

卫星导航接收端抗干扰性能测试平台构建方法

郭淑霞¹,董中要¹,高颖²

- (1. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室,陕西 西安 710065;
2. 西北工业大学 航海学院,陕西 西安 710072)

摘要: 针对空间电磁环境的日益复杂化,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,为了测试动态导航接收端的抗干扰性能,提出一种室内无线抗干扰性能测试系统构建方法。采用基于灰色关联分析的场景映射方法、基于脚本的仪表驱动技术,结合信源模拟设备、微波开关、微波暗室等构建半实物仿真平台。不断调节干扰信号发射端输出功率,改变接收端有效载噪(C/N_0),据此获得导航接收端失锁时的输入信干比(J/S)。仿真结果表明:通过干信比与有效载噪比的关系曲线,实现对接收端的抗干扰性能测试,为卫星导航接收端抗干扰性能测试提供测试平台。

关键词: 半实物仿真; 抗干扰性能测试; 导航接收端; 灰色关联分析; 场景映射
中图分类号: TN965.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2150-06

Construction method of anti-jamming performance test system for navigation satellite receiver

Guo Shuxia¹, Dong Zhongyao¹, Gao Ying²

- (1. Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China;
2. School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The anti-jamming performance of the Beidou navigation satellite receiver attracted the users' extensive attention due to the increasingly complex electromagnetic environment. A indoor wireless anti-jamming performance test system for the Beidou dynamic receiver was proposed. Semi-physical simulation system is constructed in anechoic chamber by the combination of scene mapping based on grey relational analysis (GRA), instrumentation script-based drive technology and corresponding simulators, microwave switches. By adjusting the output power of the interference, and the receiver effective carrier-to-noise ratio (C/N_0), where is used to represent the anti-jamming performance, then the jam-to-signal ratio (J/S) can be obtained when the receiver is loss of lock. The simulation results show that the anti-jamming performance test of the receiver can be reflected by J/S versus C/N_0 curve, and this method provides a test platform for the Beidou receiver anti-jamming performance test.

Key words: semi-physical simulation; anti-jamming performance test; navigation satellite receiver; grey relational analysis; scene mapping

收稿日期:2012-12-11; 修订日期:2013-01-15

基金项目:某部级基金(20212HK03010);西北工业大学科技创新基金

作者简介:郭淑霞(1965-),女,副教授,硕士生导师,博士,主要从事卫星导航、复杂电磁环境模拟方面的研究。

Email:guoshuxia@sina.com

0 引言

国内北斗卫星导航系统于2012年12月27日正式向亚太地区的大部分区域提供了全天候、高精度的导航、定位、授时和短报文通信服务,成为国防和经济社会不可或缺的信息基础设施^[1]。

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非常微弱,使得导航信号淹没在噪声中,对卫星导航系统终端仍然会有较大的影响^[2]。因此,抗干扰问题成为当前研究的主要问题之一。

国内外学者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],其是研究和测试抗干扰技术强有力的手段。目前,对卫星导航接收端抗干扰性能测试平台的构建不断出现。

1974年,美国建成了尤马试验场(YPG),作为GPS系统的测试试验环境。通过模拟GPS卫星信号,用来测试GPS用户设备。2002年,欧盟在德国建成伽利略试验和发展测试环境,支持伽利略应用试验。在慕尼黑的Berchtesgaden通过6个固定在地面上的发射机来发射Galileo信号,使Galileo接收端和应用软件开发用户尽早开展软硬件在真实环境中的测试。中国电子科技集团第五十四研究所建有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。

然而,外场试验模拟系统^[4]虽然是卫星导航接收端测试的一种有效途径,但受到试验耗费、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,可重复性低等缺点。因此,建立一种价格低廉、操作安全、可重复性强,且能够接近逼真环境的室内无线抗干扰性能测试平台成为亟待解决的问题^[5]。

采用半实物仿真方法^[6-9],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,采用场景映射方法与仪表的脚本驱动技术。通过场景映射方法,实现对外界复杂动态电磁环境的逼近真实映射,解决室内电磁环境模拟误差较大的弊端;仪表的脚本驱动技术,实现远程可控、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。

1 卫星导航接收端面临的复杂电磁环境分析

将卫星导航接收端所面临的干扰等效为电磁辐射端口,并经过各自的传输信道作用于卫星导航接收天线端口,从而验证卫星导航接收端抗干扰性能。使用一种简化的复杂电磁环境分析模型,如图1所示。

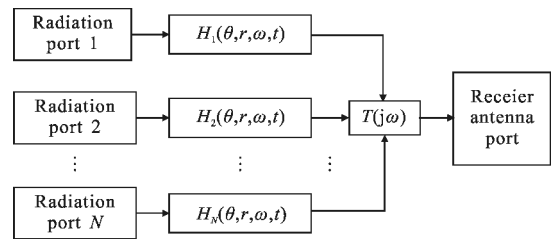


图1 复杂电磁环境模型

Fig.1 Complex electromagnetic environment model

图1中, $H_i(\theta, r, \omega, t)$ 表示第*i*个辐射源电磁信号传播到卫星导航接收天线端口处的传递函数, $T(j\omega)$ 表示外界电磁环境与卫星导航接收天线端口的耦合函数。则卫星导航接收端接收到的电磁信号可以表示为:

$$R(j\omega) = \sum_{i=1}^N P_{it} G_{it} H_i(q, r, W, t) T(j\omega) \quad (1)$$

式中: P_{it} 为第*i*个辐射源输出功率; G_{it} 为第*i*个辐射源天线增益。

从图1中可以看出,复杂电磁环境强度与特定区域中的辐射源密度、相对位置、辐射源工作方式、辐射强度等有关。

针对单个电磁信号功率密度为:

$$r_D = P_i G_i H(q, r, W, t) = \frac{P_i G_i F(q, j) M(t)}{4\pi r^2 L(r, f)} \quad (2)$$

式中: P_i 为辐射源辐射功率; G_i 为辐射源天线增益; r 为辐射源相对于卫星导航接收端的距离; $F(\theta, \varphi)$ 为辐射源方向性因子; $M(t)$ 为辐射源扫描性因子; $L(r, f)$ 为空间传输损耗; f 为信号发射频率。

针对*N*个电磁信号辐射源,复杂电磁信号密度可以表示为:

$$r_{ND} = \sum_{i=1}^N r_{iD} = \sum_{i=1}^N \frac{P_i G_i F_i(q, j) M_i(t)}{4\pi r^2 L_i(r, f)} \quad (3)$$

进而可以得到卫星导航接收天线端口的信号功率为:

$$P_r = D_e \cdot r_{ND} \quad (4)$$

式中: D_e 为卫星导航接收天线有效面积。

2 系统构建

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。

该测试系统主要包括: 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 2 所示。

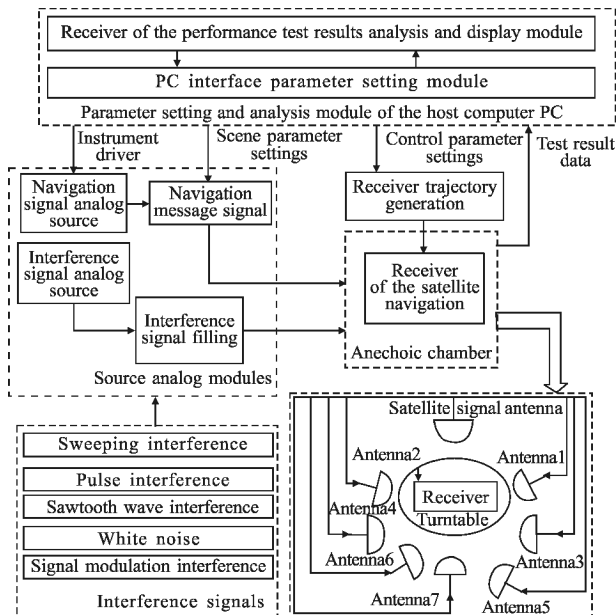


图 2 系统框图

Fig.2 System block diagram

3 系统关键技术

3.1 灰色关联分析的场景映射方法

为了达到在微波暗室中复现卫星导航动态接收端面临的复杂电磁环境, 各个干扰的位置可以通过主控程序动态的切换微波开关来选择最为接近真实电磁信号辐射的输出。对应天线辐射的功率则要改变干扰的功率设置来达到下一仿真节拍的辐射功率值。场景到微波暗室的映射关系如图 3 所示。

通过比对实际场景中导航接收端-干扰源的角度关系与暗室中静态天线-导航接收设备之间的角

度关系, 采用灰色关联分析法, 动态切换微波开关。完成干扰模拟源的干扰信号输出, 实现场景-暗室的准确映射。

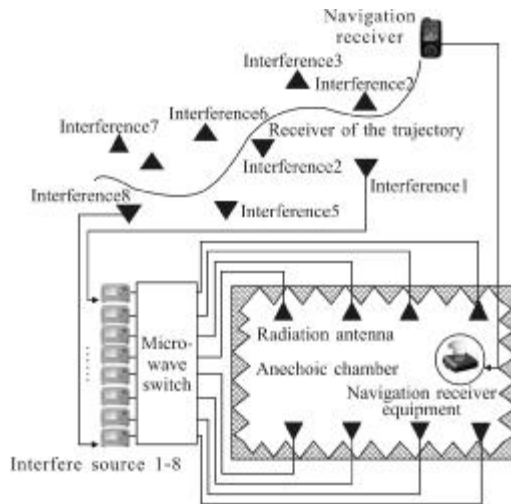


图 3 场景映射

Fig.3 Scene mapping

灰色关联分析(GRA)法是分析系统之间相似或相异的关联程度, 主要用于分析系统各因素之间相关特征, 从而挖掘出系统的主要影响因素^[10]。把微波暗室中辐射天线与导航接收端设备的固定夹角表示为: $x_0[8] = \{15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85\}$ 其中, $x_0(j)$ 表示静态喇叭 j 与导航接收端设备的固定夹角。导航接收端在运动过程中通过实时计算导航接收端与各个干扰源的实际夹角 $x(j)$, 其中 $1 \# j \# N^*$ 表示实际场景中干扰源个数, N^* 代表正整数。根据排列组合原理, 将 $x(j)$ 排列后得到 $x_i(j)$, 式中: $i=1, 2, \dots, A_8^j$ 。

选取固定夹角 $x_0(j)$ 作为主因子, $x_i(j)$ 作为影响因子, 其关联系数可以表示为:

$$\zeta_i(j) = \frac{\min_j \min_i A + \rho \max_j \max_i A}{A + \rho \max_j \max_i A} \quad (5)$$

式中: $A = |x_0(j) - x_i(j)|$, $\zeta_i(j)$ 为影响因子序列 $x_i(j)$ 对主因子序列 $x_0(j)$ 的关联系数; ρ 为分辨系数 ($\rho \in [0, 1]$), 这里取 $\rho=0.5$ 。

为了便于比较分析, 对关联系数进行平均化处理:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n z_i(k) \quad (6)$$

式中: $i=1, 2, \dots, A_8^j$, $n=j!$, r_i 为影响因子序列 $x_i(j)$ 对主因子序列 $x_0(j)$ 的关联度。选取相关度最大者, 作为微

波开关切换的准则。

3.2 脚本的仪表驱动技术

目前,较为常用的仪表驱动方式如图 4 所示。

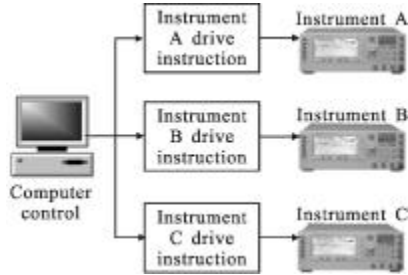


图 4 传统仪表驱动方式

Fig.4 Traditional instrument drive mode

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,增加系统的复杂性;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,限制系统的灵活扩展性,不符合程序设计的要求。

使用仪表的脚本驱动技术,需要依照统一格式编写特定仪表的脚本文件,针对仪表 SMU200A 编写脚本如图 5 所示。



图 5 仪表 SMU200A 脚本文件

Fig.5 Instrument SMU200A script file

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 6 所示。

由图 6 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,该驱动程序用来读取特定仪表所对应的脚本文件。将读取到的脚本指令下发至仪表,可以完成多台仪表的驱动,仪表脚本驱动流程图如图 7 所示。

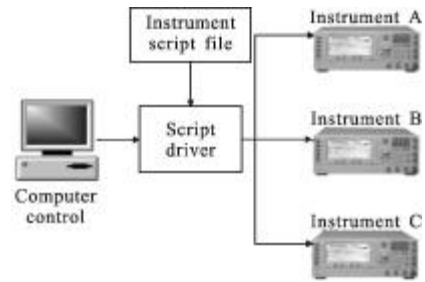


图 6 仪表脚本驱动方式

Fig.6 Instrument script-driven mode

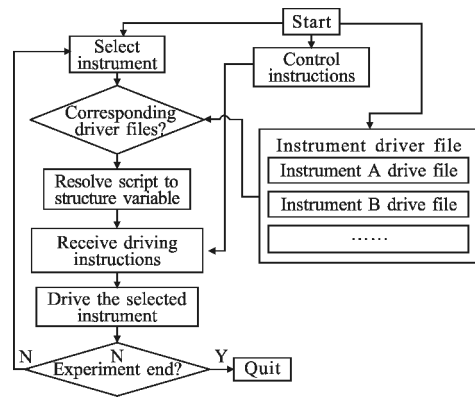


图 7 脚本驱动技术流程图

Fig.7 Script-driven technology flow-chart

为了比较基于脚本的仪表驱动方式与传统驱动方式执行效率及其可扩展性能的区别,图 8 给出了两种驱动方式的差异,其中虚线代表基于脚本的仪表驱动方式,实线代表传统仪表驱动方式。

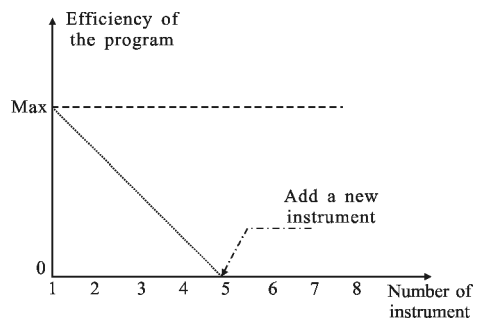


图 8 仪表驱动性能比较

Fig.8 Instrument driver performance comparison

从图 8 中可以看出,传统仪表驱动方式的程序执行效率随着仪表个数的增加不断降低,另外,当加入新的仪表时,传统仪表不能实现新加入仪表的驱动。而基于脚本的仪表驱动方式执行效率一直保持不变,具有较好的程序执行效率及系统与仪表设备的兼容性。

4 实验仿真分析

通过该测试平台放置仿真对象(卫星、干扰源 1、干扰源 2、机载卫星导航接收端),调整暗室中天线,并放置北斗卫星导航抗干扰接收端与普通接收端各一个于暗室中转台。仿真开始,在 t 时刻记录卫星位置为 (x, y, z) , 机载(无人机)导航接收端位置为 (x_G, y_G, z_G) , 干扰 的位置为 (x_i, y_i, z_i) , 如图 9 所示。

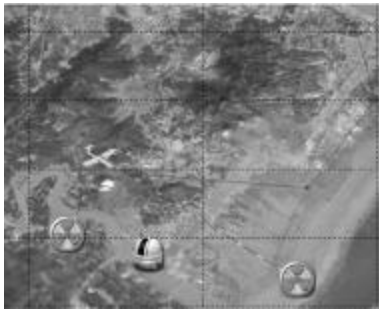


图 9 场景设置
Fig.9 Scene setting

则 t 时刻干扰相对于机载导航接收端-卫星之间的方位角为:

$$j_i = \arctan \frac{x_i - x_G}{y_i - y_G} - \arctan \frac{x - x_G}{y - y_G} \quad (7)$$

根据公式(7)可以计算出 t 时刻卫星导航接收端相对于干扰 1、干扰 2 的夹角关系,并根据公式(8)将其转化为角度,如表 1 所示。

$$\psi_i = \frac{180 * \varphi_i}{\pi} \quad (8)$$

表 1 干扰源角度关系

Tab.1 Angle relationship of interference

Interference	Radian	Angle
Interference 1	0.233 6	13.384 7
Interference 2	0.583 2	33.417 4

采用灰色关联分析法分析 t 时刻干扰与室内无线辐射天线相对于卫星导航接收端的相关性,结果如图 10 所示。根据灰色关联分析结果,选择相关度较大者作为 t 时刻开关切换依据。 t 时刻关联度最大为 0.940 3,对应的开关切换方式为 $x_2(j)$,如图 11 所示。

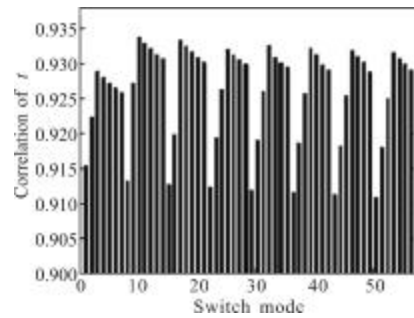


图 10 灰色关联分析

Fig.10 Grey relational analysis

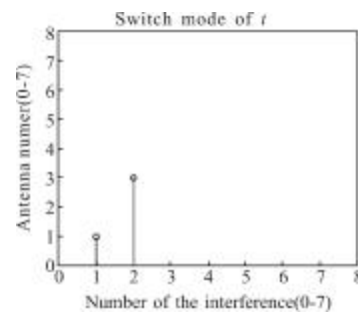


图 11 t 时刻开关切换方式

Fig.11 Switch mode at t

从图 11 中可以看出, t 时刻干扰源 1 使用暗室中的 3 号天线模拟,干扰 2 使用暗室中的 3 号天线模拟。

对应微波开关切换结果见图 12。针对干扰 1,采用基于脚本的仪表驱动技术,通过设置干扰属性,实现仪表的驱动,如图 13 所示。

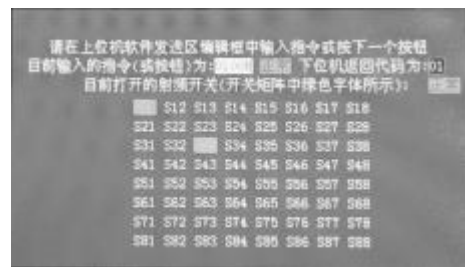


图 12 t 时刻微波开关切换

Fig.12 Microwave switch mode at t



图 13 t 时刻仪表驱动结果

Fig.13 Instrument drive result at t

图 14 表明, 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 92 dB 时, 接收端失锁; 而普通接收端在干信比增加到 64 dB 时已经失锁。

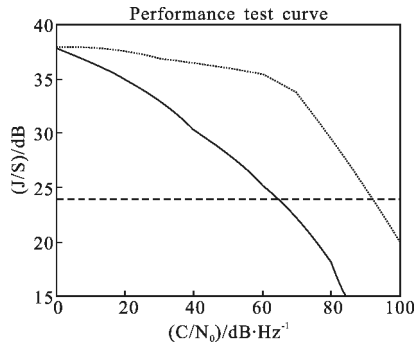


图 14 抗干扰性能测试曲线

Fig.14 Test curve of the anti-jamming performance

5 结论

遵循卫星导航接收端所面临的复杂电磁环境模拟逼真、系统扩充性强模拟快速等原则, 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室内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。对未来导航接收端的抗干扰性能测试提供参考与使用价值。

参考文献:

- [1] Paul C. Recent and future developments in global navigation satellite systems and their impact on national geoinformation infrastructures [C]//Geoinformation and Surveying Conference, 2003.
- [2] Wang Lei, Lu Dan. Design and implementation of GPS adaptive array experimental platform [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2001, 27(2): 245-249.
- [3] Ching Fang Lin, Qiang Deng. Method and system for anti-jamming simulation: US, US 20020053989 A1 [P]. 2002-10-29.
- [4] Song Zhuxun, Yu Bianzhang, Ye Feng. Research on electromagnetic simulation for UAV focused on environment applicability[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(3): 433-436.
- [5] Cheng Jianqing, Yu Yunzhi. Simulation and modeling technology for complex EM environment under informational battle condition [J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 170(8): 152-156.
- [6] Feng Qi, Zhu Chang, Yuan Naichang. Evaluation of adaptive array for satellite navigation receivers[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5): 847-850.
- [7] Chen Bohan, Miao Kejian. Design of hardware-in-the-loop simulation system for control and guidance system [J]. Aeronautical Computing Techniq-UE, 2010, 40(1): 119-122.
- [8] Wang Yunping, Zhao Changming, Li Yan. Hardware-in-the-loop simulation system for laser-angle-deception jamming[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1217-1222. (in Chinese)
- [9] Ji Yuanfa, Sun Xiyan, Fu Qiang. Beidou receiver anti-jamming performance automatic test method and system: China, CN 102830407 A [P]. 2012-12-19.
- [10] Di Yuchun, Deng Yanping. Performance evaluation based on the grey relational grade of image segmentation [J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(3): 1-7. (in Chinese)