# 北斗卫星导航接收端抗干扰性能测试系统构建方法研究

郭淑霞 董中要 张 宁 刘孟江
(西北工业大学无人机特种技术重点实验室 西安 710065)

**摘 要** 由于空间电磁环境日益复杂,卫星导航接收端抗干扰性能成为北斗用户密切关注的问题。为了对接收端抗干扰性能进行测试,提出一种卫星导航接收端抗干扰性能测试系统构建方法。采用数字式仿真技术以及基于脚本的仪表驱动技术,结合信号源模拟设备、耦合器、微波暗室等构建半实物仿真系统,实现了对卫星导航接收端抗干扰性能的测试。使用接收端有效载噪比作为抗干扰性能指标,通过调节干扰信号发射端输出功率进行仿真。仿真结果表明,该系统能够得到干信比与有效载噪比的关系曲线,从而为北斗用户接收端抗干扰性能测试提供较大的参考与使用价值。

**关键词** 导航接收端,抗干扰性能测试,半实物仿真,仪表驱动,微波暗室
**中图法分类号** P228.7 **文献标识码** A

## Anti-jamming Performance Test System Building Method of Beidou Satellite Navigation Receiver

GUO Shu-xia DONG Zhong-yao ZHANG Ning LIU Meng-jiang
(Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

**Abstract** In view of the increasingly complex space electromagnetic environment, users pay more attention to the receiver anti-jamming performance of satellite navigation. For testing receiver anti-jamming performance, a kind of method to construct test system was proposed. By using digital simulation technology and instrument driving technology based on script, and combining with signal simulation equipments, couplers, anechoic chamber to construct semi-physical simulation system, the test was realized. The effective carrier to noise ratio at the receiver was used as index of anti-jamming performance, and it was simulated by adjusting output power of the jamming signal transmitter. The simulation results show that the curve of bit error rate versus the effective carrier to noise ratio can be got by the system, which can provide reference for the Beidou receiver anti-jamming performance test.

**Keywords** Navigation receiver, Anti-jamming performance test, Semi-physical simulation, Instrumentation drive, Anechoic chamber

## 1 引言

北斗卫星导航系统自2012年12月27日起向亚太大部分地区正式提供区域服务,为人们提供高精度、全天候的定位、导航和授时与短报文通信服务,成为国防和经济社会不可或缺的信息基础设施。在军用方面,卫星导航系统是武器装备的重要支持手段,是部队战斗力的后备力量,拥有性能优越的卫星导航系统,就拥有战争的主动权。在民用方面,卫星导航系统可用于气象观测、资源勘察、大地测量、交通管制等领域,为人类带来巨大的经济效益和社会效益[1]。

然而,由于空间电磁环境的复杂度不断提高,卫星导航系统的信号到达接收端时非常微弱,使得导航信号淹没在噪声中。虽然卫星导航信号采用扩频通信体制,具有较大的扩频增益,可以将淹没在噪声中的信号提取出来,但当干扰信号非常强,并且干扰类型复杂、干扰信号角度多变时,卫星导航系统终端仍然会受到较大的影响[2]。因此,抗干扰问题成为当前研究的主要问题之一。目前,很多的抗干扰算法局限于理论研究与软件仿真层面,无法在实际平台下验证抗干扰性能。国内外普遍认为,抗干扰技术的研究和应用单靠理论和仿真研究是不够的,需要建立抗干扰测试平台[3,4],它是研究和测试抗干扰技术强有力的手段。

目前,针对卫星导航系统接收端测试系统的主要构建方法有:外场测试模拟、全数字仿真、半实物仿真。近年来,外场试验模拟系统平台在国内外不断涌现。例如,美国海军空战中心武器部(NAWCW-PNS)正在开发自由空间干扰系统,旨在建立一个真实的GPS威胁场景,用来测试GPS的抗干扰能力[5];中电54所建立的卫星导航室外测试环境,能够提供接近真实的外场测试环境;深圳市汽车电子产品检测与鉴定公共技术服务平台(ATC)首次对北斗车载导航终端样机进行测试等。外场试验模拟系统,固然是卫星导航接收端测试的一种有效途径,但是受到试验耗费、组织实施、安全性等因素的制约,具有一定的局限性,且不能做定量分析。

全数字仿真系统[6,7],虽然成本低、安全性好,但由于电磁环境的复杂性以及耦合途径的多样性,导致全数字式仿真

到稿日期:2012-09-24 返修日期:2012-12-22 本文受某部级基金项目(20212HK03010),2012年西北工业大学科技创新基金,2010年西北工业大学科技创新基金资助。

**郭淑霞**(1965—),女,副教授,硕士生导师,主要研究方向为无线通信、卫星导航、复杂电磁环境模拟,E-mail:guoshuxia0223@sina.com;**董中要**(1988—),男,硕士生,主要研究方向为无线通信、卫星导航、复杂电磁环境模拟。

无法完整、真实地反映现实中的复杂电磁环境。

半实物仿真系统又称为硬件再回路仿真系统[8-12]，通常是将数学模型、实体模拟和物理设备联系在一起而形成的一种仿真系统，是计算机仿真与物理效应仿真相结合的产物。半实物仿真系统具有的研制周期短、质量高、成本低等优点使其成为仿真领域中的一个重要分支。

本文采用半实物仿真方法，结合信号源模拟设备、微波暗室、程控衰减器、微波开关、耦合器及其他辅助设备构建卫星导航接收端性能测试平台。该测试平台使用了数字仿真与仪表的脚本驱动等关键技术。其中，数字仿真技术实现外场实测数据的暗室复现，突破外场测试不同重复的难题；仪表的脚本驱动技术实现远程可控、干扰样式可变、干扰功率可调的复杂电磁环境，突破常规仪表驱动技术的局限。该平台能够模拟接近真实的复杂电磁环境，为北斗卫星导航接收端的测试提供基础，具有广大的研究前景与应用价值。

## 2 系统构建

本文提出的卫星导航接收端抗干扰性能测试半实物仿真系统实现的功能主要有：复杂电磁环境信号的模拟与发射、导航信号的模拟与发射、导航接收端的运行轨迹、抗干扰性能的测试结果并以图形的形式直观表达卫星导航接收端抗干扰性能。

### 2.1 系统组成

卫星导航接收端抗干扰测试系统主要包括：上位机、导航信号与干扰信号模拟源、微波暗室、转台等，各部分连接框图如图 1 所示。

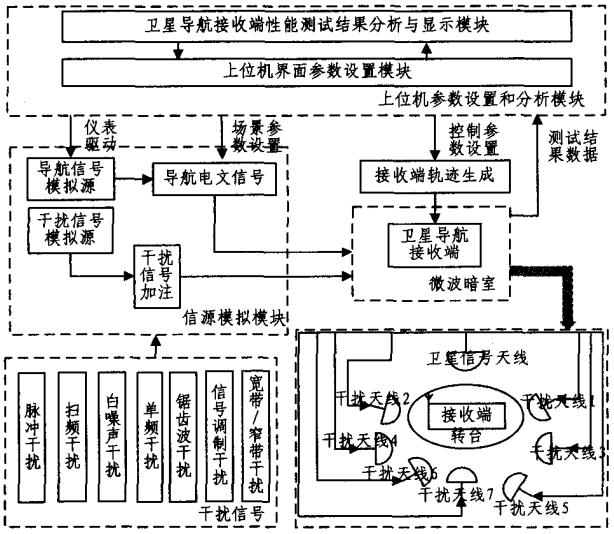


图 1 系统框图

上位机：主要实现系统自检、测试场景构建、测试参数的设置、参数数据库保存和测试数据的处理与结果显示，以及仪表的驱动和转台运动控制等功能。

导航信号与干扰信号模拟源：根据上位机下发的参数信息，驱动仪表产生相应的信号。其中干扰信号模拟源主要实现干扰样式多变、功率可调的多路信号远程控制，达到测试场景中干扰信号复杂化的目的。导航信号模拟源产生星历等信息。

微波暗室：是该半实物仿真系统不可缺少的一部分，主要用来接受导航信号与干扰信号模拟源所产生的信号，并将其作用于被测的卫星导航接收端。

转台：用来控制导航接收端的位置状态，是测量接收端动态性能不可缺少的部分。

### 2.2 系统软件实现

本系统软件采用模块化设计思想，系统流程如图 2 所示。

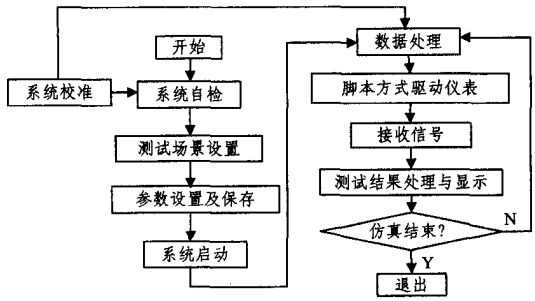


图 2 系统软件流程图

由于系统中所有信号模拟器均采用微波电缆进行连接，在传输过程中存在信号损耗，因此系统开始工作之前，需要对系统进行校准，得到在线仪表的对应功率补偿值并参与数据处理。

另外，测试场景构建之前还需要完成系统的自检工作，主要是为了保证系统中所用设备之间的连接正常。自检完毕后，构建测试场景，设置场景中相应对象的参数并保存至数据库。

系统启动后，对所有数据进行处理，包括：各个干扰源与接收机之间的位置关系及其功率关系，并据此采用脚本方式驱动仪表模拟出相应信号，同时根据位置关系控制微波开关的切换，从而控制暗室中的相应微波天线辐射出真实的干扰信号，达到复杂电磁环境的暗室复现目的。

位于复杂电磁环境中的接收端接收暗室中的信号（干扰信号和导航信号），并将收到的信号送到接收机中进行信号分析与处理，同时将测试结果上传至主控机，绘制测试结果曲线图。

## 3 系统关键技术

本文设计的半实物仿真系统主要使用的关键技术有：仪表脚本驱动技术、数字式仿真技术。

### 3.1 仪表脚本驱动技术

在仪表驱动技术中，通过人机交互界面实现仪表的远程控制是一种方便、高效的方法，目前，较为常用的仪表驱动方式如图 3 所示。

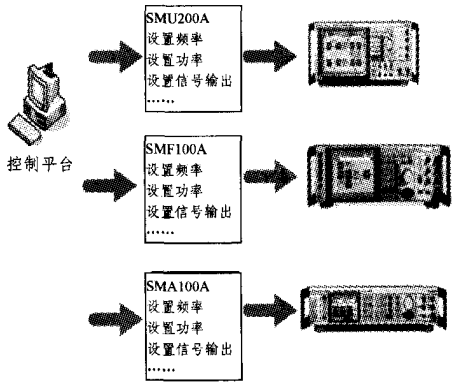


图 3 传统仪表驱动方式

由图 3 可以看出，传统的仪表驱动技术需要根据不同厂商生产的仪表而编写相应的仪表驱动代码，这增加了系统的

复杂性；而且，当可用的不同型号仪表增加时，原有程序无法对该新型号仪表进行驱动，这限制了系统的灵活扩展性，不符合程序设计的要求。

本文提出一种基于脚本的仪表驱动技术。使用该技术驱动仪表首先需要依照统一格式编写特定仪表的脚本文件，用来存放与特定仪表可以完成的功能相对应的仪表驱动指令，针对仪表 SMU200A(R&S 公司提供)编写脚本，如图 4 所示。

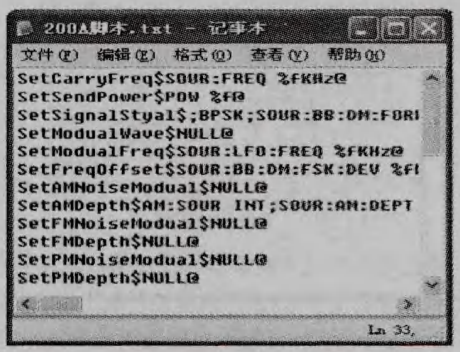


图 4　仪表 SMU200A 脚本文件

由图 5 可以看出，该脚本文件中的每行与特定仪表的一个功能实现相对应，例如：SetCarryFreq $:FREQ %fKHz@，其中 SetCarryFreq 为标识符，用来表示本条指令能够驱动仪表完成的功能；符号“$”与“@”之间的部分为对应仪表可以识别的指令(可以从相应仪表的用户手册中得到)。

得到脚本文件之后，可以使用脚本驱动技术实现仪表的驱动，该技术的核心思想如图 5 所示。

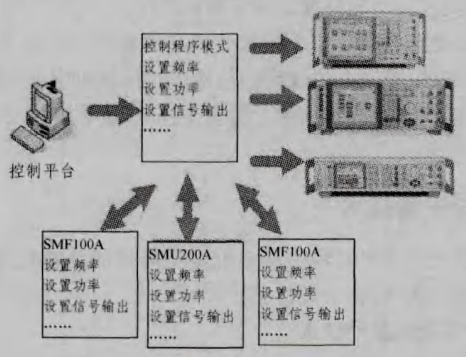


图 5　仪表脚本驱动方式

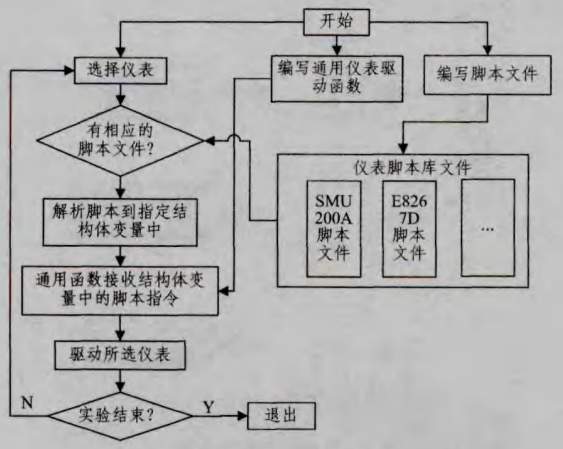


图 6　脚本驱动技术流程图

由图 5 可以看出，脚本方式驱动仪表与传统的仪表驱动技术不同，针对多台仪表，只需要编写一段通用脚本驱动程序，该驱动程序不是用来直接驱动仪表，而是用来读取特定仪表所对应的脚本文件，之后将读取到的脚本指令发给仪表，完成多台仪表的驱动，仪表脚本驱动流程图如图 6 所示。

### 3.2　数字式仿真技术

为了实现外场试验结果数据的室内再现功能，本系统采用数字式仿真技术为外场试验数据的导入提供良好的接口，该技术实现方法如下。

首先根据外场试验数据编制数字仿真数据，如图 7 所示。

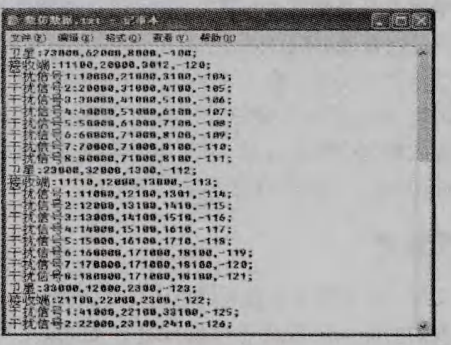


图 7　数字式仿真数据处理文件

进行数字仿真时，选择相应的数字仿真数据，将其导入到系统中数字仿真处理模块，该模块根据编制数字仿真数据的规则对其解析，将解析后的各个数据赋给系统中的相应变量，从而实现与外场测试相对应的多次室内测试，流程图如图 8 所示。

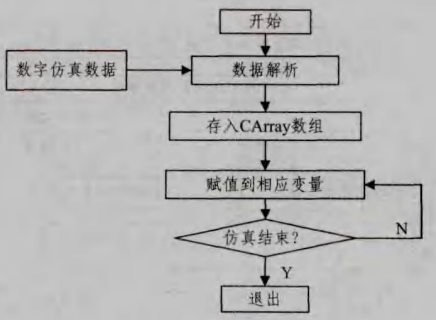


图 8　数字式仿真流程图

## 4　仿真结果分析

根据半实物仿真的思想以及本文采用的几种关键技术对系统进行实现，并在该系统平台上进行卫星导航接收端的抗干扰性能测试。

设置场景如图 9 所示，并分别对场景中的干扰以及通信信号进行参数设置(其中干扰信号功率为初始值)，如图 10—图 12 所示。

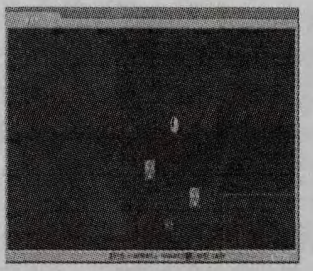

图 9　场景设置

图 10　单频连续波干扰属性设置

图 11　脉冲干扰属性设置

图 12　导航信号属性设置

其中，对象的关键参数设置如表 1—表 3 所列。根据表 1—表 3 中设置的参数，采用脚本方式驱动仪表结果，如图 13—图 15 所示。

表 1　导航信号参数设置

| 仪表名称 | 仪表 IP 地址 | 载频 (GHz) | 发射功率 (dBm) | 信号形式 | 码速率 (MHz) | 滤波器类型 | 滤波器系数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SMU200A | 192.168.1.14 | 1.56(B1) | −130 | BPSK | 1.023 | Cosine | 0.23 |

表 2　脉冲干扰信号参数设置

| 仪表名称 | 仪表 IP 地址 | 载频 (GHz) | 发射功率 (dBm) | 脉冲宽度 (us) | 重频 (us) |
|---|---|---|---|---|---|
| SMA200A | 192.168.1.9 | 1.56 | 0 (起始发射功率) | 3 | 10 |

表 3　单频连续波干扰信号参数设置

| 仪表名称 | 仪表 IP 地址 | 中心频率(GHz) | 发射功率(dBm) |
|---|---|---|---|
| SMA100A | 192.168.1.11 | 1.56 | 0(起始发射功率) |

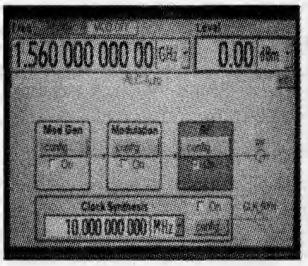


图 13　SMA100A 单频连续波干扰

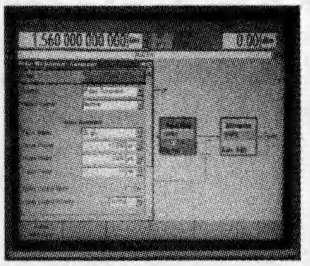

图 14　SMA200A 脉冲干扰

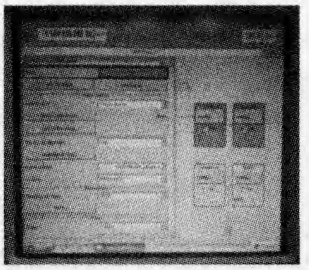

图 15　SMU200A 导航信号

从图 13—图 15 中可以看出，仪表显示的相关参数与属性设置中的参数项相对应，从而实现了采用脚本方式对仪表远程控制的目的，此时通过仪表的 RF 射频输出口，即可将射频信号经过微波开关后发送至暗室中的微波开关，同时不断改变上位机中的干扰信号输出功率，实现信号的暗室复现。

将北斗卫星导航抗干扰接收端与普通接收端各一个放置于暗室中转台，抗干扰接收端与普通接收端同时接收注入暗室中的信号(导航信号与干扰信号的总和)，并在上位机不断地加大干扰信号的输出功率，使干信比($J/S$)增加，使得接收端(抗干扰接收端与普通接收端)如数的信号解扩后噪声加大，降低导航信号有效载噪比($C/N_0$)，从而增加接收端跟踪弱相关信号的难度。将接收端接收到的信号通过微波电缆传送至测试系统，将测试结果通过 SOCKET 传送至上位机。如此重复，直至接收端有效 $C/N_0$ 降到跟踪门限以下时，迫使接收端失去从导航信号中获取测量值的能力，同时促使接收端失锁。测试结果如图 16 所示。

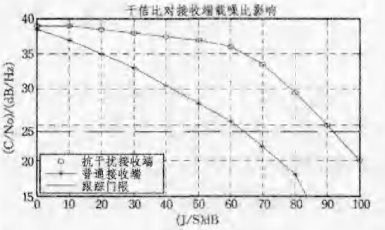


图 16　测试曲线

从图中可以看出，抗干扰接收端的性能明显优于普通接收端，对抗干扰接收端而言，当干信比增加到 92dB 时，接收端失锁；而普通接收端在干信比增加到 64dB 时已经失锁。

**结束语**　本文遵循卫星导航接收端所面临的复杂电磁环境模拟逼真、系统扩充性强等原则，从卫星导航接收端测试系统的构建原理、软件设计流程角度出发，阐述卫星导航接收端测试系统的构建方法。

并通过设置一个特殊场景，实现对卫星导航抗干扰接收端与普通接收端的抗干扰性能测试，并以图形化的方式直观呈现测试结果。这对未来导航接收端的抗干扰性能测试提供了参考与使用价值。

## 参 考 文 献


[1]　杨军，曹冲. 我国北斗卫星导航系统应用需求及效益分析[J]. 武汉大学学报：信息科学版，2004，29(9)：775-778

[2]　王磊，卢丹. GPS 自适应天线实验平台的设计与实现[J]. 中国科学院研究生院学报，2001，27(2)：245-249

[3]　Lin Ching-fang，Deng Qiang. Method and system for anti-jamming simulation[Z]. US. US 20020053989 A1. 2002. 10. 29

[4]　Chen Ya-ding，Liu Xiao-hui，Cheng Yu-fan，et al. The Architecture and Anti-jamming Test of Ultra-Fast Frequency HopPlatform[J]. Journal of Electronics & & Information Technology，2007，29(9)：2191-2194

[5]　张益青，庄春华，何晓云，等. 卫星导航用户终端抗干扰测试平台设计与实现[A]//第三届中国卫星导航学术年会电子文集—S06 北斗/GNSS 测试评估技术[C]. 2012

[6]　张斌，胡晓峰，姜忠钦，等. 战场复杂信息环境体系仿真研究[J]. 装备指挥技术学院学报，2009，20(4)：94-98

[7]　程健庆，余云智. 信息化战场条件下复杂电磁环境仿真建模技术[J]. 舰船电子工程，2008，170(8)：152-156

[8]　冯起，朱畅，袁乃昌. 卫星导航接收机自适应阵仿真测试评估[J]. 电波科学学报，2008，23(5)：847-850

[9]　陈伯翰，苗克坚. 制导控制半实物仿真系统设计[J]. 航空计算技术，2010，40(1)：119-122

[10]　秦大国，李波，陈小武，等. 空间通信链路半实物仿真平台设计与实现[J]. 航天控制，2009，27(6)：66-70

[11]　王云萍，赵长明，李岩，等. 激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统[J]. 红外与激光工程，2012，41(5)：1217-1222

[12]　纪元法，孙希延，符强，等. 北斗接收机抗干扰性能自动测试方法和系统[Z]. 中国. CN 102830407 A. 2012. 12. 19