

七 全球卫星导航设备测试平台

本测试解决平台，包括卫星导航定位系统的基本原理、四大卫星导航定位系统和卫星导航增强系统介绍以及如何使用 SMBV100B/SMW200A 进行接收机测试，测试项目包括 TTFF、灵敏度、定位精度、移动接收和干扰测试等。

1 全球卫星导航系统 GNSS 概述

GNSS 是 Global Navigation Satellite System 的缩写，即全球卫星导航系统，它是利用卫星来测量物体位置、速度及授时等功能的系统。中国 BeiDou、美国 GPS、俄罗斯 Glonass 和欧盟 Galileo 为联合国卫星导航委员会认定的全球卫星导航系统四大核心供应商。

卫星导航技术已经成为我们生活中不可或缺的一部分，应用领域涵盖个人消费者、工业、汽车和军工等。导航的重要性一直在提升，潜力巨大。有一个非常明显的趋势是在个人消费市场，导航接收机使用越来越广泛，其中汽车和移动终端的导航和定位应用尤其重要。

1.1 卫星导航定位系统组成

卫星导航定位系统主要由空间部分、地面控制部分和用户设备三大部分组成，如下图所示：

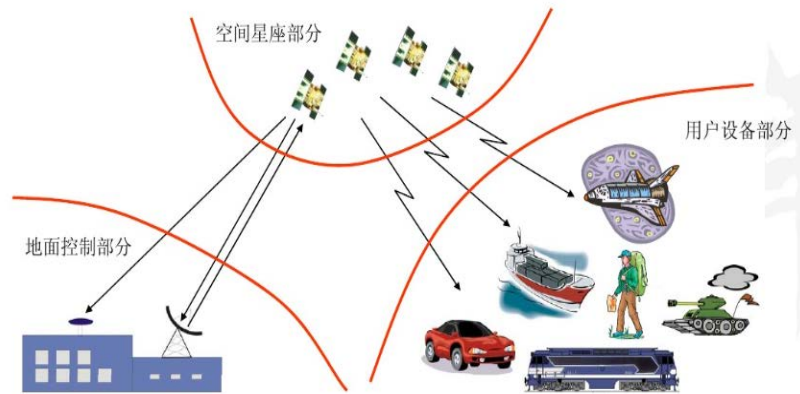


图 1 GNSS 卫星导航系统组成

其中：

- 空间部分：包括 GNSS 工作卫星和备份卫星；
- 地面控制部分：控制整个系统和时间，负责轨道监测和预报；
- 用户设备部分：主要是各种型号接收机。

1.2 卫星导航定位系统频段划分

各种不同的卫星导航定位系统的频段有所不同，具体可参见下图所示：

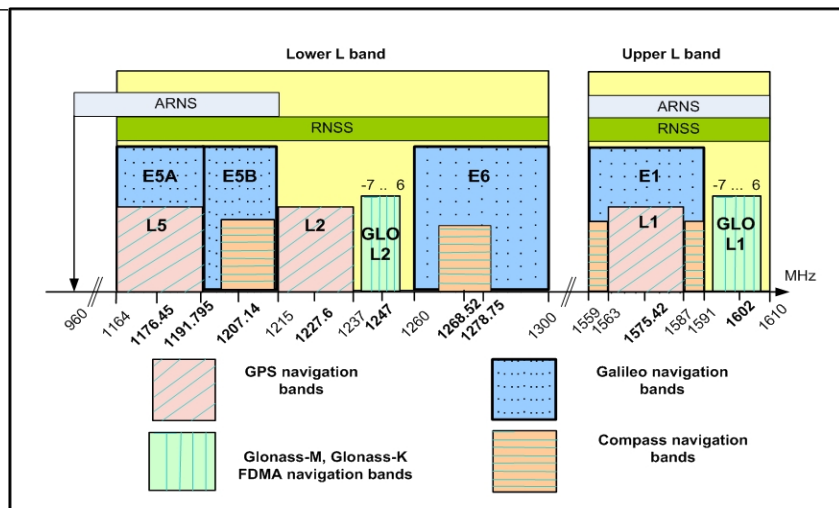


图2 GNSS 卫星导航系统频段划分

2 卫星导航定位原理

GNSS 的定位原理，简单来说，就是利用几何与物理的一些基本原理，利用空间分布的卫星以及卫星与地面点间距离交汇出地面点位置的方法。因此，若假定卫星的位置已知，通过一定的方法我们又准确测定出地面点 A 至卫星间的距离，那么 A 点一定位于以卫星为中心，以所测得距离为半径的球上。若我们能同时测得点 A 至另两颗卫星的距离，则该点一定处在三个球相交的两个点上。根据地理知识，我们很容易确定其中一个点是我们所需要的点。

以上假设，需要知道已知卫星的位置同时还得测定接收机到三颗卫星的距离，即可实现定位，但是由于卫星大多是分布在两万公里高空的运动载体，只能是在同一时间测定三个距离才可定位，要实现同步必须具有统一的时间基准，从解析几何角度出发，GNSS 定位需要包括确定一个点的三维坐标与实现同步的四个未知参数，因此，必须通过测定到至少 4 颗卫星才能定位，如下图的方程所示：

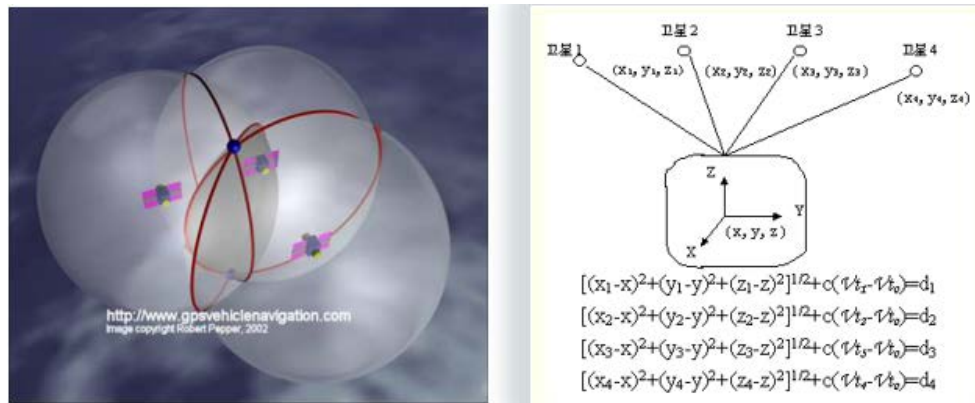


图3 卫星定位原理及方程表达式

2.1 确定卫星三维坐标

卫星导航定位是以卫星为已知的基准点，通过测量站星间的距离，解算用户的位置。而卫星的在轨参数信息主要包含在卫星的导航电文中。

GPS 卫星导航电文是用户利用 GPS 定位和导航所必须的基础数据。它主要提供了卫星在空间的位置、卫星的工作状态、卫星钟的修正参数、电离层延迟修正参数等重要信息。这些信息是以二进制码的形式按规定格式编码，并按帧发给用户接收机，因此又称之为数据码(D 码)。

2.2 确定站星间的距离

距离测量主要采用两种方法：一是测量 GNSS 卫星发射的测距码信号到达用户接收机的传播时间，即伪距测量；二是测量具有载波多普勒频移的 GNSS 卫星载波信号与接收机产生的参考载波信号之间的相位差，即载波相位测量。通过 4 颗或 4 颗以上的卫星同时进行伪距或载波相位测量即可推算出接收机的三维位置。

3 全球卫星导航系统 GNSS 介绍

3.1 GPS

GPS (Global Positioning System) 即全球定位系统，属于美国建设、维护的卫星导航系统，也是目前应用最为广泛的卫星导航系统。它是一个被动式定位的卫星导航定位系统，由美国陆海空三军于 20 世纪 70 年代联合研制。

GPS 由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成卫星星座，24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内，轨道倾角为 55 度，卫星距离地球表面的平均高度为 20000 公里，运行速度为 3800m/s，运行周期为 11 时 58 分。如图 1 所示，每颗卫星可覆盖全球约 38% 的面积，卫星的分布可以保证在地球上任何地点、任何时刻，同时能观测到 4 颗卫星。

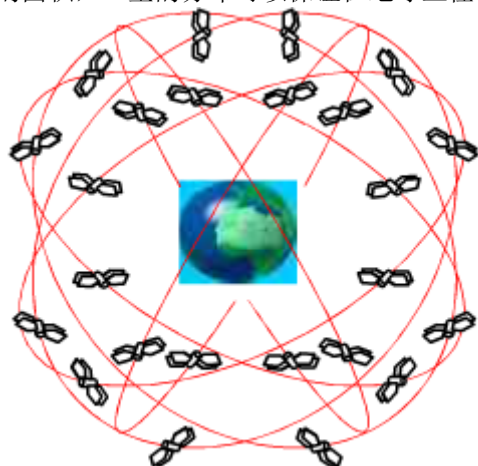


图 4 GPS 卫星星座

GPS 卫星发射三种频率的载波信号，即频率为 1575.42MHz 的 L1 载波，频率为 1227.60MHz 的 L2 载波和频率为 1176.45MHz 的 L5，在各个频段上又分别调制着多种信号，这些信号主要有：C/A 码（粗捕获码）、P 码（精码）和导航信息。GPS 采用了信号扩频调制，把窄带信号扩展到一个很宽的频带上发射出去，已达到抗干扰、保密和省电的目的。

3.2 GLONASS

前苏联从 80 年代初开始建设的与美国 GPS 系统相类似的卫星定位系统，也是由卫星星座、地面监测控制站和用户设备三部分组成。Glonass 系统的卫星星座由 24 颗卫星组成，均匀分布在 3 个近圆形轨道平面上，每个轨道面 8 颗卫星，轨道高度 19100 公里，运行周期 11 小时 15 分，轨道倾角 64.8 度。与美国 GPS 系统不同的是 Glonass 系统采用频分多址方式，根据载波频率来区分卫星（GPS 是码分多址，根据调制码来区分卫星）。每颗 Glonass 卫星发射的两种载波频率分别为：

$L1 = 1602 + 0.5625 * k$ (MHz) 和 $L2 = 1246 + 0.4375 * k$ (MHz) 其中， $k = 1 \sim 24$ ，为每颗卫星的频率编号。



图5 GLONASS 卫星星座

3.3 GALILEO

Galileo 系统原理同 GPS 相似，可以覆盖全球的导航和定位功能，为用户提供误差不超过 1 米的高精度、高可靠性的定位服务。

Galileo 系统的基本结构包括星座与地面设施、服务中心、用户接收机等，卫星星座由 30 颗卫星组成（27 颗工作卫星和 3 颗备用卫星），卫星采用中等地球轨道，均匀分布在高度约为 23616 Km 的 3 个中高度园轨道面上，倾角为 56 度。卫星的设计寿命为 20 年，卫星信号采用 4 种位于 L 波段的多载频来发射，其频率分别为：

E5a: 1176.45MHz、E5b: 1207.14MHz、Eb: 1278.75MHz、E1:1575.42MHz

Galileo 系统的主要特点是向用户提供公共服务、安全服务、商业服务、政府服务等不同模式的多服务，它除了具有全球导航定位功能外，还具有全球搜寻救援功能。

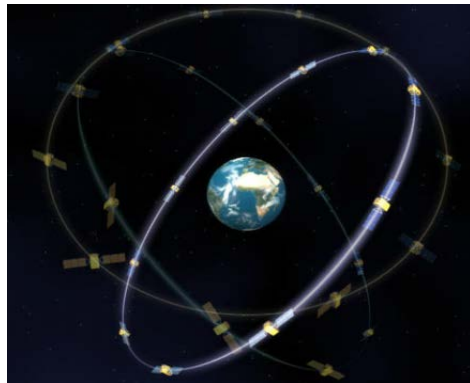


图6 GALILEO 卫星星座

3.4 BeiDou

BeiDou 即北斗卫星导航系统，是中国自行研制的全球卫星定位与通信系统，是继 GPS、Glonass 之后第三个成熟的卫星导航系统。系统由空间端、地面端和用户端组成，可在全球范围内全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠定位、导航、授时服务，并且具有短报文通信能力。

北斗系统的空间端由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成，地面端包括主控站、注入站和监测站等若干地面站。用户端由北斗用户端以及与其他卫星导航系统兼容的终端组成。

北斗卫星信号使用如下三个频段：

B1: 1559.052~1591.788MHz

B2:1166.22~1217.37MHz

B3:1250.618~1286.423MHz

现阶段北斗卫星信号（第二阶段）的基本特征如下表所示：

信号	中心频点 (MHz)	码速率 (cps)	带宽 (MHz)	调制方式	服务类型
B1(I)	1561.098	2.046	4.092	QPSK	开放
B1(Q)		2.046			授权
B2(I)	1207.14	2.046	24	QPSK	开放
B2(Q)		10.23			授权
B3	1268.52	10.23	24	QPSK	授权

作为全球系统，北斗卫星导航系统在 2012 年左右已经覆盖亚太地区，将在 2020 年之前完成全球覆盖，其卫星星座如下图所示：

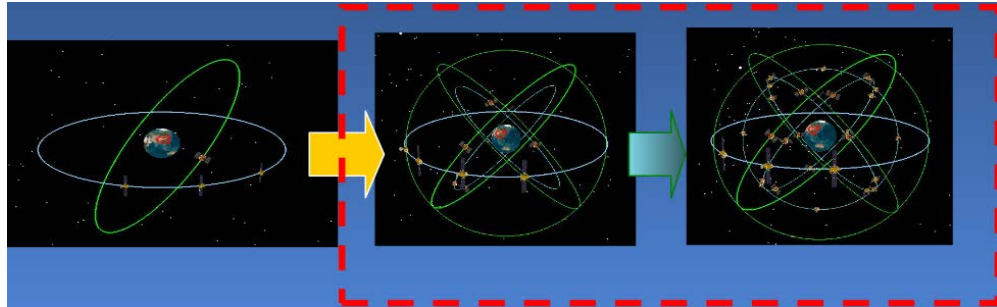


图 7 BeiDou 卫星工作星座

3.5 GBAS

GBAS - Ground-Based Augmentation Systems, 地基增强系统

空中交通管理系统从现有陆基导航系统向星基导航系统过渡已成为未来发展的必然趋势。卫星导航系统可以提供全球、全天候、连续实时的导航，具备成为支持民用航空的主用导航系统的能力。为保证飞行安全，民航精密进近和着陆引导在精度、完好性和可用性等方面都对卫星导航提出了很高的要求。为此，国际民航组织提出了地基增强系统（GBAS）的概念，美国定义其名称为本地局域增强系统（LAAS）。

GBAS 通过差分定位提高卫星导航精度的基础上，增加一系列完好性监视算法，提高系统完好性、可用性、连续性指标，使机场覆盖空域范围内的配置相应机载设备的飞机获得到达 I 类精密进近（CAT-I）甚至更高标准的精密进近、着陆引导服务。

GBAS 由地面站、监控设备和机载设备组成。GBAS 地面站包括四对参考接收机和天线、地面数据处理设备、甚高频数据广播（VDB）设备和 VDB 天线等。地面数据处理设备通过结合来自每个参考接收机的测量值产生可见卫星的差分校正值；同时，通过实时监测导航信号本身或者是地面站的异常，形成卫星导航系统和本站自身的完好性信息；然后把 FAS 数据、校正值和完好性信息通过 VDB 播发给机载用户。机载设备为多模式接收机（MMR）。由于机载用户和 GBAS 站的距离很近（小于 50 公里），它们之间的误差有很强的相关性，所以通过这种方法能够提高机载用户的定位精度和完好性。

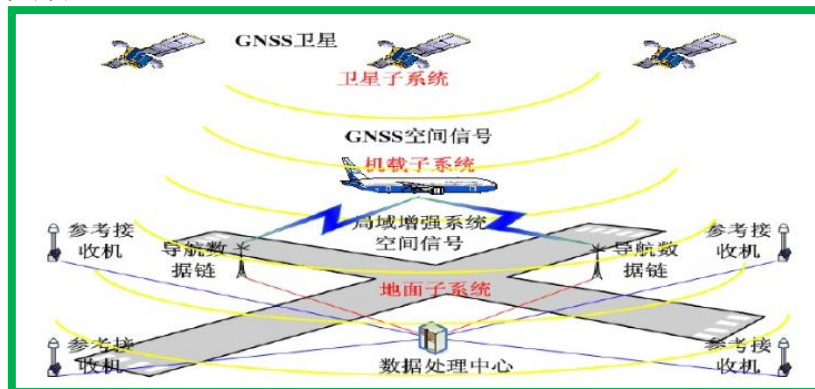


图 8 GBAS 系统组成

3.6 SBAS

SBAS - Satellite-Based Augmentation Systems, 星基增强系统。通过地球静止轨道 (GEO) 卫星搭载卫星导航增强信号转发器, 可以向用户播发星历误差、卫星钟差、电离层延迟等多种修正信息, 实现对于原有卫星导航系统定位精度的改进, 从而成为各航天大国竞相发展的手段。目前, 全球已经建立起了多个 SBAS 系统, 如美国的 WAAS (Wide Area Augmentation System)、俄罗斯的 SDCM (System for Differential Corrections and Monitoring)、欧洲的 EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)、日本的 MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) 以及印度的 GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation)。

上述 SBAS 系统的工作原理大致相同。首先, 由大量分布极广的差分站 (位置已知) 对导航卫星进行监测, 获得原始定位数据 (伪距、卫星播发的相位等) 并送至中央处理设施 (主控站), 后者通过计算得到各卫星的各种定位修正信息, 通过上行注入站发给 GEO 卫星, 最后将修正信息播发给广大用户, 从而达到提高定位精度的目的。

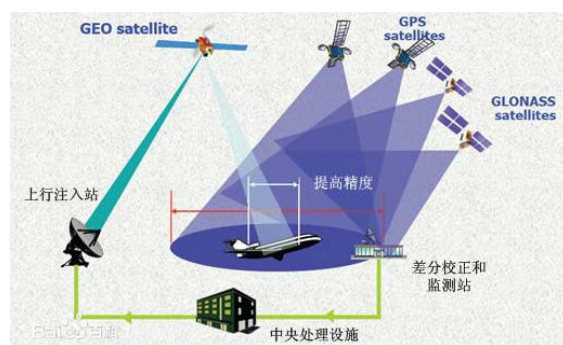


图9 SBAS 系统组成

4 卫星导航模拟器

4.1 实时卫星导航模拟的必要性

测试导航接收机的一种方案是使用外部真实的卫星信号。这种方法虽然可以使接收机在包含多种因素影响的真实环境下进行测试, 但也存在很大的缺陷, 如测试环境变化剧烈且不可预知, 这使得无法在保证严格一致的测试条件下执行重复测试。实际上由于需要在不同时间、地点进行验证, 这使得真实卫星信号测试变得更加棘手, 不仅消耗很多时间和金钱, 而且有些测试项根本无法完成, 像高海拔和高速度(如飞机)测试就变得不切实际。

导航信号模拟器克服了以上这些问题。仪表能够根据产生模拟的卫星导航信号, 也可加入真实环境下接收的各种影响因素。模拟器拥有以下优势:

- 产生的信号严格已知, 接收机能够在可控的确定条件下测试;

- 测试条件能够精确重现, 这样就能在相同条件下进行多次重复测试;

- 多种条件综合测试, 实验室就能模拟任意位置和时间, 任意路线下移动接收;

- 可以节省大量的时间和费用, 像接收机其中一个关键特性首次定位精度, 模拟器可以在极短时间内就能模拟慕尼黑、纽约、北京或悉尼等任何城市, 而这是使用真实卫星导航信号根本无法完成的任务;

- 测试条件的构建灵活性大, 从模拟单颗静态卫星, 到模拟带多径和大气层效应的多颗卫星。因此, 可以只在某个特定因素影响下进行测试(屏蔽其他影响)。让用户更加

深入了解接收机的性能；

相比于真实的导航信号，导航模拟器产生的信号几乎没有任何噪声，因此能为测试提供极佳的信噪比。一些导航模拟器(如 SMBV/SMW)，用户可以自定义设置噪声分布。

基于以上原因，导航卫星模拟器是研发和生产中测试接收机功能和性能的理想选择

4.2 Rohde-Schwarz 卫星导航模拟器 SMBV100B 与 SMW200A

SMBV 是一台高性价比的通用矢量信号发生器，具备优异的射频指标，最高频率到 6GHz，而 SMW 则是一台高端的矢量信号发生器，具有业界领先的射频指标，配备双射频通道，且频率最高可到 44GHz，SMBV 和 SMW 支持几乎所有的通信和广播标准，通过配置一个或多个可选选件，支持 GPS、Glonass、Galileo 和 BeiDou，是全能卫星导航模拟器。

SMW 作为更先进的卫星导航模拟器相比 SMBV 能够覆盖更多的测试应用，除了通用的单频或多频测试应用之外，还可以实现多天线应用，多车交互应用和进行高级的干扰模拟。以下是两款仪器在 GNSS 应用方面的差异对比：

导航模拟器	频段	应用	测试
SMBV100B	L1, L2 和 L5	单频或多频应用	GNSS 生产测试； 标准接收机测试； 特殊条件下的接收机测试（干扰，多径，闰秒）； RAIM 测试
SMW200A	L1, L2 和 L5	单频或多频应用	标准接收机测试； 特殊条件下的接收机测试（干扰，多径，闰秒）； RAIM 测试； 电离层监测； 大气探测
		多天线应用	基准确定； 波速赋型（CRPA）； 姿态确定； 多径测向
		多车交互应用	差分 GNSS； 避免碰撞； 航天器编队飞行； 时间和频率转移
		高级干扰模拟	欺骗干扰攻击模拟； 多干扰共存测试



图 10 R&S SMBV100B (左) 与 SMW200A(右)

R&S 卫星导航模拟器为接收机测试提供了强大和可靠的单表解决方案，它们提供了以下关键特性：

实时导航卫星模拟，支持 GPS L1/L2/L5(C/A 和 P 码)，Glonass L1/L2，Galileo E1/E5 和 BeiDou B1/B2/B3；同时还支持 SBAS 中的 QZSS/WAAS/EGNOS/MSAS/GAGAN。

SMBV 最多可支持至 102 颗卫星；

SMW 最多可支持至 144 颗卫星；

无限的模拟时间，带有卫星空中自动切换功能；

静态卫星模拟可配置多普勒频移；

模拟产生混合场景的 GPS，Glonass，Galileo 和 BeiDou 卫星；

静态接收机测试支持自定义或预定义的地理位置；

移动接收机测试支持自定义或预定义的行驶路线(可直接导入 NMEA 数据)；

对单颗卫星或全部卫星进行实时动态功率控制，模拟卫星可视性变化(遮挡)。在不影响信号产生情况下激活或去激活卫星；

模拟多径传播(可配置延时、功率、多普勒频移和载波相位)；

支持电离层和对流层模型；

通过导入 Almanac 文件，支持最新或早期的卫星轨道；

通过导入 RINEX 文件，支持最新或早期的星历数据(多达 12 个星历集)；

可设置的仰角模板，自己移除低仰角的卫星；

支持自定义或预定义的 A-GPS 场景；

单表解决方案一无需外部软件或外部电脑；

除了导航卫星模拟外，SMBV/SMW 还支持数字通信标准如 GSM/EDGE，3GPP/HSPA，LTE，5G NR，WLAN，Wimax，Bluetooth，以及广播标准如 FM stereo(带 RDS)，HD Radio，Sirius 和 XM Satellite Radio 和 DAB。今天的移动终端除了 GPS/Glonass/BeiDou 外还具备以上所述的一种或多种标准，因此拥有一台能够支持所有测试信号产生的单表给用户带来很大帮助。所有信号都是实时产生，无需任何外部软件。

SMBV/SMW 还能选配高斯白噪声产生模块，用于在射频输出信号上叠加可控的噪声，而且还支持叠加 CW 阻塞干扰。SMW 更能够支持 MIMO 信道衰落，可模拟各种场景，单台仪表就能够实现之前多台仪表才能实现的功能。

仪表所有设置都能通过 SCPI 命令远程控制，可以完成生产或者研发自动化测试，远程控制硬件接口包括以太网(TCP/IP)，GPIO(IEC/IEEE)和 USB。

5 R&S 卫星导航接收机测试方案

对于导航接收机测试，一般有两种方法：辐射测试和传导测试，两者连接的示意图如下：



图 11 导航接收机天线口辐射测试



图 12 导航接收机传导测试

如果被测导航接收机缺少外部接口时，唯一的办法就是通过空口辐射进行测试，不过这种方法会存在严重的干扰问题，一方面辐射发射的卫星信号会对真实的卫星导航信号产生干扰，另一方面真实的卫星信号也会干扰测试信号，影响测试精度。为了屏蔽干扰，建议使用合适的屏蔽箱进行测试。如果被测导航接收机可以提供外部接口，推荐使用传导方式进行测试，可以得到更为精准的结果。

导航接收机常见的测试项目如下：

标准接收机测试项目：

- 首次定位时间 TTFF；
- 定位精度（静态和动态）；
- 灵敏度；
- 重新捕获时间；
- 长久测试

特殊条件下的测试：

- 干扰条件下的测试；
- 多径条件下的测试；
- 大气层影响；
- 动态衰落场景；

特殊事件测试：

- 闰秒事件；
- 接收机秒脉冲性能验证；
- 生产灵敏度测试；

接收机自动化测试：

航空航天和国防应用：

- GPS P 码测试；
- 载体姿态模拟测试；

5.1 标准接收机测试

标准接收机测试是指的常见的接收机测试项目，是接收机基本性能的重要保证。

5.1.1 首次定位时间 TTFF

首次定位时间（Time to first fix, TTFF）指的是接收机首次搜星获得定位的时间，该指标非常重要，直接影响接收机用户的使用感受。测试过程中卫星导航模拟器 SMBV/SMW 模拟固定位置的卫星星座图，用户可以把卫星导航模拟器设置成“Navigation”模式，该模式下仪表自动设置卫星参数，用户可以选择预定义的城市或者自定义坐标，模拟的卫星数量至少保证 4 颗。对于该项测试，参考电平通常设置为高于捕获灵敏度电平。见下图的 SMBV 的设置界面：

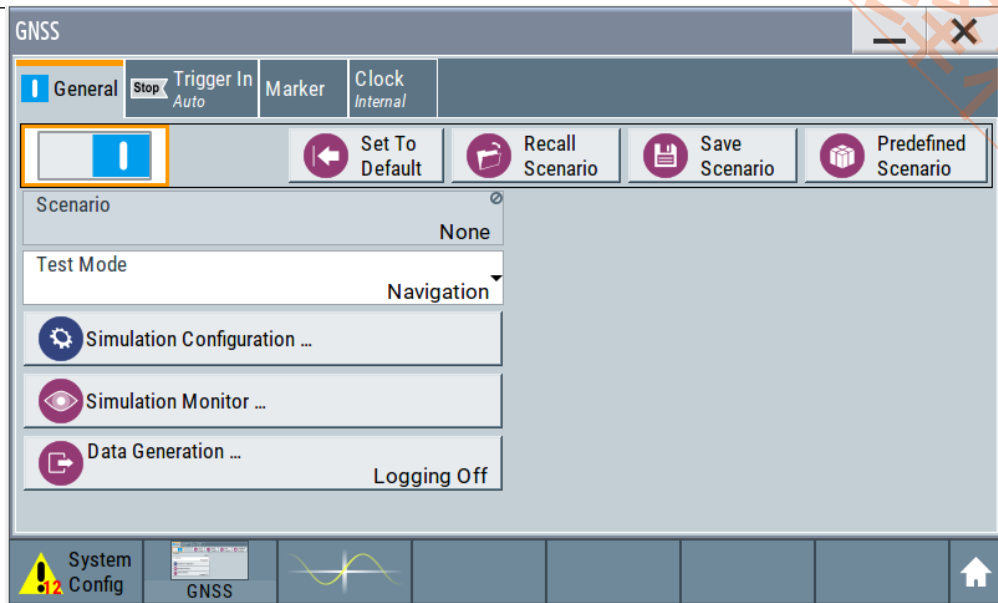


图 13 首次定位时间设置框图

5.1.2 灵敏度

灵敏度是指导航接收机获得卫星信号并且得到位置信息所需的卫星发射最小功率，该项测试是为了验证导航接收机捕获或者跟踪卫星信号，并且保持可靠定位状态的能力。捕获和跟踪是接收机最重要的两个参数，虽然在地球表面（晴朗天气）可接收到的卫星信号至少高于-130dBm，但是在建筑物内或者树下，功率会下降，这时如果具备高接收灵敏度的接收机就可以正常工作。可以通过降低 SMBV/SMW 的发射功率，完成该项测试。

在导航接收机的测试中，灵敏度有两种统计方法：

- 一 定位精度统计法：即当定位精度小于某一个给定值的时候，计算当前的接收功率，作为接收机的灵敏度；
- 二 CNO 统计法：即通过捕获到的卫星载噪比的方式，计算当前的接收电平，作为接收机的灵敏度。其中，灵敏度和 CNO 直接的关系如下：

$$\text{灵敏度}_{\min} = -174\text{dBm/Hz} + C/N_{\min} + NF_{\text{receiver}}$$

5.1.3 定位精度（静态/动态）

定位精度是指导航接收机定位的位置与真实位置的接近程度，一般需要测试其绝对精度、可重复性和移动状态下的定位精度。

为了测试绝对定位精度，SMBV/SMW 可模拟不同的静态位置，例如参考坐标半径内的任意位置，接收机的上报位置信息会和模拟位置进行比较，计算 2D 和 3D 误差，最终误差量是不同地点误差的平均值。该测试项参考电平设置为高于捕获灵敏度电平。测试动态定位精度时，SMBV/SMW 可以模拟接收机沿指定路径移动，仪表自带一些轨迹文件，也支持用户自定义 waypoint 文件。接收机上报位置和 waypoint 文件中的模拟位置进行比较，通过计算经度、纬度和高度差获得 2D 和 3D 误差。

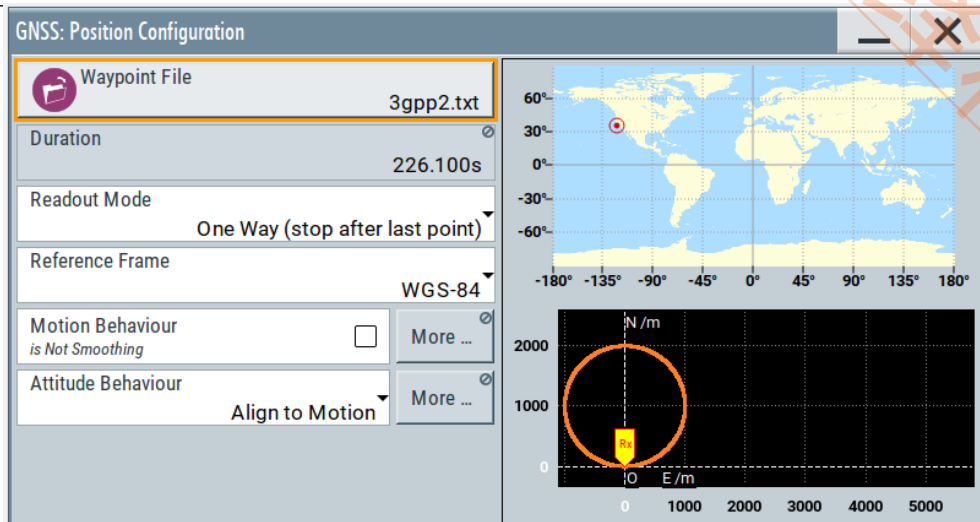


图 14 动态场景下的接收机测试

5.1.4 重新捕获时间

重新捕获时间是指接收机在位置信息丢失后，重新获得卫星信号和位置信息所需的时间。该项测试是为了验证接收机在短时间丢失所有信号后能在多短时间内重新捕获卫星信号，重新捕获时间对车载导航接收机来说非常重要。测试过程中 SMBV/SMW 配置为“Navigation”模式，先关闭所有模拟卫星信号，等待一段时间后恢复卫星可视性，参考电平通常设置为高于捕获灵敏度电平。

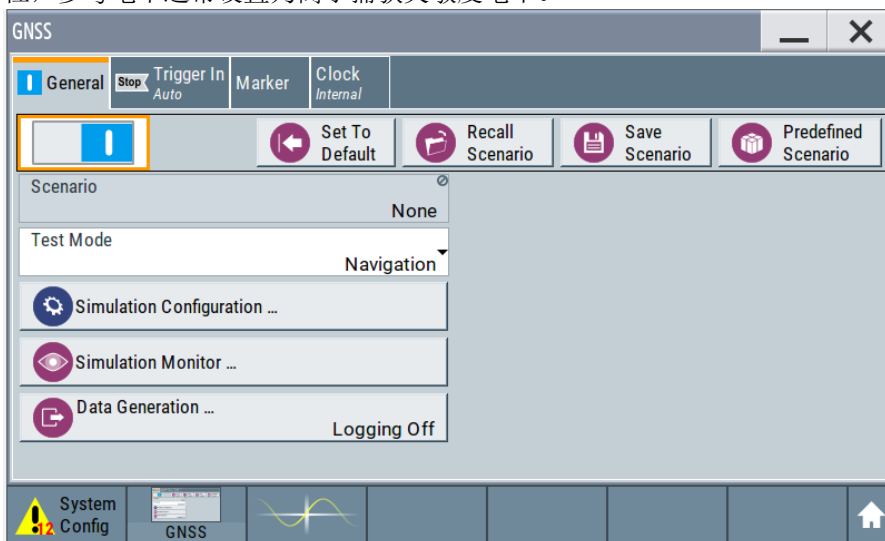


图 15 重新捕获时间基本设置

5.1.5 长久测试

长久测试用于验证接收机能否在较长测试时间内提供可靠和精确的位置定位，这样的长久测试需运行至少 24 小时，也可能是两天或者更长时间。

SMBV/SMW 模拟空中真实卫星运动，这时会有可见卫星的稳定重建过程，当一些卫星最终消失在地平线以下时，也有一些卫星从地平线升起。SMBV/SMW 可以模拟卫星的实时切换，因此拥有无限的模拟时间，这样 SMBV/SMW 非常适合于长久测试。同时，SNBV/SMW 还可以提供长时间稳定的射频信号输出，用于测试。

5.2 特殊条件下的测试

标准条件下的测试只能保证接收机的基本性能，但是接收机处于复杂场景下的性能，需要做相关的特殊条件测出，例如：多径、大气层影响、遮挡效应等；

5.2.1 干扰条件下的测试

该项测试是为了验证非期望干扰信号如何影响接收机性能，由于卫星信号功率非常低，致使其很容易受到干扰。当接收机受到干扰信号影响时，性能指标就会下降甚至无法获取或跟踪卫星。移动终端和芯片组集成了越来越多的功能，使得干扰不可避免，导航接收机的性能必须在可能的干扰源如 WLAN、蓝牙、FM 立体声和移动通信标准信号下进行测试，保证导航功能的正确性。

干扰测试中需要至少两路射频信号，例如使用 2 台 SMBV。一台 SMBV 产生导航信号，另一台用于产生干扰信号，然后通过合路器合并，如下图：

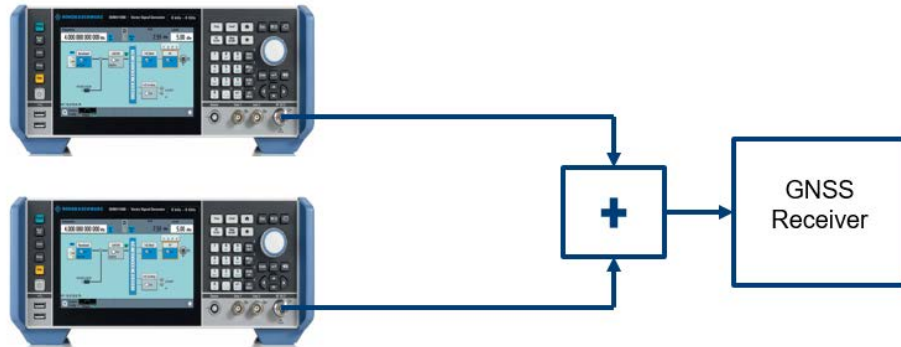


图 16 干扰条件下的测试框图 - SMBV100B

如果使用 SMW 进行干扰测试，由于 SMW 具有双通道（配合 2 台 SGT 最多可以 4 通道），可以分别设置导航信号和干扰信号，一台仪器便可以完成 2 台 SMBV 的功能，如下图：

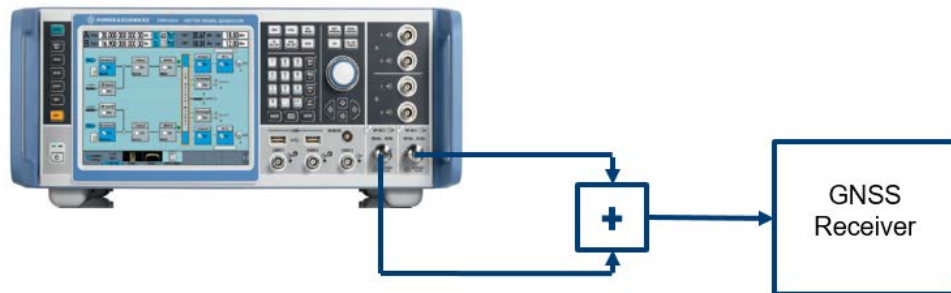


图 17 干扰条件下的测试框图 - SMW200A

SMBV/SMW 是全功能的信号发生器，支持数字通信标准信号产生，包括 GSM/EDGE、3GPP WCDMA、LTE、WLAN、WiMAX 和 Bluetooth 等，广播信号像 FM 立体声、HD Radio 和 DAB 等，以及各种导航卫星标准。而且内置的 ARB 发生器可以用来回放用户自定义的干扰信号。干扰信号的输出电平可以有很大的动态范围，并且支持频率扫描和功率扫描功能。

5.2.2 多径条件下的测试

该项测试是为了验证接收机在受到多径影响下的导航接收性能变化，尤其是定位精度、首次定位时间和重新捕获时间的下降程度。

实际环境下尤其是城市，卫星信号会受到建筑物和其他城市物体的反射，因此到达接收机的卫星信号不仅有直射信号，而且包含了每颗卫星多径后的信号，这些卫星信号以不同时延和衰减到达接收机。为了测试接收机在多径作用下的接收能力，SMBV/SMW 可以模拟一颗或者多颗卫星的静态多径传播，可以为每颗卫星设定多径传播参数，如 SMBV 最多可以模拟 102 个通道。每颗卫星最多 10 条路径，设置界面如下图：

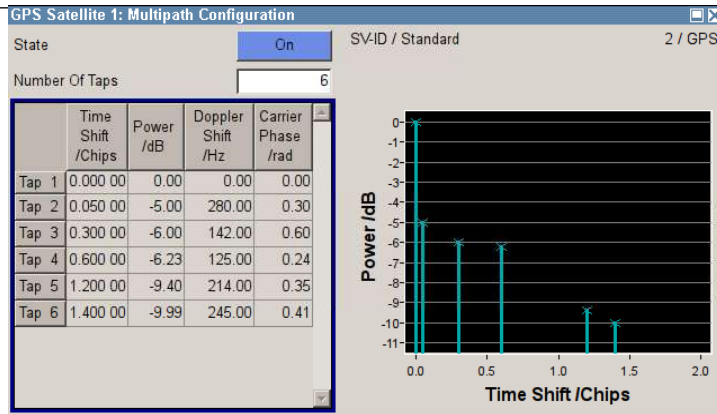


图 18 多径条件下的测试

5.2.3 大气层下的测试

该测试项用于验证由于大气层造成的时延对于接收机性能的影响，尤其是定位精度。卫星信号到达接收机的路线中需经过由不同特性组成的地球大气层，其中电离

层和对流层占主要影响。SMBV/SMW 支持模拟卫星信号在电离层和对流层中的传播特性，对于 GPS，Klobuchar 模型应用于电离层建模，STANAG 模型应用于对流层建模，设置界面如下：

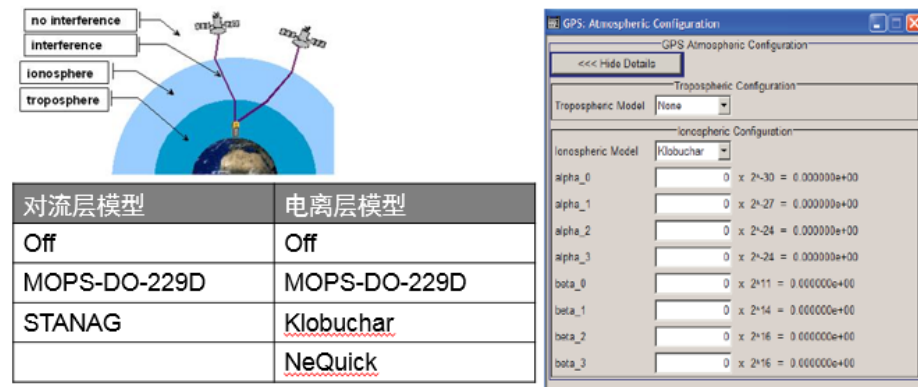


图 19 大气层建模条件下的测试

5.2.4 动态衰落场景下的测试

在很多情况下，卫星信号不能直接到达接收天线，相反地，卫星信号会建筑物、树木或地面反射。相对于直达信号，此类多径信号到达天线更迟，具有衰减，会造成显著的定位误差。

该项测试用于验证接收机沿着一个或者三个方向（经度、纬度和高度）运动路径下受到各种障碍物的阻挡或者多径条件下的接收性能，通过测试定位精度和重捕获时间，验证接收机移动时是否能很好地跟踪卫星。

测试中，SMBV/SMW 不仅能模拟卫星的移动而且还可以模拟接收机的运动，因此就像接收机自己在真的移动一样。如上节所示，SMBV/SMW 支持移动轨迹文件，如下图：

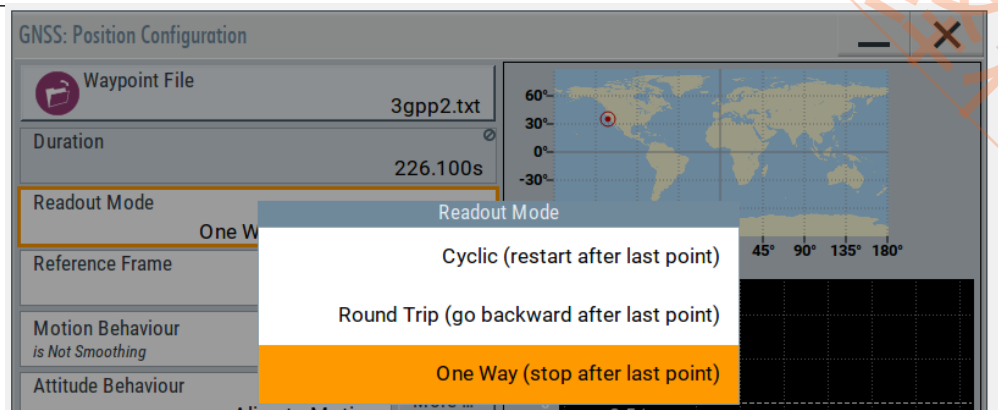


图 20 运动轨迹定义

SMBV/SMW 支持的路径文件为 Waypoint 方式，包括：

KML 文件 (Google Earth 输出格式)

Waypoints 文件 (R&S 定义格式)

txt 文件

NMEA 文件

xtd 文件 (包括：位置、速度、姿态等信息)

为了充分验证接收机针对各种障碍物条件下的性能测试，SMBV/SMW 提供各种场景的模拟，特色如下：

用户自定义垂直障碍，建模城市环境

用户自定义道路平面，建模高速公路和周边环境

用户自定义界面建模飞机和船舶的陆地/海洋反射

用户自定义界面将隧道建模为全信号模糊

在自动定位模式下根据所建模的用户环境，自动实时更新卫星可见性和多径

10 Hz 模糊和多径环境采样信号 (码片速率)

可配置的垂直障碍、道路平面和陆地/海洋区域的材料特性

诸如农村区域、亚城市区域、城市巷道、隧道、桥梁、高速公路之类的环境模型

需要, SMBVB-K44、, SMBVB-K66、, SMBVB-K94 或, SMBVB-K107 选项

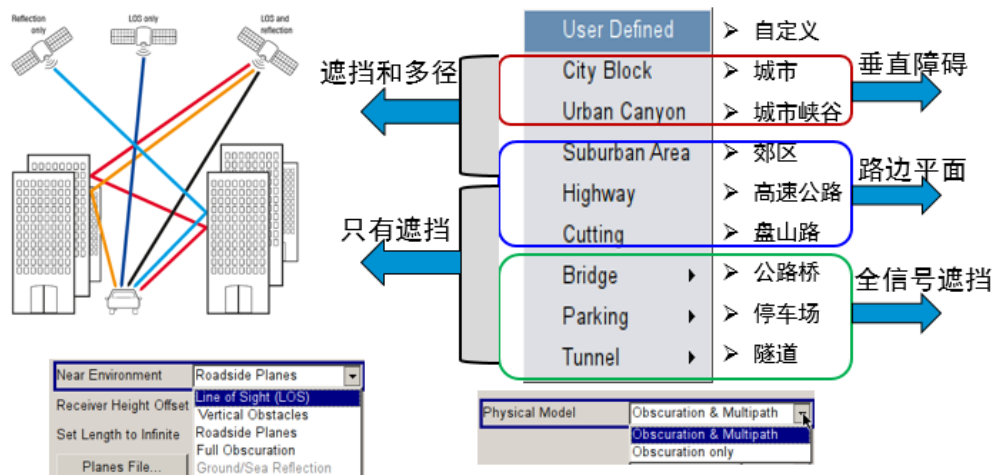


图 21 遮挡效应及多径效应的模拟

5.3 特殊事件测试

标准条件和特殊条件下的测试保障了接收机的主要性能，不过由于地球自转的影响及接收机本身时钟性能的优劣，都会对接收机的性能再次造成影响，为了评估接收机在处理这类事件的能力，需要做闰秒插入测试及秒脉冲测试。

5.3.1 闰秒插入测试

该项测试用于验证接收机是否能正常处理闰秒插入，考虑到地球转动的变化，世界标准时间(UTC)需要通过闰秒定期修正。通过插入一个闰秒，UTC 年就能增加一秒时间。对比而言，GPS 时间连续，无法通过闰秒修正。UTC 和 GPS 之间的时间差通过导航信息广播。在 2012 年，时间差是 16 秒。接收机使用广播的 UTC 到 GPS 时间差提供 UTC 时间。一旦闰秒插入事件产生，UTC 到 GPS 时间差增加一秒。

SMBV/SMW 可以非常方便模拟闰秒插入事件，支持验证接收机能否响应插入事件和调整显示的 UTC 时间。SMBV/SMW 工作于” Navigation” 模式。如果模拟的是过去时刻，SMBV/SMW 可以自动显示下一次闰秒插入的时间(相对于当前模拟时间)，也可以用来显示对应的闰秒偏差。但是，用户也可以自定义设置时间和闰秒偏差。SMBV/SMW 自动修改导航消息用于通知接收机闰秒插入事件的周/日，以及当前和下一个闰秒偏差。模拟的闰秒插入都是在 00:00 时刻发生。SMBV 设置界面如下：

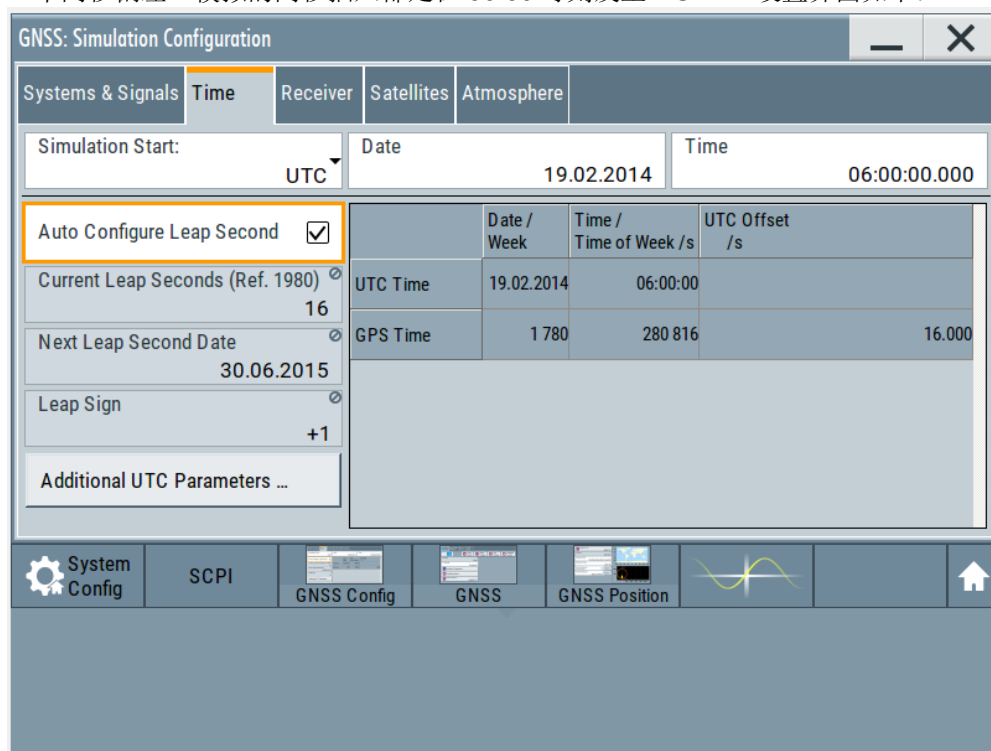


图 22 闰秒插入测试

5.3.2 接收机秒脉冲性能测试

用于验证接收机秒脉冲输出精度。很多接收机能输出同步于 GPS 时钟(如果是 GPS 接收机)的秒脉冲信号，上升沿和 GPS 秒对齐。这些秒脉冲信号可以用来同步本地时钟，如 CDMA2000 网络就使用 GPS 的秒脉冲信号作为的基站间同步信号。

SMBV/SMW 在 Marker 输出端提供一下定时信号：1PPS（1 秒产生一次脉冲信号）、1PP2S（2 秒产生一次脉冲信号）和 10PPS（100ms 产生一次脉冲信号），SMBV 设置界面如下：

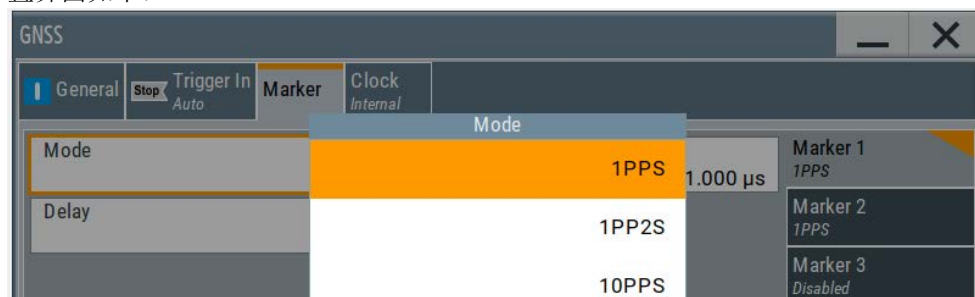


图 23 导航模拟器秒脉冲输出设置

通过比较导航模拟器的 1PPS 和接收机的 1PPS 就能得到定时准确度，下面测试框图中 SMW 的 1PPS 作为时间基准，通过示波器比较脉冲沿的时间差就能得到脉冲稳定性和抖动参数。

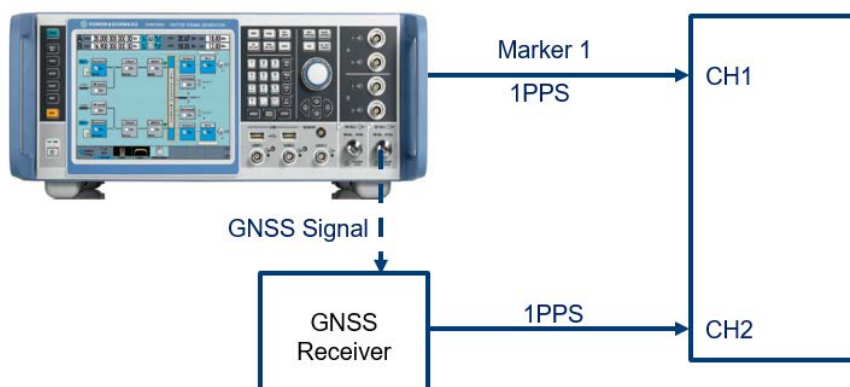


图 24 接收机秒脉冲测试框图

5.4 生产灵敏度测试

在 GNSS 模块和接收机的生产测试过程中，需要验证 GNSS 接收机能够捕获或跟踪卫星信号保持可靠定位状态所需的最小输入功率。

基于 SMBV 的 GNSS 生产测试仪，在 GNSS L1/L2/L5 三个频段，都可以模拟 GPS、Glonass、Galileo 和 BeiDou 导航标准的卫星。每个频段 4 颗卫星可单独激活，每个具有 34dB 的动态范围。电平可在测试中改变，不需要中断信号，这使用户能够同时为每个系统执行独立的灵敏度测试。大动态范围提供了充足的余量，以适应芯片组的差异。

除 GNSS 信号外，该 GNSS 生产测试仪还能校准具有明显更高电平的装置而进行的非常基本的测试生成纯净、电平稳定的连续波信号，或者干脆作为干扰源使用。



图 25 生产灵敏度测试框图

5.5 自动化测试

SMBV/SMW 也支持自动化测试，可以在操作界面手动控制或远程控制。远程控制需要在上位机通过 LAN、GPIB 或 USB 连接 SMBV/SMW。举例来说，可以有两种方式远程控制仪器。

通过网络远程桌面

自动控制程序，SCPI 命令自动配置

测试连接图如下：

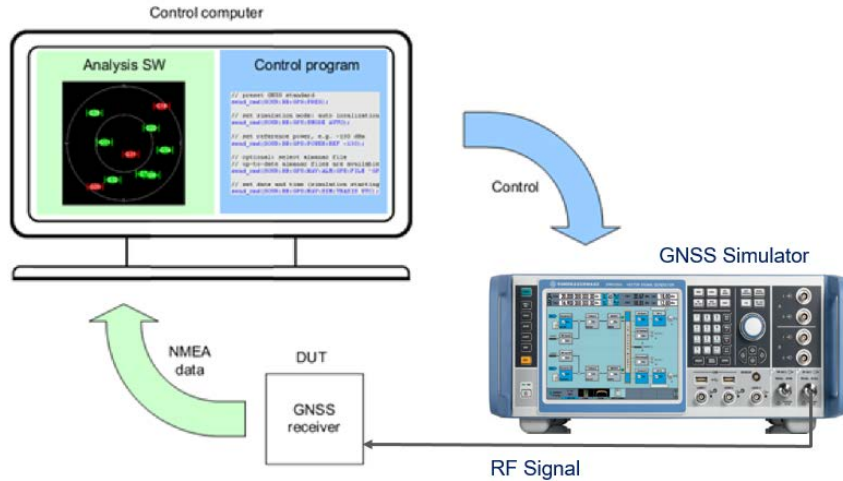


图 26 自动化测试框图

接收机通过标准的 NMEA 数据格式上报结果，这些数据可以通过第三方软件读入并进行处理，完成分析、可视化和数据记录等工作。

5.6 航空航天和国防应用测试

前面提到的基本都是民用接收机的测试。针对军用接收机的测试，除了上面提到的基本功能和性能测试外，还需要关注精测距码 P 码测试及载体姿态模拟等功能。

5.6.1 GPS-P 码测试

除了 GPS 接收机中商用的粗测距码 C/A 码外，很多应用，特别是美国军事应用，需要精测距码 P 码。因为更高的码字速率，使用 P 码信号可以有效提供 GNSS 接收机的定位精度。

SMBV/SMW 支持同时生成 C/A 码和 P 码信号，信号发生器自动做出不同速率所需的设置，在所有操作模式（静态、动态、用户定位）下的所有接收机测试以及移动场景下的 P 码测试。

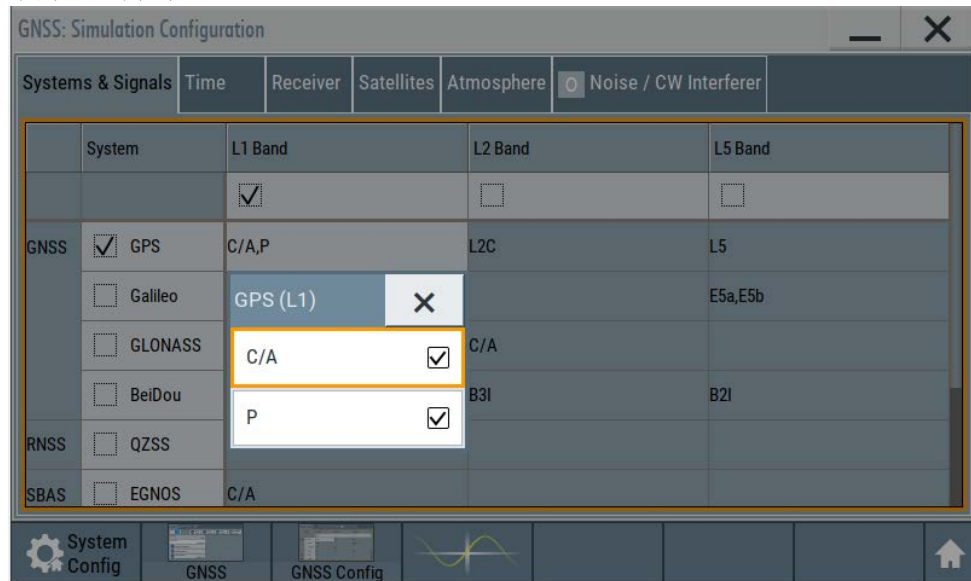


图 27 GPS P 码测试设置

SMBV/SMW 甚至支持标准版本下的高信号动态我模拟，可以为移动用户模拟高达 599m/s 的速度和 160g 的加速度。对于特殊的 A&D 应用，使用硬件选项可以扩展使用速度范围为 10000m/s。这使得易于模拟诸如超音速和极超音速的飞机运动，其他 A&D 应用涉及到急转车辆的模拟，也可以在 SMBV/SMW 中实现。

5.6.2 载体姿态模拟测试

对于战斗机、鱼雷、导弹等设备上的接收机，经常都是在旋转的状态，这些载体的姿态会极大地影响导航信号的接收，如下图战斗机和导弹的不同姿态接收到的卫星信号不一样：

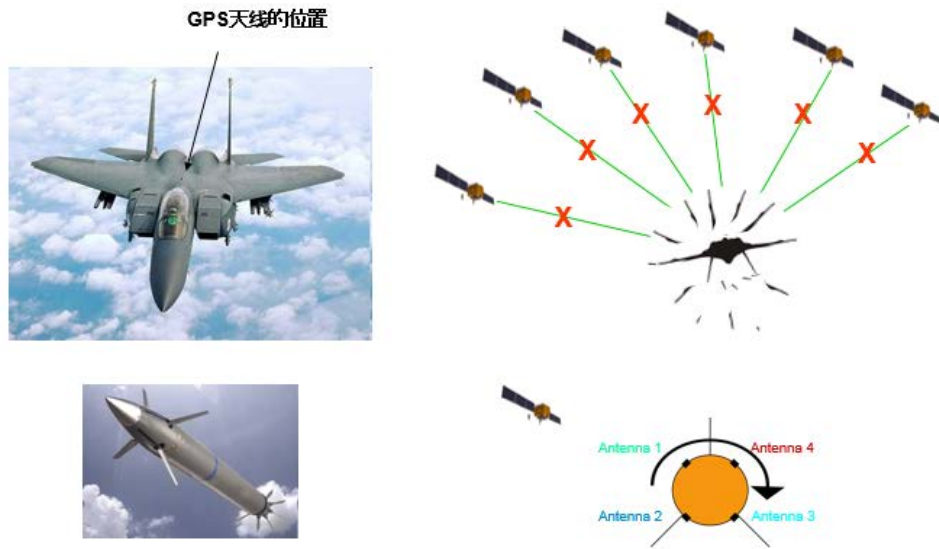


图 28 载体姿态对导航信号的影响

针对这种载体姿态的测试，仿真天线的朝向是非常重要的，定义载体姿态数据(旋转、颠簸、摆动)，SMBV/SMW 即可实时仿真载体姿态变化对接收信号的影响。而对于载体上面有多根天线的情况，则需要考虑多天线的测试，连接框图如下所示：

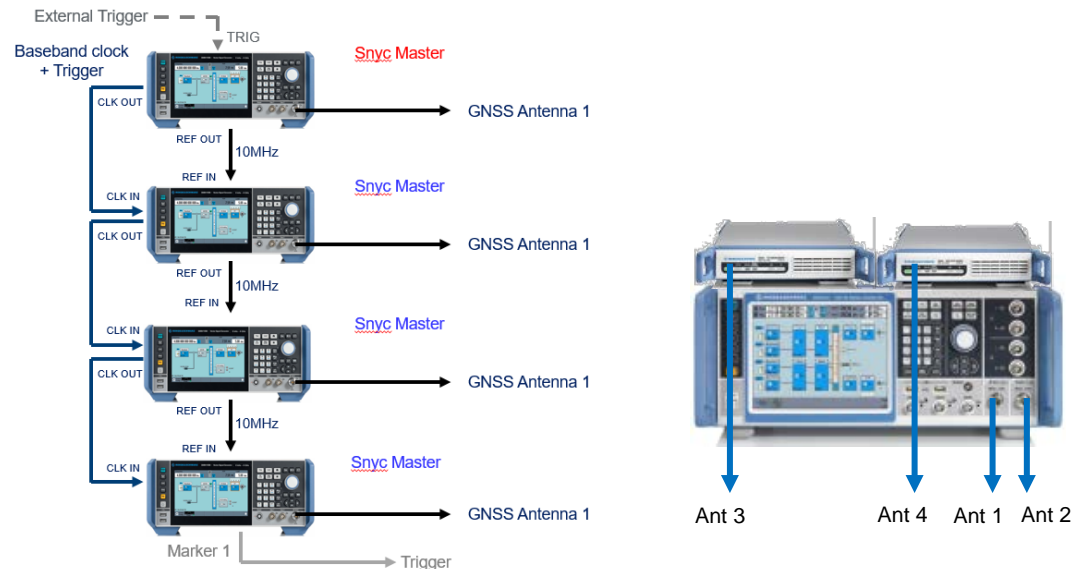


图 29 多天线接收机测试框图 - SMBV100B(左)、SMW200A(右)

6 总结

R&S 的导航卫星模拟器，提供了方便、可靠和高性价比的接收机测试解决方案。SMBV100B 单表实时产生多达 60 颗 GPS, Glonass, Galileo 和 BeiDou 卫星，这为

研发和生产领域的卫星模拟提供了极大的便捷。SMW 作为比 SMBV100B 更先进的导航卫星模拟器，能够实时产生多达 144 颗卫星，能够进行更多高级应用，如多天线应用，多车交互应用及各种干扰模拟，是新一代卫星导航模拟器的标杆。

Feature	R&S SMBV100B	R&S SMW200A
Multi-frequency scenarios	Yes	Yes
GNSS frequency bands	L1, L2 and L5	L1, L2 and L5
Number of GNSS channels	6 to 60	24 to 144
Number of RF outputs	1	1 to 4 (up to 2 internal RF paths, path 3 and 4 by connecting two R&S®SGT100A)
Maximum number of simulated antennas	1	4
Maximum number of simulated vehicles	1	2
Measured worst case pseudorange accuracy	< 1 cm	< 1 cm
Hardware update rate	100 Hz	100 Hz
Signal dynamics		
Velocity	max. 600 m/s	max. 10000 m/s
Acceleration	max. 1600 m/s ²	max. 1600 m/s ²
Jerk	max. 400 m/s ³	max. 400 m/s ³
HIL streaming rate	100 Hz	100 Hz
HIL latency	20 ms	20 ms
Interference generation	Yes	Yes
Interference sources	1	7
Interference scenarios	GNSS + CW interference or GNSS + AWGN	GNSS + CW interference GNSS + AWGN GNSS + comm. signal (coexistence) GNSS + jamming spoofing

图 30 R&S SMBV100B 和 SMW200A 卫星导航模拟器特性

7 配置信息

SMBV100B GNSS 配置列表：

基本单元		
R&S®SMBV100B	矢量信号发生器	1423.1003.02
硬件选项（GNSS 相关配置）		
R&S®SMBVB-B103	9 kHz 到 3.2 GHz	1423.6270.02
R&S®SMBVB-B1	参考信号振荡器 OCXO	1423.6470.02
R&S®SMBVB-B1H	高性能参考信号振荡器 OCXO	1423.6570.02
软件选项（仅与 GNSS 相关）		
R&S®SMBVB-K90	相位参考	1423.7601.02
R&S®SMBVB-K62	高斯白噪声	1423.7876.02
R&S®SMBVB-K44	GPS	1423.7753.02
R&S®SMBVB-K98	现代化 GPS	1423.7960.02
R&S®SMBVB-K66	Galileo	1423.7882.02
R&S®SMBVB-K94	GLONASS	1423.7953.02
R&S®SMBVB-K107	北斗	1423.7999.02
R&S®SMBVB-K132	现代化北斗	1423.8789
R&S®SMBVB-K106	SBAS/QZSS	1423.7982.02
R&S®SMBVB-K99	GNSS 扩展到 24 颗卫星	1423.7976.02
R&S®SMBVB-K108	真实世界场景	1423.8008.02
R&S®SMBVB-K109	实时 GNSS 接口	1423.8014.02
R&S®SMBVB-K133	单卫星 GNSS	1423.8743.02
R&S®SMBVB-K134	GNSS 更新到双频段	1423.8750.02
R&S®SMBVB-K135	GNSS 更新到三频段	1423.8766.02
R&S®SMBVB-K136	增加 6 颗 GNSS 卫星	1423.8772.02
R&S®SMBVB-K137	增加 12 颗 GNSS 卫星	1423.8795.02
软件选项（播放 R&S WinIQSIM2 生成的波形文件）		
R&S®SMBVB-K244	GPS	1423.8195.02
R&S®SMBVB-K298	现代化 GOS	1423.8408.02
R&S®SMBVB-K266	Galileo	1423.8320.02
R&S®SMBVB-K294	GLONASS	1423.8395.02
R&S®SMBVB-K407	北斗	1423.8489.02
R&S®SMBVB-K432	现代化北斗	1423.8837
软件选项（GNSS 自动化测试）		
R&S®SMBVB-K360	ERA-GLONASS 测试套件	1423.8650.02
R&S®SMBVB-K361	eCall 测试套件	1423.8666.02
软件选项（航空电子选项）		
R&S®SMBVB-K111	GBAS	1423.8020.02
R&S®SMBVB-K151	ILS	1423.8120.02
R&S®SMBVB-K152	VOR	1423.8137.02
R&S®SMBVB-K153	DME	1423.8143.02

SMW200A GNSS 配置列表:

基本单元		
R&S®SMW200A	矢量信号发生器	1413.0000.02
硬件选项 (GNSS 相关配置)		
R&S®SMW-B103	100 kHz 到 3 GHz, 通道 A	1413.0004.02
R&S®SMW-B203	100 kHz 到 3 GHz, 通道 B	1413.0804.02
R&S®SMW-B13	单路实时基带	1413.2807.02
R&S®SMW-B13T	双路实时基带	1413.3003.02
R&S®SMW-B10	实时基带, ARB 64 Ms, RF 带宽 120MHz	1413.1200.02
R&S®SMW-B10(F)	实时基带, ARB 64 Ms, RF 带宽 120MHz, 高信号动态	1413.4303.02
R&S®SMW-B90	相位参考	1413.5841.02
软件选项 (仅与 GNSS 相关)		
R&S®SMW-K62	高斯白噪声	1413.3484.02
R&S®SMW-K76	多个实体 (用于共存测试)	1413.9624.02
R&S®SMW-K44	GPS	1413.3832.02
R&S®SMW-K98	现代化 GPS	1414.1533.02
R&S®SMW-K66	Galileo	1413.4380.02
R&S®SMW-K94	GLONASS	1414.1485.02
R&S®SMW-K107	北斗	1414.1585.02
R&S®SMW-K132	现代化北斗	1414.6606
R&S®SMW-K106	SBAS/QZSS	1414.2923.02
R&S®SMW-K99	GNSS 扩展到 48 颗卫星	1414.2881.02
R&S®SMW-K108	真实世界场景	1414.2975.02
R&S®SMW-K109	实时 GNSS 接口	1414.3013.02
R&S®SMW-K120	高级 GNSS 应用	1419.3094.02
软件选项 (播放 R&S WinIQSIM2 生成的波形文件)		
R&S®SMW-K244	GPS	1415.4880.02
R&S®SMW-K298	现代化 GPS	1415.3171.02
R&S®SMW-K266	Galileo	1419.7015.02
R&S®SMW-K294	GLONASS	1415.7067.02
R&S®SMW-K407	北斗	1415.7155.02
R&S®SMW-K432	现代化北斗	1415.6629
软件选项 (GNSS 自动化测试)		
R&S®SMW-K360	ERA-GLONASS 测试套件	1419.2800.02
R&S®SMW-K361	eCall 测试套件	1415.2846.02