

# 导航卫星上行注入与测距性能测试系统设计

崔小准, 崔永军, 刘哲, 王妍, 刘彬

(中国空间技术研究院 总体部, 北京 100094)

**摘要:** 导航卫星的上行注入与测距性能是卫星导航系统服务精度一个重要保证, 设计了一种导航卫星的上行注入与测距性能测试系统; 该系统以控制处理计算机为核心, 并结合了专用设计的基准频率发生器模块、基准时间发生器模块、注入信号发生器模块和通用商业化仪器, 能实时动态地模拟导航卫星在轨期间接收地面注入信号的情形, 完成导航卫星上行注入性能测试中电文信息的生成和对比以及上行测距性能测试; 该测试系统稳定、灵活, 测量精度高, 而且可以通过修改测试软件参数来满足新的测试要求, 便于测试系统的升级改造。

**关键词:** 导航卫星; 上行注入; 测距; 测试系统

## Design of Test System for Uplink Injecting and Ranging Performance of Navigation Satellite

Cui Xiaozhun, Cui Yongjun, Liu Zhe, Wang Yan, Liu Bin

(Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The uplink injecting and ranging performance of navigation satellite is an important guarantee of the service accuracy for satellite navigation system. A navigation satellite uplink injection and ranging performance test system is proposed in this paper. The core of the test system is the controlling and processing computer. The test system is combined with the special design of the reference frequency generator module, the reference time generator module, the injection signal generator module and general commercial instruments. The test system can real-time dynamically simulate scenarios that the orbital navigation satellite receive uplink signals from earth station. The performance of ranging and information generating and comparing can be completed. The test system is stable, flexible with high accuracy. Test software parameters can be modified to meet the new testing requirements, and so the test system is easy for upgrading.

**Keywords:** navigation satellite; uplink injection; ranging; test system

## 0 引言

卫星导航系统可发送高精度、全天时、全天候的导航、定位和授时信息, 是当今国民经济和国防建设不可或缺的重要空间基础设施。导航卫星的上行注入接收部分用于卫星定期接收地面向卫星注入广播星历、卫星钟差和卫星历书等信息<sup>[1-2]</sup>; 此外, 卫星导航系统必须保证地面站与卫星之间保持严格的时间同步, 采用星地双向时间比对技术实现星地时间同步是星地时间同步的一种主要方式<sup>[3-4]</sup>; 因此, 卫星上行接收的信息处理的准确性和伪距测量精度是保证卫星导航系统服务精度的必要途径<sup>[5]</sup>。本文提出一种导航卫星上行注入与测距性能测试系统的设计方案, 重点介绍测试系统的总体设计、各主要组成部分设计、测试系统数据处理及系统工作流程。

## 1 测试系统的总体设计

上行注入和测距性能测试系统的组成如图 1 所示, 包括: 晶振、基准频率发生器、微波切换开关、分路器、基准时间发生器、注入信号发生器、干扰信号发生器、时间间隔计数器、合路器、导航信号接收机和控制计算机等设备。

上行注入和测距性能地面测试系统上行部分主要是模拟地

面注入的上行信号, 实现对卫星上行注入的信息接收处理及星载测距接收机测距性能的测试。为了完成这些测试项目, 注入信号发生器产生模拟频率动态和幅度动态的上行注入信号, 信号通过 RF 有线接入卫星的注入接收机, 同时接收星载接收设备回传测试数据及卫星下行导航信息, 通过数据处理, 实现导航卫星上行注入与测距性能相关参数的测试。

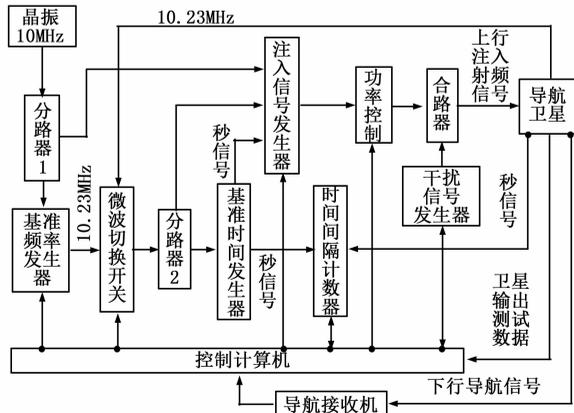


图 1 测试系统的总体组成框图

## 2 测试系统主要组成部分设计

下面对测试系统各主要组成部分设计进行描述。

### 2.1 晶振

高稳定度的恒稳晶体振荡器, 产生 10 MHz 的本振信号送

收稿日期:2014-03-13; 修回日期:2014-05-10。

基金项目:国家科技重大专项资助项目(DHZX01A01004)。

作者简介:崔小准(1970-),男,湖南益阳人,研究员,博士,主要从事导航卫星系统设计、导航信号质量评估和时延标定。

至第一分路器。晶振选用商业化仪器, 采用瑞士 OSCILLO-QUARTZ 公式的产品 OCXO8600-3 恒稳晶体振荡器, 相位噪声指标为: -113dBc@1Hz、-130dBc@10Hz、-140dBc@100Hz、-145dBc@1kHz。

### 2.2 基准频率发生器

基准频率合成器为专用设备, 其组成原理如图 2 所示<sup>[6]</sup>。

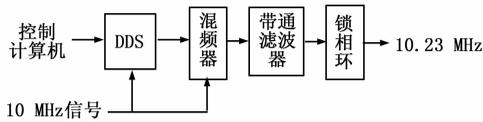


图 2 基准频率发生器原理

DDS (Direct Digital Synthesizer 直接数字频率合成器) 输出频率为 0.23 MHz, 与 10 MHz 混频后通过带通滤波器和锁相环输出 10.23 MHz 基准频率信号。根据模拟的星地动态关系, 计算机计算星地多普勒频率, 从而确定基准频率 10.23 MHz 的真实频率值, 计算机通过数据线对基准频率发生器的频率控制字寄存器中的频率控制字进行更新, 调整基准频率信号的实际频率值。例如, 如果星地为相对匀速状态, 则生成的基准频率与 10.23 MHz 之间有一个对应的恒定偏差, 该偏差值按以下公式计算:

$$\Delta f = \frac{\Delta V}{c} \times 10.23 \times 10^6 \quad (1)$$

式中,  $\Delta V$  为星地相对径向速度 (m/s);  $c$  为光速, 等于 299797458.8 m/s;  $\Delta f$  为基准频率实际生成的频率值比标称的 10.23 MHz 的变化量 (Hz)。

DDS 的输出频率值是对 10 MHz 的本振信号进行的一种频率综合。假定基准频率调整前, 输出为标称频率 10.23 MHz, 则频率控制字为:

$$F\omega_1 = \frac{0.23 \times 10^6}{10 \times 10^6} \times 2^N \quad (2)$$

式中,  $N$  为频率控制字寄存器位数。

改变基准频率发生器的输出频率增加  $\Delta f$ , 则需要将频率控制字寄存器的频率控制字更新为:

$$F\omega_2 = \frac{0.23 \times 10^6 + \Delta f}{10 \times 10^6} \times 2^N \quad (3)$$

如果星地为相对的匀加速运动, 则生成的基准频率与 10.23 MHz 之间的偏差为一个均匀的时变量。

基准频率发生器生成的基准频率信号送至微波切换开关。

### 2.3 基准时间发生器

基准时间发生器组成原理如图 3 所示。以 10.23 MHz 的基准频率信号为参考, 生成本地的 1 PPS (1 Pulse Per Second 秒脉冲) 信号时间基准, 用专用电路实现, 计数器对 10.23 MHz 进行周期计数, 每 10.23 M 个周期产生一个秒脉冲信号, 波形示意图如图 4 所示。基准时间发生器的 1 PPS 信号时间基准同时送至注入信号发生器和时间间隔计数器。

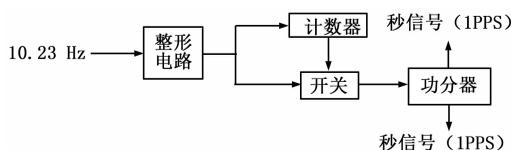


图 3 基准时间发生器组成原理

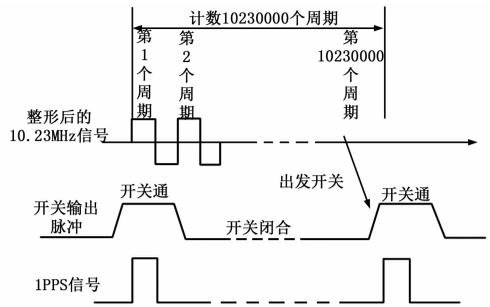


图 4 基准时间发生器波形示意图

### 2.4 注入信号发生器

注入信号发生器组成原理如图 5 所示。

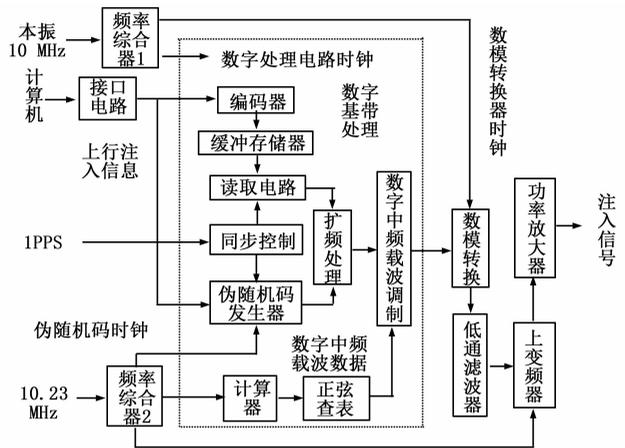


图 5 注入信号发生器组成原理

其工作过程如下:

频率综合器 1 将输入的本振 10 MHz 信号进行频率综合, 生成数字基带处理的各数字电路所需要的时钟信号以及数模转换器的时钟信号。

频率综合器 2 对输入的基准频率 10.23 MHz 信号进行频率综合, 生成伪随机码发生器的码时钟、数字中频调制载波数据的参考时钟和上变频器的本振信号。

计算机通过接口电路设定待测卫星上行注入信号的伪随机码相关参数, 进行伪随机码发生器的参数设置; 并将上行注入信息输入到注入信号发生器, 进行信道编码, 然后暂存在缓冲存储器中。

基准时间信号 1 PPS 作为同步控制的触发信号, 启动伪随机码发生器产生伪随机码序列, 并读取编码后的注入信息, 进行扩频处理。

数字中频 BPSK 载波调制对扩频处理后的数据进行中频数字载波的 BPSK 调制。

数模转换器对数字中频 BPSK 载波调制信号进行数模转换, 然后低通滤波, 通过上变频器转换为卫星注入的射频信号。

功率放大器对变频后的信号进行功率放大到一定的功率电平。

### 2.5 干扰信号发生器

通过控制计算机的控制, 生成要求的干扰信号, 设置参数

包括干扰类型、干扰信号功率等。采用商业化的通用仪器矢量信号发生器来实现干扰信号的产生，如 Agilent 公司的矢量信号发生器 E4438C。

### 2.6 功率控制电路

用于对上行注入的射频信号功率进行调整。控制计算机通过接口和驱动电路，设置功率控制电路中各微波开关的切换，设置不同的衰减量，实现上行信号电平的变化，以保证测试系统输出的注入信号到达卫星入口的电平在测试项目规定的范围。功率控制电路中，大步进功率控制段实现 0~110 dB 的衰减变化，步进最小步进量 10 dB，小步进功率控制段实现 0~11 dB 的衰减变化，步进最小步进量 1 dB，大步进功率控制与小步进功率控制联合实现总衰减量为 0~121 dB，最小步进为 1 dB。

### 2.7 时间间隔计数器

对上行注入和测距性能测试系统的基准时间秒脉冲信号与卫星导航系统的基准时间秒脉冲信号进行测量，其测量值通过接口送到控制计算机。

### 2.8 合路器

实现干扰信号和上行注入射频信号的合成，形成干扰模式下的上行注入测试信号。

### 2.9 导航接收机

导航接收机完成导航卫星下行导航信号的接收、捕获跟踪、解调、解码，将导航电文输出给控制计算机。

### 2.10 控制计算机

控制计算机主要完成如下：

- 1) 计算机通过数据线对基准频率发生器的 DDS 频率控制字进行更新，实现基准频率值的控制。
- 2) 实现微波开关切换，对本地基准频率信号和卫星基准频率信号进行选择，可实现星地同源模式的测试场景，用于卫星注入接收通道绝对时延的测试。
- 3) 进行注入信息的生成。根据测试需要，形成规定帧格式的注入数据，传输到注入信号发生器。
- 4) 控制注入信号发生器，实现待测卫星上行注入信号伪随机码发生器的参数设置。
- 5) 进行控制功率，保证注入信号发生器输出信号到达卫星注入端口的功率在测试要求所规定范围。
- 6) 读取导航卫星上行注入接收设备测试口的回传数据，进行解包，针对各注入信息星地接口协议规定，将注入数据与解包的数据按照对应关系进行比对，完成上行注入信息正确性测试。同时，提取卫星上行注入接收通道的伪距测量值，进行数据处理，得到上行注入的测距性能的测试结果。

## 3 测试数据处理和工作流程

测试数据处理是获取测距性能参数测量结果以及完成上行注入信息接收处理的正确性判断，其中测距性能参数主要包括伪距测量的随机误差、通道伪距测量的稳定性和测量通道的绝对时延，测距性能参数测试体方法可以采用多速率数字信号处理法<sup>[7]</sup>、部分相关法<sup>[8]</sup>或数字包络检波法<sup>[9]</sup>。在上行注入信息接收处理的正确性判断中，以测试计算机生成的注入信息数据作为参考，读取卫星上行注入接收回传的测试数据及导航接收机接收下行导航信号后解调的导航电文信息，根据星地接口协议的有关规定，进行信息比对，给出比对结果和接收误码率，

实现上行注入信息接收处理正确性的判断。

测试系统的工作流程如图 6 所示。

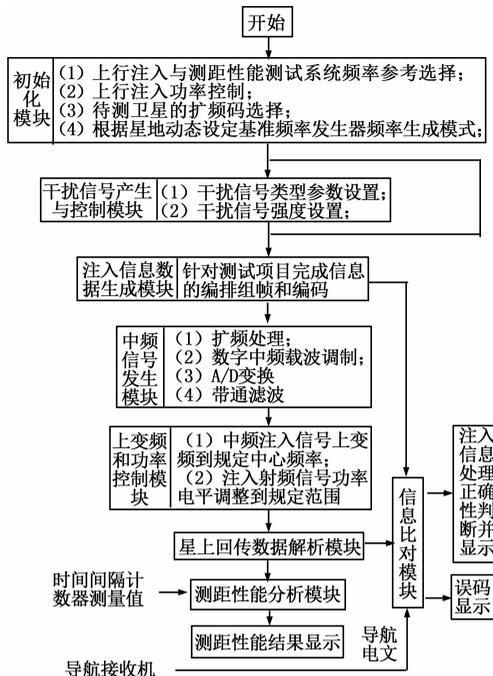


图 6 测试系统的工作流程

## 4 测试系统试验结果

以卫星的某状态测试阶段上行注入接收测距性能的随机误差测量为例。完成上行通道伪距值测量后，运行测距性能分析模块，进行随机误差数据处理，数据处理界面如图 7 所示。

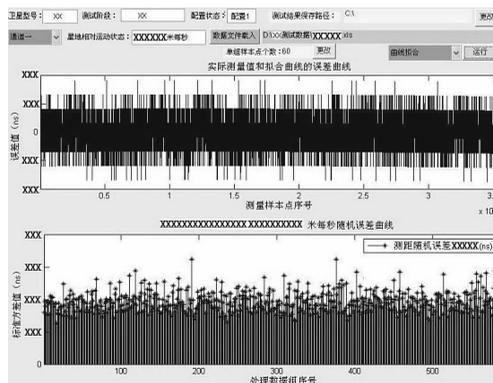


图 7 随机误差数据处理界面

## 5 结论

测试系统以控制处理计算机为核心，结合了专用设计模块和通用商业化仪器，遵循先进测试系统的最新理念<sup>[10]</sup>：模块化和自动化，具体优势主要为：

- 1) 采用控制处理计算机控制基准频率发生器生成的基准频率信号，能实时动态地模拟卫星在轨期间与地面的多普勒效应，为测距性能的考核提供一个与实际在轨状态基本一致的测试条件，保证了上行注入测距性能的测试结果真实可靠；

(下转第 2349 页)

际值从而导致圆度误差较大。

表 3 可以看出, 微分逼近几何反求法和带半径约束的 hough 圆检测法测量的圆度误差和圆弧角度波动较大, 刀尖放置角度、刀尖半径会显著影响测量结果。相比之下, 本文算法测量的各刀尖圆度误差约  $10 \mu\text{m}$ , 圆弧角度约  $107.7 \pm 0.5^\circ$ , 更稳定、更符合刀具研磨实际, 侧面证明了本文算法的正确性。

从运行效率上, 由于微分逼近几何反求法需逐点进行直线拟合, 带半径约束的 hough 圆检测法需进行 hough 圆检测、寻找最佳拟合圆, 运行速度较慢。本文算法分离圆弧时采用三点定圆方法直接计算圆方程, 取代最小二乘圆拟合, 显著提高处理效率。

### 3 结束语

圆弧刃刀具刀尖圆弧参数会影响加工尺寸精度、表面质量和刀刃耐用度, 刀具研磨、精密制造、摩擦学、表面学分析等领域急需达到微米甚至亚微米的测量设备。

本文提出一种基于显微镜和 CCD 的测量方案, 采用滑动窗口三点定圆实现圆弧初始定位和空间矩法检测亚像素边缘, 利用最小二乘法进行亚像素边缘圆拟合, 实现精度达到亚微米量级的圆弧刃刀具刀尖圆弧精密测量。

算法采用形态学运算优化分割结果, 提取出完整的刀尖像素级边缘; 采用滑动窗口三点定圆法, 根据局域半径方差分离出直线刃和圆弧刃, 运算效率优于现有方法; 实验对比现有亚像素定位法, 采用鲁棒性更好的空间矩法, 计算亚像素边缘点; 最后对亚像素边缘进行最小二乘法圆拟合, 计算刀尖圆弧

各参数。

实验结果表明, 本文算法具有 3 个优点: 1) 能消除研磨本底噪声影响; 2) 准确分离刀尖直线刃与圆弧刃; 3) 快速准确实现圆弧亚像素参数测量。

目前, 该算法已成功运用于实际项目中, 软件性能指标可以达到: (1) 可测量  $0.2 \sim 0.8 \text{ mm}$  的刀尖 (更大的需更换物镜以获得更大视场); (2) 半径、圆度误差测量精度达亚微米量级, 角度测量精度达  $0.1^\circ$ 。

#### 参考文献:

- [1] 程 玉, 黄 康. 数控加工中刀尖圆弧半径补偿与刀具磨耗补偿实例分析 [J]. 机床与液压, 2011, 39 (2): 34-36.
- [2] 周建来, 杜玉玲, 陈书法, 等. CNC 编程中刀尖圆弧半径的测量方法和加工精度 [J]. 新技术新工艺, 2004, (8): 22-24.
- [3] 刘力双, 王宝光, 张 挑, 等. 刀具预调测量仪系统的研究 [J]. 制造技术与机床, 2005, (10): 67-69.
- [4] 李增强. 圆弧刃金刚石刀具刀尖圆弧的机械研磨及其检测技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [5] 周 洋. 图像式刀调仪视觉检测技术研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [6] S Yaceng, C Jing, T Junwei. The Research of the Measures Algorithm of the Parameter of the Cutter [J]. Image, Graphics and Signal Processing, 2011, (1): 45-52.
- [7] 尚雅层, 陈 静, 田军委. 高斯拟合亚像素边缘检测算法 [J]. 计算机应用, 2011, (1): 179-181.
- [4] 王 岗, 李 莘, 吴春邦. 星地双向时间比对技术中伪距及其时刻的处理方法 [J]. 空间电子技术, 2007, 4 (2): 35-56.
- [5] 龙运军, 陈英武, 邢立宁, 等. 导航卫星上行注入任务调度模型及启发式算法 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 25 (2): 34-39.
- [6] Felbatch D, Heimbueger D, Herre P, et al. Galileo Payload 10.23 MHz Master Clock Generation with a Clock Monitoring and Control Unit (CMCU) [A]. 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum [C]. 2003: 583-586.
- [7] 崔小准, 米 红, 李 懿, 等. 一种全球定位系统卫星 C/A 信号通道绝对时延标定算法 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46 (11): 1843-1847.
- [8] Cui X Z, Li P, Hu C B, et al. Delay calibration algorithm for BOC channel of RNSS using partial correlation [A]. IEEE 14th International Conference on Communication Technology [C]. Chendu, 2012: 1344-1348.
- [9] 崔小准, 李 懿, 武向军, 等. Measuring absolute delay of RNSS signal channel using digital envelope detection [J]. Journal of Donghua University, 2013, 30 (2): 114-117.
- [10] 崔小准, 李 懿, 刘庆军. 导航卫星导航信号频谱自动检测与判读软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (1): 4-6.

#### 参考文献:

- [1] 金国平, 王茂磊, 范建军, 等. GPS 上行注入系统探析及思考 [J]. 计算机与网络, 2012, 38 (16): 48-51.
- [2] Journ S, Poumailloux J, Piéplu J M, et al. Producing the Galileo Services From the Ground Mission Segment (GMS) [A]. ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division [C]. Fort Worth, 2006: 504-519.
- [3] 吴海玲, 郭树人, 樊士伟. 无源卫星导航系统星地双向无线电时间比对实现 [J]. 全球定位系统, 2003, 28 (5): 36-40.

(上接第 2342 页)

2) 利用导航信号接收机接收和解调导航信号, 提取导航电文, 通过控制计算机完成导航卫星上行注入性能中信息处理功能的星地大环路比对, 实现整星对上行注入信号信息处理的正确性验证测试;

3) 控制计算机控制独立的干扰信号发生器, 干扰信号的期望特征可以通过控制计算机软件更改, 满足测试需求的变更和扩展;

4) 注入性能测试中电文信息的生成和比对都是通过控制计算机的软件来实现的, 可以通过修改测试软件来满足新的测试要求, 便于测试系统的升级改造。