

卫星导航抗干扰自动化测试系统设计与实现

郑楷

成都天奥信息科技有限公司, 四川 成都 610000

DOI:10.61369/ME.2026070031

摘 要 : 针对卫星导航抗干扰设备传统人工测试标准化差、多空域干扰场景难以复现、动态性能检测效率低等问题,设计一套集射频激励、空域辐射、姿态模拟、自动化测控于一体的室外抗干扰自动测试系统。系统采用以太网 + 串口混合总线架构,集成多通道射频信号源、大功率射频功放、宽频圆极化发射阵列、精密电动转台与长行程动态滑轨硬件平台;配套四层分层式自动化测控软件,支持可视化测试用例编辑、多方位干扰自动遍历、定位测速指标实时解算、测试数据归档与定制报表输出。完整完成系统总体架构、硬件选型、室外机械工装、软件架构、环境适应性与可靠性工程设计。联调试验结果表明,系统故障检测率 $\geq 92\%$,完整测试时长由人工 4h 缩短至 40min,测试复现误差低于 3%,可满足导航抗干扰装备研发、出厂检验、故障复现全场景标准化测试需求。

关 键 词 : 卫星导航; 抗干扰测试; 自动测试系统; 电动转台; 射频功放; 评估软件

Design and Implementation of Satellite Navigation Anti-interference Automatic Testing System

Zheng Kai

Chengdu Tian'ao Information Technology Co., Ltd. Chengdu, Sichuan 610000

Abstract : To address the issues of poor standardization in traditional manual testing of satellite navigation anti-interference equipment, the difficulty in reproducing multi-domain interference scenarios, and the low efficiency of dynamic performance detection, a set of outdoor anti-interference automatic testing system integrating RF excitation, spatial radiation, attitude simulation, and automatic measurement and control has been designed. The system adopts an Ethernet + serial port hybrid bus architecture, integrating multi-channel RF signal sources, high-power RF amplifiers, wide-band circularly polarized transmitting arrays, precise electric turntables, and long-stroke dynamic slide rails hardware platforms; it is equipped with a four-layer hierarchical automated measurement and control software, supporting visual test case editing, automatic traversal of multi-directional interference, real-time calculation of positioning and speed indicators, and archiving of test data and customized report output. The overall system architecture, hardware selection, outdoor mechanical fixtures, software architecture, environmental adaptability and reliability engineering design have been completed. The joint debugging test results show that the system's fault detection rate is $\geq 92\%$, the complete test duration is reduced from 4 hours by manual operation to 40 minutes, and the test reproducibility error is less than 3%, which can meet the standardized testing requirements for the development, factory inspection, and fault reproduction of navigation anti-interference equipment in all scenarios.

Keywords : satellite navigation; anti-interference test; automatic test system; electric turntable; radio frequency amplifier; evaluation software

引言

(一) 研究背景

卫星导航接收机抗干扰性能是装备核心考核指标。传统分立仪器人工测试模式存在明显短板:人工架设天线、手动调节被测件姿态,多方位、多角度干扰场景复现一致性差;缺少标准化高动态运动模拟工装,动态抗干扰指标无法量化;测试流程无统一管控,人工记录、精度解算、报告编制工作量大,测试周期冗长。

现有商用导航测试设备以室内暗室射频仿真设备为主,无法模拟室外开放式远场辐射、载体长距离连续运动场景;国内现有装置多

为单通道室内平台，户外防护不足、运动模拟能力缺失、软件开放性差，无法支撑批量复合干扰测试。本文研制室外 KGR-CS 型一体化抗干扰自动测试系统。

（二）国内外研究现状

国外 Keysight、Spirent 等厂商的导航仿真设备精度高，但局限于室内封闭环境，无法模拟室外空域辐射场景，设备成本高、扩展能力弱。国内现有相关测试装置多为单通道小型室内平台，存在室外环境防护不足、运动模拟能力缺失、软件开放性差等问题，无法支撑多维度复合干扰批量测试。

本文提出软硬件一体化集成方案，搭建室外硬件平台并配套全流程自动化软件，实现抗干扰标准化全自动检测。

（三）论文主要工作

- 1) 梳理系统功能、射频 / 运动 / 环境 / 可靠性全套技术需求，划分系统五大硬件模块；
- 2) 完成总线架构、楼顶场地布局、射频链路整体方案设计；
- 3) 完成仪器、工控、射频功放、运动工装全硬件选型与结构、线缆工艺设计；
- 4) 分层设计自动化测控软件，实现设备驱动、流程编辑、数据解析、报表全功能；
- 5) 完成可靠性、维修性、环境防护、验收方案设计，开展整机试验验证。

一、系统总体设计

（一）系统需求

- 1) 多通道干扰激励与空域辐射：6 路独立射频干扰信号，经功率放大后通过 8 组环形分布式天线实现全空域干扰覆盖；
- 2) 姿态与高动态模拟：电动转台实现被测件 360° 连续旋转，双 20m 滑轨模拟载体直线高速运动；
- 3) 全设备远程程控：工控机通过网口、串口统一管控信号源、频谱仪、电源、功放、转台、滑轨；
- 4) 自动化数据处理：实时解算定位、测速误差，自动标记不合格项，支持原始数据存储与回放；
- 5) 可定制测试流程：可视化拖拽编辑测试用例，自动遍历单 / 三 / 六 / 八方位干扰场景，一键生成标准化测试报告。

（二）设计原则

- 1) 通用性：软硬件预留扩展接口，仪器具备互换能力，兼容多型号导航抗干扰设备；
- 2) 稳定性：总线低延迟传输，电路多级保护，元器件降额设计，支持 72h 不间断连续测试；
- 3) 易用可扩展：软件图形化无代码编辑，模块化架构，支持用户二次开发；
- 4) 经济性：成熟商用仪器搭配定制机械工装，平衡研制成本与测试性能。

（三）系统整体组成

系统由仪器仪表、通用设备、定制机械工装、集成附件、自动测试软件 5 部分构成。室内机柜集成射频信号源、频谱仪、程控电源、工控机、交换机；室外测试区以转台为中心环形布置发射天线、配套 2 套独立滑轨。

工作流程：工控机运行测控软件下发指令控制信号源输出干扰信号；经功放放大由天线向空间辐射多方位干扰。被测导航设备接收混合信号后回传观测数据；软件实时计算定位 / 测速误差并与指标阈值对比。频谱仪实时监测射频链路功率、杂散、谐波，实现发

射链路故障预警，测试完成后自动生成 Word 格式检测报表。

（四）场地布局设计

系统分为室内调试间、楼顶露天测试区两部分。8 套发射天线呈 45° 环形布置，天线与被测件水平间距 4m，俯仰调节范围 - 10° ~ + 20° ；两套动态滑轨独立布设，用于高动态模拟，户外线缆统一敷设减速走线槽，完成防雨、防踩踏防护设计。

二、硬件系统详细设计

（一）射频仪器与通用控制硬件

- 1) 射频信号源：安捷伦 E4438C，工作频段 250kHz~3GHz；
- 2) 频谱分析仪：N9030A，实时监测空域射频信号，校验功放、天线输出功率与杂散指标；
- 3) 程控直流电源：DH1790-1，输出 0~36V/15A，适配被测设备 5V/10A、28V/5A 供电需求。
- 4) 工控机，配备双千兆网口、多路 RS232/422 复用串口混合总线通信。
- 5) 六通道功放，工作频段 1000~2500MHz，饱和输出功率 ≥ 50dBm，集成多重保护，杂散抑制 ≥ 65dBc。
- 6) HHS103 螺旋柱状天线，1~3GHz 宽频右旋圆极化，增益 6~8dBic，N 型防水射频接口。

（二）定制机械工装设计

- 1) 选用 Y200RA100 蜗轮蜗杆旋转台，额定承重 45kg，重复定位精度 0.005° ；配套 41 路集成电滑环，解决旋转过程射频、供电、通信线缆缠绕问题。
- 2) 天线配置 304 不锈钢立柱 + 蜗轮蜗杆角度滑台，俯仰调节 ± 20° 。
- 3) 轨道总长 22m，有效运动行程 20m，最大负载 15kg，最高运动速度 2m/s。铝合金型材，配套防雨防护罩，结构应力仿真验证安全裕度充足。
- 4) 37U 工业机柜尺寸，内置 8 口 PDU 电源排插；室外转

台、滑轨配套亚克力防雨罩。结构件采用阳极氧化、静电喷塑双重防腐，不同金属接触面电化电位差，满足防霉、防盐雾、耐日晒要求。

5) 射频线缆选用 YSF-500 低损耗同轴电缆，系统以 LAN 为主、串口为辅混合控制总线，预留扩展接口支持新增设备接入。

三、自动化测控软件设计

(一) 软件分层架构

软件采用四层松耦合分层架构，配套双人机交互界面适配两类使用场景：流程测试主界面、研发分析主界面。



图 1 自动测试软件测试主界面

1. 四层分层架构

- 1) 物理设备层：信号源、功放、转台、滑轨、接收机等全部硬件实体；
- 2) 设备驱动层：统一 VISA/TCP/ 串口驱动库，标准化读写接口，支持仪器型号快速替换；
- 3) 自动测试应用层：流程编辑、设备控制面板、自动执行引擎、异常告警核心业务逻辑；
- 4) 数据存储分析层：SQLite 数据库读写、定位测速解算、曲线绘图、自定义报表渲染。

2. 界面分区设计

- 1) 流程测试界面：顶部测试操作按钮栏、中部实时日志视图、底部状态进度栏，面向批量出厂测试人员，无复杂参数配置；
- 2) 分析测试界面：顶部菜单栏、快捷工具栏、中间多视图显示窗口、底部系统状态栏，支持单设备独立控制、测试流程自定义编辑，适配研发故障排查。

(二) 核心功能模块

自动测试软件整体功能模块如表 1 所示：

表 1 自动测试软件功能模块表

序号	项目		功能描述
1	测试流程	测试场景创建	从测试流程集选取子集，并配置参数
2		测试场景编辑（修改）	从测试流程集选取子集，并配置参数
3		测试场景序列	管理当前需要进行测试的场景列表，一次测试包含多个场景的测试流程，每个测试流程可重复执行 1~n 次。
4		执行测试	开始测试
5		暂停测试	暂停本次测试
6		停止测试	停止本次测试
7		中止测试	当某一场景测试失败或测试结果不符合预期时，软件能够判断并中止后续场景的测试
8		测试（子）流程开发	基于设备 / 仪器驱动，编写抗干扰测试中各个设备 / 仪器所需提供的功能（子流程），并约定各个功能的参数和参数配置界面。
9	设备控制	设备管理	在界面中根据配置文件加载设备清单，只提供设备基础通信方式 / 地址配置，设备增删通过配置文件维护。
10		仪器自检	将系统内包含的仪器自检指令维护进软件数据库，并从仪器回读自检信息显示在自动测试软件界面上。从而支持查询仪器自检信息。
11		电源管理	负责提供电源手动控制控件、程控参数设置、状态回读等交互界面。
12		转台控制	负责提供电动转台手动控制控件、程控参数设置、状态回读等交互界面。
13		干扰源控制	干扰源控制负责提供干扰源手动控制控件、程控参数设置、状态回读等交互界面；交互界面需要更具设备配置文件中干扰源数量和匹配功放端口加载。 备注：每台功放为双通道，故物理层面每两个干扰源（信号发生器）共用一台功放设备，每台干扰源独享一路信号放大通道。
14	数据回放	数据回放	对存储在本地的数据文件，能够进行数据回放。
15	报表输出	数据筛选	可以根据被测件型号、测试人员、测试时间要素等组合条件，从数据库中查询对应的测试数据。
16		检测报表	根据产品型号条件，检测系统中的报表配置文件和模板文件是否存在。
17		生成报表	将查询到的测试数据，按照报表配置文件的要求自动地填写到模板文件中，从而生成一系列对应的测试报表。
18		报表组合	根据产品型号，将多份不同测试过程的报表组合成一份完整的测试报表。

（三）软件运行环境

操作系统兼容 Windows7/10（32/64 位），底层依赖 VISA 仪器驱动，内置 SQLite 轻量化数据库服务，无需独立数据库服务，部署简单便捷。硬件交互依托以太网控制射频仪器、串口控制转台、滑轨与测试接收机。

四、可靠性、维修性与环境设计

严格遵循产品设计要求开展可靠性设计；元器件执行降额准则，大功率功放配备强制风冷；整机成熟期 MTBF $\geq 20000\text{h}$ ，硬件集成过流、过压、过温、短路多级保护电路。

（一）维修性设计

整机模块化分区布局，仪器、功放、工装独立可拆卸；标准化通用接口，关键设备支持直接互换；MTTR $\leq 0.5\text{h}$ ；配套完整计量标校规范，故障代码软件可视化显示，降低故障排查难度。

（二）环境适应性设计

室内设备工作区间 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，室外工装 $-10\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 95\%$ 无凝露；全部紧固件防松加固，设备具备防震、防鼠咬、防虫蛀结构设计；出厂强制开展高低温、湿热、振动环境试验。

五、系统试验验证

选取某型北斗导航抗干扰接收机作为被测样机，开展多轮整机联调验证：

1）静态多方位干扰试验：系统自动循环切换 8 组天线干扰信号，转台 $0\sim 360^{\circ}$ 连续旋转，全程无人值守；定位精度测试标准差 $\leq 0.8\text{m}$ ，测试复现误差 $< 3\%$ ；

2）高动态滑轨试验：滑轨 $0\sim 2\text{m/s}$ 往复运动叠加多路干扰，软件自动记录动态测速误差，精准捕捉抗干扰失效节点；

3）长时可靠性试验：72h 不间断自动化循环测试，设备无通信中断、无宕机，故障检测率 92%，满足 $\geq 90\%$ 设计指标；

4）效率对比：传统人工完整测试耗时 4h，自动化系统仅需 40min，测试效率提升 6 倍，消除人工记录引入的随机误差。

试验结果表明，本系统可稳定模拟室外复合电磁干扰与载体高动态运动场景，自动化程度、测试一致性、环境防护能力均满足工程批量检测需求。

六、结论与展望

（一）结论

本文设计的卫星导航抗干扰自动测试系统，融合多通道射频激励、分布式空域辐射、精密姿态 / 高动态模拟、一体化自动化测控软硬件，解决传统人工测试场景难复现、效率低、数据标准化不足的问题。系统完成总体架构、硬件选型、室外机械工装、分层测控软件、可靠性全套工程设计，经整机联调验证，可全自动完成静态多方位、直线高动态复合干扰测试，适用于导航抗干扰装备研发试验、出厂检验、故障复现全流程场景。

参考文献

- [1] 谢钢. 全球导航卫星系统原理 [M]. 北京：电子工业出版社，2019.
- [2] 李磊，王军. 卫星导航接收机抗干扰自动测试平台设计 [J]. 电讯技术，2021, 61 (05): 612-618.
- [3] 张宇，刘成. 多通道射频干扰模拟测试系统开发 [J]. 计算机测量与控制，2023, 31 (02): 78-83.
- [4] 是德科技. E4438C ESG 系列信号发生器技术手册 [Z]. 2020.