

# 异常环境下 GNSS 接收机性能测试平台开发

孙淑光, 王天游, 马文利, 程 鹏

(中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300)

**摘要:** 为了验证全球导航卫星系统 (GNSS) 接收机在电离层异常环境下的性能是否满足相应的技术规范要求, 文章设计开发了 GNSS 接收机性能测试平台; 该平台主要由信号仿真器、轨迹发生器、误差仿真模块、待测接收机以及性能测试模块组成, 可以仿真不同电离层环境下的卫星信号, 从而测定接收机在不同环境下的性能; 详细介绍了误差仿真模块与测试模块的设计方案, 并利用信号仿真器与接收机进行测试验证, 证明了该平台的有效性。

**关键词:** 接收机性能; 电离层误差; 接收机自主完好性

## Performance Test Platform Development of GNSS Receiver under Abnormal Conditions

Sun Shuguang, Wang Tianyou, Ma Wenli, Cheng Peng

(School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In order to verify the receiver performance whether meet the requirements of the corresponding technical specification, especially in the Abnormal ionosphere environment, it developed a GNSS receiver performance test platform. The platform was mainly composed of signal simulator, error simulation module, the receiver under test and performance test module, it could simulate signals under different ionosphere environment to verify the receiver performance. It introduced the error simulation module and the performance test module in detail, and use them to prove the effectiveness of the platform.

**Keywords:** receiver performance; ionosphere error; receiver autonomous integrity monitoring

## 0 引言

随着 GNSS 的发展, 导航用户定位精度不断提高, 其在民用航空领域的应用也越来越广泛。而机载导航接收机的性能对民航安全有着至关重要的作用。影响定位接收机性能的因素有很多, 包括卫星信号误差、传播路径误差以及接收机自身因素造成的误差等, 其中, 传播路径误差中以电离层误差最难预测, 异常环境下电离层扰动如地震、核爆炸以及强烈的太阳、地磁活动等都会对电磁波的传播产生严重影响, 如何精确地测定接收机在这些异常扰动下的性能显得尤为重要。

本文利用轨迹发生器、信号发生器、电离层误差设置模块、待测接收机以及性能测试模块组成测试平台, 为 GNSS 接收机的定位精度和接收机自主完好性监测 (RAIM) 等性能评估提供验证平台。

## 1 平台整体设计

测试平台主要由轨迹发生器、标准信号发生器、误差环境设置模块、待测接收机以及性能测试模块组成, 其组成框图如图 1 所示。

首先, 信号发生器根据轨迹发生器的设置生成标准 GPS 信号。

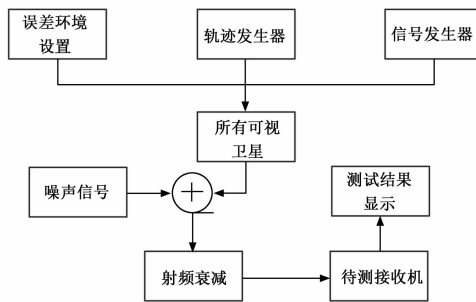


图 1 GNSS 接收机性能测试平台整体设计

然后, 通过误差环境设置模块设置电离层误差, 将误差延迟加入到标准 GPS 信号中生成带误差延迟的 GPS 信号, 设置不同的电离层误差可以为接收机测试提供不同的电离层环境, 从而测定接收机在不同环境下的性能。

最后, 测试模块接收待测接收机输出数据, 并将输出结果标准数据进行对比验证接收机在不同环境下的定位精度与 RAIM。

国际民航组织在不同的飞行阶段对接收机的性能要求如表 1 所示<sup>[1]</sup>。

## 2 误差环境设置

### 2.1 电离层误差模型

本文从 <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/> 下载了 1998~2015 年的 IONEX<sup>[2]</sup> 格式的格网电离层数据, 将其作为数据库, 制作了基于 MATLAB-GUI 的总电子密度含

收稿日期:2016-03-11; 修回日期:2016-04-18。

基金项目:中国民航局安全能力建设项目(AADSA0007)。

作者简介:孙淑光(1970-),女,山东人,教授,硕士,主要从事民航导航新技术、机载电子系统故障诊断方向的研究。

表 1 民航飞机对机载接收机的性能要求

飞行阶段	精度（95%）	完好性			续性	可用性
		告警限值	完好性风险	告警时间		
远洋航路	3.7 km（H） N/A（V）	7.4 km（H） N/A（V）	$1 \times 10^{-5}/\text{h}$	300 s	$1 \times 10^{-4}/\text{h} \sim 1 \times 10^{-8}/\text{h}$	0.99~0.99999
本土航路	0.74 km（H） N/A（V）	3.7 km（H） N/A（V）	$1 \times 10^{-5}/\text{h}$	15 s	$1 \times 10^{-4}/\text{h} \sim 1 \times 10^{-8}/\text{h}$	0.99~0.99999
终端区	0.74 km（H） N/A（V）	1.85 km（H） N/A（V）	$1 \times 10^{-5}/\text{h}$	15 s	$1 \times 10^{-4}/\text{h} \sim 1 \times 10^{-8}/\text{h}$	0.99~0.99999
NPA	220 m（H） N/A（V）	556 m（H） N/A（V）	$1 \times 10^{-5}/\text{h}$	10 s	$1 \times 10^{-4}/\text{h} \sim 1 \times 10^{-8}/\text{h}$	0.99~0.99999
APV-1	16 m（H） 20 m（V）	40 m（H） 50 m（V）	$2 \times 10^{-7}/\text{app}$ (150 s)	10 s	$8 \times 10^{-6}/15 \text{ s} \sim$	0.99~0.99999
APV-2	16 m（H） 8 m（V）	40 m（H） 20 m（V）	$2 \times 10^{-7}/\text{app}$ (150 s)	6 s	$8 \times 10^{-6}/15 \text{ s} \sim$	0.99~0.99999
LPV-200	16 m（H） 4 m（V）	40 m（H） 35 m（V）	$2 \times 10^{-7}/\text{app}$ (150 s)	6 s	$8 \times 10^{-6}/15 \text{ s} \sim$	0.99~0.99999
CAT-1	16 m（H） 4 m（V）	40 m（H） 10 m（V）	$2 \times 10^{-7}/\text{app}$ (150 s)	6 s	$8 \times 10^{-6}/15 \text{ s} \sim$	0.99~0.99999

量（TEC）数据处理软件。软件界面如图 2 所示，其可以实现以下几种功能：

- 1) 任一位置点、任一时刻的 TEC 值
- 2) 任一天的 TEC 日变化曲线；
- 3) 99~14 年之间任一年的 TEC 变化曲线；
- 4) 任一经度处 TEC 随纬度变化曲线；
- 5) 任一纬度处 TEC 随经度变化曲线；
- 6) TEC 在 99~14 年之间的变化曲线；

通过该软件可以观察 TEC 随地方时、季节、经、纬度和年份的变化曲线，也可以观察出异常扰动期间 TEC 变化，从而确定异常扰动发生时刻以及持续时间。



图 2 TEC 数据处理软件

而且，利用这些数据通过内插算法<sup>[3-4]</sup>即可求得任意时刻  $t$  任意位置  $(\beta, \lambda)$  处的天顶方向 TEC（VTEC）值。求得 VTEC 后通过映射函数求得倾斜方向 TEC（STEC）。计算公式如下<sup>[5]</sup>：

$$STEC = m(z)VTEC = \frac{1}{\cos z}VTEC$$

(1)

其中： $m(z) = \frac{1}{\cos z}$  为单层映射函数； $z'$  为穿刺点处天

顶距。  
电离层时延计算公式为：

$$\delta t_{iono} = \frac{40.3 * STEC}{c f^2}$$

(2)

其中： $c$  为光速， $f$  为载波频率。

2.2 电离层误差环境的设置

测试中所设置的异常电离层环境包括地震、磁暴、放射性污染等<sup>[6]</sup>。

2.2.1 地震

本文研究了 2000 年以来几个 7.0 级以上的地震，由于篇幅所限不再详细列出，仅以 2008 年 5 月 12 日四川汶川（31.0°N，103.4°E）8.0 级地震和 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级地震（38.1°N，142.6°E）为例。图 3 为其 TEC 变化曲线图。

由几次地震期间 VTEC 变化情况可以看出：在地震发生前前的某段时间内 VTEC 出现迅速降低的情况，如图 3（a）中 5 月 9 日的 10：00~14：00 段以及图 3（b）中 3 月 3 日、5 日的 04：00~10：00 段，这极有可能是由于地震引起的，这与利用其它方法分析得出的结论一致<sup>[7-8]</sup>，因此可以将该段时间视为地震引起的电离层异常情况，利用 2.1 节中的 TEC 数据处理软件仿真产生该段时间的电离层误差延时。

2.2.2 磁暴

以 2004 年 11 月 9 日和 2006 年 12 月 15 日发生的电磁爆为例进行研究，其 VTEC 变化情况分别如图 4（a）和 4（b）所示。

由图（a）可以看出 14 日 14：00 至 15 日 08：00 时间段内 VTEC 出现剧烈震荡，由图（b）可以看出 7 日 20：00 至 8 日 6：00 以及 9 日 18：00 至 10 日 04：00 时间段内 VTEC 出现震荡，这与磁暴期间磁暴环电流指数（Dst）逐日变化情况一致<sup>[9]</sup>，因此可以利用 2.1 节中的 TEC 数据处理软件仿真产生该段时间的电离层时延误差。

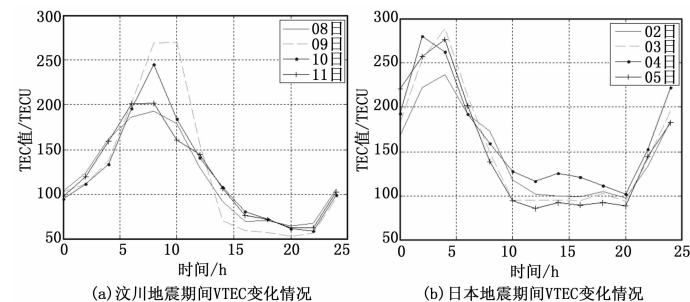


图 3 地震期间 VTEC 变化情况

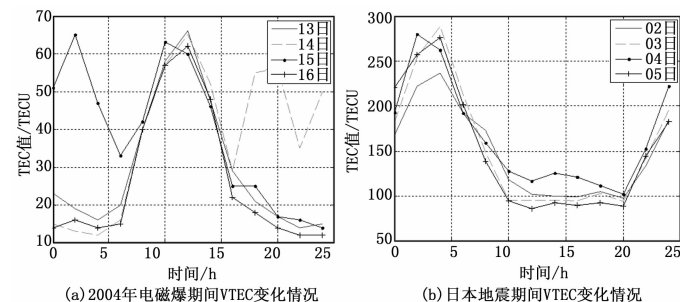


图 4 磁暴期间 TEC 变化情况

### 2.2.3 放射性污染

2013 年 2 月 12 日, 朝鲜在北部地下核试验场成功举行了第三次地下核试验, 核爆炸前后 11~14 日内 VTEC 变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出: 由于核爆炸的影响 12 日 TEC 值峰值后移且在 02:00 时刻变化率发生变化, 有可能是因为核爆炸使得 VTEC 值减小, 因此可以选择 01:35:00~02:55:00 作为测试时间段。

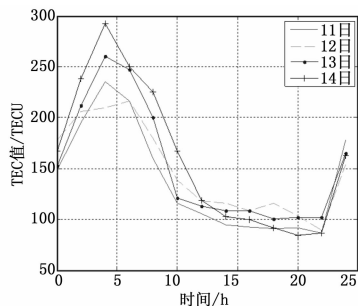


图 5 核爆炸前后 11~14 日 VTEC 变化曲线

## 3 测试模块

接收机性能测试模块按数据处理时间先后分为参数设置模块和测试评估模块。参数设置模块包括初始化设置、数据采集和界面显示 3 个部分; 测试评估模块包括数据处理、界面显示、评估计算和生成报表 4 个部分。其结构组成如图 6 所示。

### 3.1 参数设置模块

参数设置模块主要包括 4 个子界面: 轨迹设置界面, 接收机数据采集界面, 误差设置界面以及可见星相关参数显示列表。

轨迹设置部分可以根据需要设置不同的运动模型: 静止和沿大圆航线飞行。

误差设置参数主要包括根据真实信息计算出的数据和接收

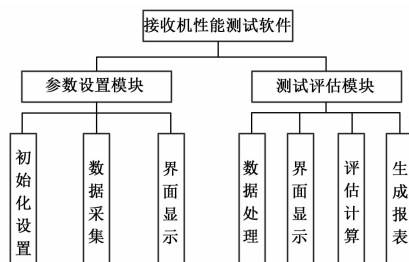


图 6 接收机性能测试软件结构组成

机输出的实测数据进行比较以评估接收机性能。

数据采集模块通过串口通信对接收机数据进行实时采集。主要有: 接收机的位置信息包括经、纬、高, 水平保护限, 告警时长, 故障检测隔离标志以及实测故障卫星号。

可见星参数显示列表用来直观地显示可见星的数量、PRN 号、高度角、方位角、伪距、穿刺点位置、电离层误差以及对流层误差。

### 3.2 测试评估模块

测试评估模块主要包括定位精度和 RAIM 的测试评估。

#### 3.2.1 定位精度评估计算流程

卫星定位中通常用均方根差 (root mean square error, RMS) 来表示定位精度<sup>[10]</sup>。水平定位精度 (Horizontal RMS, HRMS) 和垂直定位精度 (Vertical RMS, VRMS) 的定义式如下:

$$\begin{cases} HRMS = 2DRMS = 2 * \sqrt{(\sigma_N^2 + \sigma_E^2)} \\ VRMS = 2 * \sigma_U \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\sigma_E, \sigma_N, \sigma_U$  为分别表示东、北、天向定位标准差。

假设  $t_i$  时刻, 接收机测得坐标为  $(X_i, Y_i, Z_i)$ , 实际坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 将  $(X_i, Y_i, Z_i)$  转换为以  $(X_0, Y_0, Z_0)$  为站心的站心直角坐标, 设转换后的坐标为  $(N_i, E_i, U_i)$ , 即为东、北、天 3 个方向的误差。根据中误差计算公式, 3 个方向的中误差为<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{N_i^2}{n}}, \quad \sigma_E = \sqrt{\frac{E_i^2}{n}}, \quad \sigma_U = \sqrt{\frac{U_i^2}{n}} \quad (4)$$

将 (4) 带入 (3) 即可求得定位精度。

定位精度的评估流程图如图 7 所示。

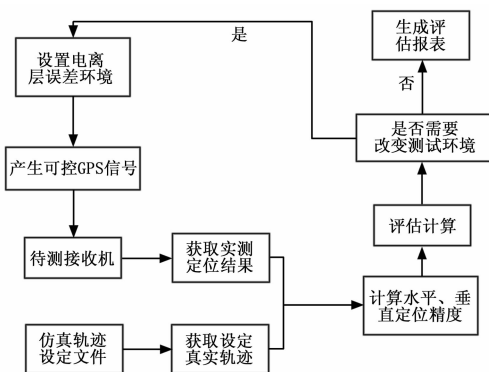


图 7 定位精度评估流程图

#### 3.2.2 RAIM 评估计算流程

RAIM 是衡量接收机性能的一项重要指标, 体现了接收机故障检测与隔离 (fault detection and isolation, FDI)

和及时告警的能力。完好性包括告警门限、完好性风险、告警时间 3 个方面的要求。

告警门限：是特定场合下为保证交通运输安全而设定的定位误差上限，该数值由应用场景的特性决定；

完好性风险：是指出现危险误导信息（PL（保护限）<AL（告警限）<PE（定位误差）），导航系统未发现或者未及时告警的概率；

告警时间：是指从发现危险误导信息到运载体驾驶人员获得告警信息时的时间间隔。

控制信号仿真器产生 GPS 信号，并将测试信号送入接收机，然后调节信号仿真器中的电离层误差生成异常环境下的 GPS 信号，并将接收机输出的故障检测与隔离标志以及告警时间送到测试评估平台进行评估。因为完好性风险是一个概率值，所以需要实施蒙特卡洛实验进行多次测量。

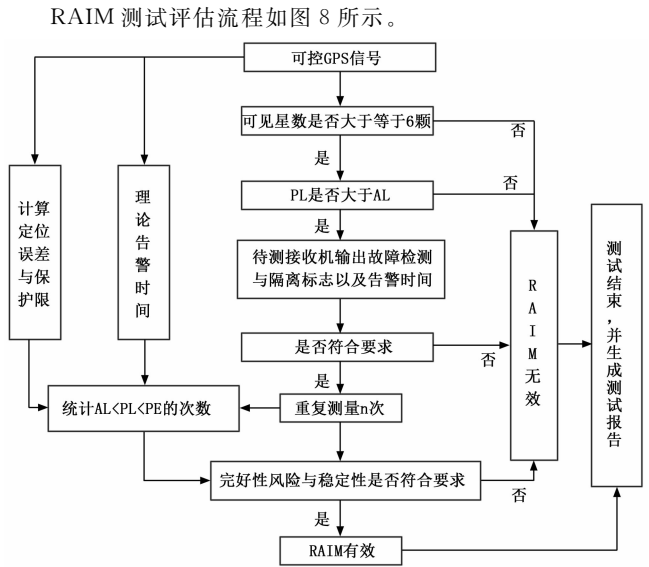


图 8 RAIM 测试流程图

#### 4 测试结果验证

本文将接收机置于静止状态进行仿真验证。仿真时间为 2008.5.12 9:30:00—14:30:00，采样间隔为 1 s，测量次数为  $1 \times 10^5$ 。

测试结果如表 2 及图 9 所示。图 9（a）为单次测量中实际位置与测量位置之间的偏差（每隔一分钟计算一次），图 9（b）为单次测量中发生故障 1 min 内检测统计量与检测门限之间的对比，图 9（c）为  $1 \times 10^5$  次蒙特卡罗实验中 PE、PL、AL 关系，PL 设为 45，取前 1 000 次为例。表 2 和图 9 验证了该测试平台的有效性和可靠性。

表 2 测试数据对比

测试指标	水平精度（km）	完好性风险	告警时长（s）
标准要求	0.74	$1 \times 10^{-5}$	15
实测数据	$2.18 \times 10^{-3}$	0	12
结果	符合要求	符合要求	符合要求

#### 5 结论

为了保证接收机在民航领域应用的安全性与可靠性，必须

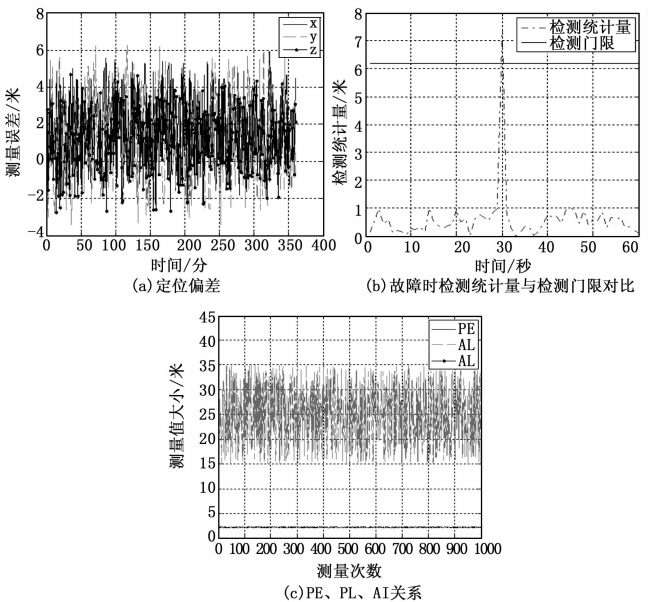


图 9 接收机性能测试结果

建立接收机的性能测试平台，尤其是异常电离层环境下的测试平台。本文设计开发了一种测试平台，该平台可以测试地震、磁暴、核爆炸等异常电离层情况下接收机的性能，并通过实验验证了该平台的有效性，为接收机的开发与应用提供了测试平台。

#### 参考文献：

[1] ICAO SARPS (2004), Annex 10: International Standards and Recommended Practices; Aeronautical Telecommunications, Volume 1 [S]. International Civil Aviation Organization.

[2] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 [J]. Journal of Geodesy, 2009, 83 (3-4): 263-275.

[3] Schaer S, Gurtner W, Feltens J. IONEX: The IONosphere map exchange format version 1 [A]. In Proceedings of the IGS AC Workshop [C]. 1998: 233-247.

[4] Code Ac Team. Global ionosphere maps produced by Code [EB/OL]. (2012-07-04). ftp: ftp.unibe.ch/aiub/ionev/soura.

[5] Schaer S. How to use CODE's global ionosphere maps [J]. Astronomical Institute, University of Berne, 1997: 1-9.

[6] Pulnits S A, Liu J Y. Ionospheric variability unrelated to solar and geomagnetic activity [J]. Advances in Space Research. 2004 (34): 1926-1933.

[7] 徐 彤. 中低纬电离层电离层模型及其异常现象相关研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.

[8] 陈必焰, 戴吾蛟, 蔡昌盛, 等. 利用电离层层析技术探测日本 9.0 级地震前电离层异常 [J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31 (6): 11-14.

[9] 姚宜斌, 陈家君, 陈 鹏, 等. 2003-2006 年磁暴期间欧洲区域电离层三维层析及演变分析 [J]. 武汉大学学报, 2014, 39 (2): 132-136.

[10] 刘基余. GPS 卫星导航的精度, 误差与偏差 [J]. 导航, 1998 (4): 32-35.

[11] 陈 雷, 孙付平, 李海峰, 等. 跟踪环路误差对卫星导航伪距测量精度影响的评定 [J]. 海洋测绘, 2008, 28 (5): 35-38.