拉角 ( $\bar{\varphi} \ \bar{\theta} \ \bar{\psi}$ ) 的相互关系<sup>[6]</sup>。

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\varphi} \\ \bar{\theta} \\ \bar{\psi} \end{bmatrix} \quad (3)$$

自动驾驶仪模型具备两个控制回路，即力控制和力矩控制，分别采用各自的比例积分控制器进行控制<sup>[7-8]</sup>。

$$G(s) = K_1 + \frac{K_2}{S} \quad (4)$$

飞机运动学模型和自动驾驶仪模型计算流程如图 6 所示。

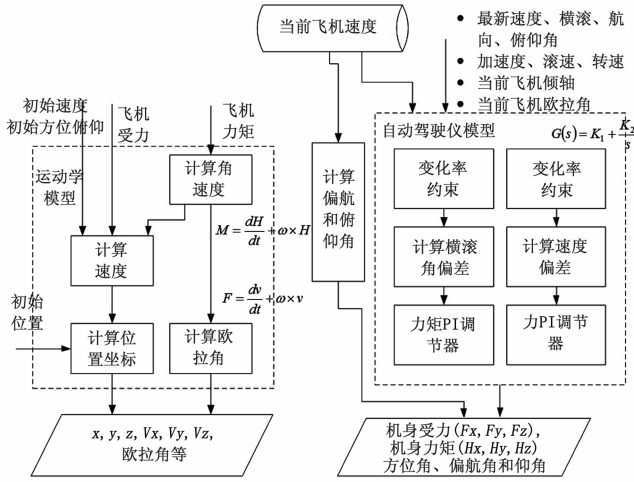


图 6 飞机运动模型计算流程

仿真运行获得的飞机平台航迹和姿态数据如图 7 所示。

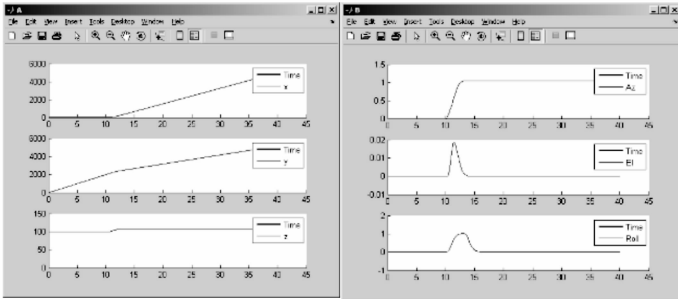


图 7 飞机平台航迹和姿态

### 5.2 雷达电子战模型

雷达电子战无源探测仿真模型典型组成包含三部分，即雷达模型、射频环境模型、无源探测模型<sup>[9]</sup>。

1) 雷达模型包含发射机模块、接收机模块、天线模块、波束调度模块、信号处理模块、滤波跟踪模块<sup>[10]</sup>。雷达发射机辐射信号参数可设置功率、采样率、信号中频、脉宽、脉冲个数、PRI 等。信号经天线完成增益、极化方式等参数模拟，并送至射频环境模型。雷达接收机收到射频环境的目标回波信号在完成信号处理和测距测向后，进行信号的滤波和航迹的预测，从而控制跟踪门，完成波束的控制，实现目标的跟踪。

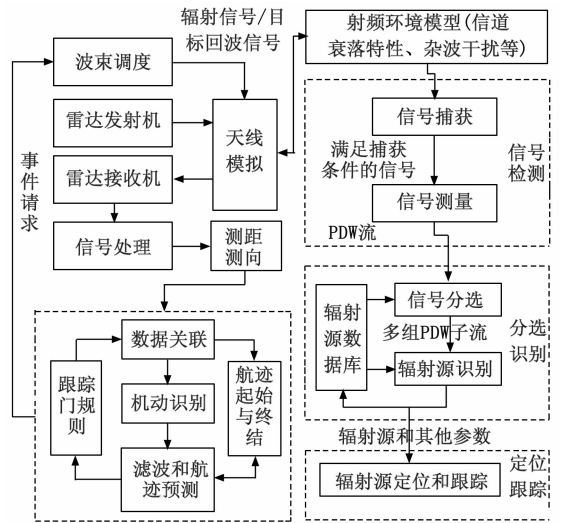


图 8 雷达电子战模型工作流程

2) 射频环境模型主要模拟信号的无线信道衰落特性包括功率衰减、时延、多普勒频移、相移、多径。模拟杂波和干扰的影响。RCS 模拟通过查表方式实现；

3) 无源探测模型主要包含信号检测、分选识别和定位跟踪三部分。首先 ESM 对接收信号进行检测，并对辐射源信号进行参数测量，形成脉冲描述字流即 PDW。然后信号处理模块根据已知的信号特征参数库，对输入的 PDW 信号流进行辐射源分选、参数估计、辐射源识别、威胁程度判别和作战态势判别等。最后完成辐射源的定位和跟踪。

辐射源发射信号一般可表示为：

$$s(t) = \tilde{s}(t) \cdot \exp(j2\pi f_0 t + \varphi) \quad (5)$$

式 (5) 中  $\tilde{s}(t)$  为信号的复包络， $f_0$  为信号的载频。无源侦察和雷达的区别在于，雷达是双程工作，而无源探测是单程工作，这就决定了时延和多普勒的计算有所不同。辐射源信号经过射频环境，ESM 截获到的回波信号可以表示为：

$$s(t) = Ks(t - t_r) = K\tilde{s}(t - t_r)\exp(j2\pi f_0(t - t_r) + \varphi) \quad (6)$$

其中： $t_r = \frac{1}{c}(R_0 - v_r t)$ ， $R_0$  为  $t = 0$  时的距离， $v_r$  为辐射源相对侦察机的径向运动速度。

### 6 仿真与分析

#### 6.1 场景规划

构建红蓝双方 2v2 飞机电子对抗场景。红方两架飞机从机场起飞，保持编队飞行并通过数据链进行态势共享，红 2 飞机开启雷达探测目标。红方飞机进入蓝方无源探测系统截获半径范围内，雷达信号被无源探测系统侦收测向。

#### 6.2 仿真测试

仿真测试步骤如下所示。

- 1) 根据想定场景设置辐射源个数，以及辐射源的信号参数，为无源探测系统提供波形输入；
- 2) 根据场景设置的辐射源与无源探测系统所在载机平

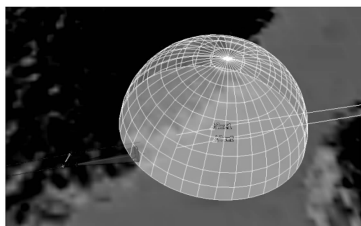


图 9 想定场景

台的运动轨迹信息, 实时解算出各辐射源相对无源探测系统的径向距离、径向速度、方位俯仰角(东北天坐标系);

3) 辐射源的时域交叠脉冲串输入时域测量模块, 从而获得脉冲时域参数, 验证本模块能有效截获辐射源脉冲信号, 并以较高精度测量得到脉冲的时域参数 TOA、PW、PA;

4) 频域参数测量模块输出时频曲线, 用于测量瞬时频率;

5) 依据不同来向的辐射源脉冲信号采用二维干涉仪测向获取目标方位、俯仰角;

6) TOA 序列输入雷达信号分选模块, 获得所有的 PRI 估计值以及对应的 PRI 序列;

7) 脉内参数测量模块以辐射源脉冲序列和时频曲线为输入, 获得脉内调制类型及调制类型相关参数。

### 6.3 结果与分析

辐射源时域重叠信号经时域测量模块处理得到的数据如图 10 所示。星号表征检测到的脉冲 TOA, 即脉冲上升沿。该点对应的纵坐标代表了该脉冲的 PA。可以看到, 模块检测到的 TOA 与真实的脉冲前沿非常接近。同时, 由于作用距离、不同辐射源发射天线在 ESM 载机平台方向的不同天线增益等影响, 进入时域参数测量模块的辐射源脉冲序列具有不同的 PA, 但同一辐射源内部的各脉冲 PA 起伏很小。

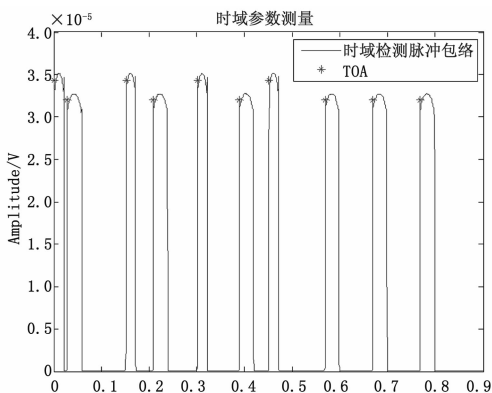


图 10 时域测量图

查看图 11 所示的时频曲线, 脉冲内部时频关系总体呈线性, 且频率的起始和终止值与初始设置一致。脉冲宽度外部全无信号和噪声, 是由于在时域参数测量模块得到各脉冲的 TOA、PW 和 PA 后, 系统附加了脉冲抽取模块, 仅保留了脉冲宽度内部的信号波形, 便于中间波形的查看。

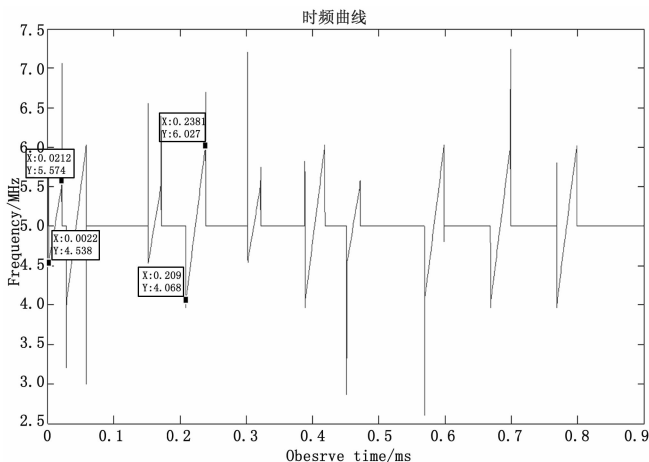


图 11 频域测量图

表 1 辐射源角度测量结果

	辐射源 1		辐射源 2	
	真实值	测量值均值	真实值	测量值均值
方位角	212.85	32.855	218.69	38.686
俯仰角	25.93	25.873	39.89	39.904

表 1 中给出了空域测量参数 DOA 测量值的统计, 方位测量值与真实值相差近似  $180^\circ$ , 将真实的方位角向下折叠到  $[0, 180^\circ]$ , 即以  $180^\circ$  进行求余操作得到模糊的角度值, 与测量值相差  $0.005^\circ$ , 且各脉冲的测量值相差极小。

综上所述, 基于此系统开展的电子对抗仿真测试, 仿真数据与真实值误差偏小, 仿真流程是合理的, 结果数据是可信的。另外, 仿真效率表征了仿真速度的快慢, 其可通过仿真时效比衡量。仿真时效比为真实耗费时间与仿真时间的比值。仿真实效比大于 1 表示仿真速度快, 小于表示仿真速度慢。实际仿真速度还跟仿真硬件配置有着较大关系, 此次仿真采用的计算机为高配置图形工作站, 因此仿真实效比达到了  $6.44^{[11-12]}$ 。

### 7 结束语

依照本文所述方法搭建的分布式仿真系统不仅能够利用 Simulink 工具箱信号处理模型库, 还对 m 文件模型有着良好的兼容性, 此外借助状态机进行仿真控制使得控制流程更清晰。对于 Simulink 模型运行效率问题也可以通过 RTW 解决。最后通过红蓝电子对抗想定场景仿真验证, 进一步证明该仿真系统搭建方法是可信的, 以此为基础构建新型航空电子作战需求仿真平台是可行的。

#### 参考文献:

[1] 王雷, 降华. SIMULINK 模块库在计算机控制系统仿真设计中的应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2016 (6): 216-217.  
 [2] 冯磊, 基于 RTW 的分布式实时仿真系统研究与实现 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.

(下转第 198 页)