



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1471—2024

全球导航卫星系统(GNSS) 信号模拟器校准规范

Calibration Specification for GNSS Signal Simulators

2024-06-14 发布

2024-12-14 实施

国家市场监督管理总局 发布

全球导航卫星系统(GNSS)

信号模拟器校准规范

Calibration Specification for GNSS

Signal Simulators

JJF 1471—2024

代替 JJF 1471—2014

归口单位：全国时间频率计量技术委员会

起草单位：中国计量科学研究院

北京交通大学

中国电子科技集团公司第十研究所

本规范委托全国时间频率计量技术委员会负责解释

本规范起草人：

杨志强（中国计量科学研究院）

张爱敏（中国计量科学研究院）

梁 坤（北京交通大学）

潘 柳（中国电子科技集团公司第十研究所）

梁桂海（中国电子科技集团公司第十研究所）

目 录

引言 (II)

1 范围..... (1)

2 引用文件..... (1)

3 术语..... (1)

4 概述..... (1)

5 计量特性..... (3)

5.1 GNSS 信号模拟器 (3)

5.2 RDSS 入站接收机 (4)

6 校准条件..... (4)

6.1 环境条件..... (4)

6.2 测量标准及其他设备..... (4)

7 校准项目和校准方法..... (6)

7.1 校准项目..... (6)

7.2 校准方法..... (7)

8 校准结果表达..... (16)

9 复校时间间隔..... (17)

附录 A 原始记录格式 (18)

附录 B 校准证书（内页）格式 (24)

附录 C 校准结果的不确定度评定示例 (27)

附录 D 矢量信号发生器产生 RDSS 入站信号的方法 (37)

附录 E RDSS 入站接收机双向设备时延测量误差的测量方法 (39)

引 言

JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成修订本规范的基础性系列规范。

本规范是对 JJF 1471—2014《全球导航卫星系统（GNSS）信号模拟器校准规范》的修订，除编辑性修改外，主要修订内容如下：

- 增加了北斗 RDSS 信号模拟器及北斗 RDSS 入站接收机的校准；
- 增加了模拟器伪距误差和伪距率误差的校准；
- 增加了模拟器动态范围和伪距率分辨力的通用计数器校准方法；
- 增加了 RDSS 入站接收机双向设备时延测量误差的测量方法；
- 补充了部分引用文件、术语和计量单位。

本规范历次版本发布情况为：

- JJF 1471—2014。

全球导航卫星系统(GNSS) 信号模拟器校准规范

1 范围

本规范适用于全球导航卫星系统（GNSS）信号模拟器（含北斗 RDSS 信号模拟器）的校准。

2 引用文件

本规范引用了以下文件：

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1180 时间频率计量名词术语及定义

JJF 1403 全球导航卫星系统（GNSS）接收机（时间测量型）校准规范

GB/T 19391 全球定位系统（GPS）术语及定义

GB/T 39267—2020 北斗卫星导航术语

GB/T 39413—2020 北斗卫星导航系统信号模拟器性能要求及测试方法

BD 420007 北斗用户终端 RDSS 单元性能要求及测试方法

凡是注明日期的引用文件，仅注明日期的版本适用于本规范；凡是不注明日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语

3.1 加加速度 jerk

加速度的时间变化率。

3.2 内部通道延迟 internal channel delay

模拟器内部通道的信道特性引入的信号时延。

3.3 卫星无线电测定业务 Radio Determination Satellite Service; RDSS

由用户接收主控站通过高轨道卫星（GEO）转发的导航信号，响应后再由 GEO 卫星转发至主控站完成距离测量，用户位置及时间参数由主控站计算的导航体制。

3.4 RDSS 出站信号 RDSS outbound signal

北斗卫星导航系统 RDSS 业务中由主控站发射经卫星转发至用户的无线电信号。

3.5 RDSS 入站信号 RDSS inbound signal

北斗卫星导航系统 RDSS 业务中由用户发射经卫星转发至主控站的无线电信号。

3.6 RDSS 双向设备时延 RDSS two-way time delay of device

RDSS 用户设备从接收信号到达天线口面至发射信号离开天线口面的时间延迟。

4 概述

GNSS 信号模拟器（以下简称模拟器）是 GNSS 系统信号发生器，用于模拟产生特

定的 GNSS 系统信号。模拟器提供全球导航卫星系统导航信号仿真，卫星星座可包括 BDS（北斗卫星导航系统）、GPS（全球定位系统）、GALILEO（伽利略系统）、GLO-NASS（格洛纳斯系统）等，可用在 GNSS 接收机的研发、生产和计量过程的各个环节。

GNSS 信号模拟器的基本结构和工作原理如图 1 所示。仿真控制、数字仿真模块对导航卫星、信号传输环境和接收用户进行建模，模拟导航系统全星座的运行和用户的运动状态，运算产生信号模型参数；以内部时基为参考，射频模拟信号生成模块按照各导航系统接口控制协议要求，生成各种卫星导航射频信号。

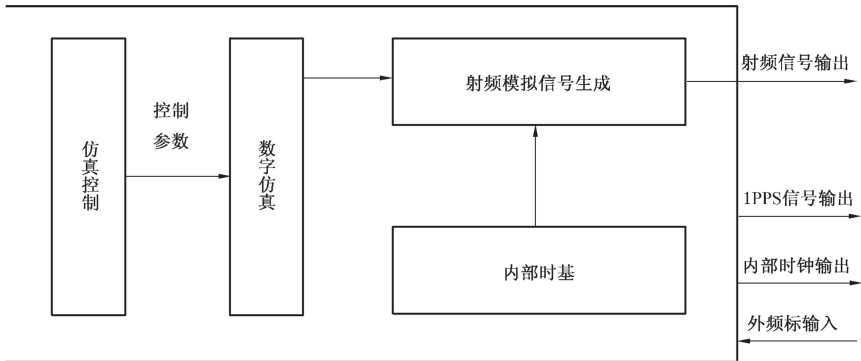


图 1 GNSS 信号模拟器的基本结构和工作原理

模拟器通常包含出站信号模拟和入站信号解算功能，其中出站信号模拟部分与传统的 GNSS 信号模拟器类似，入站信号解算部分称为 RDSS 入站接收机，有时也以独立设备的形态出现。RDSS 入站接收机用于测试北斗 RDSS 终端入站信号的发射频率、发射功率、相位调制误差、载波抑制和双向设备时延等指标。

RDSS 入站接收机的基本结构和工作原理如图 2 所示。RDSS 入站信号经射频前端处理，得到中频信号；信号采集模块对中频信号进行采集；数字信号处理模块对采集到的信号进行同步、解调和参数估计，最后得到输入电文和信号的频率、幅度、相位调制误差、载波抑制和双向设备时延等参数。

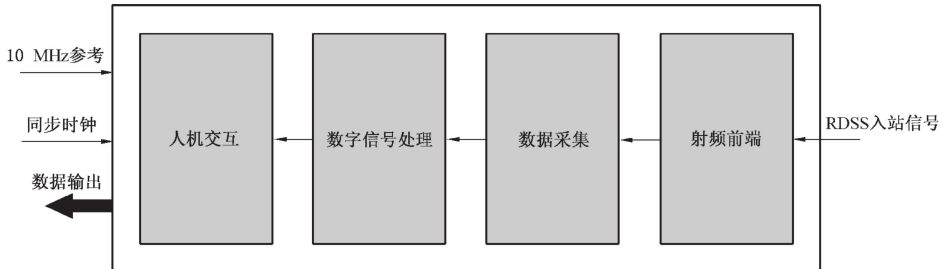


图 2 RDSS 入站接收机基本结构和工作原理

5 计量特性

5.1 GNSS 信号模拟器

5.1.1 射频信号载波频率偏差

($-100 \sim 100$) Hz。

5.1.2 功率范围

大信号输出口：($-60 \sim -20$) dBm；

小信号输出口：($-170 \sim -70$) dBm。

5.1.3 功率分辨力

($0.1 \sim 2$) dB。

5.1.4 功率偏差

$\pm (0.5 \sim 2)$ dB。

5.1.5 动态范围

a) 速度动态范围：($0 \sim 36\,000$) m/s；

b) 加速度动态范围：($0 \sim 2\,000$) m/s²；

c) 加加速度动态范围：($0 \sim 2\,000$) m/s³。

5.1.6 伪距分辨力和伪距误差

a) 伪距分辨力：($0.01 \sim 0.1$) m；

b) 伪距误差： ≤ 0.05 m。

5.1.7 伪距率分辨力和伪距率误差

a) 伪距率分辨力：($0.01 \sim 0.1$) m/s；

b) 伪距率误差： ≤ 0.01 m/s。

5.1.8 内部通道延迟

($0 \sim 15$) ns。

5.1.9 谐波抑制

($-60 \sim -20$) dBc。

5.1.10 非谐波抑制

($-60 \sim -30$) dBc。

5.1.11 相位噪声

($-90 \sim -60$) dBc/Hz (傅里叶频率 10 Hz)；

($-100 \sim -65$) dBc/Hz (傅里叶频率 100 Hz)；

($-110 \sim -70$) dBc/Hz (傅里叶频率 1 kHz)；

($-120 \sim -80$) dBc/Hz (傅里叶频率 10 kHz)；

($-130 \sim -85$) dBc/Hz (傅里叶频率 100 kHz)。

5.1.12 内部时基

相对频率偏差： $\pm 5 \times 10^{-11} \sim \pm 5 \times 10^{-8}$ ；

频率稳定度： $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-9}$ ($\tau = 1$ s)。

5.1.13 误差矢量幅度

2%~20%。

5.2 RDSS 入站接收机

5.2.1 频率测量

最大允许误差： $\pm (1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-8})$ 。

5.2.2 功率测量

最大允许误差： $\pm (0.5 \text{ dB} \sim 2 \text{ dB})$ 。

5.2.3 载波抑制测量

最大允许误差： $\pm (0.5 \text{ dB} \sim 2 \text{ dB})$ 。

5.2.4 相位调制误差测量

最大允许误差： $\pm (0.5\% \sim 2\%)$ 。

注：以上指标仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：在 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 内任选一点，校准过程中温度变化不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

6.1.2 环境相对湿度： $\leq 80\%$ 。

6.1.3 电源电压： $(220 \pm 22) \text{ V}$ ；

电源频率： $(50 \pm 1) \text{ Hz}$ 。

6.1.4 无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 功率计

频率范围： $100 \text{ kHz} \sim 3.6 \text{ GHz}$ ；

测量范围： $-80 \text{ dBm} \sim 0 \text{ dBm}$ ；

最大允许误差： $\pm 0.2 \text{ dB}$ ；

最小分辨力： 0.01 dB 。

6.2.2 测量接收机

频率范围： $100 \text{ kHz} \sim 3.6 \text{ GHz}$ ；

相对电平测量范围： $-140 \text{ dB} \sim 0 \text{ dB}$ ；

最大允许误差： $\pm 0.2 \text{ dB}$ ；

最小分辨力： 0.01 dB 。

6.2.3 实时频谱分析仪

频率范围： $100 \text{ Hz} \sim 3.6 \text{ GHz}$ ；

最大允许误差： $\pm 0.1 \text{ Hz}$ （使用外部参考源）。

6.2.4 微波频率计（具有外频标输入功能）

频率范围： $1 \text{ GHz} \sim 3.6 \text{ GHz}$ ，最小分辨力： 1 Hz 。

6.2.5 高速数字示波器

频率范围： $100 \text{ kHz} \sim 3.6 \text{ GHz}$ ；

采样率： ≥ 80 GS/s；

时间分辨力： ≤ 12.5 ps；

存储深度： ≥ 2 GS。

6.2.6 频谱分析仪

频率范围：20 Hz～3.6 GHz；

电平测量最大允许误差： ± 1 dB；

动态范围： ≥ 100 dB。

6.2.7 低噪声合成信号发生器

频率范围：10 MHz～3.6 GHz；

相位噪声：优于被校模拟器 10 dB。

6.2.8 相位噪声测量系统

频率范围：10 MHz～3.6 GHz；

频偏范围：1 Hz～1 MHz；

附加相位噪声：优于被校模拟器 10 dB。

6.2.9 频标比对器

测量范围：1 Hz～30 MHz；

附加频率稳定度：优于被校模拟器相应采样时间频率稳定度的 1/3。

6.2.10 参考频率源

输出频率：5 MHz 或 10 MHz；

相对频率偏差：优于 $\pm 5 \times 10^{-12}$ ；

频率稳定度：优于被校模拟器相应采样时间频率稳定度的 1/3。

6.2.11 低噪声放大器

频率范围：(1～3.6) GHz；

附加相位噪声：优于被校模拟器相应相位噪声 10 dB。

6.2.12 矢量信号分析仪

频率范围：20 Hz～3.6 GHz；

解调分析带宽：120 MHz。

6.2.13 峰值功率计

频率范围：50 MHz～3.6 GHz；

功率测量范围： -30 dBm～20 dBm；

功率测量误差： $\pm 5\%$ 。

6.2.14 矢量信号发生器

频率范围：10 MHz～3.6 GHz；

幅度范围： -60 dBm～10 dBm；

调制带宽： ≥ 40 MHz；

存储深度： ≥ 20 MSa。

6.2.15 功率放大器

频率范围：1 615.68 MHz $\pm$ 4.08 MHz；

增益：20 dB~40 dB。

6.2.16 通用计数器（具有外频标输入功能）

频率范围：1 GHz~3 GHz；

取样时间：1 s 无间断取样；

最大允许误差：±0.02 Hz。

注：以上条件为校准中需遵循的一般性要求，根据实际情况也可做合理变化。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 1。

表 1 校准项目表

序号	校准项目名称		
1	外观及工作正常性检查		
2	GNSS 信号模拟器	射频信号载波频率偏差	
3		功率控制	功率范围
4			功率分辨率
5			功率偏差
6		动态范围	速度动态范围
7			加速度动态范围
8			加加速度动态范围
9		误差控制	伪距分辨率和伪距误差
10			伪距率分辨率和伪距率误差
11			内部通道延迟
12		频谱纯度	谐波抑制
13			非谐波抑制
14			相位噪声
15		内部时基	相对频率偏差
16			1 s 频率稳定度
17		误差矢量幅度	
18	RDSS 入站接收机	频率测量	
19		功率测量	
20		载波抑制测量	
21		相位调制误差测量	

7.2 校准方法

所有校准用设备均需按各自技术说明书规定的时间预热。

部分参数校准利用模拟器的校准输出口或大信号输出口；如无校准输出口或大信号输出口，则利用模拟器通用射频信号输出口，必要时配合使用低噪声放大器。

7.2.1 外观及工作正常性检查

被校准模拟器不应有影响正常工作及读数的机械损伤，各项标识应清晰完整，输入输出插座应牢靠，按键及旋钮应能正常动作并接触良好。仪器通电后状态正常，显示器能正常显示。达到规定预热时间后各输出端有相应信号输出，各项功能检查正常。有自检功能的，应能通过自检。

7.2.2 射频信号载波频率偏差

校准连接如图 3 所示。

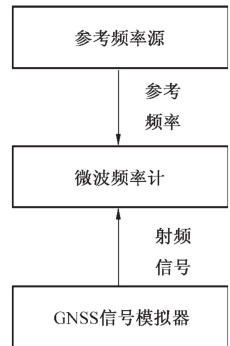


图 3 模拟器射频信号载波功率校准

- a) 模拟器开机，选择待测导航系统和频点；
- b) 设置场景为卫星和载体均为静态，仿真单通道单载波信号；
- c) 利用微波频率计（使用外部参考频率源）对射频信号载波频率 f_m 测量并记录；
- d) 根据模拟器输出射频信号载波频率标称值 f_0 及式（1），计算射频信号载波频率偏差 Δf_c ，作为射频信号载波频率偏差校准值。

$$\Delta f_c = f_m - f_0 \tag{1}$$

7.2.3 功率控制

7.2.3.1 功率范围

校准连接如图 4 所示。



图 4 模拟器信号输出功率控制校准

- a) 模拟器开机，选择待测导航系统和频点；
- b) 设置场景为卫星和载体均为静态，仿真单通道单载波信号；
- c) 根据模拟器输出信号功率范围指标，设置信号最大和最小功率，利用功率计或测量接收机进行测量并记录，作为模拟器输出信号功率范围校准值；
- d) 如果信号功率低至功率计或测量接收机无法测量，可通过测量模拟器校准口（或大信号口）和通用射频信号口的最大功率获得两口间衰减值，利用测得的模拟器校准口（或大信号口）的最小功率结合衰减值，得到模拟器输出信号最小功率值。

7.2.3.2 功率分辨率

校准原理框图如图 4。

- a) 模拟器开机，选择待测导航系统和频点；
- b) 设置场景为卫星和载体均为静态，仿真单通道单载波信号；
- c) 在模拟器功率范围内，设置初始信号功率，利用功率计或测量接收机进行测量并记录，根据模拟器功率分辨率指标增加或减少模拟器信号功率，利用功率计或测量接收机进行测量并记录，两次功率测量值相减，差值作为功率分辨率校准值。

7.2.3.3 功率偏差

校准原理框图如图 4。

- a) 模拟器开机，选择待测导航系统和频点；
- b) 设置场景初始为卫星和载体均为静态，仿真单通道单载波信号；
- c) 根据模拟器输出信号功率范围指标，在功率范围内，挑选至少 5 个校准功率点，功率计或测量接收机依次测量相应功率值 P_m 并记录；
- d) 根据模拟器输出信号功率标称值 P_0 和式（2），计算功率偏差 ΔP ，作为功率偏差校准值。

$$\Delta P = P_m - P_0 \tag{2}$$

7.2.4 动态范围

7.2.4.1 速度与加速度动态范围

（1）实时频谱仪法

校准连接如图 5。

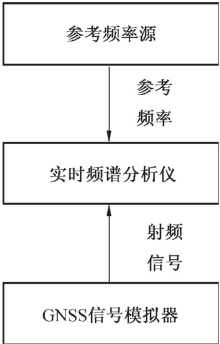


图 5 模拟器信号动态范围校准（实时频谱仪）

- a) 模拟器开机，选择待测导航系统和频点；
- b) 设置场景，仿真单颗卫星单载波，载波频率为 f_0 ，初始卫星与载体均为静态，规定时间（如 1 min）后，设置载体径向初始加速度为模拟器加速度范围指标上限，初始速度为 0 m/s，使速度达到模拟器速度范围指标上限，保持匀速一定时间（如 1 min）；
- c) 启动仿真；
- d) 将实时频谱分析仪中心频点设为载波频率，观察扫频信号，记录扫频范围 Δf ，并记录从最低端开始到最高端的一次完整扫频的时间 t_{all} ；
- e) 基于多普勒频移原理，利用式（3）计算速度， $(-v \sim +v)$ 作为模拟器速度动态范围校准值；利用式（4）计算加速度， $(-a \sim +a)$ 作为模拟器加速度动态范围校准值。

$$v = \Delta f \cdot \frac{c}{f_0} \quad (3)$$

$$a = \frac{\Delta f}{t_{\text{all}}} \cdot \frac{c}{f_0} \quad (4)$$

式中， c 为光速，取值为 299 792 458 m/s。

（2）通用计数器法

校准连接如图 6。

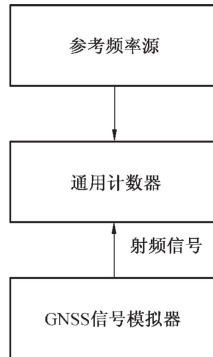


图 6 模拟器动态范围校准（通用计数器法）

- a) 模拟器开机，选择待测导航系统和频点。
- b) 设置场景，仿真单颗卫星单载波，载波频率为 f_0 ，初始卫星与载体均为静态，规定时间（如 1 min）后，设置载体径向初始加速度为模拟器加速度范围指标上限、初始速度为 0 m/s，使速度达到模拟器速度范围指标上限，保持匀速一定时间（如 3 min）。
- c) 启动仿真。
- d) 设置通用计数器取样时间为 1 s，测量载体静态时的载波频率，记为 f_m ，连续记录模拟器载波频率从 $f_m \sim f_m + \Delta f$ 的变化过程，记为 f_i ($i=1, 2, 3 \cdots n$)。
- e) 速度达到最大值后，连续从 f_i 中取 100 个测量值，计算平均值 $\overline{f_i}$ ，按多普勒频

移原理, 利用式 (5) 计算速度 v , 取 $(-v \sim v)$ 作为模拟器速度动态范围校准值。

$$v = \overline{\Delta f} \cdot \frac{c}{f_0} \quad (5)$$

式中, $\overline{\Delta f} = \overline{f_i} - f_m$ 。

f) 从 f_i 中, 取速度上升过程中的一段, 计算其一阶导数序列为 f'_i , 按式 (6) 计算加速度 a , $(-a \sim +a)$ 作为模拟器加速度动态范围校准值。

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f'_i \cdot \frac{c}{f_0} \quad (6)$$

7.2.4.2 加加速度动态范围

(1) 实时频谱仪法

校准原理框图如图 5 所示。

a) 模拟器开机, 选择待测导航系统和频点;

b) 设置场景, 仿真单颗卫星单载波信号, 载波频率为 f_0 , 初始卫星与载体均为静态, 规定时间 (如 1 min) 后, 载体在径向上开始以模拟器加加速度动态范围上限值进行匀加加速度运动, 规定时间 (如 5 s) 后, 载体以匀速运动运行;

c) 启动仿真;

d) 将实时频谱分析仪中心频点设为载波频率, 观察扫频信号, 记录扫频范围 Δf , 并记录从最低端开始到最高端的一次完整扫频的时间 t_{all} ;

e) 基于多普勒频移原理, 利用式 (7) 计算加加速度, $(-J \sim +J)$ 作为模拟器加加速度动态范围校准值。

$$J = \frac{2\Delta f}{t_{\text{all}}^2} \cdot \frac{c}{f_0} \quad (7)$$

(2) 通用计数器法

校准连接如图 6 所示。

a) 模拟器开机, 选择待测导航系统和频点;

b) 设置场景, 仿真单颗卫星单载波, 载波频率为 f_0 , 初始卫星与载体均为静态, 规定时间 (如 1 min) 后, 载体在径向上开始以模拟器加加速度动态范围上限值进行匀加加速度运动, 规定时间 (如 5 s) 后, 载体以匀速运动运行;

c) 启动仿真;

d) 测量载体静态时的载波频率, 记为 f_m , 连续记录模拟器载波频率从 $f_m \sim f_m + \Delta f$ 的变化过程, 记为 f_i ($i=1, 2, 3 \cdots n$);

e) 从 f_i 中, 取速度上升过程中的一段, 计算其二阶导数序列为 f''_i , 按式 (8) 计算加加速度 J , $(-J \sim +J)$ 作为模拟器加加速度动态范围校准值。

$$J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f''_i \cdot \frac{c}{f_0} \quad (8)$$

7.2.5 误差控制

7.2.5.1 伪距分辨率和伪距误差

校准连接如图 7 所示。

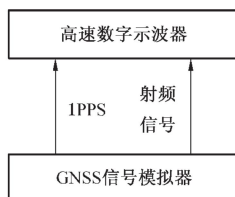


图7 模拟器信号误差控制校准

- a) 将模拟器开机，选择待测导航系统和频点；
- b) 设置场景，卫星和载体均为静态，径向距离为 0 m，仿真单通道单载波信号；
- c) 启动仿真；
- d) 实时采集高速数字示波器上 1PPS 信号与射频载波信号过零点的时间差 ΔT_1 ，并记录；

e) 根据模拟器伪距分辨率指标增加或减少模拟器径向距离，实时采集高速数字示波器上 1PPS 信号与射频载波信号相位翻转点的时间差 ΔT_2 ，并记录；

- f) 利用式 (9) 计算伪距变化值，作为伪距分辨率校准值；

$$\Delta\rho = (\Delta T_2 - \Delta T_1) \times c \quad (9)$$

g) 设置被测模拟器场景径向距离为 N (例如 100 m)，在伪距范围内，挑选至少 5 个校准点，实时采集高速数字示波器上 1PPS 信号与射频载波信号相位翻转点的时间差 ΔT_3 ，并记录；

- h) 利用式 (10) 计算伪距误差校准值。

$$\Delta\rho = (\Delta T_3 - \Delta T_1) \times c - N \quad (10)$$

7.2.5.2 伪距率分辨率和伪距率误差

(1) 数字示波器法

校准原理框图如图 7 所示。

- a) 将模拟器开机，选择待测导航系统和频点。
- b) 设置场景，卫星和载体均为静态，径向距离为 0 m，仿真单通道单载波信号。
- c) 启动仿真。
- d) 实时采集高速数字示波器上 1PPS 信号与射频载波信号过零点的时间差 ΔT_1 ，并记录。

e) 将径向速度改变为 $\dot{\rho}_1$ ，规定时间 Δt_1 (例如 10 s) 后，将径向速度恢复为 0 m/s。

f) 实时采集高速数字示波器上 1PPS 信号与射频载波信号相位翻转点的时间差 ΔT_2 ，并记录。

g) 根据模拟器伪距率分辨率指标改变径向速度为 $\dot{\rho}_2$ ，规定时间 Δt_2 (例如 10 s) 后，径向速度恢复为 0 m/s。

h) 实时采集高速数字示波器上 1PPS 信号与射频载波信号相位翻转点的时间差 ΔT_3 ，并记录。

- i) 利用式 (11) 计算伪距率变化值，作为伪距率分辨率校准值。

$$\dot{\rho} = (\Delta T_3 - \Delta T_2) \times c / \Delta t_2 - (\Delta T_2 - \Delta T_1) \times c / \Delta t_1 \quad (11)$$

j) 恢复径向距离为 0 m, 在速度范围内, 挑选至少 5 个校准点, 设置被测模拟器场景径向速度为 $\dot{\rho}_3$ (例如 100 m/s), 规定时间 Δt_1 (例如 10 s) 后, 将径向速度恢复为 0 m/s; 实时采集高速数字示波器上 1PPS 信号与射频载波信号相位翻转点的时间差 ΔT_4 , 并记录。

k) 利用式 (12) 计算伪距率误差校准值。

$$\Delta \dot{\rho} = (\Delta T_4 - \Delta T_1) \times c / \Delta t_1 - \dot{\rho}_3 \quad (12)$$

(2) 通用计数器法

校准连接如图 8 所示。

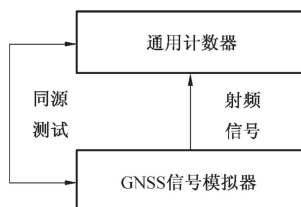


图 8 伪距率校准（通用计数器法）

a) 将模拟器开机, 选择待测导航系统和频点;

b) 设置场景, 仿真单颗卫星, 载体径向初始速度为 0 m/s, 仿真单通道单载波信号;

c) 启动仿真;

d) 设置通用计数器取样时间 τ 为 1 s, 测量模拟器输出射频信号载波频率 f_0 ;

e) 根据模拟器伪距率分辨率指标改变径向速度 $\dot{\rho}_1$, 设置通用计数器取样时间 τ 为 1 s, 测量模拟器输出射频信号载波频率 f_1 ;

f) 利用式 (13) 计算伪距率变化值, 作为伪距率分辨率校准值;

$$\delta \dot{\rho} = \frac{(f_1 - f_0) \times c}{f_0} \quad (13)$$

g) 在速度范围内, 挑选至少 5 个校准点, 设置被测模拟器场景径向速度为 $\dot{\rho}_2$ (例如 100 m/s), 设置通用计数器取样时间 τ 为 1 s, 测量模拟器输出射频信号载波频率 f_2 ;

h) 利用式 (14) 计算伪距率变化值, 作为伪距率误差校准值。

$$\Delta \dot{\rho} = \frac{(f_2 - f_0) \times c}{f_0} - \dot{\rho}_2 \quad (14)$$

7.2.5.3 内部通道延迟

校准原理框图如图 7 所示。

a) 将模拟器开机, 选择待测导航系统和频点;

b) 设置场景, 卫星和载体均为静态, 径向距离为 0 m, 仿真单通道单颗卫星信号, 调制方式为 BPSK 单 I 路;

c) 启动仿真;

d) 观察或实时采集计算高速数字示波器上 1PPS 信号与射频载波信号相位翻转点

的时间差，并记录，作为此通道内部通道时延的校准值；

e) 根据模拟器具体特性，改变硬件通道，重复步骤 b) ～步骤 d)。

7.2.6 频谱纯度

7.2.6.1 谐波抑制

校准连接如图 9 所示。

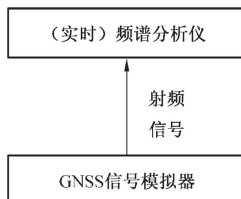


图 9 模拟器信号谐波校准

a) 将模拟器开机，选择待测导航系统和频点；

b) 设置场景，卫星和载体均为静态，径向距离为 0 m，仿真单通道单载波信号；

c) 启动仿真；

d) 利用 (实时) 频谱分析仪对输出信号进行分析，读取相应载频功率 P_1 及其二次和三次谐波功率 P_2 和 P_3 ；

e) 利用式 (15) 计算谐波抑制水平 H_n ，作为谐波抑制校准值。

$$H_n = P_n - P_1, n = 2 \text{ 或 } 3 \quad (15)$$

7.2.6.2 非谐波抑制

校准连接如图 9 所示。

a) 将模拟器开机，选择待测导航系统和频点；

b) 设置场景，卫星和载体均为静态，径向距离为 0 m，仿真单通道单载波信号；

c) 启动仿真；

d) 利用 (实时) 频谱分析仪对输出信号进行分析，读取相应载频功率 P_1 及相应频带内 (频偏参考技术说明书) 杂波 (非谐波) P_m ；

e) 利用式 (16) 计算非谐波抑制水平 $H_m = P_m - P_1$ ，作为非谐波校准值。

$$H_m = P_m - P_1 \quad (16)$$

7.2.6.3 相位噪声

校准连接如图 10 所示。

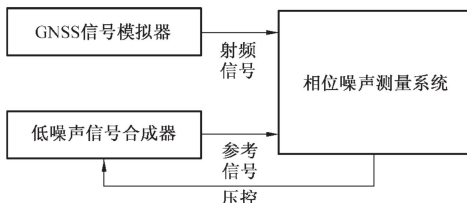


图 10 模拟器信号相位噪声校准

a) 将模拟器开机，选择待测导航系统和频点；

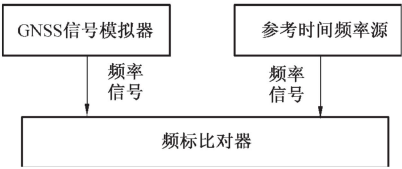
b) 设置场景，卫星和载体均为静态，径向距离为 0 m，仿真单通道单载波信号；

- c) 启动仿真；
- d) 利用相位噪声测量系统对输出信号进行分析，读取相应频点处的相位噪声，作为相位噪声校准值。

7.2.7 内部时基

7.2.7.1 相对频率偏差

校准连接如图 11 所示。



设置取样时间 $\tau=100\text{ s}$ ，测量相对频率偏差。

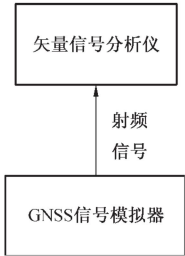
7.2.7.2 1 s 频率稳定度

校准连接如图 11 所示。

设置取样时间为 1 s，取样组数为 100，读取阿伦标准偏差值作为 1 s 频率稳定度校准值。

7.2.8 误差矢量幅度

校准连接如图 12 所示。



- a) 将模拟器开机，选择待测导航系统和频点；
- b) 设置场景，卫星和载体均为静态，径向距离为 0 m，仿真单通道单颗卫星信号，调制方式为 BPSK 单 I 路；
- c) 启动仿真；
- d) 按模拟器说明书的要求设置矢量信号分析仪的载频、功率电平、调制频率、调相相偏及检波带宽；
- e) 用矢量信号分析仪测量信号 EVM（误差矢量幅度）值，作为 EVM 校准值。

7.2.9 RDSS 入站接收机测量误差

7.2.9.1 频率测量

校准连接如图 13 所示。

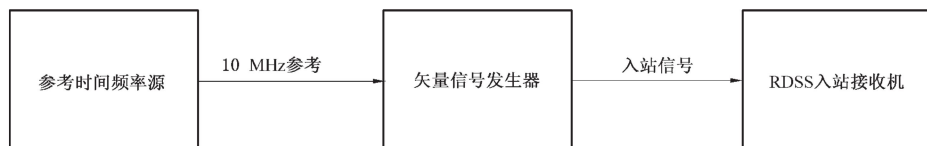


图 13 频率测量校准

- 设置矢量信号发生器按北斗 RDSS 入站信号格式输出出入站信号（设置方法见附录 D），幅度为 0 dBm，中心频率为 $1\,615.68\text{ MHz} + \Delta f_0$ ，其中 Δf_0 为 0 Hz；
- 从被测 RDSS 入站接收机读出入站信号的频差 Δf_x ；
- 利用式（17）计算频率测量误差；

$$\Delta f = \Delta f_x - \Delta f_0 \quad (17)$$

- 在标称范围内，设置 Δf_0 的值，至少选择 5 个校准点，重复步骤 a)～步骤 c)，完成 RDSS 入站接收机全频率测量范围的校准。

7.2.9.2 功率测量

校准连接如图 14 所示。

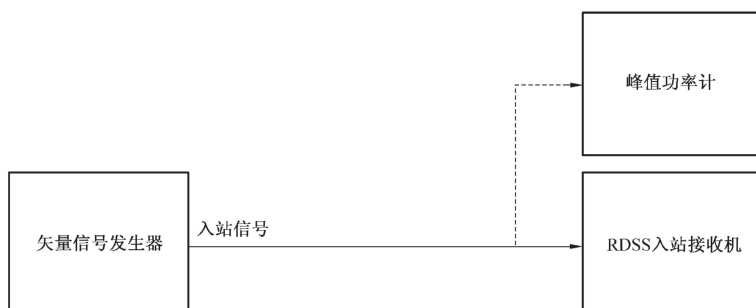


图 14 功率测量校准

- 设置矢量信号发生器输出北斗 RDSS 入站信号，中心频率为 1 615.68 MHz，输出幅度为 10 dBm；
- 先将入站信号连接到峰值功率计，测量得到入站信号功率标准值 P_0 ；
- 然后将入站信号连接到 RDSS 入站接收机，从入站接收机读出相应功率示值 P_x ；
- 利用式（18）计算功率测量误差；

$$\Delta P = P_x - P_0 \quad (18)$$

- 在标称范围内，至少选择 5 个校准点，改变矢量信号发生器的输出幅度，重复步骤 b)～步骤 d)，完成 RDSS 入站接收机全功率测量范围的校准。

7.2.9.3 载波抑制测量

校准连接如图 15 所示。

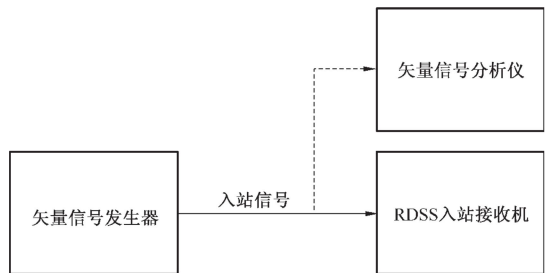


图 15 载波抑制和相位调制误差校准

- a) 设置矢量信号发生器输出北斗 RDSS 入站信号，中心频率为 1 615.68 MHz，幅度为 0 dBm，通过对基带数字信号进行预失真处理的方式调整载波抑制为 45 dB；
- b) 将矢量信号发生器输出的入站信号接至矢量信号分析仪，设置矢量信号分析仪为上升沿触发，中心频率为 1 615.68MHz，调制方式为 BPSK，截取入站信号脉内部分进行解调，读取矢量信号分析仪 IQ OFFSET 的绝对值为载波抑制 S_0 ；
- c) 将矢量信号发生器输出的入站信号接至被校 RDSS 入站接收机，从被校 RDSS 入站接收机读出相应载波抑制测量值 S_x ；
- d) 利用式 (19) 计算载波抑制测量误差；

$$\Delta S = S_x - S_0 \tag{19}$$

- e) 在标称范围内，至少选择 5 个校准点，改变矢量信号发生器的载波抑制，重复步骤 b)～步骤 d)，完成 RDSS 入站接收机全载波抑制测量范围的校准。

7.2.9.4 相位调制误差测量

校准连接如图 15 所示。

- a) 设置矢量信号发生器输出北斗 RDSS 入站信号，中心频率为 1 615.68 MHz，幅度为 0 dBm，通过对基带数字信号进行预失真处理的方式调整相位调制误差为 0.5°；
- b) 将矢量信号发生器输出的入站信号接至矢量信号分析仪，设置矢量信号分析仪为上升沿触发，中心频率为 1 615.68 MHz，调制方式为 BPSK，截取入站信号脉内部分进行解调，读取相位调制误差 P_{E0} ；
- c) 将矢量信号发生器输出的入站信号接至被校 RDSS 入站接收机，从被校 RDSS 入站接收机读出相应相位调制误差 P_{Ex} ；
- d) 利用式 (20) 计算相位调制误差；

$$\Delta P_E = P_{Ex} - P_{E0} \tag{20}$$

- e) 在标称范围内，至少选择 5 个校准点，改变矢量信号发生器的相位调制误差，重复步骤 b)～步骤 d)，完成 RDSS 入站接收机全相位调制误差测量范围的校准。

8 校准结果表达

由校准方出具“校准证书”或校准报告。包括下列内容：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；

- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 对校准规范的偏离的说明；
- m) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔建议 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

原始记录格式

校准地点	
校准时间	
校准仪器	
被校设备	
校准人员	
校准项目	➤ 外观及工作正常性检查 ➤ 射频信号载波频率偏差 ➤ ☐ 功率控制 ➤ 功率范围 ➤ 功率分辨力 ➤ 功率偏差 ➤ ☐ 动态范围 ➤ 速度动态范围 ➤ 加速度动态范围 ➤ 加加速度动态范围 ➤ ☐ 误差控制 ➤ 伪距分辨力和伪距误差 ➤ 伪距率分辨力和伪距率误差 ➤ 内部通道延迟 ➤ ☐ 频谱纯度 ➤ 谐波抑制 ➤ 非谐波抑制 ➤ 相位噪声 ➤ ☐ 内部时基 ➤ 相对频率偏差 ➤ 1 s 频率稳定度 ➤ ☐ 误差矢量幅度 ➤ ☐ RDSS 入站接收机 ➤ 频率测量误差 ➤ 功率测量误差 ➤ 载波抑制测量误差 ➤ 相位调制误差测量误差

A.1 外观及工作正常性检查

表 A.1 外观及工作正常性检查

检查项目	记录
是否有影响工作和读数的机械损伤	
各项标识是否清晰完整	
输入输出插座是否牢靠	
按键及旋钮是否正常动作并接触良好	
仪器通电后状态是否正常	
显示器是否能正常显示	
达到规定预热时间后各输出端是否有相应信号输出	
有自检功能的，是否能通过自检	
有北斗 RDSS 测试功能的，RDSS 双向收发功能正查功能	

A.2 射频信号载波频率偏差

表 A.2 射频信号载波频率偏差校准参考记录表

	标称值	测量值	偏差值	扩展不确定度 ($k=2$)
频点 1				
频点 2				
频点 3				

A.3 功率控制

表 A.3 功率范围校准参考记录表

	最大值	最小值	扩展不确定度 ($k=2$)
频点 1			
频点 2			
频点 3			

表 A.4 功率分辨力校准参考记录表

	理论值	测量值	差值	分辨力	扩展不确定度 ($k=2$)
频点 1					
频点 2					
频点 3					
.....					

表 A.5 准确性校准参考记录表

	理论值	测量功率	差值	准确性	扩展不确定度 ($k=2$)
频点 1					
频点 2					
频点 3					
.....					

A.4 动态范围

A.4.1 速度和加速度动态范围

表 A.6 速度和加速度动态范围校准结果

频点/GHz	扫频范围/kHz	扫频时间/s	速度范围/ (m/s)	加速度范围/ (m/s ²)
.....				
速度动态范围:			扩展不确定度 ($k=2$):	
加速度动态范围:			扩展不确定度 ($k=2$):	

A.4.2 加加速度动态范围

表 A.7 加加速度动态范围校准结果

频点/GHz	扫频范围/kHz	扫频时间/s	加加速度范围/（m/s ³ ）
.....			
加加速度动态范围： 扩展不确定度（ <i>k</i> ＝2）：			

A.5 误差控制

A.5.1 伪距分辨率

表 A.8 伪距分辨率和误差测量结果参考记录表

次数	$\Delta T_1/\text{ps}$	$\Delta T_2/\text{ps}$	$\Delta T_3/\text{ps}$	$\delta\rho/\text{ps}$	$\Delta\rho/\text{ps}$
1					
2					
3					
伪距分辨率:					
扩展不确定度 ($k=2$):					
伪距误差:					
扩展不确定度 ($k=2$):					

A.5.2 伪距率分辨率

表 A.9 伪距率分辨率和误差测量结果参考记录表

次数	$\Delta T_1/\text{ps}$	$\Delta T_2/\text{ps}$	$\Delta T_3/\text{ps}$	$\Delta t/\text{ps}$	$\delta \dot{\rho}/\text{ps}$	$\Delta \dot{\rho}/\text{ps}$
1						
2						
3						
伪距率分辨率： 扩展不确定度（ $k=2$ ）：						
伪距率误差： 扩展不确定度（ $k=2$ ）：						

A.5.3 内部通道延迟

表 A.10 内部通道延迟

内部通道延迟量/ns	
扩展不确定度（ $k=2$ ）	

A.6 频谱纯度

A.6.1 谐波抑制

表 A.11 谐波校准参考记录表

次数\测量值	谐波抑制/dB		
	频点 1	频点 2	频点 3
1			
2			
3			
4			
5			
谐波			
扩展不确定度（ $k=2$ ）			

A.6.2 非谐波抑制

表 A.12 非谐波功率校准参考记录表

次数\测量值	非谐波抑制/dB		
	频点 1	频点 2	频点 3
1			
2			
3			

表 A. 12 (续)

次数\测量值	非谐波抑制/dB		
	频点 1	频点 2	频点 3
4			
5			
杂波功率			
扩展不确定度 ($k=2$)			

A. 6.3 相位噪声

表 A. 13 某频点相位噪声校准参考记录表

校准次数	相位噪声/ (dBc/Hz)			
	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
1				
2				
3				
4				
5				
相位噪声				
扩展不确定度 ($k=2$)				

A. 7 内部时基

A. 7.1 相对频率偏差

表 A. 14 相对频率偏差

参考频率值	模拟器频率值	相对频率偏差
相对频率偏差：		
扩展不确定度 ($k=2$):		

A. 7.2 1 s 频率稳定度

表 A. 15 频率稳定度

取样间隔	频率稳定度	扩展不确定度 ($k=2$)
1 s		

A.8 误差矢量幅度

表 A.16 误差矢量幅度

EVM/%	1	2	3	扩展不确定度 ($k=2$)
频点 1				
频点 2				
频点 3				
.....				

A.9 RDSS 入站接收机测量

A.9.1 频率测量

表 A.17 频率测量

标准值	频率测量偏差	扩展不确定度 ($k=2$)
...		

A.9.2 功率测量

表 A.18 功率测量

标准值	功率测量偏差	扩展不确定度 ($k=2$)

A.9.3 载波抑制测量

表 A.19 载波抑制测量

标准值	载波抑制测量偏差	扩展不确定度 ($k=2$)

A.9.4 相位调制误差测量

表 A.20 相位调制误差测量

标准值	相位调制误差测量值	扩展不确定度 ($k=2$)

附录 B

校准证书（内页）格式

B.1 外观及工作正常性检查

是否通过：

B.2 射频信号载波频率偏差

$$\Delta f_c =$$

$$\text{扩展不确定度：} U = \quad (k=2)$$

B.3 信号功率

B.3.1 功率范围

$$(P_{\min} \sim P_{\max}) =$$

$$\text{扩展不确定度：} U = \quad (k=2)$$

B.3.2 信号功率分辨力

$$r_p =$$

$$\text{扩展不确定度：} U = \quad (k=2)$$

B.3.3 信号功率偏差

$$\sigma_p =$$

$$\text{扩展不确定度：} U = \quad (k=2)$$

B.4 信号动态范围

B.4.1 速度

$$v =$$

$$\text{扩展不确定度：} U = \quad (k=2)$$

B.4.2 加速度

$$a =$$

$$\text{扩展不确定度：} U = \quad (k=2)$$

B.4.3 加加速度

$$J =$$

$$\text{扩展不确定度：} U = \quad (k=2)$$

B.5 信号误差控制

B.5.1 伪距分辨力

$$\Delta \rho =$$

$$\text{扩展不确定度：} U = \quad (k=2)$$

伪距误差

$$\delta \rho =$$

$$\text{扩展不确定度：} U = \quad (k=2)$$

B.5.2 伪距率分辨力

$$\Delta \dot{\rho} =$$

伪距率误差	扩展不确定度：U=	(k=2)
	$\delta \dot{\rho} =$	
B. 5. 3 内部通道延迟	扩展不确定度：U=	(k=2)
	D=	
	$\sigma_D =$	
B. 6 频谱纯度	扩展不确定度：U=	(k=2)
B. 6. 1 谐波	H=	
	扩展不确定度：U=	(k=2)
B. 6. 2 非谐波	CL=	
	扩展不确定度：U=	(k=2)
B. 6. 3 相位噪声	PH=	
	扩展不确定度：U=	(k=2)
B. 7 内部时基		
B. 7. 1 相对频率偏差	$\delta_f =$	
	扩展不确定度：U=	(k=2)
B. 7. 2 1 s 频率稳定度	$\sigma_f =$	
	扩展不确定度：U=	(k=2)
B. 8 误差矢量幅度	$E_k =$	
	扩展不确定度：U=	(k=2)
B. 9 RDSS 入站接收机测量误差		
B. 9. 1 频率测量	$\Delta f =$	
	扩展不确定度：U=	(k=2)
B. 9. 2 功率测量	$\Delta P =$	
	扩展不确定度：U=	(k=2)
B. 9. 3 载波抑制测量	$\Delta S =$	
	扩展不确定度：U=	(k=2)

B.9.4 相位调制误差测量

$$\Delta P_{\text{E}} =$$

$$\text{扩展不确定度: } U = \quad (k=2)$$

注：校准内页格式仅给出单系统单频点的校准结果格式，多系统多频点按类似格式罗列。

附录 C

校准结果的不确定度评定示例

GNSS 信号模拟器校准结果可分为模拟器射频信号载波频率偏差、功率控制校准结果（包括功率范围、功率分辨力、功率偏差）、动态范围校准结果（包括速度动态范围、加速度动态范围、加加速度动态范围）、误差控制校准结果（包括伪距分辨力、伪距率分辨力、内部通道延迟）、频谱纯度校准结果（包括谐波抑制、非谐波抑制、相位噪声）、内部时基校准结果（包括相对频率偏差和 1 s 频率稳定度）、误差矢量幅度校准结果、RDSS 入站信号频率测量校准结果、RDSS 入站信号功率测量校准结果、RDSS 入站信号载波抑制校准结果、RDSS 入站信号相位调制误差校准结果。

在模拟器校准装置中，包括了多个测量仪器完成各参数的测量，如第 7 章各参数校准示意图所示，实例中给出了模拟器各参数校准的不确定度评估方法。

C.1 射频信号载波频率偏差校准

C.1.1 测量模型

射频信号载波频率偏差校准测量可由式 (C.1) 表示：

$$\Delta f_c = f_m - f_0 \quad (\text{C.1})$$

其中， Δf_c 为微波频率计测量得到的射频信号载波频率偏差，单位为 Hz。

C.1.2 不确定度来源

Δf_c 的不确定度主要来源见表 C.1。

表 C.1 Δf_c 不确定度主要来源

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	值/Hz	分布	包含因子	标准不确定度/Hz
u_1	微波频率计	B	2	矩形	$\sqrt{3}$	1.2
u_2	时基参考	B	3	矩形	$\sqrt{3}$	1.8
u_3	测量重复性	A	0.1	——	1.0	0.1

C.1.3 不确定度评定

参考表 C.1 主要不确定度来源， Δf_c 的合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 2.2 \text{ Hz}$$

单次测量的合成标准不确定度为 2.2 Hz。

扩展不确定度 $U(\Delta f_c)$ 为 4.4 Hz ($k=2$)。

C.2 功率控制校准

C.2.1 功率范围校准

功率计测量得到的信号功率 P 的不确定度主要来源见表 C.2。

表 C.2 不确定度主要来源

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	值/dB	分布	包含因子	标准不确定度/dB
u_1	功率计	B	0.02	矩形	$\sqrt{3}$	0.012

表 C.2 (续)

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	值/dB	分布	包含因子	标准不确定度/dB
u_2	失配	B	0.02	反正弦	$\sqrt{2}$	0.014
u_3	测量重复性	A	0.01	——	1.0	0.01

参考以上主要不确定度来源，合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$

最终单次测量的合成标准不确定度 $u_c(x)$ 为 0.02 dB。

扩展不确定度为 $U(P)$ 为 0.04 dB ($k=2$)。

C.2.2 功率分辨力校准

C.2.2.1 测量模型

功率分辨力校准测量可由式 (C.2) 表示：

$$x = P_1 - P_0 \tag{C.2}$$

式中， P_0 和 P_1 分别为功率计在模拟器调整信号功率前后测量得到的信号功率，单位为 dBm。

校准合成标准不确定度计算如式 (C.3)：

$$u_c(x) = \sqrt{u^2(P_1) + u^2(P_0)} \tag{C.3}$$

式中， $u(P_1)$ 和 $u(P_0)$ 分别为 P_1 和 P_0 的标准不确定度，单位为 dB。

C.2.2.2 不确定度来源

P_1 和 P_0 不确定度来源同 C.2.1。

C.2.2.3 不确定度评定

故可得最终单次测量的合成标准不确定度 $u_c(x)$ 为 0.03 dB。

扩展不确定度为 $U(P)$ 为 0.06 dB ($k=2$)。

C.2.3 功率偏差校准

不确定度评定同 C.2.1。

C.3 动态范围校准

C.3.1 速度范围校准

C.3.1.1 测量模型

速度范围校准测量可由式 (C.4) 表示：

$$v = \Delta f \cdot \frac{c}{f_0} \tag{C.4}$$

式中， Δf 为实时频谱仪测量得到的信号频偏，单位为 Hz。

校准合成标准不确定度可计算如式 (C.5)：

$$u_c(v) = \frac{c}{f_0} \cdot u(\Delta f) \tag{C.5}$$

式中， $u(\Delta f)$ 为 Δf 的合成标准不确定度，单位为 Hz。

Δf 的不确定度主要来源见表 C.3。

C.3.1.2 不确定度来源

表 C.3 Δf 不确定度主要来源

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	值/Hz	分布	包含因子	标准不确定度/Hz
u_1	实时频谱仪频率测量最大允许误差	B	2	矩形	$\sqrt{3}$	1.2
u_2	时基参考	B	3	矩形	$\sqrt{3}$	1.8
u_3	测量重复性	A	0.1	——	1.0	0.1

C.3.1.3 不确定度评定

参考以上主要不确定度来源, $u(\Delta f)$ 为 2.2 Hz, 最终单次测量的合成标准不确定度 $u_c(v)$ 为 0.42 m/s。

扩展不确定度 $U(v)$ 为 0.84 m/s ($k=2$)。

C.3.2 加速度范围校准

C.3.2.1 测量模型

加速度范围校准测量可由式 (C.6) 表示:

$$a = \frac{\Delta f}{t_{\text{all}}} \cdot \frac{c}{f_0} \tag{C.6}$$

式中, t_{all} 为实时频谱仪测量得到的扫频时间, 单位为 s。

忽略高阶项影响, 校准合成标准不确定度计算如式 (C.7):

$$u_c(a) = \frac{c}{f_0} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f^2}{t_{\text{all}}^4} \cdot u^2(t_{\text{all}}) + \frac{1}{t_{\text{all}}^2} \cdot u^2(\Delta f)} \tag{C.7}$$

式中, $u(t_{\text{all}})$ 为 t_{all} 的合成标准不确定度, 单位为 s。

t_{all} 的不确定度主要来源见表 C.4。

C.3.2.2 不确定度主来源

表 C.4 t_{all} 不确定度主要来源

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	值/s	分布	包含因子	标准不确定度/s
u_1	实时频谱仪时间测量最大允许误差	B	2×10^{-7}	矩形	$\sqrt{3}$	1.2×10^{-7}
u_2	时基参考	B	2×10^{-9}	矩形	$\sqrt{3}$	1.2×10^{-9}
u_3	测量重复性	A	1×10^{-9}	——	1.0	1×10^{-9}

C.3.2.3 不确定度评定

参考以上主要不确定度来源, $u(t_{\text{all}})$ 为 1.2×10^{-7} s, 结合表 C.4 中主要不确定度来源及实际测量结果, 最终单次测量的合成标准不确定度 $u_c(a)$ 为 0.08 m/s²。

扩展不确定度 $U(a)$ 为 0.16 m/s² ($k=2$)。

C.3.3 加加速度范围校准

C.3.3.1 测量模型

加加速度范围校准测量可由式 (C.8) 表示:

$$J = \frac{2\Delta f}{t_{\text{all}}^2} \cdot \frac{c}{f_0} \quad (\text{C.8})$$

忽略高阶项影响，校准合成标准不确定度可计算如式 (C.9)：

$$u_c(J) = \frac{2c}{f_0} \cdot \sqrt{\frac{4\Delta f^2}{t_{\text{all}}^6} \cdot u^2(t_{\text{all}}) + \frac{1}{t_{\text{all}}^4} \cdot u^2(\Delta f)} \quad (\text{C.9})$$

C.3.3.2 不确定度评定

参考表 C.3 和表 C.4 中主要不确定度来源及实际测量结果，最终单次测量的合成标准不确定度 $u_c(J)$ 为 0.13 m/s^3 ，扩展不确定度为 $U(J)$ 为 0.26 m/s^3 ($k=2$)。

C.4 误差控制校准

C.4.1 伪距偏差

C.4.1.1 测量模型

伪距偏差校准测量可由式 (C.10) 表示：

$$\Delta\rho = (\Delta T_2 - \Delta T_1) \times c \quad (\text{C.10})$$

校准合成标准不确定度计算如式 (C.11)：

$$u_c(\Delta\rho) = c \cdot \sqrt{u^2(\Delta T_1) + u^2(\Delta T_2)} \quad (\text{C.11})$$

式中， $u(\Delta T_1)$ 和 $u(\Delta T_2)$ 分别为 ΔT_1 和 ΔT_2 的标准不确定度，单位为 s。

ΔT_1 和 ΔT_2 的不确定度来源见表 C.5。

C.4.1.2 不确定度来源

表 C.5 ΔT_1 和 ΔT_2 不确定度主要来源

不确定度来源	评定方法	值	分布	包含因子	标准不确定度
高速示波器测量分辨力	B	0.56 ps	矩形	$\sqrt{3}$	可忽略
通道间偏差	B	10 ps	矩形	$\sqrt{3}$	可忽略
时基误差	B	0.1 ps	矩形	$\sqrt{3}$	可忽略
1PPS 信号噪声引起误差	B	0.05 ns	矩形	$\sqrt{3}$	0.03 ns
射频信号噪声引起误差	B	0.1 ns	矩形	$\sqrt{3}$	0.06 ns
测量重复性	A	0.01 ns	——	1.0	0.01 ns

C.4.1.3 不确定度评定

参考以上主要不确定度来源及实际测量结果， $u(\Delta T_1)$ 和 $u(\Delta T_2)$ 均为 0.07 ns，最终单次测量的合成标准不确定度 $u_c(\Delta\rho)$ 为 0.03 m。

扩展不确定度 $U(\Delta\rho)$ 为 0.06 m ($k=2$)。

C.4.2 伪距率偏差

C.4.2.1 测量模型

伪距率偏差校准测量可由式 (C.12) 表示：

$$\dot{\rho} = (\Delta T_2 - \Delta T_1) \times c / \Delta t \quad (\text{C.12})$$

校准合成标准不确定度计算如式 (C.13)：

$$u_c(\dot{\rho}) = \frac{c}{\Delta t} \cdot \sqrt{u^2(\Delta T_1) + u^2(\Delta T_2)} \quad (\text{C.13})$$

C.4.2.2 不确定度评定

参考表 C.5，内部通道延迟 D 的测量合成标准不确定度 $u(D)$ 为 0.07 ns，最终单次测量的合成标准不确定度 $u_c(x)$ 为 0.07 ns。

扩展不确定度 $U(D)$ 为 0.14 ns ($k=2$)。

C.5 频谱纯度校准

C.5.1 谐波和非谐波测量不确定度评估

谐波测量结果 H 的不确定度来源见表 C.6。

表 C.6 H 不确定度主要来源

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	值	分布/dB	包含因子	标准不确定度/dB
u_1	频谱分析仪测量相对电平	B	0.41	——	1.0	0.41
u_2	失配	B	0.80	——	1.0	0.80
u_3	连接电缆	B	0.20	矩形	$\sqrt{3}$	0.16
	测量重复性	A	0.10	——	1.0	0.10

参考以上主要不确定度来源及实际测量结果， $u(H)$ 为 0.9 dB，最终单次测量的合成标准不确定度 $u_c(x)$ 为 0.9 dB。

扩展不确定度 $U(H)$ 为 1.8 dB ($k=2$)。

非谐波的不确定度评定方法及结果同谐波。

C.5.2 相位噪声

相位噪声测量结果的不确定度来源见表 C.7。

表 C.7 PH 不确定度主要来源

不确定度来源	评定方法	值 dBc/Hz	分布	包含因子	标准不确定度 dBc/Hz
测量系统测量误差	B	2	矩形	$\sqrt{3}$	1.4
测量系统本底	B	0.2	——	1.0	0.2
参考源相位噪声	B	0.4	——	1.0	0.4
测量重复性	A	0.1	——	1.0	0.1

参考以上主要不确定度来源及实际测量结果， $u(PH)$ 为 1.5 dBc/Hz，最终单次测量的合成标准不确定度 $u_c(x)$ 为 1.5 dBc/Hz。

扩展不确定度为 $U(PH)$ 为 3.0 dB ($k=2$)。

C.6 内部时基校准

C.6.1 相对频率偏差

C.6.1.1 测量模型

设被校准模拟器内部时基的频率为 f_A ，参考时间频率源的频率为 f_B ，两频率标准的频率标称值相同为 f_0 ，则两频率标准的频率差 $y_{AB}(\tau)$ 可由式 (C.14) 表示。

$$y_{AB}(\tau) = \frac{f_A - f_B}{f_0} = \frac{f_A - f_0}{f_0} - \frac{f_B - f_0}{f_0} = y_A(\tau) - y_B(\tau) \tag{C.14}$$

$y_A(\tau)$ 和 $y_B(\tau)$ 分别为两者的频率偏差，无量纲； τ 为测量时的平均时间（取样时间），单位为 s；在本规范中取 $\tau=100$ s。

内部时基频率偏差单次校准结果为 5.7×10^{-7} 。

$y_{AB}(\tau)$ 的不确定度主要来源见表 C. 8。

C. 6. 1. 2 不确定度来源

表 C. 8 $y_{AB}(\tau)$ 不确定度来源

不确定度来源	评定方法	值	分布	包含因子	标准不确定度
参考时间频率源的频率不准确性	B	1×10^{-14}	——	1.0	1×10^{-14}
参考时间频率源的频率不稳定性	B	$7 \times 10^{-15}/100$ s	——	1.0	$7 \times 10^{-15}/100$ s
电缆、转接头稳定性	B	1×10^{-14}	——	1.0	1×10^{-14}
频标比对器	B	$1 \times 10^{-14}/100$ s	——	1.0	$1 \times 10^{-14}/100$ s
数据修约	B	5×10^{-9}	——	——	5×10^{-9}
测量重复性	A	1×10^{-11}	——	1.0	1×10^{-11}

C. 6. 1. 3 不确定度评定

参考以上主要不确定度来源及实际校准结果，最终单次测量频率偏差的合成标准不确定度 $u_c[y_{AB}(\tau=100 \text{ s})]$ 为 5×10^{-9} ，扩展不确定度 $U[y_{AB}(\tau=100 \text{ s})]$ 为 1×10^{-8} ($k=2$)。

C. 6. 2 1 s 频率稳定度

C. 6. 2. 1 测量模型

1 s 频率稳定度 $\sigma_y(\tau=1 \text{ s})$ 由频标比对器直接给出，校准结果见表 C. 9。

表 C. 9 内部时基 1 s 频率稳定度校准结果

次数	稳定度
1	$7.1 \times 10^{-11}/\text{s}$

$\sigma_y(\tau=1 \text{ s})$ 校准不确定度评定过程中，有限次测量引入的不确定度可由式 (C. 15) 计算：

$$u_\tau = \frac{\sigma_y(\tau=1 \text{ s})}{\sqrt{m}} \tag{C.15}$$

式中， m 为计算 $\sigma_y(\tau=1 \text{ s})$ 时的取样个数。例中， m 为 100。

C. 6. 2. 2 不确定度来源

$\sigma_y(\tau=1 \text{ s})$ 的不确定度主要来源见表 C. 10。

表 C.10 $\sigma_y(\tau=1\text{ s})$ 不确定度来源

不确定度来源	评定方法	值	分量	包含因子	标准不确定度
参考时间频率源的频率不稳定性	B	$2 \times 10^{-14} / 1\text{ s}$	u_3	1.0	$2 \times 10^{-14} / 1\text{ s}$
频标比对器	B	$1.2 \times 10^{-13} / 1\text{ s}$	u_3	1.0	$1.2 \times 10^{-13} / 1\text{ s}$
有限次测量	A	7.1×10^{-12}	u_3	1.0	7.1×10^{-12}

C.6.2.3 不确定度的评定

参考以上主要不确定度来源及实际校准结果，最终单次测量频率稳定度的合成标准不确定度 $u_c[\sigma_y(\tau=1\text{ s})]$ 为 7.1×10^{-12} ，扩展不确定度 $U[\sigma_y(\tau=1\text{ s})]$ 为 1.5×10^{-11} ($k=2$)。

C.7 误差矢量幅度校准

误差矢量幅度测量结果 EVM 的不确定度来源见表 C.11。

表 C.11 EVM 不确定度主要来源

不确定度来源	评定方法	值	分布	包含因子	标准不确定度
信噪比	B	0.20%	矩形	$\sqrt{3}$	0.12%
相位噪声	B	0.05%	——	——	0.05%
矢量信号分析仪残余幅度误差	B	0.30%	矩形	$\sqrt{3}$	0.17%
矢量信号分析仪残余相位误差	B	0.50%	矩形	$\sqrt{3}$	0.29%
矢量信号分析仪 I/Q 原点漂移	B	0.07%	矩形	$\sqrt{3}$	0.04%
测量重复性	A	0.50%	——	1.0	0.50%

参考以上主要不确定度来源及实际测量结果，EVM 的合成标准不确定度 $u(\text{EVM})$ 均为 0.36%，最终单次测量的合成标准不确定度 $u_c(x)$ 为 0.36%。

扩展不确定度为 $U(\text{EVM})$ 为 0.72% ($k=2$)。

C.8 RDSS 入站接收机频率测量不确定度评定

C.8.1 测量模型

采用参考时间频率源和矢量信号发生器直接测量被校 RDSS 入站接收机，测量模型为

$$\Delta f = f_x - f_0 \quad (\text{C.16})$$

式中：

Δf ——RDSS 入站接收机频率测量误差；

f_x ——RDSS 入站接收机频率测量值；

f_0 ——矢量信号发生器频率值。

C.8.2 不确定度来源

1) 参考时间频率源的频率偏差 u_1 ；

- 2) 参考时间频率源的频率稳定度 u_2 ;
- 3) 矢量信号发生器频率偏差 u_3 ;
- 4) 被校 RDSS 入站接收机的测量重复性 u_4 。

表 C.12 RDSS 入站接收机频率测量不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量	来源	评定方法	分布	包含因子	标准不确定度/Hz
1	u_1	参考时间频率源的 频率准确度	B	矩形	$\sqrt{3}$	0.2
2	u_2	参考时间频率源的 频率稳定度	B	矩形	$\sqrt{3}$	0.02
3	u_3	矢量信号发生器 频率偏差	A	——	1.0	0.02
4	u_4	被测件测量重复性	A	——	1.0	1.6

C.8.3 不确定度评定

根据表 C.12，假设各不确定度分量互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{0.2^2 + 0.02^2 + 0.02^2 + 1.6^2} \text{ Hz} \approx 1.7 \text{ Hz}$$

扩展不确定度：

$$U = 2 \times u_c = 3.4 \text{ Hz} \quad (k = 2)$$

C.9 RDSS 入站接收机功率测量不确定度评定

C.9.1 测量模型

采用峰值功率计和被校 RDSS 入站接收机比较测量，测量模型为

$$\Delta P = P_x - P_0 \tag{C.17}$$

式中：

ΔP ——RDSS 入站接收机功率测量误差；

P_x ——RDSS 入站接收机功率测量值；

P_0 ——峰值功率计功率测量值。

C.9.2 不确定度来源

- 1) 峰值功率计功率准确度 u_1 ;
- 2) 失配 u_2 ;
- 3) 峰值功率计/矢量信号分析仪测量重复性 u_3 ;
- 4) 被校 RDSS 入站接收机功率测量重复性 u_4 。

表 C.13 RDSS 入站接收机功率测量不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量	来源	评定方法	分布	包含因子	标准不确定度/dB
1	u_1	峰值功率计准确度	B	矩形	$\sqrt{3}$	0.08
2	u_2	失配	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.02
3	u_3	峰值功率计重复性	A	——	1.0	0.06
4	u_4	被测件测量重复性	A	——	1.0	0.20

C.9.3 不确定度评定

根据表 C.13, 假设各不确定度分量互不相关, 合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{0.08^2 + 0.02^2 + 0.06^2 + 0.20^2} \text{ dB} \approx 0.23 \text{ dB}$$

扩展不确定度:

$$U = 2 \times u_c = 0.46 \text{ dB} \quad (k=2)$$

C.10 RDSS 入站接收机载波抑制测量不确定度评定

C.10.1 测量模型

采用矢量信号分析仪和被校 RDSS 入站接收机比较测量, 测量模型为

$$\Delta S = S_x - S_0 \quad (\text{C.18})$$

式中:

ΔS ——被校 RDSS 入站接收机载波抑制测量误差;

S_x ——被校 RDSS 入站接收机载波抑制测量值;

S_0 ——矢量信号分析仪载波抑制测量值。

C.10.2 不确定度来源

- 1) 矢量信号分析仪 IQ 原点漂移 u_1 ;
- 2) 矢量信号分析仪测量重复性 u_2 ;
- 3) 被校 RDSS 入站接收机载波抑制测量重复性 u_3 。

表 C.14 RDSS 入站接收机载波抑制测量不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量	来源	评定方法	分布	包含因子	标准不确定度/dB
1	u_1	IQ 原点漂移	B	矩形	$\sqrt{3}$	0.07
2	u_2	矢量信号分析仪重复性	B	矩形	$\sqrt{3}$	0.02
3	u_3	被测件测量重复性	A	——	1.0	0.12

C.10.3 不确定度评定

根据表 C.14, 假设各不确定度分量互不相关, 合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{0.07^2 + 0.02^2 + 0.12^2} \text{ dB} = 0.15 \text{ dB}$$

扩展不确定度:

$$U = 2 \times u_c = 0.30 \text{ dB} \quad (k=2)$$

C.11 RDSS 入站接收机相位调制误差测量误差不确定度评定

C.11.1 测量模型

采用矢量信号分析仪和被校 RDSS 入站接收机比较测量, 测量模型为

$$\Delta PE = PE_x - PE_0 \quad (\text{C.19})$$

式中:

ΔPE ——被校 RDSS 入站接收机相位调制误差测量误差;

PE_x ——被校 RDSS 入站接收机相位调制误差测量值;

PE_0 ——矢量信号分析仪相位调制误差测量值。

C.11.2 不确定度来源

- 1) 矢量信号分析仪残余相位调制误差 u_1 ;
- 2) 矢量信号分析仪测量重复性 u_2 ;
- 3) 被校 RDSS 入站接收机相位调制误差测量重复性 u_3 。

表 C.15 RDSS 入站接收机相位调制误差测量不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量	来源	评定方法	分布	包含因子	标准不确定度
1	u_1	残余相位调制误差	B	矩形	$\sqrt{3}$	0.29%
2	u_2	矢量信号分析仪重复性	B	矩形	$\sqrt{3}$	0.03%
3	u_3	被测件测量重复性	A	——	1.0	0.04%

C.11.3 不确定度评定

根据表 C.15，假设各不确定度分量互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{0.29^2 + 0.03^2 + 0.04^2} \% \approx 0.30 \%$$

扩展不确定度：

$$U = 2 \times u_c = 0.60 \% \quad (k = 2)$$

附录 D

矢量信号发生器产生 RDSS 入站信号的方法

D.1 概述

进行 RDSS 入站接收机频率测量、功率测量、相位调制误差测量和载波抑制测量时，需要产生标准入站信号。标准入站信号的数据格式和正常 RDSS 用户机发送的入站信号数据格式一致，频率、功率、相位调制误差和载波抑制准确可调。产生标准入站信号分为三个步骤：

- a) 生成 RDSS 基带数字信号；
- b) 用矢量信号发生器将 RDSS 基带数字信号调制到射频；
- c) 通过矢量信号发生器控制频率、功率、相位调制误差和载波抑制值。

D.2 RDSS 基带信号的生成

RDSS 基带数字信号生成方法有两种，一种是根据 RDSS 基带信号的帧格式正向生成，由于 RDSS 基带信号的帧格式是保密的，这种方法只适合有条件的单位。第二种方法是利用矢量信号分析仪直接解调 RDSS 用户机发射的入站信号获得，这种方式不需要了解 RDSS 入站信号帧格式的具体结构。第二种方法步骤如下。

a) 连接矢量信号分析仪（以 R&S FPS 为例）、RDSS 用户机、导航信号模拟器如图 D.1 所示；

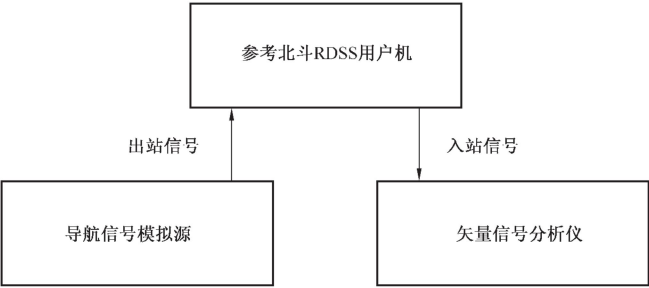


图 D.1 矢量信号分析仪捕获入站信号测量连接图

- b) 设置导航信号模拟器播发北斗 S 频点信号，信号幅度满足 RDSS 用户机正常锁定信号要求；
- c) 设置 RDSS 用户机以 1 次/s 的频度发送定位申请；
- d) 设置矢量信号分析仪工作模式为 VSA，中心频率为 1 615.68 MHz、码速率为 4.08 MSa/s、调制方式为 PSK、触发方式为中频功率触发、采样率为 16.32 MSa/s、数据采集长度为 256 kSa，根据接收到的信号幅度设置适当的触发电平；
- e) 采用单次测量方式采集一帧入站信号，使用矢量分析仪的解调功能直接解调出基带数字信号，保存备用。

D.3 用矢量信号发生器将 RDSS 基带数字信号调制到射频

以是德科技 M9381A 矢量信号发生器为例，RDSS 基带数字信号调制步骤如下：

- a) 使用 Matlab 等工具，对 D.2 中保存的基带数字信号进行 BPSK 调制，得到 IQ 信号；
- b) 使用 Matlab 等工具，对 IQ 信号进行升采样，升采样倍数根据矢量信号发生器采样率和存储深度确定，一般取 4 倍即可，保存备用；
- c) 在 M9381A 的用户界面中选择 IQ 波形为步骤 b) 保存的文件；
- d) 设置 M9381A 的采样率为 IQ 信号升采样后的采样率，设置 M9381A 的中心频率为 1 615.68 MHz，打开矢量调制开关，打开射频信号开关。

D.4 控制频率、功率、相位调制误差和载波抑制值

- a) 在 M9381A 的用户界面可直接调整输出频率和功率；
- b) 在 M9381A 用户界面的“impairments”页中，设置“Phase noise”的值，可以调整输出信号的相位调制误差；
- c) 在 M9381A 用户界面的“impairments”页中，设置“I Offset”的值，可以调整输出信号的载波抑制。

相位调制误差和载波抑制标准值以矢量信号分析仪定标值为准。

附录 E

RDSS 入站接收机双向设备时延测量误差的测量方法

E.1 双向设备时延概述

RDSS 出站信号的每一帧的帧标志段调制了 13 位巴克码，其中第 13 位巴克码的下降沿为该帧的准时点。北斗用户机发射的入站信号的帧标志段也调制了 13 位巴克码，其中第 13 位巴克码的下降沿为其准时点。具体来说，北斗用户机的双向设备时延即其发射的入站信号的准时点离开发射端口的时刻和对应出站信号准时点到达接收端口的时刻的时间差。

E.2 双向设备时延测量误差的测量

双向设备时延的定标与校准连接如图 E.1 和图 E.2 所示。

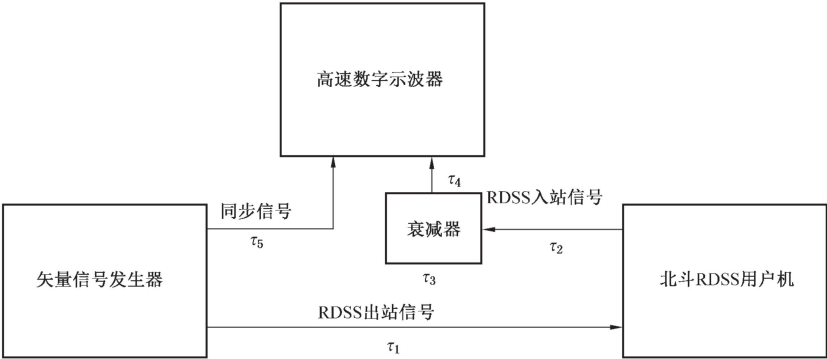


图 E.1 双向设备时延定标



图 E.2 双向设备时延校准

- 1) 首先标定各段电缆和衰减器的时延 $\tau_1 \sim \tau_7$ 。
- 2) 设置矢量信号发生器输出北斗 RDSS 出站信号和出站信号的同步信号，RDSS 出站信号幅度为 10 dBm；出站信号连接到北斗 RDSS 用户机的输入端，同步信号连接到高速数字示波器的通道 1，北斗 RDSS 用户机的输出端通过衰减器连接到高速数字示波器的通道 2，如图 E.1 所示。
- 3) 使用计算机的 RS232 接口向北斗 RDSS 用户机发送“LZM”语句，设置北斗 RDSS 用户机的双向设备时延为 1 ms。
- 4) 用高速数字示波器测量同步信号上升沿和北斗 RDSS 用户机输出的入站信号帧

标志段第 13 位巴克码下降沿之间的时差 τ_8 ，按式 (E.1) 计算双向设备时延标准值 τ_0 。

$$\tau_0 = \tau_8 - \tau_1 - \tau_2 - \tau_3 - \tau_4 + \tau_5 \quad (\text{E.1})$$

5) 将被校模拟器的出站信号连接到北斗 RDSS 用户机的输入端，将北斗 RDSS 用户机的输出端连接到被校入站接收机的输入端，如图 E.2 所示。

6) 用被校 RDSS 入站接收机测得北斗 RDSS 用户机相应的双向设备时延为 τ_9 ，按式 (E.2) 计算双向设备时延测得值 τ_x 。

$$\tau_x = \tau_9 - \tau_6 - \tau_7 \quad (\text{E.2})$$

7) 利用式 (E.3) 计算双向设备时延测量误差。

$$\Delta\tau = \tau_x - \tau_0 \quad (\text{E.3})$$

8) 在 0.998 ms~1.002 ms 范围内，选择至少 5 个校准点，改变 RDSS 用户机的双向设备时延，重复步骤 2)~步骤 7)，完成 RDSS 入站接收机全双向设备时延测量范围的测量。