

中华人民共和国国家计量技术规范

JJFXXXX-XXX

GNSS 信号射频光传输系统校准规范

Calibration Specification of GNSS RF Signal Optical Transmission Equipments
(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局

发布

GNSS 信号射频光传输系统

校准规范

Calibration Specification of GNSS RF Signal
Optical Transmission Equipments

JJF XXX—202X

归口单位：全国卫星导航应用专用计量测试技术委员会

主要起草单位：北京无线电计量测试研究所

参加起草单位：北京市计量检测科学研究院

成都同相科技有限公司

中国电子科技集团公司第三十四研究所

中关村空间信息产业技术联盟

本规范委托全国卫星导航应用专用计量测试技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

李 禛（北京无线电计量测试研究所）

孙洪俊（北京无线电计量测试研究所）

阎栋梁（北京无线电计量测试研究所）

参加起草人：

仲崇霞（北京市计量检测科学研究院）

高 超（成都同相科技有限公司）

尹怡辉（中国电子科技集团公司第三十四研究所）

马广浩（中关村空间信息产业技术联盟）

目 录

引 言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语及计量单位	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 工作频率	(2)
5.2 频率传输误差	(2)
5.3 定位一致性	(2)
5.4 最大光链路传输距离	(2)
5.5 链路传输时延	(2)
5.6 噪声系数	(2)
5.7 附加相位噪声	(2)
5.8 增益调节范围	(2)
5.9 增益误差	(2)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 测量标准及其他设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 校准项目	(4)
7.2 校准方法	(5)
8 校准结果表达	(9)
9 复校时间间隔	(10)
附录 A 原始记录格式	(11)
附录 B 校准证书内页格式	(13)
附录 C 不确定度评定示例	(15)

引 言

JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制订工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

GNSS 信号射频光传输系统校准规范

1 范围

本规范适用于 GNSS 信号射频光传输系统的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1198-2022 通信用可调谐激光源校准规范

JJF1471-2024 全球导航卫星系统（GNSS）信号模拟器校准规范

JJF 2314-2025 GNSS 卫星导航信号转发器校准规范

GB/T 39267-2020 北斗卫星导航术语

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

3 术语及计量单位

GBT39267 界定的以及下列术语和定义适用于本规范

3.1 最大光链路传输距离 longest optical link distance

GNSS 信号通过光链路传输且能使 GNSS 接收机正常工作的最大距离。

3.2 链路传输时延 link transmission delay

GNSS 信号通过链路传输所产生的时延。

3.3 附加相位声 additional phase noise

整套传输系统引入的附加相位噪声。

4 概述

GNSS 信号射频光传输系统（以下简称传输系统）由发射端和接收端两部分组成，发射端包括低噪声放大器和直调激光器，接收端包括光电探测器、低噪声放大器和衰减器，工作原理如图 1 所示。GNSS 导航信号进入发射端后，经过低噪声放大器进行放大后，进入直调激光器转换为光载波信号，光载波信号经过一定距离光纤的传输进入接收端，接收端中的光电探测器将光载波信号转换为导航信号，还原恢复出的导航信号经过一定增益的低噪声放大器和可变衰减器，达到适当的功率后输出导航信号。

GNSS 信号射频光传输系统作为 GNSS 信号的远距离传输装置，广泛应用于雷达、通信、导航等领域。

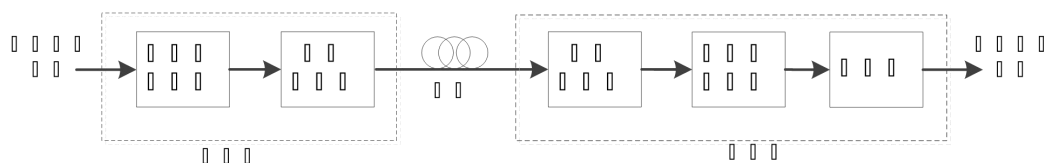


图1 传输系统工作原理图

5 计量特性

5.1 工作频率

BDS: B1I、B1C、B2I、B3I;

GPS: L1、L2、L5;

GLONASS : G1、G2;

Galileo : E1、E5a、E5b。

注：至少支持上述频点中的一种或能够覆盖产品说明书中声明可适用的频点。

5.2 频率传输误差

$\leq 10\text{Hz}$ 。

5.3 定位一致性

$\leq 2\text{m}$ 。

5.4 最大光链路传输距离

$\geq 1\text{ km}$ 。

5.5 链路传输时延

$\leq 150\text{ }\mu\text{s}$ 。

5.6 噪声系数

$\leq 3\text{ dB}$ 。

5.7 附加相位噪声

见表1。

表1 附加相位噪声

傅立叶频率 f	附加相位噪声 $\mathcal{L}(f)$ / (dBc/Hz)
10Hz	-80~-140
100Hz	-90~-150
1kHz	-100~-150
10kHz	-140~-160
100kHz	-140~-160
1MHz	-140~-160

5.8 增益调节范围

$\leq 30\text{ dB}$ 。

5.9 增益误差

$\leq \pm 1\text{ dB}$ 。

注：以上技术指标不用于合格评定，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度

在(15~30)℃范围内任选一点，校准过程中环境温度的变化不超过 ± 2 ℃，且不应有温度突变。

6.1.2 环境湿度

相对湿度： $\leq 80\%$ 。

6.1.3 供电电源

电压：220 V \pm 22 V；

频率：50 Hz \pm 1 Hz。

6.1.4 其它

周围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 GNSS 信号模拟器

输出频率：支持被校传输系统所适用的 GNSS 系统；

功率范围：

小信号输出口：(-150~-70) dBm；

大信号输出口：(-60~-20) dBm。

功率最大允许误差： ± 0.5 dB；

伪距误差： ≤ 0.05 m。

6.2.2 矢量网络分析仪

频率范围：50 MHz~2 GHz；

插入损耗测量范围及最大允许误差：0~70dB， $\pm(0.1\text{dB}+0.1\text{dB}/10\text{dB})$ ；

时延测量范围及最大允许误差：0~100s， $\pm(10\text{ps}+0.5\%\times t)$ 。

6.2.3 信号发生器

频率范围：10 MHz~2 GHz；

输出功率范围：-100 dBm~+15 dBm；

输出幅度精度： ± 0.5 dB；

频率偏差优于被校频率偏差一个数量级或可外接参考频标。

6.2.4 频谱分析仪

频率范围：1 MHz~2 GHz；

功率范围：-120dBm~-30dBm，最大允许误差：优于 ± 2 dB；

-30dBm~10dBm，最大允许误差：优于 ± 0.5 dB

6.2.5 参考频率源

输出范围：10MHz；

相对频率偏差：优于被校频率偏差一个数量级。

6.2.6 功分器

频率范围：1GHz~2 GHz；

幅度平衡： ± 0.15 dB。

6.2.7 移相器

频率范围：5MHz~2GHz；

相移范围： $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内连续可调；

插入损耗： ≤ 2 dB。

6.2.8 低噪声放大器

频率范围：1GHz~2 GHz；

增益：20 dB~40 dB；

噪声系数： ≤ 2 ；

附加相位噪声：优于被测设备 10dB。

6.2.9 相位噪声测量系统

频率范围：5 MHz~2 GHz；

本底噪声： -165 dBc/Hz @ 100 kHz；

最大允许误差： ± 2 dB。

6.2.10 参考接收机

频点：支持被校传输系统所适用的 GNSS 频点，可单频点定位解算；

定位偏差：5 m；

定位精密度(2σ)：0.5 m。

6.2.11 噪声源

频率范围：支持被校传输系统所适用的 GNSS 频点频率；

超噪比范围：5dB~35dB；

输出端口电压驻波比： < 1.3 。

6.2.12 噪声系数分析仪

频率范围：支持被校传输系统所适用的 GNSS 频点频率；

噪声系数测量范围：0dB~35dB；

最大允许误差：优于 ± 0.15 dB。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 2。

表 2 校准项目表

序号	校准项目
1	外观及工作正常性检查
2	工作频率
3	定位一致性
4	最大光链路传输距离
5	频率传输误差
6	链路传输时延
7	噪声系数
8	附加相位噪声
9	增益调节范围
10	增益误差

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

目测被校传输系统外观，无影响正常工作的机械损伤，仪器名称、型号、制造单位、出厂编号及输入输出接口标识应完整清晰。通电后，仪器按键、开关灵活可靠，各状态指示正常。

7.2.2 工作频率

a)按图 2 连接仪器。

b)打开卫星导航信号模拟器（以下简称模拟器），设置模拟器，输出 1575.42MHz（GPS L1）单频点场景（此场景为静态场景，可见卫星为 6 颗，几何精度因子为 2.5，信号功率设置为-130 dBm 或者按厂家电平指标，仿真时间 60min）。

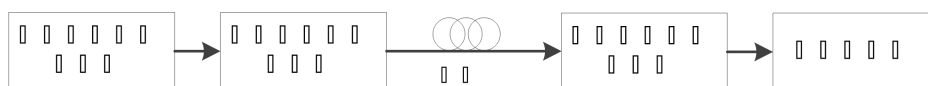


图 2 工作频率校准连接示意图

c)模拟器开始仿真，等待 13 min，观察参考接收机是否捕获全部卫星。

d)分别设置模拟器输出 1176.45MHz（GPS L5）、1602MHz（GLONASS G1）单频点信号，重复步骤 b)~c)。

7.2.3 定位一致性

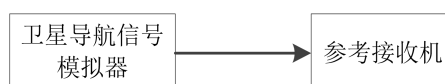


图 3 定位一致性校准连接示意图

a)按图 2 连接仪器。打开模拟器，场景设置按 7.2.2，仿真时间大于 2 h。模拟器开始仿真，仿真标准位置值（ x_0 , y_0 , z_0 ）。

b)参考接送机输出第一个有效定位后,连续运行 15 min,记录定位信息 (x, y, z) ,按公式(1)~(4)计算定位偏差 δ_p 。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (3)$$

$$\delta_p = \sqrt{(\bar{x} - x_0)^2 + (\bar{y} - y_0)^2 + (\bar{z} - z_0)^2} \quad (4)$$

式中:

\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} ——定位信息测量平均值, m;

n ——测量次数, $n \geq 10$;

x_i 、 y_i 、 z_i ——参考接收机第 i 次测量三维位置, m;

δ_p ——定位偏差, m;

x_0 、 y_0 、 z_0 ——仿真标准位置值, m。

c)按图 3 连接仪器。模拟器场景设置不变。模拟器开始仿真,参考接送机输出第一个有效定位后,连续运行 15 min,记录定位信息 (x, y, z) ,按公式(1)~(4)计算定位偏差 δ_p 。

d)按照公式(5)计算定位一致性。

$$\Delta\delta = \delta_p - \delta_{p'} \quad (5)$$

式中:

$\Delta\delta$ ——定位一致性, m。

7.2.4 最大光链路传输距离

a)按图 2 连接仪器,根据设备指标设置最大长度,也可根据送校单位的要求选取。

b)打开模拟器,场景设置按 7.2.2,仿真时间大于 2 h。模拟器开始仿真,记录仿真标准位置值 (x_0, y_0, z_0) 。

c)参考接送机输出第一个有效定位后,连续运行 15 min,记录定位信息 (x, y, z) ,按公式(1)~(4)计算定位偏差 δ_p ,定位偏差应优于 10 m。

一般使用 1 km 光纤模拟最大光链路传输距离,也可根据实际情况或送校单位的要求选取。

7.2.5 频率传输误差

a)按图 4 连接仪器。

b)将模拟器设置为输出 1575.42MHz 单载波信号 f_0 , 功率-80dBm 读取频谱仪上功率最高点频率值 f_1 。

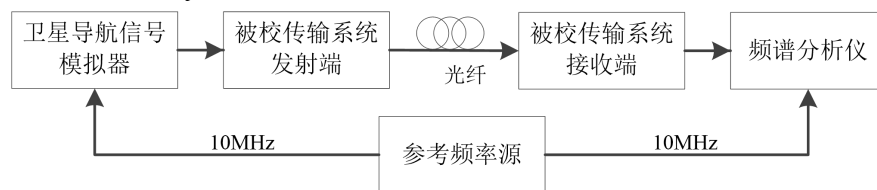


图4 频率传输误差校准连接示意图

c)按照公式(6)计算频率传输误差。

$$\Delta f = f_1 - f_0 \quad (6)$$

式中：

Δf --频率传输误差，Hz；

f_1 --被校设备输出频率，Hz；

f_0 --模拟器输出单载波频率，Hz。

d)分别设置模拟器输出 1176.45MHz、1602MHz 单载波信号，重复步骤 b)~c)。

7.2.6 链路传输时延

a)按说明书要求预热矢量网络分析仪。

b)复位矢量网络分析仪，设置矢量网络分析仪的中心频率 1575.42MHz，展宽【SPAN】为 10MHz，测量点数 1601。设置矢量网络分析仪测量参数为【S21】，对矢量网络分析仪进行传输频响校准或全二端口校准。

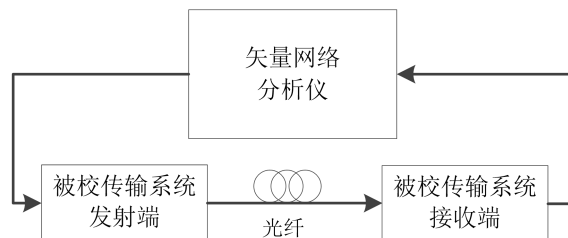


图5 链路传输时延校准连接示意图

c)设置矢量网络分析仪显示格式为相位【phase】，按图5连接仪器。用矢量网络分析仪的两个频标【marker1】、【marker2】分别跟踪最大值和最小值，增加矢量网络分析仪参考通道电延时【Electrical Delay】，使矢量网络分析仪显示的相位曲线近似为一条直线，且频标【marker1】和频标【marker2】相差最小（通常小于 1° ）。读取电延时值作为链路传输时延校准值。

d)分别改变中心频率为 1176.45MHz、1602MHz，重复步骤 a)~c)。

7.2.7 噪声系数

a)按图 6(a)连接仪器。对噪声系数分析仪进行自校准，将噪声系数分析仪初始复位，并将噪声源的超噪比输入到噪声系数分析仪中。

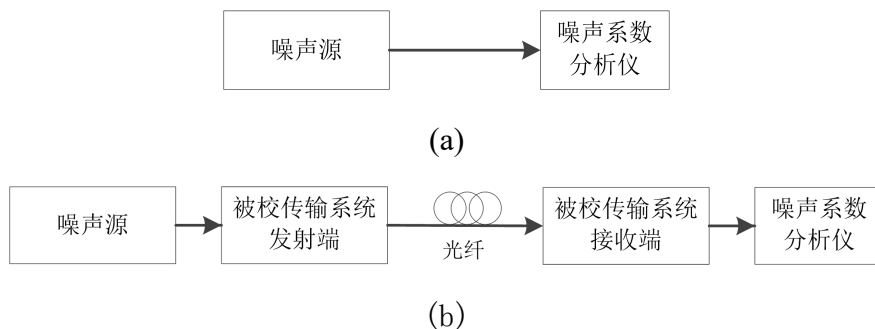


图6 噪声系数校准连接示意图

b)按图 6(b)连接仪器，根据被测设备的频率范围，设置噪声系数分析仪的中心频率和带宽。设置噪声系数分析仪的中心频率 1575.42MHz，带宽 10MHz。按噪声分析仪校准键执行校准。

c)分别设置噪声源输出 1176.45MHz、1602MHz 信号，重复步骤 a)~b)。

7.2.8 附加相位噪声

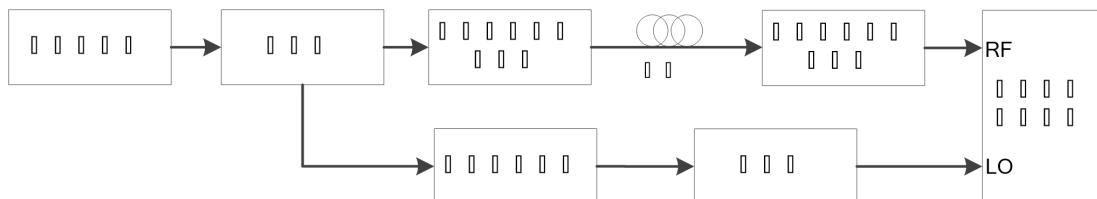


图7 附加相位噪声连接示意图

a)按图 7 连接仪器。

b)信号发生器输出频率设置为 1575.42MHz，输出功率设置为被校传输系统发射端射频信号输入最大功率（如-50 dBm），传输系统的增益设置为最大，被校传输系统发射端和接收端连接光纤长度为 1 km 或按照客户要求。根据相位噪声测量系统输入端功率要求，调节低噪声放大器放大倍数和被校传输系统接收端的输出功率。

c)通过正交指示器观察相位噪声测量系统相位检波器的输出信号，调节移相器，使相位检波器输出的直流电压达到正峰值，用 U_{\max} 表示，再调整移相器，使相位检波器输出的直流电压达到负峰值，用 U_{\min} 表示，按公式（7）计算检波常数 K_{ϕ} 。

$$K_{\phi} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2} \quad (7)$$

d)将测得的检波常数 K_{ϕ} 输入到相位噪声测量系统的测量参数预置中，调节移相器，使相位检波器的两路输入信号相位正交，观察相位噪声测量系统正交指示器的指针，应指向“0”位置。相位噪声测量系统自动进行相位噪声数据采集，在采集过程中，监视相位检波器两路输入信号相位正交情况，若正交指示器的指针偏离“0”位置，应中断测量，重新调节移相器，使正交指示器的指针指向“0”

位置，再进行相位噪声校准。将测量结果记录到附录 A.5 中。

7.2.9 增益调节范围

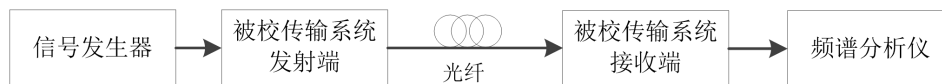


图 8 增益误差校准连接示意图

a)按图 8 连接仪器。信号发生器输出功率设置为被校传输系统发射端射频信号输入最大功率（如-50 dBm），被校传输系统发射端和接收端连接光纤长度为 1 km 或按照客户要求。

b)被校传输系统的增益设置为最大值，频谱分析仪测量被校传输系统接收端信号功率值，记为 P_{\max} ；被校传输系统的增益设置为最小值，频谱分析仪测量被校传输系统接收端信号功率值，记为 P_{\min} ；按公式（8）计算增益调节范围。

$$P_{\text{range}} = P_{\max} - P_{\min} \quad (8)$$

式中：

P_{range} ——增益调节范围，dB。

7.2.10 增益误差

a) 按图 8 连接仪器。

b)信号发生器输出功率设置-80dBm，被校传输系统发射端和接收端连接光纤长度为 1 km 或按照客户要求。

c)被校传输系统的增益设置为零，读取频谱分析仪功率测量值 P_0 ，设置被校传输系统的增益为 G_a ，频谱分析仪测量被校传输系统接收端信号功率值，记为 P_a ；根据公式（9）计算增益误差 G 。

$$G = G_a - (P_a - P_0) \quad (9)$$

式中：

G ——被校传输系统的增益误差，dB；

G_a ——被校传输系统的增益设定值，dB；

P_0 ——被校传输系统增益为零时测得的输出功率值，dBm；

d)选取 10 个不同的增益值进行校准（校准点至少包含增益控制范围的 10%、30%、50%、70%和 100%）。取 10 次增益误差的最大值作为增益误差的校准结果。

8 校准结果表达

校准证书应至少包括以下内容：

- 标题“校准证书”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；

- d) 证书或报告的唯一性标识（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) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书和校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔由用户根据使用情况自行决定，建议不超过 12 个月。

附录 A

原始记录格式

A.1 外观及工作正常性检查

检查项目	结果
外观	
工作正常性	

A.2 工作频率

频率/MHz	捕获情况
1575.42	
1176.45	
1602	

A.3 定位一致性

频率/MHz	模拟器定位偏差	光链路定位偏差	定位一致性	不确定度 $U(k=2)$
1575.42				

A.4 最大光链路传输距离

光纤长度： km

序号	定位信息测量值 (x_i, y_i, z_i)	定位信息测量平 均值($\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$)	标准位置值 (x_0, y_0, z_0)	定位偏差 δ_p	不确定度 U ($k=2$)
1					
2					
...					
n					

A.5 频率传输误差

频率/MHz	频率传输误差	不确定度 $U(k=2)$
1575.42		
1176.45		
1602		

A.6 链路传输时延

光纤长度： km

频率/MHz	链路传输时延/ns	不确定度 $U/\text{ns}(k=2)$
1575.42		
1176.45		

1602		
------	--	--

A.7 噪声系数

频率/MHz	噪声系数/dB	不确定度 U /dB ($k=2$)
1575.42		
1176.45		
1602		

A.8 附加相位噪声

载波频率 $f_0 =$ Hz

傅立叶频率	10Hz	100Hz	1kHz	10kHz	100kHz	1MHz
$\mathcal{L}(f)$ (dBc/Hz)						
不确定度 U (dB) ($k=2$)						

A.9 增益调节范围

频点	系统增益最大值/dB	系统增益最小值/dB	不确定度 U ($k=2$)

A.10 增益误差

频点	增益设定值 G_a /dB	功率测量值 P_a /dB	功率测量值 P_0 /dB	增益误差/dB	不确定度 U ($k=2$)

附录 B

校准证书内页格式

B.1 外观及工作正常性检查

检查项目	结果
外观	
工作正常性	

B.2 工作频率

频率/MHz	捕获情况
1575.42	
1176.45	
1602	

B.3 定位一致性

频率/MHz	定位一致性	不确定度 $U(k=2)$
1575.42		

B.4 最大光链路传输距离

光纤长度/km	定位偏差 δ_p	不确定度 $U(k=2)$

B.5 频率传输误差

频率/MHz	频率传输误差	不确定度 $U(k=2)$
1575.42		
1176.45		
1602		

B.6 链路传输时延

光纤长度: km

频率/MHz	链路传输时延/ns	不确定度 $U/\text{ns}(k=2)$
1575.42		
1176.45		
1602		

B.7 噪声系数

频率/MHz	噪声系数/dB	不确定度 $U/\text{dB}(k=2)$
--------	---------	-------------------------

1575.42		
1176.45		
1602		

B.8 附加相位噪声

载波频率 $f_0 =$ Hz

傅立叶频率	10Hz	100Hz	1kHz	10kHz	100kHz	1MHz
$\mathcal{L}(f)$ / (dBc/Hz)						
不确定度 U / (dB) ($k=2$)						

B.9 增益调节范围

频点	测量值/dB	不确定度 U ($k=2$)

B.10 增益误差

频点	增益误差/dB	不确定度 U ($k=2$)

附录 C

不确定度评定示例

根据 GNSS 信号射频光传输系统校准规范的各项校准项目的计量特性、校准条件及校准方法的规定,对 GNSS 信号射频光传输系统进行了校准,针对定位一致性、最大光链路传输距离、频率传输误差、链路传输时延、噪声系数、附加相位噪声、增益调节范围测量结果的不确定度进行了评定。

C.1 定位一致性

C.1.1 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括:

- a) 模拟器伪距误差引入的不确定度;
- b) 模拟器通道间延迟引入的不确定度;
- c) 测量重复性引入的不确定度。

C.1.2 标准不确定度评定

- a) 模拟器伪距误差引入的标准不确定度 u_1

模拟器伪距误差为 ± 0.05 m,按 B 类方法评定,设为均匀分布,包含因子 $k=\sqrt{3}$,则:

$$u_1 = \frac{0.05 \text{ m}}{\sqrt{3}} \approx 0.029 \text{ m} \quad (\text{C.1})$$

- b) 模拟器通道间延迟引入的标准不确定度 u_2

模拟器通道间延迟一致性偏差为 ± 0.1 ns,按 B 类方法评定,设为矩形分布,包含因子 $k=\sqrt{3}$,则:

$$u_2 = \frac{0.1 \times 299792458}{1000000000 \times \sqrt{3}} \approx 0.02 \text{ m} \quad (\text{C.2})$$

- c) 测量重复性引入的标准不确定度 u_3

采用 A 类方法进行评定,对被校传输系统定位偏差连续独立测量 10 次,用贝塞尔法计算实验标准偏差。重复性测量数据见表 C.1。

表 C.1 定位偏差的测量重复性

序号	定位偏差/m
1	1.25
2	1.48
3	1.52
4	1.36

序号	定位偏差/m
5	1.67
6	1.58
7	1.35
8	1.41
9	1.37
10	1.43
\bar{x}	1.44
s_n	0.123

标准不确定度:

$$u_3 = s_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.123 \text{ m} \quad (\text{C.3})$$

C.1.3 合成标准不确定度

标准不确定度汇总见表 C.2。

表 C.2 定位一致性标准不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度符号	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
信号源输出电平不准确	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.029 m
频谱分析仪器最大允许误差	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.02 m
测量重复性	u_3	A 类	——	——	0.123 m

以上各不确定度互不相关, 合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.13 \text{ m} \quad (\text{C.4})$$

C.1.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 2 \times 0.13 \text{ m} \approx 0.3 \text{ m} \quad (\text{C.5})$$

C.2 最大光链路传输距离

C.2.1 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括:

- 光纤长度测量不准确引入的不确定度;
- 测量重复性引入的不确定度。

C.2.2 标准不确定度评定

- 光纤长度测量不准确引入的标准不确定度 u_1

光纤长度测量不准确偏差为 $\pm 0.1\text{m}$ ，按 B 类方法评定，设为矩形分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{0.1\text{m}}{\sqrt{3}} \approx 0.06\text{m} \quad (\text{C.6})$$

b) 测量重复性引入的标准不确定度 u_3

采用 A 类方法进行评定，对被校传输系统定位偏差连续独立测量 10 次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。重复性测量数据见表 C.3。

表 C.3 定位偏差的测量重复性

序号	定位偏差/m
1	1.25
2	1.48
3	1.52
4	1.36
5	1.67
6	1.58
7	1.35
8	1.41
9	1.37
10	1.43
\bar{x}	1.44
s_n	0.123

标准不确定度：

$$u_3 = s_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.123 \text{ m} \quad (\text{C.7})$$

C.2.3 合成标准不确定度

标准不确定度汇总见表 C.4。

表 C.4 最大光链路传输距离标准不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度符号	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
光纤长度测量不准确	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.06 m
测量重复性	u_2	A 类	——	——	0.123 m

以上各不确定度互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \approx 0.14\text{m} \quad (\text{C.8})$$

C.2.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.14\text{m} \approx 0.3\text{m} \quad (\text{C.9})$$

C.3 频率传输误差

C.3.1 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- 频谱分析仪分辨力引入的不确定度；
- 参考频率源引入的不确定度；
- 测量重复性引入的不确定度。

C.3.2 标准不确定度评定

- 频谱分析仪分辨力引入的标准不确定度 u_1

根据测量时设置频谱仪的分辨力带宽，频谱分析仪频率分辨力为 0.1Hz，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{0.1\text{Hz}/2}{\sqrt{3}} \approx 0.029\text{Hz} \quad (\text{C.10})$$

- 参考频率源引入的标准不确定度 u_2

参考频率源的相对频率偏差为 $\pm 2 \times 10^{-10}$ ，以测量 1575.42MHz 为例，按 B 类方法评定，设为矩形分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{2 \times 10^{-10} \times 1575.42 \times 10^6 \text{Hz}}{\sqrt{3}} \approx 0.18\text{Hz} \quad (\text{C.11})$$

- 测量重复性引入的标准不确定度 u_3

采用 A 类方法进行评定，对被校传输系统频率传输误差连续独立测量 10 次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。重复性测量数据见表 C.5。

表 C.5 频率传输误差的测量重复性

序号	频率传输误差/Hz
1	1.0
2	0
3	0
4	1.0
5	0
6	1.0
7	0
8	0
9	0
10	1.0
\bar{x}	0.3
s_n	1.01

标准不确定度：

$$u_3 = S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 1.01\text{Hz} \quad (\text{C.12})$$

C.3.3 合成标准不确定度

标准不确定度汇总见表 C.6。

表 C.6 频率传输误差标准不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度符号	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
频谱分析仪分辨力	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.029Hz
参考频率源相对频率偏差最大允许误差	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.18Hz
测量重复性	u_3	A 类	——	——	1.01Hz

以上各不确定度互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 1.02\text{Hz} \quad (\text{C.13})$$

C.3.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 1.02\text{Hz} \approx 2\text{Hz} \quad (\text{C.14})$$

C.4 链路传输时延

C.4.1 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- 矢量网络分析仪测量相位不准确引入的不确定度；
- 测量重复性引入的不确定度。

C.4.2 标准不确定度评定

- 矢量网络分析仪测量相位不准确引入的标准不确定度 u_1

矢量网络分析仪校准证书中给出的测量传输的扩展不确定度为 1° ，工作频率为 1GHz 时，不确定度分量为按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{1^\circ}{2 \times 360 \times 1\text{GHz}} \approx 0.00139\text{ns} \quad (\text{C.15})$$

- 测量重复性引入的标准不确定度 u_2

采用 A 类方法进行评定，对被校传输系统传输时延连续独立测量 10 次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。重复性测量数据见表 C.7。

表 C.7 链路传输时延的测量重复性

序号	链路传输时延测量值/ μs
1	3.98
2	2.56

序号	链路传输时延测量值/ μs
3	4.08
4	3.55
5	5.67
6	4.35
7	3.38
8	2.09
9	4.58
10	3.66
\bar{x}	3.79
s_n	1.013

标准不确定度：

$$u_2 = s_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 1.013 \mu\text{s} \quad (\text{C.16})$$

C.4.3 合成标准不确定度

标准不确定度汇总见表 C.8。

表 C.8 链路传输时延标准不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度符号	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
矢量网络分析仪测量 相位不准确	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.000139 ns
测量重复性	u_2	A 类	——	——	1.013 μs

以上各不确定度互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \approx 1.013 \mu\text{s} \quad (\text{C.17})$$

C.4.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 1.013 \mu\text{s} = 2.0 \mu\text{s} \quad (\text{C.18})$$

C.5 噪声系数

C.5.1 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- 噪声源超噪比引入的不确定度；
- 噪声系数分析仪噪声系数测量不准引入的不确定度；
- 噪声源与被测件之间的失配引入的不确定度；
- 测量重复性引入的不确定度。

C.5.2 标准不确定度评定

a) 噪声源超噪比引入的标准不确定度 u_1

由噪声源的上级溯源证书，噪声源超噪比的不确定度 $U=0.2\text{dB}$ ($k=2$)，则：

$$u_1 = \frac{0.2\text{dB}}{2} = 0.1\text{dB} \quad (\text{C.19})$$

b) 噪声系数分析仪噪声系数测量不准引入的标准不确定度 u_2

根据早噪声系数分析仪的技术指标可知，频率在 $10\text{MHz} \sim 3.6\text{GHz}$ 内，噪声系数测量最大允许误差为 $\pm 0.15\text{dB}$ ，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{0.15\text{dB}}{\sqrt{3}} \approx 0.09\text{dB} \quad (\text{C.20})$$

c) 噪声源与被测件之间的失配引入的标准不确定度 u_3

矢噪声源与被测件之间的连接存在失配，噪声源的输出电压驻波比小于 1.15，被测件的输入端电压驻波比小于 2.00，失配误差基线为 0.11dB ，按 B 类方法评定，设为反正弦分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = \frac{0.11\text{dB}}{\sqrt{2}} \approx 0.08\text{dB} \quad (\text{C.21})$$

d) 测量重复性引入的标准不确定度 u_4

采用 A 类方法进行评定，对被校传输系统噪声系数连续独立测量 10 次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。重复性测量数据见表 C.9。

表 C.9 噪声系数的测量重复性

序号	噪声系数测量值/dB
1	1.4
2	1.4
3	1.5
4	1.4
5	1.4
6	1.4
7	1.4
8	1.4
9	1.4
10	1.4
\bar{x}	1.41
s_n	0.03

标准不确定度：

$$u_4 = S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.03\text{dB} \quad (\text{C.22})$$

C.5.3 合成标准不确定度

标准不确定度汇总见表 C.10。

表 C.10 噪声系数标准不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度符号	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
噪声源超噪比	u_1	B 类	--	2	0.10dB
噪声系数分析仪测量不准	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.09dB
噪声源与被测件之间的失配	u_3	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.08dB
测量重复性	u_4	A 类	——	——	0.03dB

以上各不确定度互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 0.2\text{dB} \quad (\text{C.23})$$

C.5.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 0.2\text{dB} \quad (\text{C.24})$$

C.6 附加相位噪声

C.6.1 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- 从功分器两个输出端到相位检波器两个输入端的两个支路对称性引入的不确定度；
- 相位噪声测量系统引入的不确定度；
- 读数误差引入的不确定度；
- 测量重复性引入的不确定度。

C.6.2 标准不确定度评定

a) 从功分器两个输出端到相位检波器两个输入端的两个支路对称性引入的标准不确定度 u_1

由于从功分器两个输出端到相位检波器两个输入端的两个支路不能完全对称，参考源引入的相位噪声在两个支路上抵消的程度有限。在本测量系统中，从功分器两个输出端到相位检波器两个输入端的两个支路对称性引入的最大误差为 $\pm 2\text{dB}$ ，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{2\text{dB}}{\sqrt{3}} = 1.155\text{dB} \quad (\text{C.25})$$

b) 相位噪声测量系统引入的标准不确定度 u_2

相位噪声测量系统在傅立叶频率 $f \leq 1\text{MHz}$ 时最大允许误差为 $\pm 2\text{dB}$ ，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{2\text{dB}}{\sqrt{3}} = 1.155\text{dB} \quad (\text{C.26})$$

c) 读数误差引入的标准不确定度 u_3

根据经验，读数误差最大贡献为 $\pm 1\text{dB}$ ，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = \frac{1\text{dB}}{\sqrt{3}} = 0.577\text{dB} \quad (\text{C.27})$$

d) 测量重复性引入的标准不确定度 u_4

采用 A 类方法进行评定，对被校传输系统附加相位噪声连续独立测量 10 次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。重复性测量数据见表 C.11。

表 C.11 附加相位噪声的测量重复性

序号	附加相位噪声 $\mathcal{L}(f)/\text{dBc/Hz}$ ($f=10\text{kHz}$)
1	-152.2
2	-153.0
3	-152.8
4	-152.5
5	-153.3
6	-152.8
7	-152.0
8	-153.1
9	-152.9
10	-152.5
\bar{x}	-152.7
s_n	0.41

标准不确定度：

$$u_4 = s_n / \sqrt{10} = 0.13\text{dB} \quad (\text{C.28})$$

C.6.3 合成标准不确定度

标准不确定度汇总见表 C.12。

表 C.12 底部噪声标准不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度符号	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
从功分器两个输出端	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	1.155 dB

到相位检波器两个输入端的两个支路对称性					
相位噪声测量系统	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	1.155 dB
读数误差	u_3	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.577 dB
测量重复性	u_4	A 类	——	——	0.13 dB

以上各不确定度互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 1.8 \text{ dB} \quad (\text{C.29})$$

C.6.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 1.8 \text{ dB} = 3.6 \text{ dB} \quad (\text{C.30})$$

C.7 增益调节范围

C.7.1 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- 信号源输出电平不准确引入的不确定度；
- 频谱分析仪器最大允许误差引入的不确定度；
- 测量重复性引入的不确定度。

C.7.2 标准不确定度评定

- 信号源输出电平不准确引入的标准不确定度 u_1

依据信号源 E8257D 技术说明书，在载波频率 250kHz~2GHz，输出电平小于 -10dBm 时，其电平最大允许误差为 $\pm 1.2 \text{ dB}$ ，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{1.2 \text{ dB}}{\sqrt{3}} \approx 0.69 \text{ dB} \quad (\text{C.31})$$

- 频谱分析仪器校最大允许误差引入的标准不确定度 u_2

依据频谱分析仪器 N9010B 技术说明书，其校准信号电平最大允许误差为 $\pm 0.27 \text{ dB}$ ，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{0.27 \text{ dB}}{\sqrt{3}} \approx 0.16 \text{ dB} \quad (\text{C.32})$$

- 测量重复性引入的标准不确定度 u_3

采用 A 类方法进行评定，对被校传输系统增益调节范围连续独立测量 10 次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。重复性测量数据见表 C.13。

表 C.13 增益调节范围的测量重复性

序号	增益调节范围/dBc
1	29.83
2	29.94
3	29.96
4	29.91
5	29.89
6	29.85
7	29.86
8	29.90
9	29.93
10	29.92
\bar{x}	29.90
s_n	0.042

标准不确定度：

$$u_3 = s_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.042 \text{ dB} \quad (\text{C.33})$$

C.7.3 合成标准不确定度

标准不确定度汇总见表 C.14。

表 C.14 增益调节范围标准不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度符号	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
信号源输出电平不准确	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.69 dB
频谱分析仪器最大允许误差	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.16 dB
测量重复性	u_3	A 类	——	——	0.042 dB

以上各不确定度互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.71 \text{ dB} \quad (\text{C.34})$$

C.7.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.71 \text{ dB} \approx 1.5 \text{ dB} \quad (\text{C.35})$$

注 1：增益误差的不确定度评定可参考 C.7 节。

注 2：以上不确定度评定示例中，当测量环境符合环境校准要求时，环境影响引入的不确定度分量可以忽略不计，不再单独列出。