

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.06.08

基于卫星导航信号模拟法的北斗接收机导航精度校准测试

叶剑峰, 彭军, 李娜娜

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 随着我国自主设计的北斗卫星导航系统稳步建设, 北斗接收机相关技术取得突破, 但当前北斗接收机校准体系尚不完善, 相关测试方法亟待研究。本文提出卫星导航信号模拟测试法, 通过多星座导航信号模拟器设计静态、动态等仿真场景模拟相关载体运动状态下真实的卫星信号, 实现对北斗接收机在相关载体运动状态下导航精度的校准测试。该方法具有准确度高、简单易操作和重复性强等优点, 可实现实验室条件下检测接收机性能。实验结果表明: 北斗系统的定位和测速精度已基本接近 GPS 系统, 但就系统的稳定性, 北斗系统与 GPS 系统相比还存在一定差距。

关键词: 北斗接收机; 模拟仿真; 多星座导航信号模拟器; 导航精度; 校准测试

中图分类号: TB9; P228

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)06-0030-07

Research on Simulation and Calibration of BeiDou Receiver on GNSS Simulator

YE Jianfeng, PENG Jun, LI Nana

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: With the steady construction and development of BeiDou Navigation Satellite System, the related technology of BeiDou receivers has made a breakthrough. The current calibration system of BeiDou receivers is not perfect, and the relevant methods must be studied. This paper proposes a simulation test based on satellite navigation signal. Through the multi constellation navigation signal simulator, static and dynamic scenarios were designed to simulate the movement of real satellite navigation signals. The method can realize a calibration test of BeiDou receivers' navigation precision in different carriers. The method can not only take the advantages of high accuracy, easy operation and repeatability, but also can realize the comprehensive testing of BeiDou receivers in the laboratory condition. The experimental results show that the measurement accuracy of position and velocity in BeiDou has been basically closed to GPS's, but there is a certain gap on the stability between BeiDou and GPS.

Key words: BeiDou receiver; analog simulation; satellite signal simulator; navigation precision; calibration test

0 引言

当前世界范围内全球卫星导航系统^[1]主要包括美国的全球定位系统(GPS)、俄罗斯的格洛纳斯系统(GLONASS)、欧盟的伽利略系统(GALILEO)和中国正在建设的北斗卫星导航系统(BDS)。由于美国GPS系统建设较早, 经过大量用户应用、技术长时间发展以及系统不断地完善和升级, 目前已发展成技术最成熟和应用最广泛的世界第一大卫星导航系统。

为全面掌握卫星导航技术和彻底摆脱战时受制于

人的局面, 我国坚持自主建设北斗卫星导航系统^[2]。根据2016年6月16日国务院发布的《中国北斗卫星导航系统》白皮书介绍, 目前北斗卫星导航系统已发射23颗卫星, 已具备了覆盖亚太地区的服务能力, 为国家发展和维护主权提供着有力支撑。按照“三步走”的总体规划以及“先区域、后全球, 先有源、后无源”的发展思路, 计划在2020年前后发射35颗卫星组网, 形成全球服务能力, 建成国际一流的全球卫星导航系统^[3]。

在这样的背景下, 为填补我国北斗接收机相关测试的空白, 完善我国GNSS接收机校准体系, 本文提出卫星导航信号模拟法, 参考某些载体的典型运动设计对应的仿真场景, 对北斗系统接收机的导航精度(定位、测速误差)开展校准测试。

收稿日期: 2016-10-01

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(JSJC2013205B204)

作者简介: 叶剑峰(1989-), 男, 吉林长春人, 硕士, 主要从事北斗、GPS导航装备动态校准测试的研究。

1 卫星导航信号模拟法

1.1 基本方法介绍

卫星导航信号模拟法^[4]主要由多星座导航信号模拟器、被测接收机和 PC 上位机等设备组成,该方法主要是在多星座导航信号模拟器上以载体(汽车、飞机、轮船以及导弹等)运动原始数据设置编辑某些载体的运动仿真场景,通过多星座伪距差分数学模型计算生成对应该仿真场景下真实的 GPS、北斗等导航系统的卫星射频信号,如图 1。

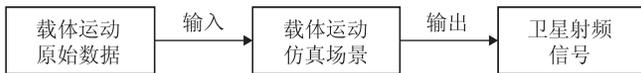


图 1 仿真场景卫星射频信号产生原理框图

仿真测试开始时,将仿真场景生成的卫星射频信号输入给被测接收机;被测接收机正常工作后,由 PC 上位机记录接收机输出数据;当仿真测试结束后,整理被测接收机测试全程数据,与多星座导航信号模拟器仿真场景输出的测试数据进行对比,计算被测接收机导航精度并进行误差分析,其测试原理框图如图 2 所示。

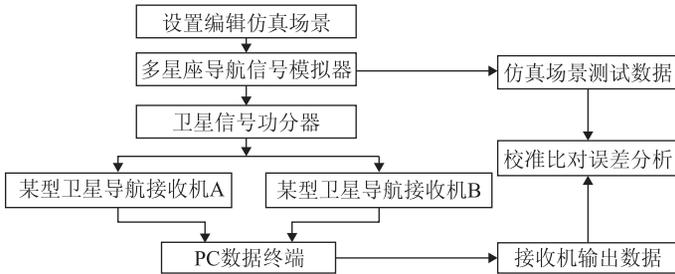


图 2 卫星导航信号模拟仿真法测试原理框图

1.2 仿真场景的建立:以火箭橇试验为例

卫星导航信号模拟法通过参考某些载体的典型运动,建立接近真实运动的模拟器仿真场景,以达到考察接收机在不同条件下导航精度的目的^[5]。

如图 3,高速火箭橇试验^[6]是一种以火箭助推器为动力采用火箭滑车沿特种轨道运行的可回收式大型地面试验,具有产生大过载、高速度、强振动和大冲击等综合条件的能力,可以十分逼真地模拟飞机、导弹真实飞行环境,但也具有单次成本高、准备周期长等缺点。考虑到北斗接收机高速火箭橇搭载试验实际价值,本文提出建立参考真实火箭橇试验的仿真场景。

应用火箭橇试验仿真场景测试能极好代替实际试验,不仅可以降低试验成本,而且能在逼真的模拟试验中反复测试北斗接收机高动态导航能力,完善北斗

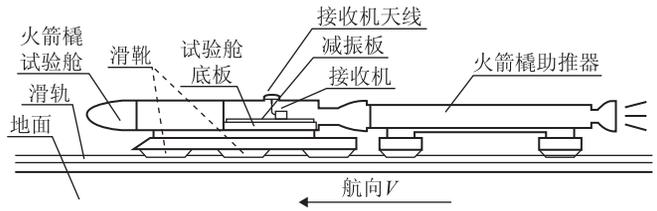


图 3 单轨火箭橇试验示意图

接收机高动态校准体系。

如图 4,建立火箭橇试验仿真场景:以某次火箭橇试验现场测量的弹道数据建立火箭橇试验弹道函数(如图 5,6 分别为橇体运动的时间-位置曲线和时间-速度曲线),经等时间间隔离散化得到火箭橇试验场景仿真源数据(t_i, S_i)和(t_i, v_i)。

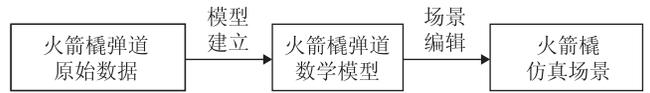


图 4 高速火箭橇试验仿真场景建立框图

将这些仿真源数据输入多星座导航信号模拟器后通过控制主机软件根据相应北斗/GPS 导航星座数学模型计算生成对应于火箭橇试验运动轨迹的导航电文和观测数据(伪距、多普勒等)场景文件,形成火箭橇试验仿真场景。

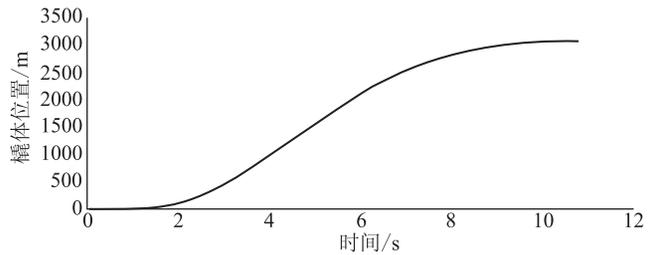


图 5 某次火箭橇试验的时间-位置曲线

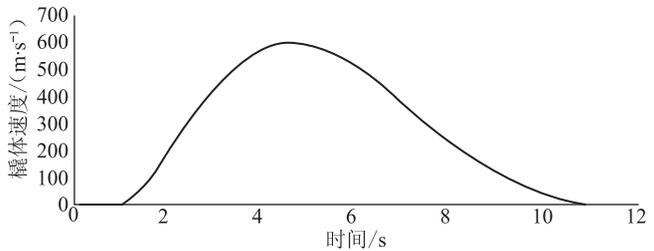


图 6 某次火箭橇试验的时间-速度曲线

2 北斗接收机校准实验及结果

校准实验选取某公司研制的高动态 GNSS 接收机,该接收机是一款高动态、高性能北斗和 GPS 双模卫星接收机,采用载波相位平滑伪距原理和高阶载波跟踪

环路动态控制方式实现精确定位,是目前市场应用较广泛的机型。高动态 GNSS 接收机的数据刷新率最高为 10 Hz,支持北斗系统 B1 频点和 GPS 系统 L1 频点,具有三种导航模式:双系统联合导航模式、北斗系统独立导航模式和 GPS 系统独立导航模式,可以同时输出这三种导航模式的信息。如图 7 为北斗接收机仿真校准实验实物。

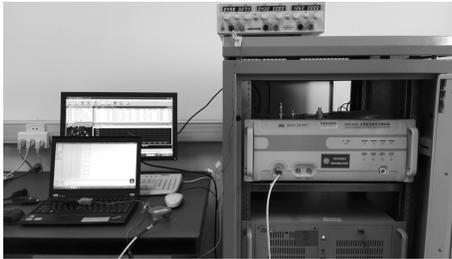


图 7 北斗接收机仿真校准实验实物图

校准实验测试过程:① 将被测接收机天线输入端连接到多星座导航信号模拟器的信号输出端,设置模拟器输出频点为接收机可接收的频点,使用专用导线连接多星座导航信号模拟器和接收机、接收机和计算机,按供电要求给接收机供电;② 选取预先编辑的仿真场景进行测试;③ 设置好接收机的数据刷新率,待接收机正常工作后,启动仿真场景,同步观测模拟器和接收机的输出信息,并记录接收机导航信息;④ 仿真实验结束后,保存被测接收机输出的测试全程数据和多星座导航信号模拟器输出的仿真场景数据;⑤ 整理被测接收机输出的测试全程数据,得到被测接收机测试全程各时刻的定位结果和测速结果;⑥ 以多星座导航信号模拟器的仿真场景数据作为校准实验的标准,在 UTC 时间轴上进行数据比对,进一步计算得到被测接收机测试全程各时刻的定位误差和测速误差。

2.1 火箭橇试验场景测试

模拟地面火箭橇试验全过程,仿真时长为 10.9 s:当 $t = 0 \sim 0.9$ s 时,火箭橇静止于发火线;当 $t = 0.9 \sim 4.8$ s 时,火箭橇沿滑轨启动,逐渐加速至最大;当 $t = 4.8 \sim 10.9$ s 时,模拟火箭橇进入水刹车段,减速直至最后停止。此测试重点考察被测接收机在双系统联合导航、北斗系统独立导航和 GPS 系统独立导航等三种模式下的动态导航性能(水平定位精度和测速精度),重点比较在高动态条件下北斗系统 B1 频点和 GPS 系统 L1 频点的服务精度。

按照北斗接收机仿真校准实验步骤,对高动态 GNSS 接收机进行火箭橇试验场景仿真测试。图 8 和

图 9 分别为高动态 GNSS 接收机火箭橇试验场景仿真测试的水平定位和测速结果,图 10 和图 11 分别为高动态 GNSS 接收机火箭橇试验场景仿真测试的水平定位和速度误差结果。

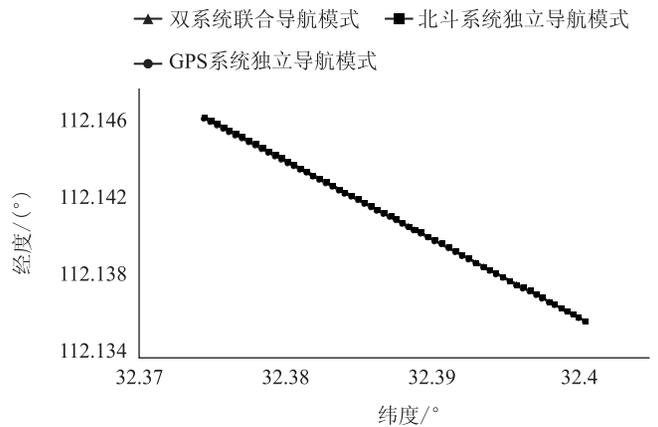


图 8 高动态 GNSS 接收机火箭橇试验场景仿真测试的水平定位结果

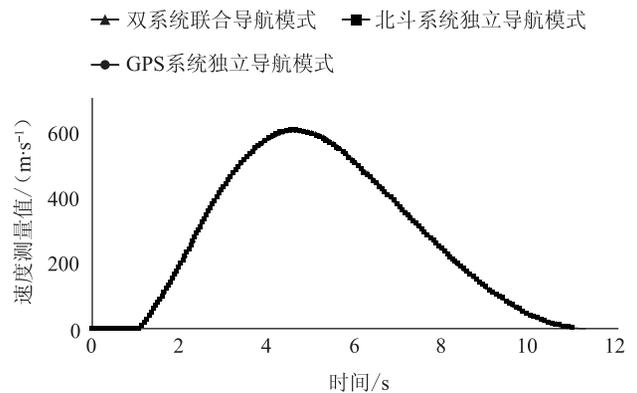


图 9 高动态 GNSS 接收机火箭橇试验场景仿真测试的测速结果

经整理得到高动态 GNSS 接收机在火箭橇试验场景仿真测试计算结果如表 1 和表 2。

表 1 高动态 GNSS 接收机火箭橇试验场景仿真测试的水平定位计算结果 m

仿真试验场景		水平定位精度(RMS)	定位测量重复性
双系统联合导航模式 (混合频点)	加速段	2.1851	1.6787
	减速段	0.6219	0.0119
GPS 系统独立导航模式 (GPS L1 频点)	加速段	0.4685	0.0059
	减速段	0.4762	0.0059
北斗系统独立导航模式 (北斗 B1 频点)	加速段	6.1347	4.7778
	减速段	1.7343	0.0377

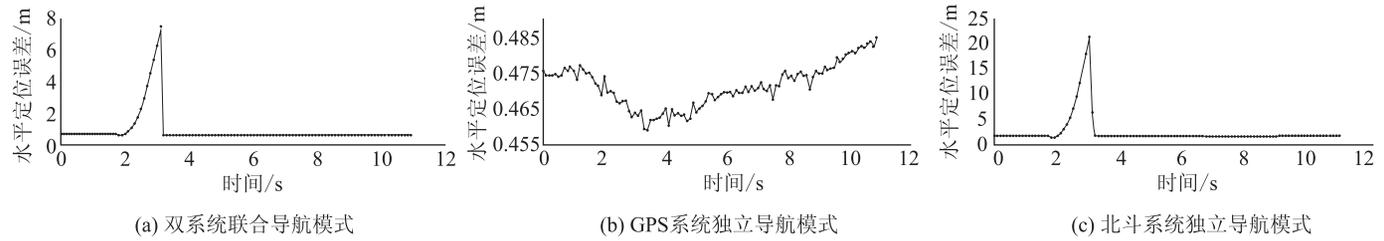


图 10 高动态 GNSS 接收机火箭橇试验场景仿真测试的水平定位误差结果

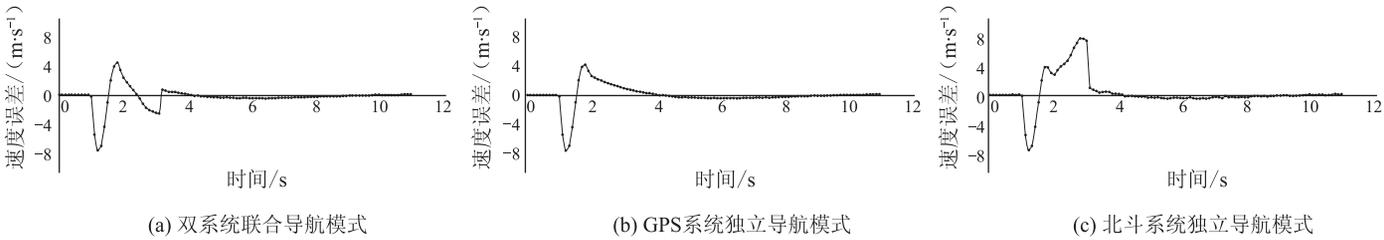


图 11 高动态 GNSS 接收机火箭橇试验场景仿真测试的测速误差结果

表 2 高动态 GNSS 接收机火箭橇试验场景仿真测试的测速计算结果

仿真试验场景		测速精度 (RMS)	速度测量重复性
双系统联合导航模式 (混合频点)	加速段	2.6746	2.6741
	减速段	0.2890	0.1931
GPS 系统独立导航模式 (GPS L1 频点)	加速段	2.6482	2.6693
	减速段	0.2869	0.1905
北斗系统独立导航模式 (北斗 B1 频点)	加速段	4.0993	3.8971
	减速段	0.2954	0.2025

由表 1 和表 2 分析可知：① 高动态 GNSS 接收机的双系统联合导航模式、GPS 系统独立导航模式和北斗系统独立导航模式在火箭橇试验加速段的动态定位精度 (RMS) 分别为 2.1851, 0.4685, 6.1347 m, 减速段动态定位精度 (RMS) 分别为 0.6219, 0.4762, 1.7343 m；② 高动态 GNSS 接收机的双系统联合导航模式、GPS 系统独立导航模式和北斗系统独立导航模式火箭橇试验加速段的动态测速精度 (RMS) 分别为 2.6746, 2.6482, 4.0993 m/s, 减速段动态测速精度 (RMS) 分别为 0.2890, 0.2869, 0.2954 m/s；③ 在火箭橇试验仿真测试中, 高动态 GNSS 接收机 GPS 系统独立导航模式的导航精度最优, 其次是双系统联合导航模式, 再次是北斗系统独立导航模式；④ 试验全程 GPS 系统的定位误差波动非常小, 试验启动时的突然加速对其定位结果几乎没有影响, 说明 GPS 系统稳定性很强, 载体运动状态的突变对其定位精度无明显影

响；而对于北斗系统, 当载体静止时接收机定位精度较好, 但载体启动瞬间, 橇体速度和加速度的瞬间增量十分巨大, 北斗定位误差突然加大, 说明北斗系统动态定位的稳定性与 GPS 系统还具有一定差距；⑤ 高动态 GNSS 接收机在火箭橇试验刚启动时各模式测速误差比较大, 考虑到橇体启动时获得火箭橇助推器瞬间巨大的点火推力, 此瞬间橇体加速度和加加速度十分巨大, 对接收机解算造成一定冲击, 导致接收机内部高阶载波跟踪环路发散, 速度解算结果无法收敛, 致使接收机的启动段导航结果不稳定。随着试验进行, 橇体的加速度和加加速度瞬时增量减小, 接收机高阶环路反应及时, 接收机跟踪状态较好, 测速误差均逐渐收敛并减小；⑥ 高动态 GNSS 接收机火箭橇试验中减速段各模式的导航精度均优于加速段。

2.2 其它场景测试

2.2.1 静止状态场景测试

模拟载体以静止状态处于一点 (试验中设置该点大地坐标为 N: 32.40054025°, E: 112.13594524°, H: 0.952071156 m), 其仿真时长为 90 min。此测试重点考察被测接收机在双系统联合导航、北斗系统独立导航和 GPS 系统独立导航等三种模式下的静止状态导航性能 (水平定位精度和测速精度), 重点比较北斗系统 B1 频点和 GPS 系统 L1 频点的服务精度。

按照北斗接收机仿真校准实验步骤, 对高动态 GNSS 接收机进行静止状态场景仿真测试, 如图 12 和图 13 分别为高动态 GNSS 接收机静止状态场景仿真测试的水平定位和测速误差结果。

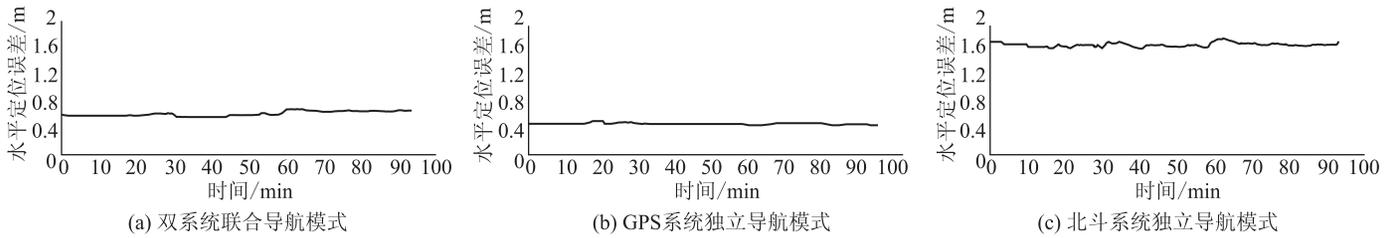


图 12 高动态 GNSS 接收机静止状态场景仿真测试的水平定位误差结果

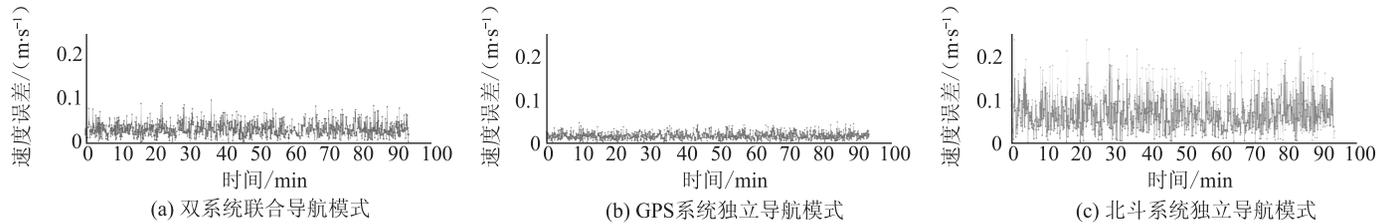


图 13 高动态 GNSS 接收机静止状态场景仿真测试的测速误差结果

经整理得到高动态 GNSS 接收机静止状态场景仿真测试的计算结果如表 3 和表 4。

表 3 高动态 GNSS 接收机静止状态场景仿真测试的水平定位计算结果

模式名称	水平定位平均结果	水平定位精度 (RMS)/ m	定位测量重复性/ m
双系统联合导航模式 (混合频点)	N: 32. 40053922 E: 112. 1359388	0. 6454	0. 06330
GPS 系统独立导航模式 (GPS L1 频点)	N: 32. 40053809 E: 112. 1359497	0. 4859	0. 01127
北斗系统独立导航模式 (北斗 B1 频点)	N: 32. 40053711 E: 112. 1359271	1. 7384	0. 03296

表 4 高动态 GNSS 接收机静止状态场景仿真测试的测速计算结果

模式名称	测速平均结果	测速精度 (RMS)	速度测量重复性
双系统联合导航模式 (混合频点)	0. 0300	0. 0342	0. 0164
GPS 系统独立导航模式 (GPS L1 频点)	0. 0155	0. 0175	0. 0081
北斗系统独立导航模式 (北斗 B1 频点)	0. 0713	0. 0828	0. 0420

由表 3 和表 4 分析可知：① 高动态 GNSS 接收机在双系统联合导航模式、GPS 系统独立导航模式和北斗系统独立导航模式下的水平定位精度 (RMS) 分别为

0. 6454, 0. 4859, 1. 7384 m, 测速精度 (RMS) 分别为 0. 0342, 0. 0175, 0. 0828 m/s; ② 在静止状态仿真测试中, 高动态 GNSS 接收机 GPS 系统独立导航模式的导航精度最优, 其次是双系统联合导航模式, 再次是北斗系统独立导航模式; ③ 双系统联合导航模式结果是由北斗系统独立导航模式和 GPS 系统独立导航模式的结果相互融合而得。由于 GPS 系统的导航精度较优, 而北斗系统的导航精度较弱, 所以双系统联合导航模式导航精度介于北斗系统和 GPS 系统之间; ④ 北斗系统静态导航的稳定性与 GPS 系统相近。

2.2.2 匀速圆周运动场景测试

模拟载体于高空盘旋飞行, 仿真时长为 1000 s; 载体以大地坐标 N: 40. 00000000°, E: 116. 00000000°, H: 6007. 823 m 为轨迹圆心, 做半径为 10000 m, 线速度为 500 m/s 的匀速圆周运动。此测试可以考察被测接收机在双系统联合导航、北斗系统独立导航和 GPS 系统独立导航等三种模式下的机载动态导航性能 (水平定位精度和测速精度), 重点比较北斗系统 B1 频点和 GPS 系统 L1 频点的服务精度。

按照北斗接收机仿真校准实验步骤, 对高动态 GNSS 接收机进行匀速圆周运动仿真测试。图 14 和图 15 分别为高动态 GNSS 接收机匀速圆周运动仿真测试的水平定位和测速结果, 图 16 和图 17 分别为高动态 GNSS 接收机匀速圆周运动仿真测试的水平定位和速度误差结果。

经整理得到高动态 GNSS 接收机匀速圆周运动仿真测试计算结果如表 5 和表 6。

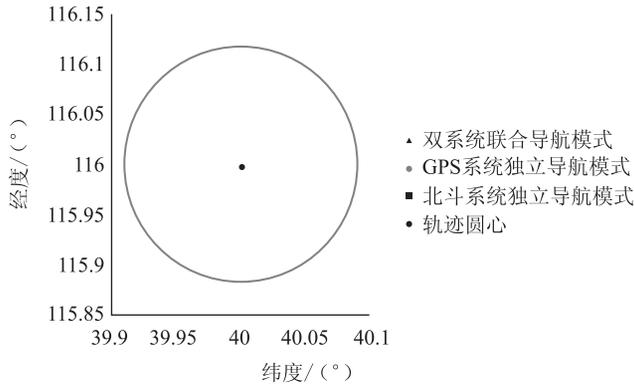


图 14 高动态 GNSS 接收机匀速圆周运动仿真测试的水平定位结果

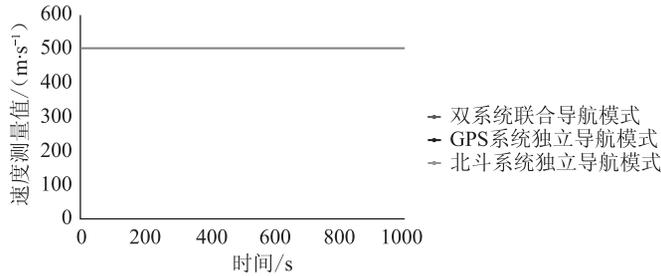


图 15 高动态 GNSS 接收机匀速圆周运动仿真测试的测速结果

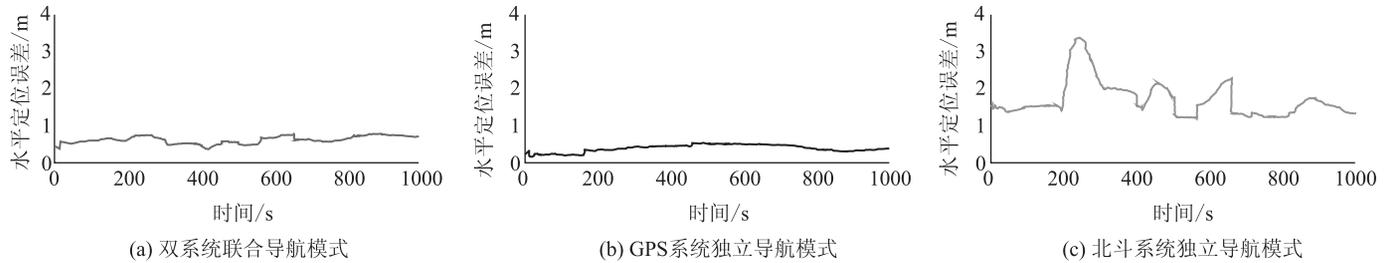


图 16 高动态 GNSS 接收机匀速圆周运动仿真测试的水平定位误差结果

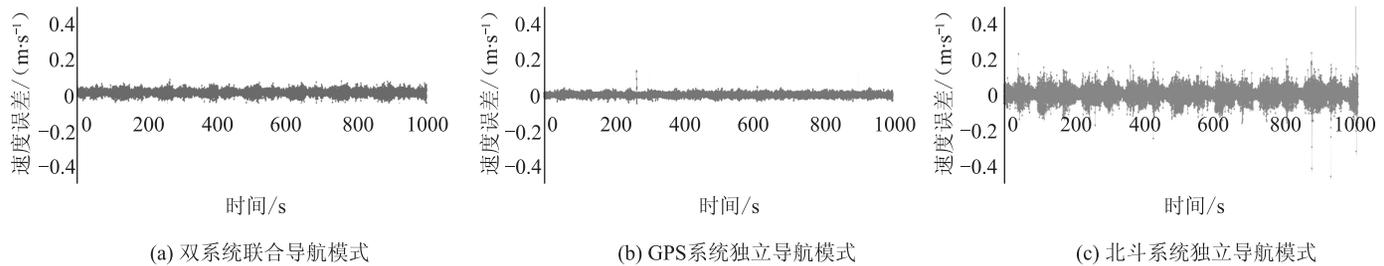


图 17 高动态 GNSS 接收机匀速圆周运动仿真测试的测速误差结果

表 5 高动态 GNSS 接收机匀速圆周运动仿真测试的水平定位计算结果

测试结果	水平定位精度 (RMS)	定位测量重复性
双系统联合导航模式 (混合频点)	0.6158	0.1013
GPS 系统独立导航模式 (GPS L1 频点)	0.3932	0.0975
北斗系统独立导航模式 (北斗 B1 频点)	1.7602	0.4860

表 6 高动态 GNSS 接收机匀速圆周运动仿真测试的测速计算结果

测试结果	测速平均结果	测速精度 (RMS)	速度测量重复性
双系统联合导航模式 (混合频点)	499.9937	0.0310	0.0124
GPS 系统独立导航模式 (GPS L1 频点)	499.9969	0.0232	0.0093
北斗系统独立导航模式 (北斗 B1 频点)	499.9896	0.0884	0.0354

由表 5 和表 6 分析可知：① 高动态 GNSS 接收机的双系统联合导航模式、GPS 系统独立导航模式和北斗系统独立导航模式匀速圆周运动仿真测试的动态定位精度 (RMS) 分别为 0.6158, 0.3932, 1.7602 m；② 高动态 GNSS 接收机的双系统联合导航模式、GPS 系统独立导航模式和北斗系统独立导航模式匀速圆周运

动仿真测试的动态测速精度 (RMS) 分别为 0.0310, 0.0232, 0.0884 m/s；③ 在匀速圆周运动仿真测试中, 高动态 GNSS 接收机 GPS 系统独立导航模式的导航精度最优, 其次是双系统联合导航模式, 再次是北斗系统独立导航模式；④ 试验全程 GPS 系统的定位误差波动非常小, 匀速圆周运动对其定位结果几乎没有影响,

说明 GPS 系统稳定性很强；而对于北斗系统，匀速圆周运动的定位误差波动较大，也说明北斗系统动态定位的稳定性与 GPS 系统还具有一定差距。

2.3 仿真测试的重复性

为考察卫星导航信号模拟测试法的试验重复性，以高动态 GNSS 接收机在静止状态场景和火箭橇试验场景下测试为例，分别进行五次重复性测试，测试结果如表 7 和表 8，分析可知：① 同一仿真场景下五次

实验结果比较，高动态 GNSS 接收机各模式的导航精度波动小，结果均稳定；② 北斗接收机仿真校准实验有较好的重复性；③ 重复性试验再次表明高动态 GNSS 接收机 GPS 系统独立导航模式的导航精度最优，其次是双系统联合导航模式，再次是北斗系统独立导航模式；④ 五次实验结果进一步说明，目前北斗系统接收机的定位和测速精度已基本接近 GPS 系统，但就系统稳定性，北斗系统与 GPS 系统还存在一定差距。

表 7 高动态 GNSS 接收机静态场景仿真测试(五次实验)的计算结果

模式	水平定位精度/m					测速精度/(m·s ⁻¹)				
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
双系统联合导航模式	0.6574	0.6774	0.6800	0.6617	0.6733	0.0331	0.0311	0.0329	0.0316	0.0329
GPS 系统独立导航模式	0.4618	0.4677	0.4504	0.4655	0.4603	0.0163	0.0169	0.0167	0.0169	0.0168
北斗系统独立导航模式	1.7364	1.7403	1.7356	1.7365	1.7386	0.0819	0.0821	0.0822	0.0819	0.0821

表 8 高动态 GNSS 接收机火箭橇试验场景仿真测试(五次实验)的计算结果

模式		水平定位精度/m					测速精度/(m·s ⁻¹)				
		第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
双系统联合导航模式	加速段	2.1785	2.1785	2.2003	2.1959	2.1718	2.6303	2.6483	2.6508	2.6489	2.6470
	减速段	0.6201	0.6201	0.6263	0.6250	0.6181	0.2892	0.2889	0.2886	0.2881	0.2875
GPS 系统独立导航模式	加速段	0.4670	0.4670	0.4717	0.4708	0.4656	2.6489	2.6495	2.6476	2.6403	2.6502
	减速段	0.4748	0.4748	0.4795	0.4786	0.4733	0.2880	0.2870	0.2879	0.2860	0.2869
北斗系统独立导航模式	加速段	6.1163	6.1163	6.1774	6.1651	6.0972	3.2101	5.0989	4.0957	4.0870	4.0996
	减速段	1.7291	1.7291	1.7464	1.7429	1.7238	0.2936	0.2955	0.2930	0.2945	0.2929

3 结论

卫星导航信号模拟法是通过设计不同的测试场景，利用多星座导航信号模拟器输出卫星仿真信号，为北斗接收机提供了一个稳定、准确、可靠的测试环境，可以很好地在实验室条件下开展北斗接收机相关动态测试。这种方法简单易用、可重复性强、测试准确度高，为北斗接收机的研制和改进给予了较好的指导作用，并为今后北斗接收机相关测试实验提供参考和依据。

参考文献

- [1] 周建郑. GPS 定位测量[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010.
- [2] 徐绍铨, 张华海, 杨志强, 等. GPS 测量原理与应用[M]. 3 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [3] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

- [4] 贾超广, 肖海霞. 基于卫星信号模拟器的北斗接收机性能测试与分析[J]. 导航定位学报, 2013, 1(4): 14-16.
- [5] 张霄霄, 庞瑶. 基于卫星模拟仿真平台的导航产品测试技术研究[J]. 现代电子技术, 2012, 35(10): 115-117.
- [6] 郑善魁, 胡杰, 孙颖, 等. 基于火箭橇的北斗动态定位精度鉴定方法[J]. 导航与控制, 2015, 14(6): 9-13.

订阅本刊可通过邮局或直接与编辑部联系。邮发代号: 80-441。全年定价 60 元。

本刊优先刊登受各类基金资助产出的论文, 欢迎赐稿!

欢迎发布技术和产品信息!