

基于高轨导航接收机的自动化地面测试系统

宁相伟¹, 邓 玥¹, 周凡卉², 赵鹏飞¹, 王 阔¹

(1 中国空间技术研究院遥感卫星总体部 北京 100094

2 中国空间技术研究院总体设计部 北京 100094)

摘要: 高轨卫星导航接收机是实现高轨航天器自主定轨的核心设备。为在地面测试阶段对高轨卫星导航接收机进行充分高效的验证, 亟需设计基于高轨卫星导航接收机的地面测试系统。设计了一种基于高轨卫星导航接收机的自动化地面测试系统, 主要创新点如下: 第一, 本系统可对高轨卫星导航接收机实际在轨状态下接收到的导航星座信号进行仿真; 第二, 具有模拟包含北斗三号等多导航卫星星座信号的功能; 第三, 本系统充分考虑自动化、通用化与一体化设计。提出的基于高轨卫星导航接收机的自动化地面测试系统能够在地面测试阶段对高轨卫星导航接收机进行充分验证, 并充分考虑测试实施, 从自动化、通用化、一体化方面提升测试效率, 减少人为操作失误导致的质量问题, 解决人工判读带来的误判漏判问题。

关键词: 高轨卫星导航仿真器; 北斗三号星座仿真; 自动化; 地面测试系统设计

中图分类号: V554+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)05-0044-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211117001

引用格式: 宁相伟, 邓玥, 周凡卉, 等. 基于高轨导航接收机的自动化地面测试系统[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 44-52.

The design of automatic ground test system based on high orbit satellite navigation receiver

NING Xiangwei¹, DENG Yue¹, ZHOU Fanhui², ZHAO Pengfei¹, WANG Kuo¹

(1. Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

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

Abstract: High orbit satellite navigation receiver is the core equipment to realize the autonomous orbit determination of high orbit spacecraft. In order to verify the high orbit satellite navigation receiver sufficiently and efficiently in the ground test stage, it is urgent to design the ground test system based on the high orbit satellite navigation receiver. In this paper, an automatic ground test system based on high orbit satellite navigation receiver is designed. The main innovations are as follows: Firstly, the system can simulate the navigation constellation signals received by high orbit satellite navigation receiver on orbit; Secondly, the navigation simulator has the function of simulating Beidou 3 constellation signal; Finally, the system sufficiently considers automation, generalization and integration design. The automatic ground test system based on high orbit satellite navigation receiver proposed in this paper can sufficiently verify the function and performance of high orbit satellite navigation receivers in the ground test stage. Considering the test implementation, this system can improve the test efficiency from the aspects of automation, generalization and integration and reduce the quality problems caused by human operation errors which can totally solve the problems of misjudgment and omission caused by manual interpretation.

Key words: High orbit satellite navigation simulator; Beidou 3 constellation simulation; Automation; Design of ground test system edge correlation

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211117001

Citation: NING Xiangwei, DENG Yue, ZHOU Fanhui, et al. The design of automatic ground test system based on high orbit satellite navigation receiver[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 44-52.

引 言

随着海洋通信、气象勘测、灾难预警、教育应用、电视直播、陆地应用等各个应用领域对高轨卫星的使用需求增加，高轨卫星数量也在不断增加^[1]。卫星本身对于其在轨过程中的精度测量要求也越来越高。常用的通过地面测控进行卫星定轨的方法不具有自主性且不满足卫星高精度定位的要求^[2]。因此，为实现高轨航天器自主定轨与提升定位定轨精度，将高轨卫星导航接收机引入到星上^[3]。

全球卫星导航系统具有实时性高、自主性强、精度较高、成本较低的特点^[4,5]。高轨卫星导航信号接收方式具有独特性，由于导航星天线的特点为朝向地球且具有高指向性，高于导航星轨道的高轨星用户只能接收从地球另一侧发射的导航星信号或来自方向图的旁瓣信号，因此高轨导航接收机可接收到的导航星数量较少，信号功率也十分微弱^[6-9]。

为适应高轨卫星导航接收机在轨实收信号特点，在地面测试阶段充分、有效地验证其功能性能，亟需设计高轨导航卫星接收机地面测试系统^[10,11]。本文针对目前高轨导航信号仿真能力不足、无法覆盖BD3星座导航信号、测试系统自动化能力不足、无法通用化等问题，将主要工作聚焦于自动化的高轨卫星导航接收机地面测试系统设计，主要创新点为以下三个方面：第一，建立高动态轨道仿真模型，模拟高轨星与导航星座相对位置，充分考虑电离层、对流层与多径对信号传输的影响，真实产生贴合高轨卫星在轨实际接收情况的导航信号；第二，随着自主可控的BD3导航星座^[12,13]的建立，系统可仿真BD3星座运行情况并产生BD3的新式电文，可适应所有BD3型号导航接收机的测试工作；第三，实现了自动化、通用化与一体化设计，充分考虑测试痛点，结合高轨导航接收机经典测试项目内容与流程，完成了指令发送-动作判读-数据判读全过程自动化设计，极大地提升了测试效率，减少了对于人员的专业性要求，解决了人工判读带来的误判漏判问题。

1 系统构架设计

高轨卫星导航接收机自动化地面测试系统由总控服务器、高轨全球导航卫星系统（GNSS）地面仿真器与多台测试终端三部分组成，如图1所示。总控服务器上部署主测试处理机（MTP）模块与数据判读服务器（RTS）模块；高轨GNSS地面仿真器由远程控制模块、数学轨道仿真模块，硬件驱动模块，基带、变频器等射频信号硬件集成组成；测试终端上部署功能自动化用例执行模块与一键化数据包判读模块。高轨GNSS地面仿真器为测试系统核心设备，数学轨道仿真模块为核心设备核心模块。

设备间通信过程如下：测试终端通过网络发送指令给总控服务器，总控服务器负责分发指令给系统内设备或星上，高轨GNSS地面仿真器接收指令后开始工作，进行高轨星座与特定用户星座综合动态仿真，产生射频信号供高轨GNSS接收机使用，并传递工作状态给总控服务器，总控服务器将星上数据与地面系统工作状态数据分发给各测试终端进行检测与判读。

系统设计过程中充分考虑了自动化、通用化与一体化。主要体现为：

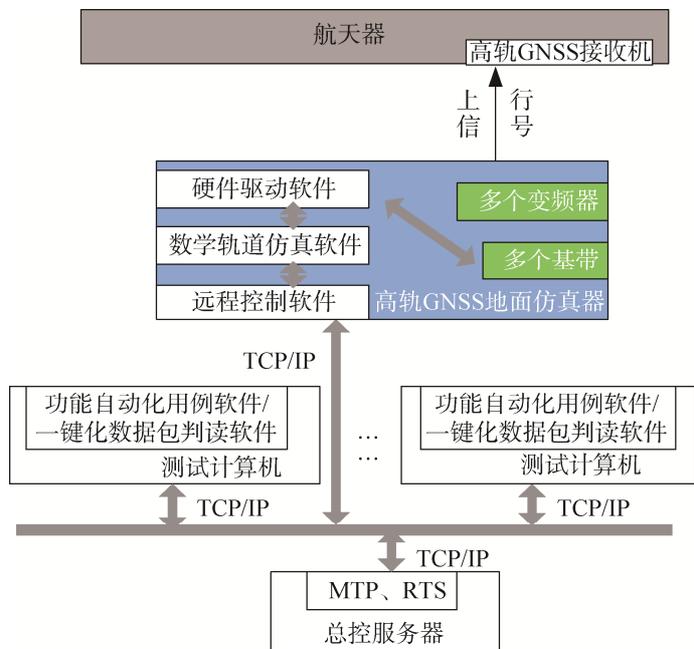


图 1 GNSS 自动化地面测试系统组成

Fig. 1 The composition of the automatic ground test system for high orbit satellite navigation receiver

① 自动化设计: 地面设备开机后进入测试准备状态, 测试人员可与测试设备分离, 直接使用测试终端操作整个地面测试系统, 通过与功能自动化用例模块软件界面的交互, 执行自动化测试用例, 按照设计时序调动星上各分系统与地面系统各设备, 对执行情况进行自动化判读; 通过与一键化数据包判读模块软件界面的交互, 接收总线与固存中的数据, 对数据的物理含义进行基于先验知识的自动化判读, 自动生成供测试人员阅览的测试报告。

② 通用化设计: 系统间可通过 IP 与端口号配置方法实现任意设备的替换; 模块中仿真起始时间, 被测卫星轨道、导航星类型、电离层选型、对流层选型、多径效应选型、导航星电文、导航星数量、可见性模型等关键参数均可配置, 可完成不同型号、不同轨道的高轨 GNSS 接收机测试验证; 可完成包含 BD 星座、GPS 星座、GLONASS 星座与 Galileo 星座的全球定位星座信号的仿真, 可依据星上 GNSS 接收机类型进行配置。

③ 一体化设计: 将核心功能整合到一台核心设备中, 实现了模块与硬件的一体化设计, 集成性好且易于运输。

2 系统设计方案

2.1 总控服务器

总控服务器负责整理、存储、接收、发送星上或地面设备的遥测遥控信息, 测试人员通过测试终端发送的星上与地面设备的操作指令, 均通过总控 MTP 产生, 收到的遥测数据与地面设备状态数据, 均通过总控 RTS 分发给地面各终端。

MTP 通过指令协议层中信息区分指令目的地, 发送给星上的指令通过地面遥控设备转化为射频信号发送给测控分系统, 经综合电子分系统解析后分发给星上执行设备; 发送给高轨 GNSS 地面仿真器的指令通过 TCP/IP 协议直接转发给设备, 设备解析后驱动软件进行相应动作。MTP 支持转发指令历史记录存储, 可进行智能指令回查。

RTS 主要功能为收集星上遥测信息与地面设备信息, 建立数据库存储数据, 并将数据实时转发给各测试终端进行智能判读。原始二进制数据通过 RTS 转发后, 可进行数据包判断与解析, 在各测试终端上显示对应遥测值与其物理含义, 各分系统通过信息判断星上与地面系统工作健康状态, 形成动作闭环。RTS 支持信息存储, 可根据遥测代号回查任意时间段遥测信息。

2.2 高轨 GNSS 地面仿真器

高轨 GNSS 地面仿真器是高轨卫星导航接收机自动化地面测试系统的核心设备。

其中, 远程控制模块负责与总控服务器建立连接, 按照规定协议将数学轨道仿真模块与硬件驱动模块的关键工作信息传输给 RTS, 并接收来自 MTP 的仿真器控制指令, 转发给数学轨道仿真模块与硬件驱动模块; 除此之外, 远程控制模块还具备任意轨道起点仿真设置计算功能, 依据测试需求计算数学仿真器需要设置的起始时间与起始点位并转发, 方便了整星模式测试使用。其具有通用性, 可依据配置连接服务器与仿真器。

数学轨道仿真模块是高轨 GNSS 地面仿真器中的核心模块, 包含高轨卫星与导航星的轨道计算模型, 可见性分析模型、可用星筛选模型、电离层延迟模型、对流层延迟模型、多径效应模型、导航天线与被测接收机天线方向图模型, 导航电文生成模型等贴合高轨卫星在轨运行实际情况的物理仿真模型。可依据导航卫星轨道六根数实时动态仿真选用导航星座中各导航卫星位置与用户高轨卫星位置, 显示三轴位置、速度与加速度信息; 再通过综合考虑地球遮挡的可见性模型计算, 计算当前时间用户星可见的导航星 PRN 代号; 通过功率筛选模型替代 PDOP 筛选模型进行播发导航星筛选, 由于可见星大多为对侧星, 高轨接收机接收到导航信号强度成为筛选关键; 筛选后的导航星与用户星间经过信号强度计算, 再经过电离层延迟、对流层延迟、多径效应等模型对于相位群延迟的修正, 得到导航信号到达高轨用户卫星的功率值, 各通道功率输出结果与导航电文中需要填充的计算值为数学轨道仿真模块向硬件驱动模块传递的主要参数内容。

硬件驱动软件接收数学轨道仿真软件输入的信号控制要求，按照导航星座对应的信号调制方式与频点信息智能调配资源池中的硬件设备，实现设备的最大复用，并按照导航电文组合与播发方式实现数据实时调度与数据层组包，形成各导航星的动态数据包。

多通道硬件基带各导航星接收数据包与驱动软件设置的调制方式进行信号调制，生成中频调制信号，中频信号经过上变频器变频成为可供星上高轨 GNSS 接收机测试使用的模拟射频信号。

2.3 测试计算机

测试终端是各分系统测试人员使用的终端设备，高轨卫星导航接收机自动化地面测试系统的功能自动化用例模块/一键化数据包判读模块部署在测试计算机上。

功能自动化用例模块可将系统化功能测试的指令序列自动发送给 MTP，并接收 RTS 反馈的遥测信息，自动化判读星上与地面设备的指令动作反映情况。通过测试用例的设计，可固化测试流程，严格控制时序，适用于复杂分系统间与地面测试系统之间的配合测试。执行自动化测试用例，可实现测试过程一键化。

一键化数据包判读模块主要用于对高轨 GNSS 接收机输出给星上其他分系统的数据包进行判读，将星上总线上传的数据通过总线监视器接收，分离出高轨 GNSS 接收机产生的数据包，通过该软件可一键化实现“数据帧截取-数据帧判读-数据包截取-数据包判读-对应参数解析-参数自动判读-生成测试报告”的测试流程，设计定制化判读进行基于先验知识的逻辑判读、时序判读，生成测试报告供测试人员进行高轨 GNSS 接收机功能与性能验证。

3 模块实现方法

远程控制模块以网络通信与数据传输、中转、存储为主，是实现测试中人与设备分离的关键；数学轨道仿真模块为本系统核心模块，包含众多高轨用户星适用的高动态轨道模型、物理环境模型、计算筛选模型等，是地面测试贴合高轨 GNSS 接收机在轨实收状态的关键保障；硬件驱动模块是实现射频信号生成与电文调制的重要一环，可智能调配资源池中硬件设备；功能自动化用例模块是固化系统性测试过程、实现复杂任务自动化测试的交互窗口，可统一调度星上与地面系统资源完成设计动作，并自动判读动作执行情况；一键化数据包判读模块针对高轨 GNSS 接收机产生的各类大量数据包进行基于先验知识的自动化判读，可设计定制化判读规则对原始数据进行自动判读。

3.1 远程控制模块

远程控制模块负责收集高轨 GNSS 地面仿真器关键工作信息，传输给总控服务器入库，并接收来自总控 MTP 的设备控制指令，执行相应指令并转发给数学仿真软件，其包含参数配置子模块、数学仿真状态采集子模块与工作状态记录子模块三部分。远程控制模块软件界面如图 2 所示。

参数配置子模块具体设计如下：通过 TCP/IP 协议建立总控服务器监听状态与识别信号源自动连接。其中，可配置的有总控服务器的 IP 地



图 2 远程控制模块软件界面
Fig. 2 The interface of remote control software

址、端口号、航天器编号、设备代号、设备编号, 可依据总控空闲状态配置后连接总控服务器; 信号源在本设备中通过端口方式进行数据通信, 需要按特定内容配置; 可配置远控软件是否给总控服务器反馈信息及反馈周期, 如总控服务器负荷数据量较大则可延长反馈周期; 可配置用户卫星星时基准时间、分离时间与定轨等待时间, 通过与输入的任务星时自动协同计算出任务需要的起始时间与起始点位, 可一键化设置测试中整星任务的起始轨道点; 数学轨道仿真模块建立的经典测试场景可存储在远程模块中, 通过总控服务器分发的指令直接调用。远程控制模块任务时间及点位计算过程如图 3 所示。

数学仿真状态采集子模块可将数学仿真软件中关键运行信息提取到远程控制软件中。按照约定的信息代号与信息内容传输给总控服务器中的 RTS。传递参数可定制化配置, 目前的经典配置内容包括数学仿真模块的仿真开始时间、设备健康状态、轨道运行状态、当前运行 UTC 时间、仿真结束时间、电离层开启状态、场景设置、频点开启状态、信号源连接状态与点位起始时间等。

工作状态记录子模块可显示与存储远程控制模块的人为操作历史与数据交互状态, 便于操作记录回查与指令信息回查。

3.2 数学轨道仿真模块

数学轨道仿真模块为高轨 GNSS 地面仿真器的核心计算模块。数学轨道仿真模块主要设计内容包括高轨卫星与导航星的轨道计算、可见性分析、可用星筛选、电离层延迟计算、对流层延迟计算、多径效应计算、导航天线与被测接收机天线方向图计算、导航电文生成等, 最终形成信号控制要求贴合高轨 GNSS 接收机在轨动态实收过程。

模块设计方式与功能均针对高轨星信号仿真需求具体设计规则如下:

① 仿真时间设置与运行: 仿真起始与终止时间可设置, 用来规定仿真场景工作范围, 起始时间对应产生第一拍轨道六根数; 仿真器内部包含 10 MHz 时钟, 可产生同步信号, 仿真步长最小可至 20 ms/帧; 时间运行过程中充分考虑闰年变化与星时跳秒变化, 贴合时间运行规律。

② 导航星座类型配置方式: 可配置 GPS、BD3、BD2、GLONASS 等导航星座中的多种组合星座输出, 依据星座选择调用信息库配置具体频点与频点调制方式, 然后发送给硬件驱动模块。

③ 可见性分析模型设计: 不同轨道卫星可见导航星模型如图 4 所示, 低轨用户卫星轨道高度往往低于导航卫星, 同侧星可见性强, 可见性模型较为简单; 高轨用户卫星受轨道高度与方向图影响, 即使导航卫星 1、2 处于高轨卫星天线主波束范围内, 由于导航卫星天线方向图指向地面, 也将导航卫星 1、2 视为不可见; 只有地球对侧卫星, 如导航卫星 3、4 在高轨卫星天线主波束范围内, 天线方向图指向相对, 才可视为可见卫星。

因此, 为贴合高轨卫星在轨实际接收状态, 在数学轨道仿真模块中建立了高轨动态地球切线选星模型, 如图 5 所示。设计地球切线方法对导航星屏蔽角进行计

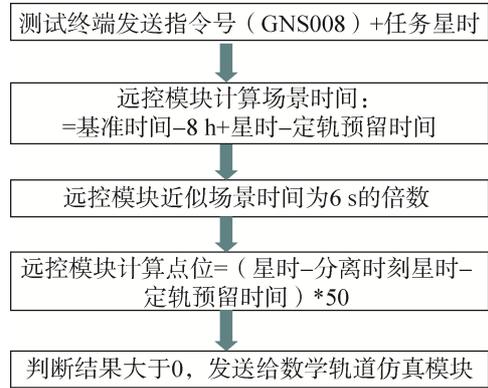


图 3 远程控制模块任务时间及点位计算过程
Fig. 3 Task time and position calculation process of remote control software

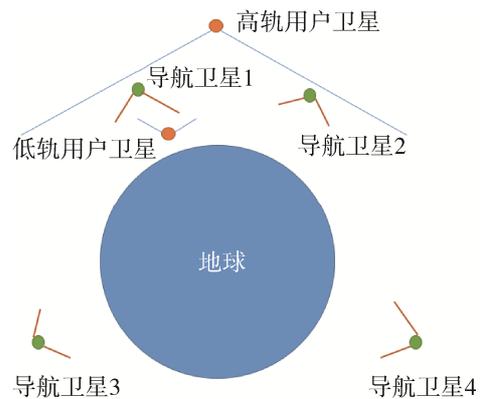


图 4 可见性分析模型
Fig. 4 Visibility analysis model

算，避免由于屏蔽角始终大于卫星高度角而导致无导航星可见的情况。当导航星相对高轨卫星载体的高度角与设置的屏蔽角满足以下公式时，地球切线方法认为导航星为可见星。

$$\frac{\pi}{2} - \theta < \pi - \alpha - \arcsin \frac{R_e}{\sqrt{X_{\text{geo}}^2 + Y_{\text{geo}}^2 + Z_{\text{geo}}^2}} \quad (1)$$

式中， θ 为导航星相对高轨卫星载体的高度角， α 为屏蔽角， R_e 表示地球半径， X_{geo} 、 Y_{geo} 、 Z_{geo} 表示高轨卫星载体的三维位置。

同时，建立导航卫星与高轨用户卫星天线方向图用于可见性计算。建立链路仿真模型，接收天线输送给匹配负载的功率 P_r 与发射天线输入功率 P_t 之间的关系可表示为：

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_0 \quad (2)$$

式中， P_t 为导航卫星的发射功率（依据导航星座发射机情况决定）， G_t 为导航卫星的发射天线增益， G_r 为高轨卫星导航接收机的接收天线增益， L_0 为电磁波在空间传输中的损耗，主要包括传输路径损耗、大气损耗、极化误差损耗等。

在轨实收情况与实际仿真情况相同，高轨 GNSS 接收机可见星往往来自地球对侧或方向图旁瓣，由于传输距离较长且方向图增益较小，高轨导航接收机接收到信号功率较小。部分可见卫星由于功率不足以满足接收灵敏度要求而成为无效卫星，因此数学轨道仿真软件选择卫星输出时应优先考虑输出功率较强的导航星信号。

可通过天线方向表格导入方式建立高轨卫星接收天线方向图模型与导航卫星发射天线方向图模型，由高轨卫星与导航卫星相对位置确定导航卫星的发射天线增益 G_t 与导航接收机的接收天线增益 G_r 。

④ 环境模型建立：为贴近在轨实际情况，需要对空间环境中的信号干扰因素进行建模，主要包含电离层模型，对流层模型与多径模型。电离层与对流层受高轨用户星与导航星相对位置影响，可分为两次穿过与未穿过模型，可依据相对位置与电离层、对流层高度动态计算。

⑤ 高轨用户卫星与导航卫星点位计算模型，通过仿真起始时间与轨道六根数计算对应时间的三轴位置与速度信息，统一坐标系后计算相对关系，并按照时间轴进行轨道位置速度逐秒积分计算。

3.3 硬件驱动模块

硬件驱动软件依据数学仿真软件要求智能调配硬件资源，按照信号数量、信号功率、调制方式、频点信息、电文内容映射对应硬件，生成射频信号经合路后统一输出；同时可驱动自身秒脉冲信号与 10M 时钟信号输出，可用于设备校准与外部设备使用；除数学轨道仿真软件控制模式外，还可屏蔽软件控制，直接生成载波信号，供设备校准使用。

3.4 功能自动化用例模块

功能自动化用例模块如图 6 所示。该模块提供各类脚本功能供用例设计人员调用，通过调用脚本按测试需求可设计自动化序列，固化序列完成测试过程的控制，可达到地面设备与星上分系统间紧密协同工作，在指令发出之后对相应设备执行情况进行自动化判读。

目前经典脚本功能包含直接指令发送、设置指令发送、判别参数范围、判别参数变化、设置等待时间、添加文字描述等。使用脚本设计自动化执行序列，序列串行执行并可设置断点。目前设计的高轨卫星导航接收机地面测试系统的经典用例包含高轨卫星 GNSS 接收机开机/关机用例、高轨卫星入轨模拟飞行用例、高轨卫星主动段模拟用例、高轨卫星任务时间跳时用例等，还可根据测试要求扩展其他用例。

截取高轨卫星 GNSS 接收机开机用例中涉及高轨卫星导航接收机地面测试系统相关部分如图 6 所示，首先，判别星上时间在设计场景开始范围内，然后，发送设置指令启动预设仿真场景，数学仿真软件开始工作，判断数学仿真软件工作场景是否满足设计规定要求，等待 5 秒后对运行状态进行再次判读

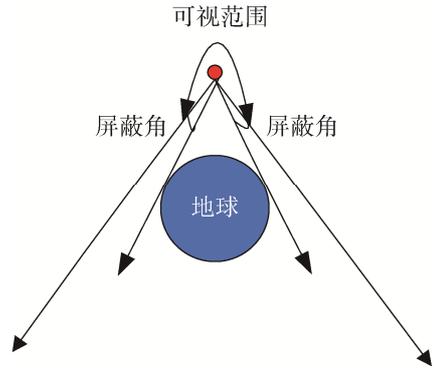


图 5 高轨卫星地球切线选星模型
Fig. 5 High orbit satellite selection model using the tangent line of earth

确认运行顺利, 完成动作闭环。除此之外, 功能自动化用例模块也可给星上测控、控制、载荷、导航等各个分系统发送指令, 通过遥测判断动作是否闭环, 通过串行顺序完成星地一体化自动化协同工作。

3.5 一键化数据包判读模块

高轨 GNSS 导航接收机工作期间需要给整星的其他分系统提供类型繁多的数据包, 包含定位定轨数据包、原始观测量数据包、轨道预测数据包、秒脉冲数据包、整秒

时间数据包等, 是维持整星正常工作任务的重要数据。因此需要对其进行严格判读, 又由于数据包更新周期短、内含数据量大, 人工判读无法高效可靠地完成测试, 容易出现误判、漏判问题。

一键化数据包判读模块可按照数据包定义、解析方式与判读方式, 定制对应数据包的解析判读规则。自动化处理步骤如下: ① 调用定制数据包格式定义, 按照标识、长度等信息对数据包进行分帧处理, 自动化判读帧长、帧头与指定位置是否满足定义要求, 判读帧内数据是否存在误码; ② 去除格式中帧头帧尾, 提取数据域并将数据域按照包头、包尾与包长进行分包处理; ③ 按照定制数据包中对应位置的物理意义与处理公式分别对大量包数据逐条解析, 得到物理含义与对应的物理数据; ④ 对物理含义依据先验知识对应的判读规则进行自动判读, 包含数据连续性、数据遍历性、数据比对、数据范围统计、数据平均值、数据最频繁值、依据数据画图、比对数据图像等, 可根据卫星特性进行定制化设计。⑤ 最后将判读结果自动生成判读报告, 使测试数据可视化, 供测试人员检查。

也可将星上产生数据包与地面系统仿真结果进行动态比对, 验证高轨 GNSS 接收机信息处理正确性及处理精度。

4 系统应用情况与使用过程

针对高轨 GNSS 接收机的经典测试过程包括高轨导航接收机功能性能测试(分系统级测试)与卫星典型工作模式验证(整星级测试)这两部分。通过这两项测试可保障高轨 GNSS 接收机在轨可稳定运行, 对可靠性与功能性进行充分验证。高轨卫星导航接收机自动化地面测试系统可实现以上两项测试。

4.1 高轨导航接收机功能性能测试过程

使用该系统进行某高轨卫星导航接收机功能性能测试, 测试过程如图 7 所示。建立状态后该测试系统可进行全部分系统级测试, 包括导航信噪比检查、导航状态遥测检查、接收导航星个数与稳定性检查、定位定轨时间检查、总线数据包检查。图中方形标记为需人工参与, 圆形标记为软硬件自动化执行, 可以看到该测试系统在高轨导航接收机分系统测试中基本实现了自动化测试过程, 测试数据经过验证可靠有效。导航相关数据包中包含星上解析的定位定轨数据包, 通过一键化数据包判读软件可自动解析生成定位定轨信息, 并与仿真器中仿真轨道位置信息进行比对, 计算定位定轨位置与速度精度, 完成对高轨导航接收机定位定轨精度实时评估。通过对星上捕获星、可用星、信噪比及定位定轨状态遥测的长期判读, 可完成对在轨信号情况的地面评估。

4.2 高轨卫星典型工作模式验证测试过程

使用该系统进行某高轨卫星典型工作模式验证测试, 测试过程如图 8 所示。使用用例建立整星典型工作模式, 注入典型自主任务, 整星任务执行后导航数据随固存数据下传至地面设备, 进行数据包自动化判读。图中方形标记过程需人工参与, 圆形标记过程为软硬件自动化执行, 可以看到该测试系统在高轨卫星典型工作模式验证测试中基本实现了自动化测试过程, 经过验证测试数据可靠有效。

				判读下限	判读上限	判读时间
状态判读	判读参数...	A070, 8字节时间码秒		157802630	157802635	600
发送指令	设置指令	GNS001, 启动仿真场景,				
状态判读	判读参数...	SG007, 场景设置		1	1	600
状态判读	判读参数...	SG008, GPSL1频点开启状态		1	1	60
状态判读	判读参数...	SG009, GPSL2频点开启状态		1	1	60
状态判读	判读参数...	SG013, ED3B1C频点开启状态		1	1	60
状态判读	判读参数...	SG014, ED3B2A频点开启状态		1	1	60
	判读参数...	SG006, 电离层开启状态		1	1	60
	判读参数...	SG002, 设备健康信息		0	0	60
	判读参数...	SG003, 轨道运行状态		1	1	60
等待时间	等待	等待6秒				
	判读参数...	SG003, 轨道运行状态		1	1	60
	等待	等待6秒				
	判读参数...	SG003, 轨道运行状态		1	1	60
文字描述	文字描述	105; 状态设置: 主控机->软控...				

图 6 功能自动化用例软件

Fig. 6 Use case software for automation

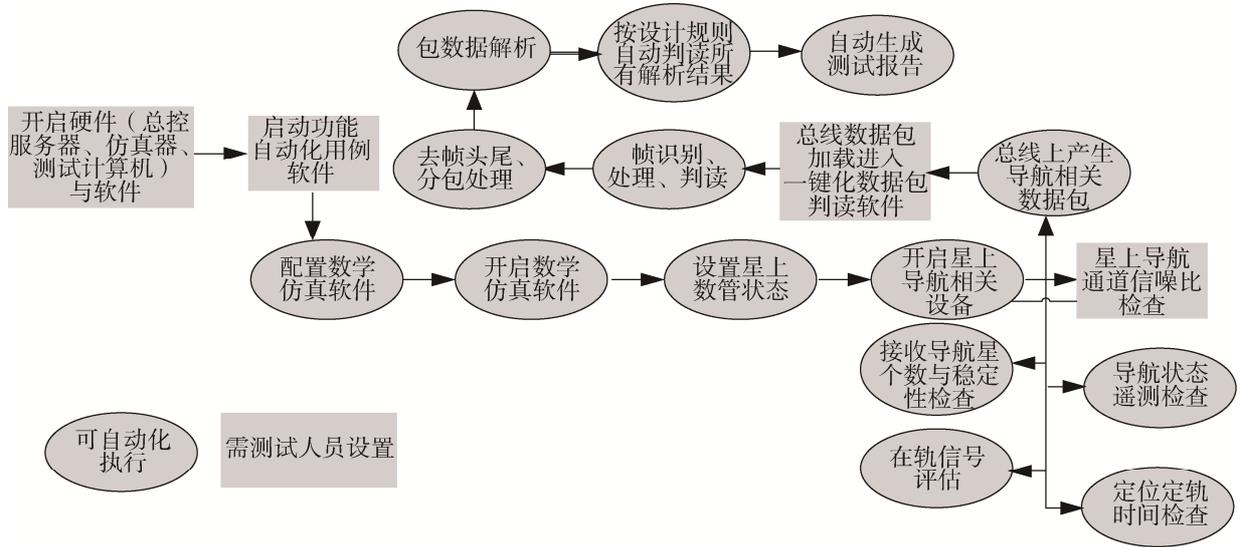


图7 高轨导航接收机功能性能测试过程

Fig. 7 The process of the function and performance test for high orbit satellite navigation receiver

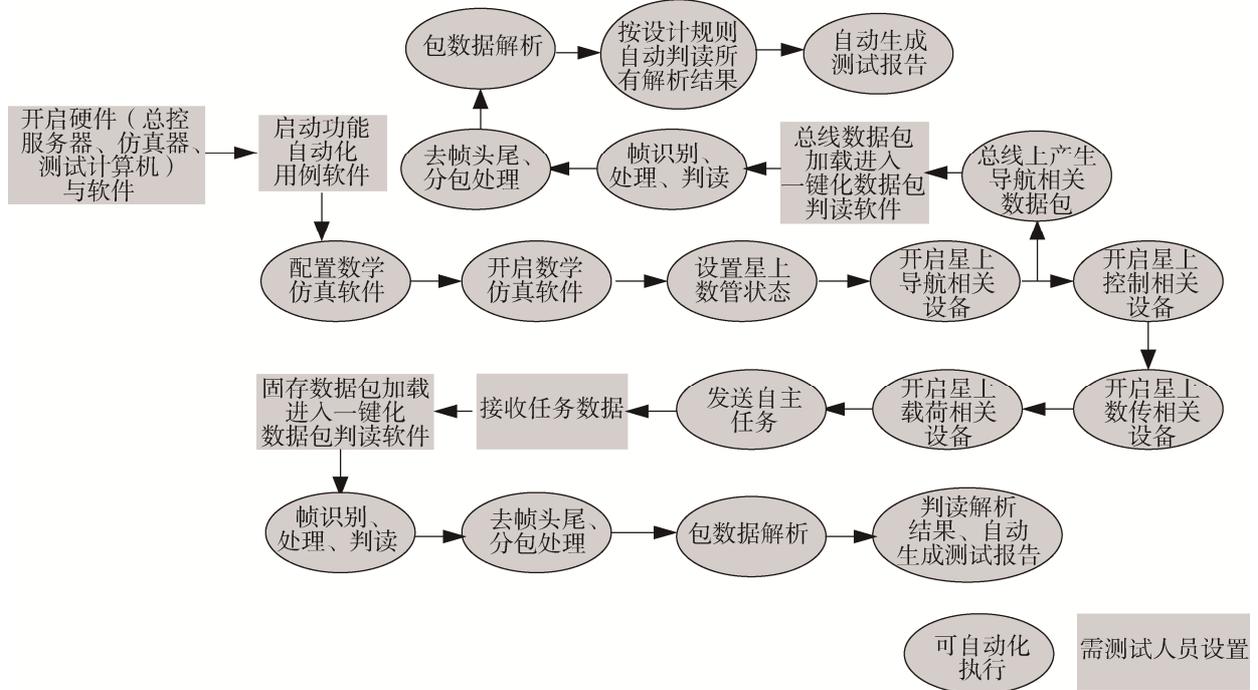


图8 高轨卫星典型工作模式验证测试过程

Fig. 8 Test process of the working mode of high orbit satellite navigation receiver

5 结束语

基于高轨导航接收机的自动化地面测试系统解决了高轨导航接收机测试问题，在地面测试阶段可动态模拟多类星座，多通道射频信号供高轨导航接收机使用；根据 BD3 星座在轨状态不断完善仿真器中对于 BD3 星座的仿真，目前已贴近在轨状态；测试系统充分考虑一体化、自动化与通用化设计，最小化测试设备范围，基本实现测试过程与数据判读的全自动化，可用于多颗高轨星座导航接收机测试。本文所设计测试系统提升了测试效率，减少了人为操作失误导致的质量问题，解决了人工判读带来的误判漏判问题，可靠验证了高轨导航接收机的功能性能与高轨导航接收机在整星典型模式下的应用，对于综合测试具有重大意义。

参考文献

- [1] 张薇, 杨思全, 范一大, 等. 高轨 SAR 卫星在综合减灾中的应用潜力和工作模式需求[J]. 航天器工程, 2017(1): 127–131.
ZHANG Wei, YANG Siqun, FAN Yida, et al. Application potential and working mode requirements of GEO SAR satellite for comprehensive disaster reduction[J]. Spacecraft Engineering, 2017(1): 127–131.
- [2] 董召勇, 尤超蓝, 李文峰. 应用星载 GNSS 接收机的 Molniya 轨道卫星测定轨方法[J]. 航天器工程, 2017(3): 23–30.
DONG Zhaoyong, YOU Chaolan, LI Wenfeng. Precise orbit determination method of molniya orbit satellites using onboard GNSS receiver[J]. Spacecraft Engineering, 2017(3): 23–30.
- [3] 张蓬, 杨克元, 王延光, 等. 一种基于星载 GNSS 接收机的高轨卫星自主导航滤波算法[J]. 空间电子技术, 2020, 17(3): 43–50.
ZHANG Peng, YANG Keyuan, WANG Yanguang, et al. A spaceborne GNSS receiver based autonomous navigation filter for HEO satellites[J]. Space Electronic Technology, 2020, 17(3): 43–50.
- [4] 胡国荣, 欧吉坤, 崔伟宏. 星载单频 GPS 接收机低轨卫星几何法定轨研究[J]. 天文学报, 2000, 41(3): 278–288.
HU Guorong, OU Jikun, CUI Weihong. A Research on geometric orbit determination for GPS-based single-frequency receivers aboard low earth satellites[J]. Acta Astronomica Sinica, 2000, 41(3): 278–288.
- [5] 郭磊, 王甫红. 星载单频 GPS 实时精密定轨模型研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(4): 371–375.
GUO Lei, WANG Fuhong. Precise real-time orbit determination model using space borne single-frequency GPS observations[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(4): 371–375.
- [6] 高阳, 王猛, 刘蕾, 等. 基于高轨航天器的 GNSS 接收机技术[J]. 中国空间科学技术, 2017, 37(3): 101–109.
GAO Yang, WANG Meng, LIU Lei, et al. GNSS receiver techniques based on high earth orbit spacecraft[J]. Chinese Space Science and Technology, 2017, 37(3): 101–109.
- [7] 谢燕军. 高轨航天器中 GPS 弱信号处理及自主定轨技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
XIE Yanjun. GPS weak signals processing and autonomous orbit determination technology in high-orbit spacecraft[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [8] 柴嘉薪, 王新龙, 俞能杰, 等. 高轨航天器 GNSS 信号传播链路建模与强度分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 1496–1503.
CHAI Jiixin, WANG Xinlong, YU Nengjie, et al. Modeling and intensity analysis of GNSS signal link for high-orbit spacecraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7): 1496–1503.
- [9] 刘海颖, 王惠南. 基于 GPS 的中、高轨道航天器定轨研究[J]. 空间科学学报, 2005, 25(4): 293–297.
LIU Haiying, WANG Huinan. Orbit determination of satellite on the middle-high earth orbit based on GPS[J]. Chinese Journal of Space Science, 2005, 25(4): 293–297.
- [10] 王猛, 单涛, 王盾. 高轨航天器 GNSS 技术发展[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1158–1167.
WANG Meng, SHAN Tao, WANG Dun. Development of GNSS technology for high earth orbit spacecraft[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1158–1167.
- [11] 张晓清, 陈广旭. 通用卫星地面测试平台的设计与实现[J]. 指挥技术学院学报, 2000, 11(6): 77–81.
ZHANG Xiaoqing, CHEN Guangxu. The design and implementation of general platform for satellite ground testing[J]. Journal of Institute of Command and Technology, 2000, 11(6): 77–81.
- [12] CAPUANO V, SHENHAI E, BLUNT P, et al. High accuracy GNSS based navigation in GEO[J]. Acta Astronautica, 2017, 136: 332–341.
- [13] NESTEROV I A, KUNITSYN V E. GNSS radio tomography of the ionosphere: The problem with essentially incomplete data[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(10): 1789–1803.

[作者简介]

宁相伟 1993 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为综合测试系统设计, 天线设计。

邓 玥 1996 年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为卫星测控和星间链路分系统测试。

周凡卉 1994 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星星载软件设计与开发。

赵鹏飞 1988 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为卫星通信技术。

王 阔 1989 年生, 学士, 工程师, 主要研究方向为卫星测控测试方法设计。

(本文编辑: 潘三英)