

文章编号: 1671-7449(2026)04-0551-10

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(4): 551-560.

面向星载侦察载荷测试的场景模拟软件设计

毛雨玥, 夏伟杰*

(南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 随着电子侦察技术的快速发展, 传统测试手段难以满足辐射源信号动态仿真和系统闭环测试的需求。针对此, 设计了一种面向星载侦察载荷测试的场景模拟软件, 以实现从辐射源信号的发送到信道传输再到卫星平台接收的全过程仿真, 通过改变信号的时延、频率和相位, 模拟设定场景下载荷侦收的辐射源信号。软件分为参数设置、场景模拟、数据存取、卫星工具包和通信接口4个模块, 运用脉冲排序和消隐实现单基带源模拟多辐射源的功能, 并通过多线程分时生成和辐射源预处理方法解决了数据量过大、计算时间过长的问题。最后, 结合实际应用场景对软件进行测试和性能分析, 证明软件可以正确运行, 并大幅提升了计算速度, 生成600万个脉冲耗时5 min。

关键词: 电子侦察; 动态仿真; 多线程分时; 卫星工具包

中图分类号: TP311

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026056

引用格式: 毛雨玥, 夏伟杰. 面向星载侦察载荷测试的场景模拟软件设计[J]. 测试技术学报, 2026, 40(4): 551-560.

Mao Yuyue, Xia Weijie. Design of scenario simulation software for spaceborne reconnaissance payload testing [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(4): 551-560.

Design of Scenario Simulation Software for Spaceborne Reconnaissance Payload Testing

Mao Yuyue, Xia Weijie*

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: With the rapid development of electronic reconnaissance technology, traditional testing methods struggle to meet the demands of dynamic simulation of emitter signals and closed-loop system testing. To address this issue, a scenario simulation software is designed for the testing of spaceborne reconnaissance payloads. A full-process simulation is realized, covering the transmission of radiation source signals, channel propagation and reception by the satellite platform. By adjusting signal parameters such as time delay, frequency and phase, the radiation source signals intercepted by the payload in predefined scenarios are simulated. It is divided into 4 modules: parameter configuration, scenario simulation, data storage/retrieval, Satellite Tool Kit, and communication interface module. The simulation of multiple radiation sources using a single baseband source is achieved through techniques like pulse sorting and blanking. Additionally, methods such as time-shared multi-threaded generation and radiation source preprocessing are employed to address issues of excessive data volume and prolonged computation time. Finally, based

【收稿日期】2025-11-10

【修回日期】2026-03-11

【录用日期】2026-04-15

【基金项目】2025年度江苏省专项基金资助项目(1004-ZAG25006-32)

【作者简介】毛雨玥(2001—), 女, 硕士生, 主要从事雷达方向上位机软件研究。E-mail: maoyuyue2001@163.com。

*【通信作者】夏伟杰(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事毫米波雷达、图像声呐研究。E-mail: nuaaxwj@nuaa.edu.cn。

on real-world application scenarios, the software is tested and subjected to performance analysis, confirming that this software can be correctly operated, and demonstrating that there is a significant increase in computational speed and generating 6 million pulses requires 5 min.

Key words: electronic reconnaissance; dynamic simulation; multi-threaded time-sharing; satellite tool kit

0 引言

电子侦察卫星系统通过侦收覆盖区域内雷达、通信、飞行器遥测遥控等多种电磁辐射信号,获取目标信号参数、辐射特性、通信内涵、空间位置、敌方军事部署,以及作战意图等多种情报信息,具有“站得高、看得远、听得广、反应快、自身安”的优点,是现代信息战争中夺取“制信息权”的关键支柱^[1-2]。在信息化战争形态加速演变的背景下,战场电磁环境日趋复杂,信号体制多样、时变性强、非合作特征突出,对电子侦察系统的感知精度、响应速度与智能处理能力提出了极高要求。电子侦察卫星作为天基信息获取的重要平台,已成为支撑战略预警、战场态势感知、目标定位与识别、电子干扰效果评估等作战任务的核心装备,其效能直接关乎战场信息优势的获取与制信息权的掌控。然而,传统的地面测试方法因成本高昂、周期长且易受环境条件制约,已难以适应电子对抗装备快速迭代的发展需求,无法对其性能进行全面、真实和高效的评估与验证,进而成为制约高性能侦察载荷发展的技术瓶颈。因此,构建一种可重复、可配置、无风险的自动化测试平台,已成为当前电子侦察卫星系统研究中的核心课题^[3-4]。

雷达信号作为电子侦察中最常用的信号,其从发射到传播到接收的单模块研究已十分成熟。Yang等^[5]提出了一种基于组件化软件工程的可重构分布式雷达回波仿真软件设计方法,显著提升了雷达仿真任务的并发处理能力和跨平台适应性。李伟等^[6]设计了一种复杂电磁环境模拟系统,采用直接数字频率合成信号发生器与混合编程技术,实现了多种雷达与通信信号的稳定生成,满足复杂电磁环境测试需求。马玉娟等^[7]系统分析了低轨卫星通信中的大尺度与小尺度衰落特性,并介绍了基于统计方法的信道建模技术,为星地链路仿真提供了理论依据。徐凡^[8]搭建了半实物仿真环境模拟空间无线信道传播特性,并提出了一种硬件同步和软件触发相结合的同步方法对技术指标进行有效测试。宋潇等^[9]提出了基

于环形试验平台的全球导航卫星系统接收机载波相位观测评估方法,模拟复杂场景下的信号遮挡与多径效应,并验证了该方法的可行性与复现性。

而本文旨在设计并实现一套集成辐射源信号发射、信道传输和载荷接收的全流程仿真软件,并模拟星载载荷接收信号的各类目标特性,为电子侦察载荷测试提供一个完整、快速、可靠的测试平台。

1 软件设计方案

1.1 系统框架和需求分析

本软件面向星载侦察载荷测试,模拟辐射源基带信号经中频、射频调制后发射到空中,在空间传输时被卫星上载荷接收的全过程,如图1所示。为模拟复杂电磁环境,该场景模拟软件具备以下能力:首先,可生成每秒不少于10万个脉冲的高密度电磁环境;其次,能模拟脉间捷变、脉组捷变等频率变化信号,重频参差、抖动、滑变等时间变化信号和线性调频、相移键控、频移键控等脉内调制信号;此外,还能实现对辐射源位置、信号特性、信道特性、载荷位置四者动态变化所引发的信号特征变化的同步模拟。上述功能涉及基带源、中频射频调制设备、信道仿真设备等多种硬件设备,系统框架如图2所示。

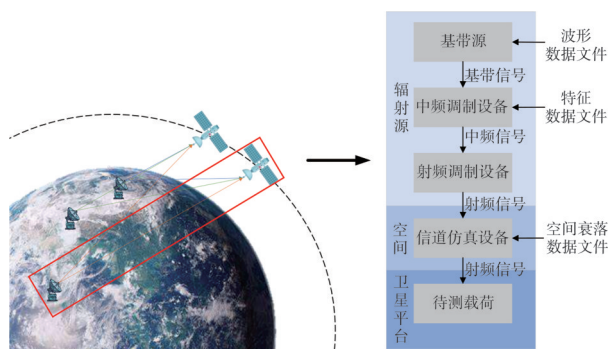


图1 星载侦察载荷场景示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spaceborne reconnaissance payload scenario

在功能方面,软件需要满足各类侦测体制、辐射源信号的参数设置和计算、卫星运动的模拟、空间衰落参数的计算和下发等;在用户界面方面,软件具备友好的用户界面和交互设计,操

作简单,符合日常使用习惯。

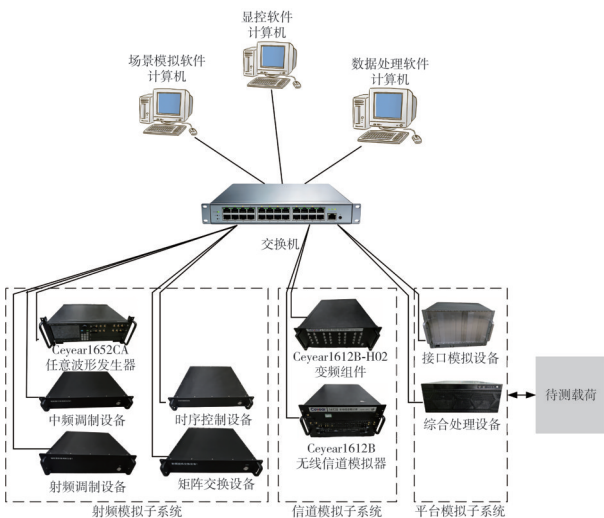


图 2 系统框架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of system framework

1.2 开发环境介绍

本软件采用 Windows 11 操作系统作为开发和运行环境,选择 Visual Studio 2017 作为主要的集成开发环境,使用 .NET Framework 4.6.1 作为用户界面开发框架,选择 C# 作为编程语言。

1.3 顶层设计

根据需求分析和功能设计,本软件内部的数据流程图如图 3 所示。

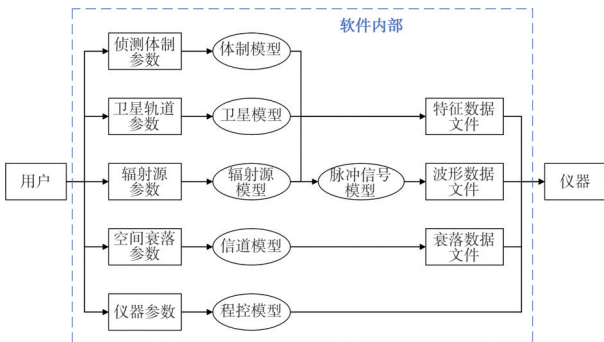


图 3 软件内部数据流向图

Fig. 3 Internal data flow of software

软件界面如图 4 所示。软件读取用户输入或配置文件导入的各类参数,构建体制模型、卫星模型、辐射源模型和信道模型模拟信号在动态环境下的变化,生成相应的波形数据文件、特征数据文件等,并根据指定报文或指令格式,将数据文件发送给仪器,获得最终的测试信号。具体实现流程如图 5 所示。



图 4 以辐射源参数设置为例的软件界面图

Fig. 4 Software interface diagram with emitter parameter settings as an example

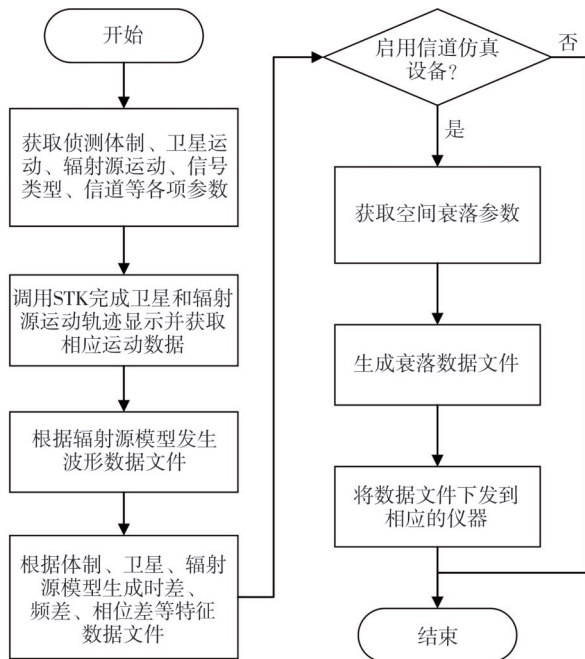


图 5 软件流程图

Fig. 5 Software flowchart

1.4 模块设计

为了优化开发效率、提高软件的可维护性,本软件采用自顶向下、模块化设计的思想,模块划分如图 6 所示。

各模块间存在数据交互。场景模拟模块借助卫星工具包(Satellite Tool Kit, STK)调用接口获取辐射源和载荷位置信息,通过参数设置模块获取的各类参数生成脉冲数据、特征数据、衰落数据等。无论是参数设置模块还是场景模拟模块,都需要通过数据存取模块进行数据的存储和读取。数据存取模块需要通过 STK 和通信接口模块给仪器下发文件。

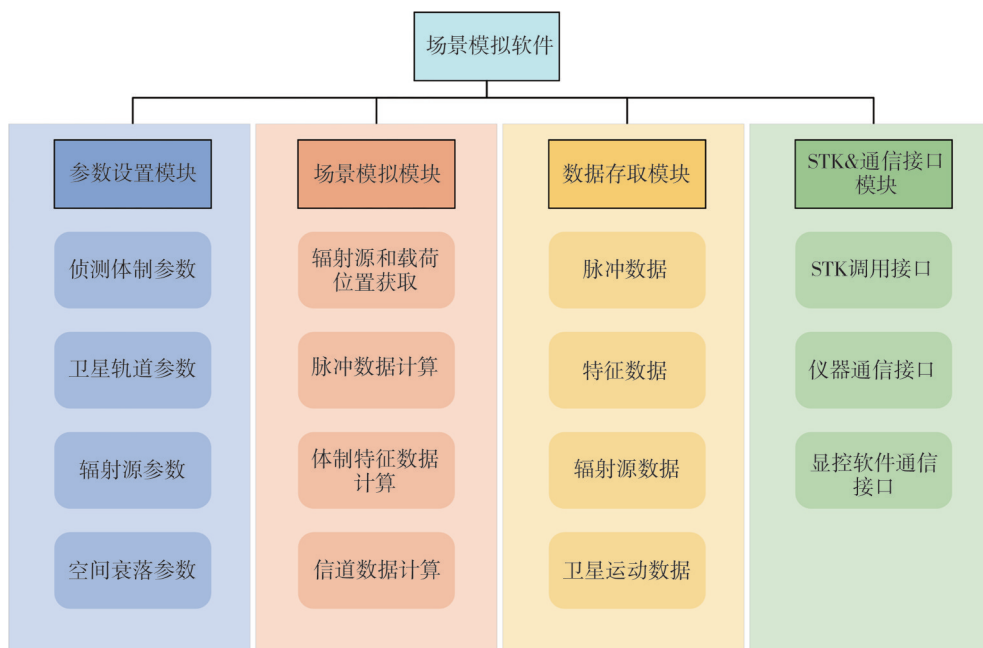


图6 软件模块划分示意图

Fig. 6 Software module diagram

2 软件实现

2.1 关键方法

本软件的特点是可实现从发射到传播再到接收的全过程动态仿真,包括但不限于辐射源的实时位置、信号的实时特征、信道的实时特性、载荷的实时位置等。为了保证复杂电磁环境的同时节约成本、提高设备利用率,一台基带源设备会同时仿真多个辐射源,即一个基带通道可能存在来自多个辐射源的不同信号。然而,同一时间一个基带通道只能产生一个信号脉冲,若多个辐射源的脉冲在时间上重叠将导致生成的冲突,需要对脉冲进行排序并消隐来解决这个问题。但该方法加剧了计算时间过长、数据量过大、软件内存不足等问题。因此,本文提出多线程分时生成和辐射源信号预处理的方法。

2.1.1 脉冲排序与消隐

为了提高仿真效率,先依次生成各个辐射源产生的所有脉冲,再将所有脉冲根据脉冲发射时间进行排序,且保证每一个脉冲都能被完整发射,即在该脉冲的脉宽时间内,通道内没有其他脉冲,否则认为是脉冲冲突。若出现脉冲冲突的情况,则保留发射时间在前的脉冲,发射时间在后的脉冲被消隐,如图7所示。

2.1.2 多线程分时生成

仿真运算虽然计算量大,但很多计算步骤是重复单一的。在软件运行内存有限的情况下,采用多线程分时生成的方法可以最大限度地提高计算速度,充分发挥处理器性能。该方法的核心是将总的仿真时间进行切割分段,每个线程只对对应的当前时间段内的脉冲信号进行处理和存储。

该方法有两个变量:分时时长和线程数量。分时过短,会增加文件操作次数;分时过长,则导致该时段内脉冲数量过多,排序算法所用空间超过软件负荷。线程数过少,分时生成的速度提升有限;线程数过多,可能会造成资源冲突而产生等待,尤其是在将生成结果写入同一文件时。而为了保证同一辐射源内在对应不同时间段的线程中不产生冲突和等待,需要对辐射源进行预处理。

2.1.3 辐射源信号预处理

预处理的方法是预先计算出各辐射源在各时间段内生成的脉冲数量和第一个脉冲的开始时间,如图8所示。该方法可以理解为把同一个辐射源在不同时间段发送的信号看作不同的辐射源发送的信号,只是这些辐射源恰好除了开始发送时间不同外其他特性均一样。

该方法的优点就是在多线程计算的时候可以避免线程间因时间顺序的不可知而产生等待。

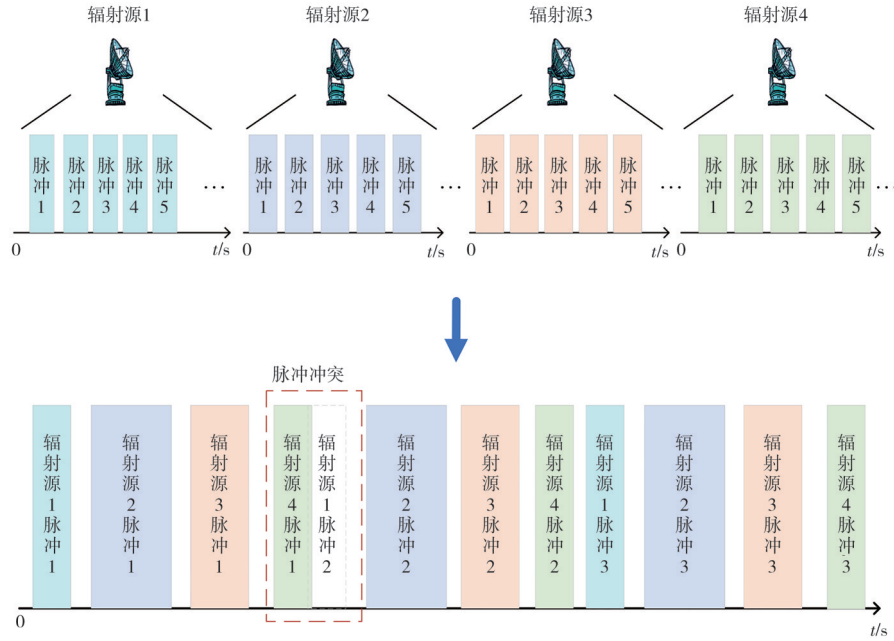


图 7 脉冲排序和消隐示意图

Fig. 7 Diagram of pulse sorting and blinding

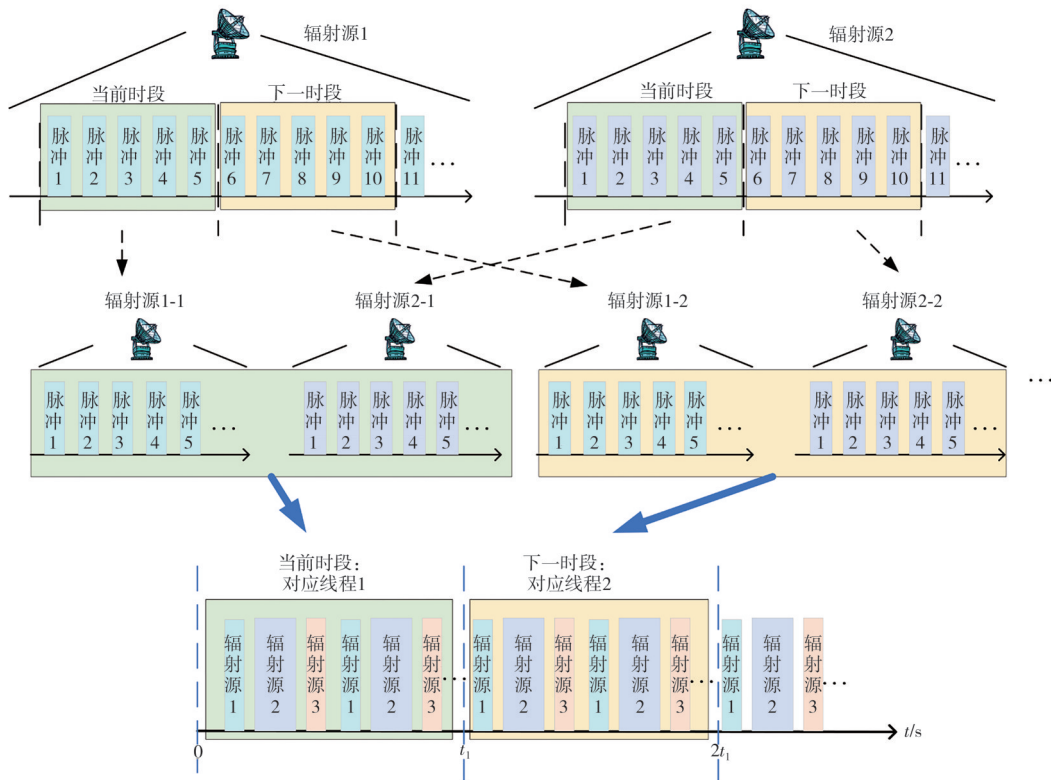


图 8 辐射源信号预处理和分时生成示意图

Fig. 8 Emitter signal preprocessing and time-sharing generation

2.2 核心模块

2.2.1 场景模拟模块

本软件的核心是场景模拟模块,主要负责根据参数设置模块传来的各类参数,结合体制模

型、辐射源模型、卫星模型、信道模型等,生成脉冲序列并计算动态过程中产生的各类特征数据。

需要计算的数据有动态辐射源的实时位置和速度,星载载荷的实时位置和速度,信号在传播过程中因侦测体制造成的时差、频差、相位差,以

及因信道环境产生的传播损耗和多普勒频移。

具体流程如图9所示。

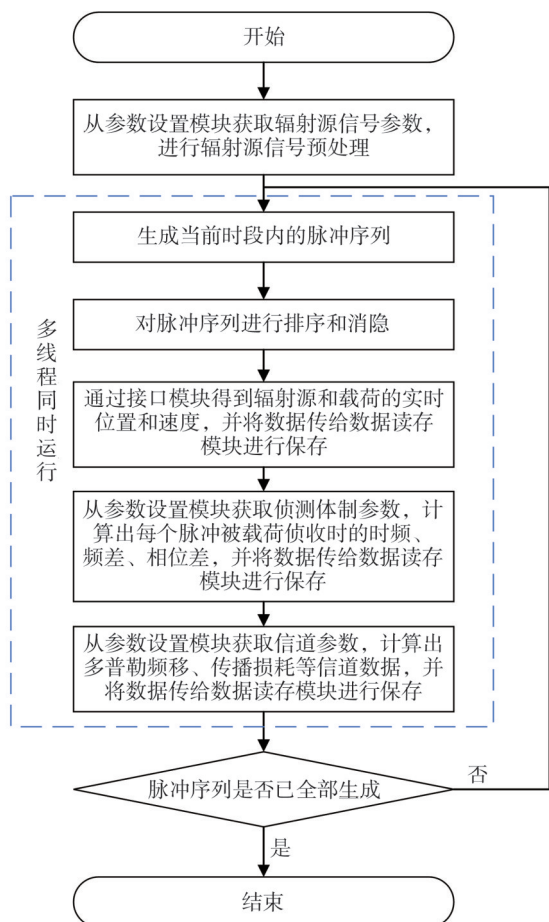


图9 计算子模块流程图

Fig. 9 Calculation submodule flowchart

2.2.2 STK和通信接口模块

STK和通信接口模块的主要功能分为借助STK软件实现场景可视化和卫星运动数据的计算, 以及通过发送数据文件控制硬件设备生成相应的信号。

1) STK调用接口

场景模拟软件运行过程需要借助STK软件提供的STKX组件来实现卫星、辐射源运动轨迹的可视化和数据获取。可以直接发送Connect命令字符串或选择STK提供的Application、Dataprovider、MapControl等类接口来实现对STKX组件的控制^[10]。

对于场景可视化, 通过添加组件中的AxAgUiAxVOCntrl控件和AxAgUi2DCntrl控件与STK分析引擎进行连接, 分别展示三维和二维地图, 实现播放卫星和辐射源的运动轨迹的功能。Application对象通过Connect语言向STK引擎发送控制命令, 获取场景仿真状态。STK引擎完成

场景仿真的核心计算后, 将当前仿真状态通知仿真显示对象^[11-12]。

对于数据获取, 具体方法为获取STK对象的Data Provider类, 并根据指定的运动数据路径、元素和采样参数返回Array类型的数组。如需要获取仿真对象ECEF坐标系下位置, 则设置路径为“artesian Position//Fixed”, 元素为“Time”、“X”、“Y”、“Z”, 采样参数为time1、time2、0.01, 返回的数据为分别存放采样点时刻、ECEF坐标下仿真对象 x 、 y 、 z 轴的坐标值的4个Array数组, 表示time1到time2时间内每隔0.01s进行采样得到的仿真对象ECEF坐标。

软件实现的具体流程如图10所示。

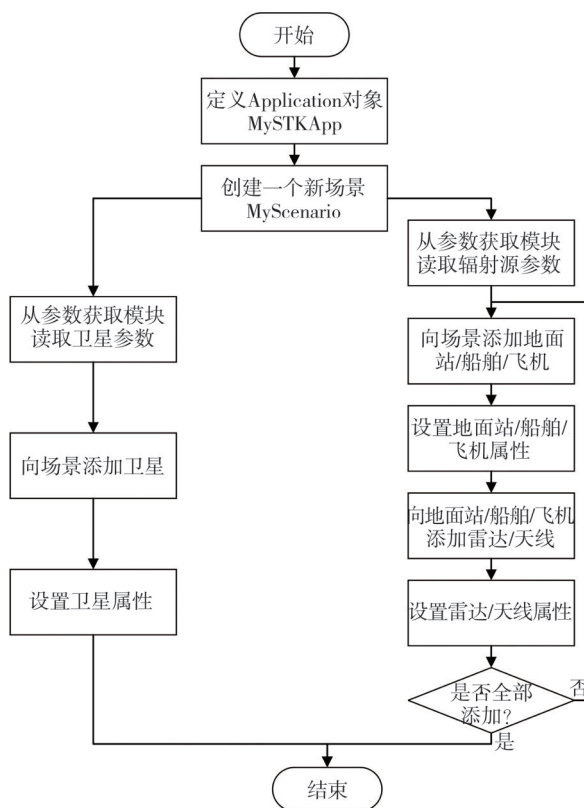


图10 场景可视化流程图

Fig. 10 Scenario visualization flowchart

2) 仪器通信接口和显控软件通信接口

场景模拟软件模拟完设定场景下载荷侦收的辐射源信号后, 需要给硬件设备下发数据文件, 使得硬件设备最终输出所需的测试信号。有两种下发文件的方式: 直接通信和通过显控软件进行下发。由于测试过程中使用了基带源、中射频调制、信道仿真设备等多种硬件设备, 其控制方式皆有所区别, 场景模拟软件提供了程控指令接口和文件下发接口与仪器进行通信。

以基带源设备为例, 使用的是Ceyear

1652CA 任意波形发生器。根据设备提供的文件格式,将需要生成的脉冲信息依次写入文件中。通过局域网接口将计算机与设备连接后,可以通过传输控制协议/网际协议与设备进行通信。按照设备给出的程控指令进行文件的下发和触发,即可控制设备按照文件内容生成指定的脉冲,如图 11 所示。

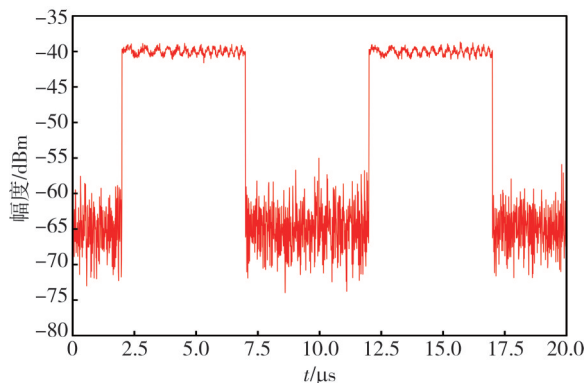


图 11 输出波形图示例

Fig. 11 Output waveform diagram example

但为了便于整个系统的拓展和同步性,在实际应用中,更常用的是通过与显控软件通信,将数据文件发送给显控软件,并由显控软件进行同步下发和触发。

3 实验与结果分析

设置侦测体制为单星干涉仪,阵列为直径 5 m、数量为 8 的均匀圆阵。

设置卫星的半长轴为 7 000 km,偏心率为 0.05,轨道倾角为 30° ,升交点赤经为 120° ,近地点幅角为 110° ,真近点角 0° ,场景时间为 2026 年 3 月 2 日上午 9:00:00。

设置辐射源 1 类型为舰载辐射源,起始位置为经度 -20° ,纬度 13° ,高度为 -0.02 km(以平均海平面为基准,以下所有高度描述相同,不再重复),速度为 0.015 km/s。信号起始时间为 0 ms,脉组数为 300,脉组内脉冲数为 20 000,调制类型为线性调频,重频类型为固定 $10\ \mu\text{s}$ 重频,脉宽类型为固定 $5\ \mu\text{s}$ 脉宽,中心频率为 1 GHz。

设置辐射源 2 类型为机载辐射源,起始位置为经度 -28° ,纬度 15° ,高度 9 km,速度为 5 km/s。信号起始时间为 0.3 ms,脉组数为 600 000,脉组内脉冲数为 10,调制类型为线性调频,重频类型为滑变重频,以 $5\ \mu\text{s}$ 为基准,向上滑变 $0.5\ \mu\text{s}$,脉宽类型为固定 $3\ \mu\text{s}$,中心频率为

1 GHz。

3.1 软件计算速度

分时生成和辐射源预处理可以在解决数据量大的问题的同时缩短软件计算时间。但具体计算速度与分时时段长短和线程数相关。

模拟 1 min 的信号(信号脉冲不少于 600 万个),线程数固定为 8,分时时段分别设置为 2、4、5、6、8 和 10 ms,得到结果如图 12 所示;分时时段固定为 5 ms。线程数分别为 2、4、8、16 和 32,得到结果如图 13 所示。

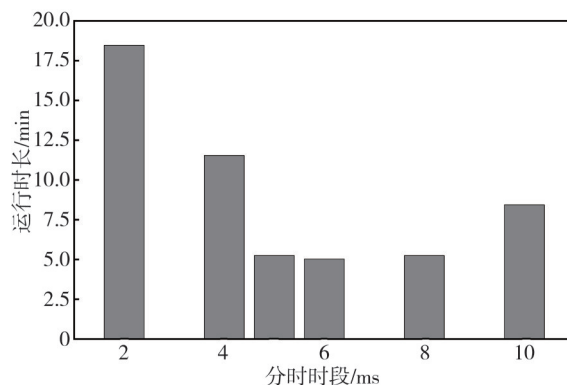


图 12 不同分时时段下运行时长结果

Fig. 12 Runtime results by time-of-use period

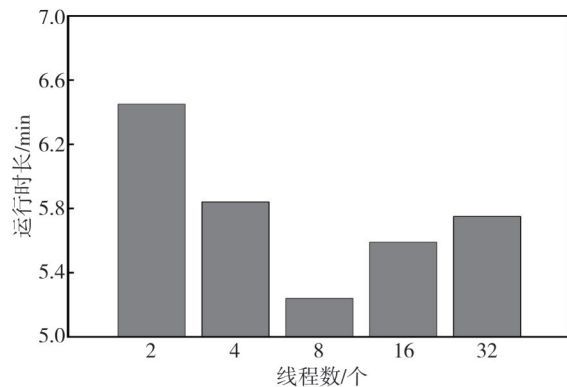


图 13 不同线程下运行时长结果

Fig. 13 Runtime results under different thread counts

通过图 12 和图 13 可以看出,分时时段在 5~8 ms 间计算速度较快,线程数在 8 个左右时效果最佳。无论是分时时段还是线程数都有一个最佳取值区间,不是越大越好也不是越小越好,这是因为分时时段过小会增加软件的 IO 操作次数,时段过大会导致排序耗时长;线程数过少,CPU 利用率低,线程数过多则容易在写入文件时造成线程间等待。当分时时段和线程个数设置合理时,模拟 600 万个脉冲仅耗时 5 min,可以实现复杂场景的快速仿真。

3.2 仿真结果

3.2.1 辐射源和卫星运动数据

卫星运动仿真结果和辐射源运动仿真结果分别如表1和表2所示。为了方便比对,采样间隔为1 s,截取前10个采样数据。

表1 地心地固坐标系下卫星运动数据

Tab. 1 Satellite motion data in the ECEF coordinate system

时间/s	X坐标/km	Y坐标/km	Z坐标/km
0	3 141.97	−5 934.02	3 560.26
1	3 148.29	−5 931.43	3 559.00
2	3 154.60	−5 928.83	3 557.74
3	3 160.91	−5 926.23	3 556.48
4	3 167.22	−5 923.62	3 555.21
5	3 173.52	−5 921.01	3 553.94
6	3 179.82	−5 918.39	3 552.67
7	3 186.12	−5 915.77	3 551.39
8	3 192.42	−5 913.15	3 550.11
9	3 198.71	−5 910.52	3 548.83
10	3 205.01	−5 907.89	3 547.54

由表1中数据可以看出,随着时间推移,卫星距离参考原点(地球质心)越来越远,说明卫星运动由近日点向远日点靠近。在运动过程中,按

照卫星运动规律,卫星速度越来越慢,但由于采样时间较短,该现象在数据中体现不够明显。由表2中数据可以看出,辐射源1和2的运动方向和运动速率均保持不变,为匀速直线运动。辐射源1为舰载辐射源,在短时间内海拔近乎不变,而辐射源2作为星载辐射源,在运动过程中,海拔高度可能有变化。在预设场景下,搭载辐射源2的飞行器是向上飞的,其海拔逐渐增高。

3.2.2 信号脉冲数据

辐射源1、2生成的脉冲和经排序和消隐后的脉冲如表3所示,辐射源1和2有部分脉冲存在时间重叠的现象,但经排序和消隐后,部分重叠的脉冲被消隐,保留的脉冲均不冲突。如辐射源1的第5个脉冲与辐射源2的第4个脉冲产生了冲突现象,经数据处理后,辐射源1的第5个脉冲被消隐,只保留了辐射源2的第4个脉冲。最终得到的脉冲数量小于未处理前辐射源1和2的脉冲数量之和,这不仅保证了仿真环境的复杂度,还能提高设备利用率、降低成本。

表2 辐射源运动数据

Tab. 2 Emitter motion data

时间/s	辐射源1			辐射源2		
	纬度/°	经度/°	海拔/km	纬度/°	经度/°	海拔/km
0	13.000 000	−20.000 000	−0.020 120	15.000 000	−28.000 000	8.987 170
1	13.000 003	−20.000 138	−0.020 120	15.038 957	−28.023 315	9.220 781
2	13.000 006	−20.000 276	−0.020 120	15.077 910	−28.046 637	9.454 386
3	13.000 009	−20.000 415	−0.020 120	15.116 860	−28.069 967	9.687 987
4	13.000 012	−20.000 553	−0.020 119	15.155 807	−28.093 306	9.921 583
5	13.000 014	−20.000 691	−0.020 119	15.194 750	−28.116 652	10.155 174
6	13.000 017	−20.000 829	−0.020 119	15.233 689	−28.140 006	10.388 760
7	13.000 020	−20.000 968	−0.020 119	15.272 633	−28.163 373	10.622 391
8	13.000 023	−20.001 106	−0.020 119	15.311 562	−28.186 741	10.855 955
9	13.000 026	−20.001 244	−0.020 119	15.350 488	−28.210 118	11.089 513
10	13.000 029	−20.001 382	−0.020 119	15.389 411	−28.233 502	11.323 067

表3 排序消隐后的辐射源脉冲数据

Tab. 3 Sorted and blanked emitter pulse data

序号	辐射源1脉冲		序号	辐射源2脉冲		序号	排序消隐后的脉冲	
	脉冲时间/μs	脉冲宽度/μs		脉冲时间/μs	脉冲宽度/μs		脉冲时间/μs	脉冲宽度/μs
1	0	3	1	3	5	1	0	3
2	10	3	2	13	5	2	3	5
3	20	3	3	24	5	3	10	3
4	30	3	4	36	5	4	13	5
5	40	3	5	49	5	5	20	3
6	50	3	6	63	5	6	24	5
7	60	3	7	78	5	7	30	3
8	70	3	8	94	5	8	36	5
9	80	3	9	111	5	9	49	5
10	90	3	10	129	5	10	60	3
11	100	3	11	148	5	11	63	5

3.2.3 体制特征数据和信道数据

由于不同阵元间间距远远小于辐射源和卫星的距离,所以不同阵元的频移和传播损耗均近似相等,只有相位在变化^[13-15]。图 14 是单星干涉仪 8 个阵元接收到的信号相较于原点接收到辐射源信号的相位差的绝对值。为了方便比较,采样间隔设置为 10 ms。从图中可以看出,阵元 1 和 5、阵元 2 和 6、阵元 3 和

7、阵元 4 和 8 的线条完全重合(数据完全相同且变化规律一致),即在均匀圆阵中中心对称的两个阵元接收到的信号相位绝对值保持一致。而对于同一阵元,随着时间变化,由于辐射源位置和卫星位置发生了改变,信号来波方向也随之变化,从而相位差($\Delta\varphi$)也在变化。但因为辐射源与卫星之间距离较远,所以位置变化带来的影响较小,相位差的变化也十分细微。

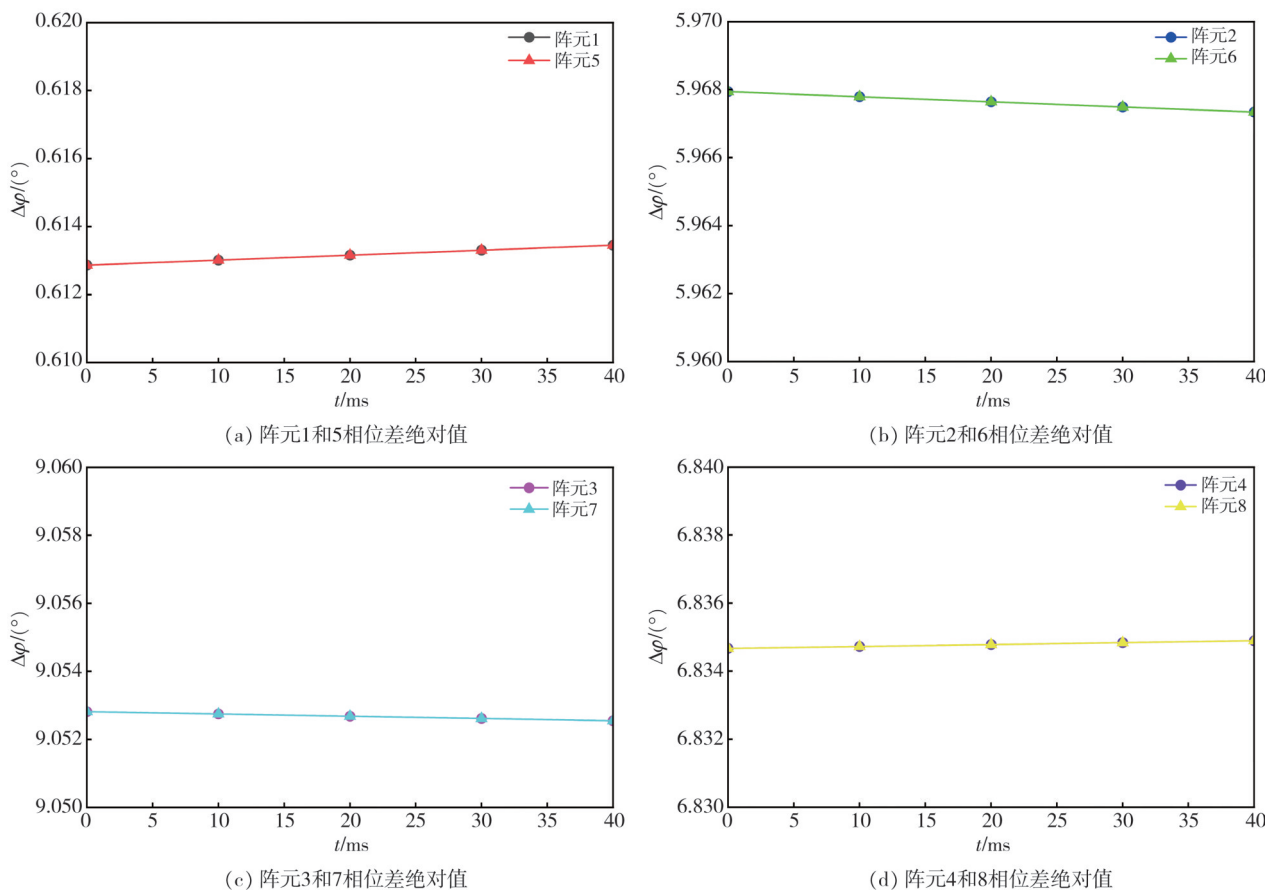


图 14 不同阵元相位差绝对值随时长变化结果

Fig. 14 Absolute phase difference variation over time for different array elements

4 结 论

面向星载侦察载荷测试的场景模拟软件通过脉冲排序和消隐技术,实现通过单个基带源设备模拟包含多个辐射源的复杂电磁环境,为载荷的研制、定标与效能评估提供关键的技术支撑,降低试验成本;通过多线程分时生成和辐射源信号预处理思想,大幅提高了星载侦察载荷场景模拟的软件仿真速度。经过多次测试,得出最佳计算速度:仅需要 5 min 就可以模拟 600 万个脉冲,有效缩短了测试周期。但本文设计软件还存在不足:当前生成的数据文件格式仅支持指定型号的

硬件设备,后续可推广到更普遍的通用设备;目前支持信道环境较简单。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 王勤果, 吴技. 电子侦察卫星: 应用与发展[J]. 电讯技术, 2025, 65(4): 642-652.
Wang Qingguo, Wu Ji. Electronic reconnaissance satellites: application and development [J]. Telecommunication Engineering, 2025, 65(4): 642-652. (in Chinese)

- [2] 王晓海. 航天电子对抗技术研究进展[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(4): 60-64.
Wang Xiaohai. Research progress of aerospace electronic countermeasures technology[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2017, 33(4): 60-64. (in Chinese)
- [3] Murrill J. Electronic countermeasures (ECM) technique measurements and automation methods [C]//2012 IEEE AUTOTESTCON Proceedings, 2012: 88-92.
- [4] 刘磊磊, 张鹏飞, 马振华, 等. 飞机进近阶段的接收机自主完好性监测研究综述[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 605-615.
Liu leilei, Zhang Pengfei, Ma Zhenghua, et al. Review of receiver autonomous integrity monitoring in aircraft approach phase[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2023, 44(6): 605-615. (in Chinese)
- [5] Yang J, Chen X, Chang S, et al. A reconfigurable distributed radar echo simulation software design method [C]//2024 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP), 2025: 1-5.
- [6] 李伟, 沈佳琪, 杜宇人. 一种复杂电磁环境模拟系统的设计[J]. 信息技术, 2024(10): 56-61.
Li Wei, Shen Jiaqi, Du Yuren. Design of a complex electromagnetic environment simulation system [J]. Information Technology, 2024 (10): 56-61. (in Chinese)
- [7] 马玉娟, 李侠宇. 低轨卫星通信星地间无线信道传播特性研究[J]. 信息通信技术, 2024, 18(5): 12-18.
Ma Yujuan, Li Xiayu. Research on channel modeling for LEO satellite communications[J]. Information and Communications Technologies, 2024, 18(5): 12-18. (in Chinese)
- [8] 徐凡. 双星时差频差定位地面测试中的同步问题研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(6): 124-127.
Xu Fan. Synchronization technology in ground test for dual-satellite geolocation system using TDOA and FDOA [J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(6): 124-127. (in Chinese)
- [9] 宋潇, 洪卫, 何浩鹏, 等. 模拟复杂场景下GNSS接收机载波相位观测评估[J]. 北京测绘, 2025, 39(9): 1399-1404.
Song Xiao, Hong Wei, He Haopeng, et al. Evaluation of GNSS receiver carrier phase observation in simulated complex scenarios [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2025, 39(9): 1399-1404. (in Chinese)
- [10] 苟杰. 基于STK的卫星轨道和通信链路仿真系统设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023: 44.
Gou Jie. Design and implementation of satellite orbit and communication link simulation system based on STK [D]. Xi'an: Xidian University, 2023: 44. (in Chinese)
- [11] 杨建国, 张建军, 吕琳. VC集成STK实现可视化场景仿真[J]. 遥测遥控, 2012, 33(4): 50-54.
Yang Jianguo, Zhang Jianjun, Lü Lin. VC integrated with STK performing visualized scenario animation [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2012, 33(4): 50-54. (in Chinese)
- [12] Zhang J, Yang G, Xu Q, et al. Application in radar simulation of STK/connect module [C]//2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, 2009: 274-276.
- [13] 刘振, 陈鑫, 苏晓龙, 等. 基于均匀圆阵的近场源定位技术研究进展[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 734-745.
Liu Zhen, Chen Xin, Su Xiaolong, et al. Progress in near-field source localization via uniform circular array [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2): 734-745. (in Chinese)
- [14] Alsayegh H, Almuhalhi M. Utilization of uniform circular array for estimating RF source location in real-time [C]//2024 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), 2024: 1-6.
- [15] Song Y. A novel method for the satellite location using interferometer and time difference system [C]//2023 8th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP), 2023: 482-486.