

北京市地方计量技术规范

JJF (京) XXXX-XXXX

低空飞行器卫星导航定位授时 (PNT) 性能 校准规范

Calibration Specification for Satellite-Based Positioning, Navigation, and
Timing (PNT) of Low-Altitude Aircraft

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

北京市市场监督管理局 发布

低空飞行器卫星导航定位
授时(PNT)性能
校准规范

JJF(京) XXXX-XXXX

Calibration Specification for Satellite-Based
Positioning, Navigation, and Timing (PNT) of
Low-Altitude Aircraft

归口单位：北京市市场监督管理局

主要起草单位：北京市计量检测科学研究院

中国航空工业集团公司北京长城计量

测试技术研究所

参与起草单位：

本规范委托 XXX 负责解释

目 录

目 录.....	(I)
引 言.....	(I)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和定义.....	(1)
4 概述.....	(1)
5 计量特性.....	(2)
5.1 定位偏差.....	(2)
5.2 航向角偏差.....	(2)
5.3 速度偏差.....	(1)
5.4 1PPS 定时偏差.....	(1)
6 校准条件.....	(2)
6.1 环境条件.....	(2)
6.2 测量标准及其他设备.....	(2)
7 校准项目和校准方法.....	(3)
7.1 校准项目.....	(3)
7.2 校准方法.....	(3)
8 复校时间间隔.....	(8)
附录 A 原始记录格式(推荐).....	(9)
附录 B 校准证书内页格式(推荐).....	(11)
附录 C 测量结果的不确定度评定示例.....	(11)

引 言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》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编制工作的基础性文件。

本规范为首次发布。

低空飞行器卫星导航定位授时（PNT）性能校准规范

1 范围

本规范适用于低空飞行器 GNSS 定位终端的导航定位授时（PNT）性能参数校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG1200 全球导航卫星系统(GNSS)接收机(测地型和导航型)

JJG722 标准数字时钟

JJF1403 全球导航卫星系统(GNSS)接收机(时间测量型)校准规范

JJF 2071 便携式智能定位计时终端校准规范

GB/T 38058 民用多旋翼无人机系统试验方法

注 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 术语和计量单位

3.1 航向角偏差 attitude offset

低空飞行器定位终端实际航向角与标准航向角的偏差。

4 概述

低空飞行器 GNSS 定位终端（以下简称飞行器）主要由 GNSS 天线、射频信号处理单元、基带处理器、辅助单元和飞控系统组成，其结构组成如图 1 所示。GNSS 天线用于接收卫星导航信号；射频信号处理单元采用低噪声放大器、下变频器和模数转换器等对射频信号进行采样与处理；基带处理器用于信号捕获跟踪、伪距/载波相位结算和定位数据结算等；辅助单元用于辅助、修正、补偿 GNSS 定位性能；飞控系统用于导航决策和姿态控制等。

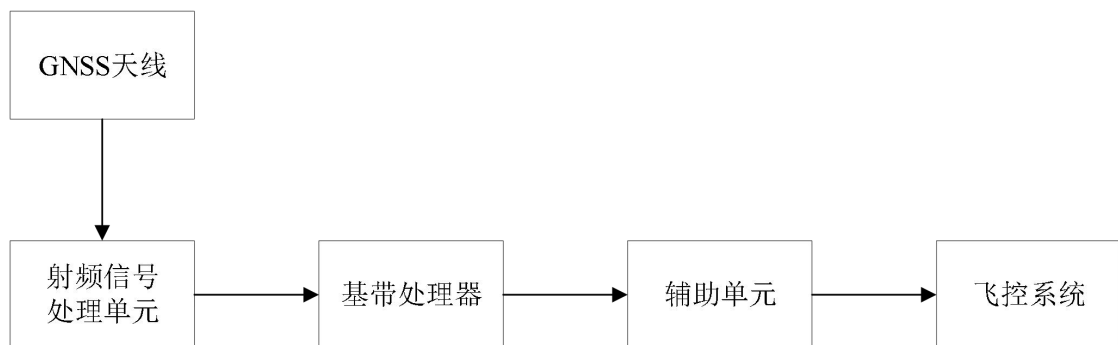


图1 低空飞行器 GNSS 定位终端组成结构原理图

飞行器被广泛应用于城市空中交通、物流运输、公共服务与应急响应、工业与作业服务、文旅等领域，应用前景广阔。

5 计量特性

5.1 定位偏差

(0.01~15) m, 1σ 。

5.2 航向角偏差

优于 $\pm 0.5^\circ$ 。

5.3 速度偏差

速度范围：(0.5~100) m/s

测量偏差：优于(0.1~100) cm/s。

5.4 1PPS 定时偏差

优于 $\pm 2\mu\text{s}$ 。

注：以上技术指标不用于合格性判定，仅提供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

- a) 环境温度：(20 \pm 5) $^\circ\text{C}$ ；
- b) 环境相对湿度： $\leq 80\%$ ；
- c) 电压：220(1 \pm 10%) V，频率：50(1 \pm 2%) Hz；
- d) 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 导航模拟器（以下简称模拟器）

- a) 输出频率：支持被校飞行器所适用的 GNSS 系统及频点；
- b) 场景：可仿真校准所需标准场景；
- c) 功率范围：(-160~-70) dBm；
- d) 功率偏差： $\pm (0.5\sim 2)$ dB；
- e) 速度动态范围：覆盖被校飞行器的速度范围， $\leq 0.02\text{m/s}$ ；
- f) 伪距误差： ≤ 0.05 m。

6.2.2 基线场

a) 地心地固坐标系中三维坐标 (x, y, z) 误差均不大于10cm。

6.2.3 全站仪

a) 测角不确定度: $U=0.002^\circ$ ($k=2$)。

6.2.4 北向基准

a) 方位误差: $\pm 0.001^\circ$ 。

6.2.5 双轴转台

a) 角位置定位不确定度: $U=0.001^\circ$ ($k=2$)。

6.2.6 水平仪

a) 示值误差: 不超过 $\pm (1+A/50) \Delta$ (A -测量点值, Δ -分辨力)

6.2.7 参考时间源

- a) 具备 GPS 锁定功能;
- b) 具备输出 10 MHz 信号相对频率偏差: 优于 $\pm 5 \times 10^{-11}$;
- c) 锁定后 1PPS 定时偏差的不确定度: 优于 50ns。

6.2.8 时间间隔测量仪

- d) 具备外参考频率信号输入功能;
- e) 时间间隔测量范围: 1 ns~1000 s;
- f) 时间间隔测量最大允许误差: 10ns。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目及对应校准方法见表1。

表 1 校准项目及对应校准方法一览表

序号	校准项目名称	校准方法对应条款
1	外观及工作正常性检查	7.2.1
2	定位偏差	7.2.2
3	航向角偏差	7.2.3
4	速度偏差	7.2.4
5	1PPS 定时偏差	7.2.5

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

用目测的方法检查被校飞行器的外观和结构。被校飞行器的标识应清晰正确、易于识别，接口、开关等应有的文字或符号标识应齐全，不应有裂痕、划痕、锈蚀等破损情况。在飞行器静态开机下，定位信息、身份信息、报警信息、指令发送回报信息和工作状态信息等应清晰可见。

7.2.2 定位偏差

7.2.2.1 模拟器法

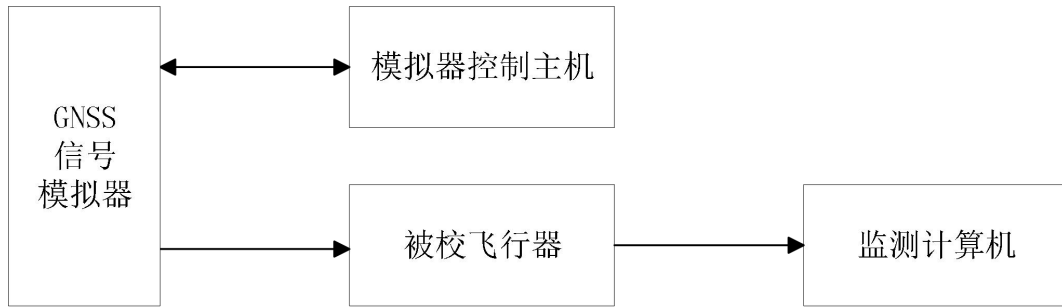


图 2 定位偏差模拟器法校准示意图

a) 仪器连接如图 2 所示；

b) 打开模拟器，开启定位偏差校准场景（静态场景，可见卫星为 6 颗，几何精度因子小于 2.5，卫星均匀分布在天顶上空，信号功率置为-120dBm 或者按厂家接口电平指标），模拟器开始仿真，记录仿真标准位置点 (x_0, y_0, z_0) ；

c) 被校飞行器开机初始化后，记录定位信息 (x, y, z) （采样间隔按照飞行器操作手册，如无要求可选择 30s）；飞行器正常定位 30min 后，停止记录；

d) 按公式 (1) 计算飞行器测量值 x_i, y_i, z_i ($i=1, \dots, n$, n 为测量次数) 的平均值 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ ，由公式 (2) 计算飞行器的定位偏差 δ_p ，并将测量结果记录于附录 A 表 A.2 中。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (1)$$

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

式 (1) (2) 中：

δ_p ——被校飞行器的定位偏差，m；

x_0, y_0, z_0 ——标准位置点的坐标，m；

\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} ——被校飞行器测量坐标点坐标的平均值，m。

7.2.2.2 基线场法

- 将飞行器定位终端置于基线场标准位置点(x_0 、 y_0 、 z_0)，开机初始化；
- 被校飞行器正常定位 5min 后，开始记录数据，采样间隔 30s，10 个观测值为 1 组，共进行 3 组观测，相邻两组起始观测时间间隔不小于 10min；
- 由公式 (1) (2) 计算 3 组观测数据的平均值及定位偏差，并将测量结果记录于附录 A 表 A.2 中。

7.2.3 航向角偏差

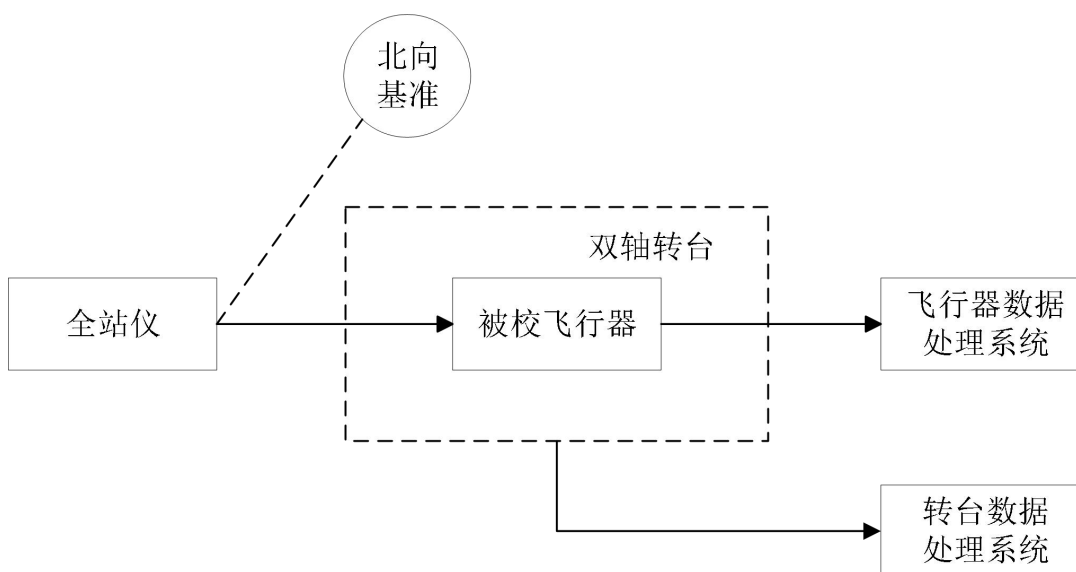


图 3 航向角偏差校准仪器连接示意图

- 仪器连接如图 3 所示；
- 利用水平仪将转台调至水平，利用全站仪和北向基准将转台水平轴零位调至正北方向，并将被校飞行器水平安装在台面上，使其航向角指向正北(零点)，被测姿态角（俯仰角或横滚角）为零且轴向与转台俯仰轴保持一致；
- 被校飞行器上电初始化进入正常工作模式后，读取被校飞行器航向角输出值；重复测量 10 次，取平均值作为被校飞行器航向角测量值；
- 将转台对应的轴向转至校准点（按照产品手册要求设定，应包括零点与量程范围内最大值、最小值，如无特殊要求可选择取 0° 、 90° 、 180° 和 270° ），按照 c) 进行测量；
- 由公式 (3) 计算飞行器的航向角偏差，并将测量结果记录于附录 A 表

A.3 中。

$$\Delta\Psi = \Psi_i - \Psi_0 \quad (3)$$

式(3)中:

$\Delta\Psi$ ——被校飞行器航向角偏差的测量结果, ($^{\circ}$);

Ψ_i ——被校飞行器在转台移动固定角度后输出的航向角测量值, ($^{\circ}$);

Ψ_0 ——转台输出的航向角标准值, ($^{\circ}$)。

7.2.4 速度偏差

a) 仪器连接如图 2 所示;

b) 打开模拟器, 开启速度偏差校准场景(动态场景, 可见卫星为 6 颗, 几何精度因子小于 2.5, 卫星均匀分布在天顶上空, 信号功率置为-120dBm 或者按厂家接口电平指标), 模拟器开始仿真, 记录仿真标准速度值(v_{x0} 、 v_{y0} 、 v_{z0});

c) 被校飞行器开机初始化后, 记录速度信息(v_x 、 v_y 、 v_z) (采样间隔按照飞行器操作手册, 如无要求可选择 30s); 飞行器正常定位 15min 后, 停止记录;

d) 参考公式(1), 计算飞行器测量值 v_{xi} 、 v_{yi} 、 v_{zi} ($i=1, \dots, n$, n 为测量次数) 的平均值 $\overline{v_x}$ 、 $\overline{v_y}$ 、 $\overline{v_z}$, 并由公式(4) 计算接收机的测速偏差, 并将测量结果记录于附录 A 表 A.4 中。

$$\delta_v = \sqrt{(\overline{v_x} - v_{x0})^2 + (\overline{v_y} - v_{y0})^2 + (\overline{v_z} - v_{z0})^2} \quad (4)$$

式(4)中:

δ_v ——被校飞行器的速度偏差, m/s;

v_{x0} 、 v_{y0} 、 v_{z0} ——标准速度值, m/s;

$\overline{v_x}$ 、 $\overline{v_y}$ 、 $\overline{v_z}$ ——被校飞行器测量速度的平均值, m/s。

7.2.5 1PPS 定时偏差

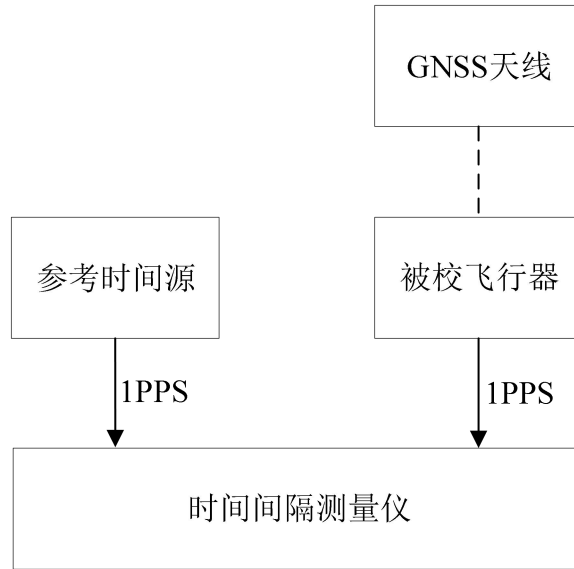


图 4 1PPS 定时偏差校准示意图

- a) 仪器连接如图 4 所示；
- b) 使用等长的同轴电缆连接参考时间源的 1PPS 和被校飞行器的 1PPS 到时间间隔测量仪的两个通道；
- c) 飞行器上电初始化进入正常工作模式，预热 15min 后开始记录数据，连续记录至少 100 组时间间隔测量值（采集时间间隔为 1s），取其平均值为定时偏差，并将测量结果记录于附录 A 表 A.4 中。

注：1PPS 定时偏差适用于有 1PPS 输出的飞行器。

8 校准结果表达

经校准的飞行器出具校准证书。校准证书应至少包括以下信息：

- 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) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；

- i) 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, 不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定, 送校单位可根据实际使用情况确定复校时间间隔。建议复校时间间隔为 1 年。

附录 A 原始记录格式

原始记录格式

委托单位	
被校设备	
校准地点	
环境条件	
校准时间	
校准人员	
核验人员	
校准依据	
校准仪器	
校准项目	<input type="checkbox"/> 定位偏差 <input type="checkbox"/> 航向角偏差 <input type="checkbox"/> 速度偏差 <input type="checkbox"/> 1PPS 定时偏差

1. 外观和工作正常性检查

外观： <input type="checkbox"/> 完好 <input type="checkbox"/> 损坏
工作正常性检查： <input type="checkbox"/> 正常 <input type="checkbox"/> 异常

2. 定位偏差

标准点坐标 (m)		测量点坐标 (m)		定位偏差 (m)	测量不确定度 U (m)
X		X			
Y		Y			
Z		Z			

3. 航向角偏差

航向角偏差 (°)	测量不确定度 U (°)

4. 速度偏差

标准速度 (m/s)		测量速度 (m/s)		速度偏差 (m/s)	测量不确定度 U (m/s)
v_x		v_x			
v_y		v_y			
v_z		v_z			

5. 1PPS 定时偏差

定时偏差 (ns)	测量不确定度 U (ns)

附录 B 校准证书内页格式

校准证书内页格式

1. 外观和工作正常性检查

外观： <input type="checkbox"/> 完好 <input type="checkbox"/> 损坏
工作正常性检查： <input type="checkbox"/> 正常 <input type="checkbox"/> 异常

2. 定位偏差

定位偏差 (m)	测量不确定度 U (m)

3. 航向角偏差

航向角偏差 ($^{\circ}$)	测量不确定度 U ($^{\circ}$)

4. 速度偏差

速度偏差 (m/s)	测量不确定度 U (m/s)

5. 1PPS 定时偏差

定时偏差 (ns)	测量不确定度 U (ns)

附录 C 测量结果的不确定度评定示例

概述

本规范给出了飞行器设备的定位偏差、姿态偏差和速度偏差的校准方法。下面对定位偏差、姿态偏差和速度偏差的测量不确定度给出评定示例。

C.1 定位偏差测量结果不确定度评定

本示例采用模拟器法对飞行器进行定位偏差的校准。

C.1.1 测量模型

$$\delta_p = \sqrt{(\bar{x} - x_0)^2 + (\bar{y} - y_0)^2 + (\bar{z} - z_0)^2} \quad (\text{C.1})$$

式) 中:

δ_p ——被校飞行器的定位偏差, m;

x_0 、 y_0 、 z_0 ——标准位置点的坐标, m;

\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} ——被校飞行器测量坐标点坐标的平均值, m。

C.1.2 标准不确定度的来源及评定

定位偏差的不确定度来源有以下几个分量: 模拟器伪距精度测量不准引入的标准不确定度, 模拟器定位信息分辨力引入的标准不确定度, 飞行器定位信息分辨力引入的标准不确定度和测量重复性引入的标准不确定度。

C.1.2.1 模拟器伪距精度测量不准引入的标准不确定度 u_1

根据模拟器溯源的校准结果可知, 伪距精度的扩展不确定度为 10mm (包含因子 $k=2$), 则

$$u_1 = \frac{10\text{mm}}{2} = 5\text{mm} \quad (\text{C.2})$$

C.1.2.2 模拟器定位信息分辨力引入的标准不确定度 u_2

根据模拟器产品手册可知, 定位信息分辨力 0.1mm, 采用 B 类评定方法, 假设其造成的误差为在半区间内均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则

$$u_2 = \frac{0.1\text{mm}}{2\sqrt{3}} = 0.015\text{mm} \quad (\text{C.3})$$

C.1.2.3 飞行器定位结果显示分辨力引入的标准不确定度 u_3

根据飞行器产品手册可知，定位信息分辨力 0.1mm，采用 B 类评定方法，假设其造成的误差为在半区间内均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_3 = \frac{0.1\text{mm}}{2\sqrt{3}} = 0.015\text{mm} \quad (\text{C.4})$$

C.1.2.4 测量重复性引入的不确定度 u_4

重复测量 10 次定位偏差，记录测量结果。

表 C.1 定位偏差测量结果记录表

次数 i	定位偏差测量值 X_i (cm)	次数 i	定位偏差测量值 X_i (cm)
1	1.85	6	1.86
2	1.86	7	1.82
3	1.83	8	1.83
4	1.85	9	1.83
5	1.84	10	1.83

$$u_4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 0.014\text{cm} \quad (\text{C.5})$$

C.1.3 标准不确定度一览表

表 C.2 定位偏差测量标准不确定度一览表

不确定度来源	类型	值	分布	因子	标准不确定度
模拟器伪距精度测量不准 u_1	B	10mm	/	2	5mm
模拟器定位信息分辨力 u_2	B	0.1mm	均匀	$\sqrt{3}$	0.015mm
飞行器定位信息分辨力 u_3	B	0.1mm	均匀	$\sqrt{3}$	0.015mm
测量重复性 u_4	A	0.014cm	/	/	0.014cm

C.1.4 不确定度分量之间相关性

各不确定度分量之间无相关性。

C.1.5 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 5.0\text{mm} \quad (\text{C.6})$$

C.1.6 扩展不确定度 U

被校飞行器设备的定位偏差扩展不确定度 ($k=2$)

$$U = ku_c = 1.0\text{cm} \quad (\text{C.7})$$

C.2 航向角偏差测量结果不确定度评定

C.2.1 测量模型

$$\Delta\Psi = \Psi_i - \Psi_0 \dots\dots\dots (C.8)$$

式中：

$\Delta\Psi$ ——被校飞行器航向角偏差的测量结果，（°）；

Ψ_i ——被校飞行器在转台移动固定角度后输出的航向角，（°）；

Ψ_0 ——转台输出的航向角标准值，（°）。

C.2.2 标准不确定度的来源及评定

航向角偏差的不确定度来源有以下几个分量：全站仪测量角度不准确引入的标准不确定度，全站仪安装与对准不准确引入的标准不确定度，转台旋转中心偏差引入的标准不确定度和测量重复性引入的标准不确定度。

航向角偏差的不确定度来源有以下几个分量：全站仪测角不准确引入的标准不确定度，北向基准误差引入的标准不确定度，转台水平轴角位置定位不准确引入的标准不确定度，被校飞行器航向角分辨力引入的标准不确定度和测量重复性引入的标准不确定度。

C.2.2.1 全站仪测角不准确引入的标准不确定度 u_1

根据全站仪的溯源证书可知，其扩展不确定度为 0.002° （包含因子 $k=2$ ），则

$$u_1 = \frac{0.002^\circ}{2} = 0.001^\circ \quad (C.9)$$

C.2.2.2 北向基准误差引入的标准不确定度 u_2

根据北向基准的产品手册可知，最大允许误差为 0.001° ，采用 B 类评定方法，假设其造成的误差为在半区间内均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_2 = \frac{0.001^\circ}{2\sqrt{3}} = 0.00029^\circ \quad (C.10)$$

C.2.2.3 转台水平轴角位置定位不准确引入的标准不确定度 u_3

根据转台的溯源证书可知，其扩展不确定度为 0.001° （包含因子 $k=2$ ），则

$$u_3 = \frac{0.001^\circ}{2} = 0.0005^\circ \quad (\text{C.11})$$

C.2.2.4 被校飞行器航向角分辨力引入的标准不确定度 u_4

根据被校飞行器航向角分辨力为 0.001° ，采用 B 类评定方法，假设其造成的误差为在半区间内均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_3 = \frac{0.001^\circ}{2\sqrt{3}} = 0.00029^\circ \quad (\text{C.12})$$

C.2.2.5 测量重复性引入的标准不确定度 u_5

在相同的实验条件下，重复测量 10 次航向角偏差，测得的结果如表 C.3 所示，按 A 类评定。

表 C.3 航向角偏差测量 10 次的结果

次数 i	航向角偏差 X_i (°)	次数 i	航向角偏差 X_i (°)
1	0.052	6	0.054
2	0.056	7	0.055
3	0.053	8	0.055
4	0.055	9	0.056
5	0.056	10	0.054

测量结果的试验标准偏差为：

$$u_5 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 0.0014^\circ \quad (\text{C.13})$$

C.2.3 标准不确定度一览表

表 C.4 航向角标准不确定度一览表

不确定度来源	类型	值	分布	因子	标准不确定度
全站仪测量角度不准确 u_1	B	0.002°	/	2	0.001°
北向基准误差 u_2	B	0.001°	均匀	$\sqrt{3}$	0.00029°
转台水平轴角位置定位不准确 u_3	B	0.001°	/	2	0.0005°
被校飞行器航向角分辨力 u_4	A	0.001°	均匀	$\sqrt{3}$	0.00029°
测量重复性 u_5	A	/	/	/	0.0014°

C.2.4 不确定度分量之间相关性

各不确定度分量之间无相关性。

C.2.5 合成标准不确定度

合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 0.002^\circ \quad (\text{C.14})$$

C.2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为

$$U = ku_c = 0.004^\circ \quad (\text{C.15})$$

C.3 速度偏差测量结果不确定度评定

C.3.1 测量模型

$$\delta_v = \sqrt{(\overline{v_x} - V_{x0})^2 + (\overline{v_y} - V_{y0})^2 + (\overline{v_z} - V_{z0})^2} \quad (\text{C.16})$$

式中：

δ_v ——被校飞行器的速度偏差，m/s；

v_{x0} 、 v_{y0} 、 v_{z0} ——标准速度值，m/s；

$\overline{v_x}$ 、 $\overline{v_y}$ 、 $\overline{v_z}$ ——被校飞行器测量速度的平均值，m/s。

C.3.2 测量不确定度来源

测量不确定度来源主要有：模拟器伪距变化率误差引入的标准不确定度，模拟器测速信息分辨力引入的标准不确定度，飞行器测速误差引入的标准不确定度和测量重复性引入的标准不确定度。

C.3.2.1 模拟器伪距变化率误差引入的标准不确定度 u_1

根据模拟器的溯源证书可知，其伪距变化率的不确定度为 0.002m/s，采用 B 类评定方法，取 $k=2$ ，由宽带示波器前沿抖动引入的标准不确定度：

$$u_1 = \frac{0.002\text{m/s}}{2} = 1.0\text{mm/s} \quad (\text{C.17})$$

C.3.2.2 模拟器测速误差引入的标准不确定度 u_2

$$u_2 = \frac{2\text{cm/s}}{\sqrt{3}} = 1.15\text{cm/s} \quad (\text{C.18})$$

C.3.2.3 飞行器测速信息分辨力引入的标准不确定度 u_3

$$u_3 = \frac{0.1\text{mm/s}}{\sqrt{3}} = 0.03\text{mm/s} \quad (\text{C.19})$$

C.3.2.4 测量重复性引入的标准不确定度 u_4

在相同的实验条件下，重复测量 10 次时速度偏差，测得的结果如表 C.5 所示，按 A 类评定。

表 C.5 速度偏差测量 10 次的结果

次数 i	速度偏差 X_i (m/s)	次数 i	速度偏差 X_i (m/s)
1	0.018	6	0.018
2	0.020	7	0.019
3	0.019	8	0.020
4	0.017	9	0.019
5	0.019	10	0.017

测量结果的试验标准偏差为：

$$u_4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 1.1\text{mm/s} \quad (\text{C.20})$$

C.3.3 标准不确定度一览表

表 C.6 速度偏差测量标准不确定度一览表

不确定度来源	类型	值	分布	因子	标准不确定度
模拟器伪距变化率误差	B	2mm/s	/	2	1mm/s
模拟器测速误差	B	2cm/s	均匀	$\sqrt{3}$	11.5mm/s
飞行器测速信息分辨力	B	0.1mm/s	均匀	$\sqrt{3}$	0.03mm/s
测量重复性	A	1.1mm/s	/	/	1.1mm/s

C.3.4 不确定度分量之间相关性

各不确定度分量之间无相关性。

C.3.5 合成标准不确定度

合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 11.6\text{mm/s} \quad (\text{C.21})$$

C.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为

$$U = ku_c = 2.3\text{cm/s} \quad (\text{C.22})$$

C. 4 1PPS 定时偏差测量结果不确定度评定

C.4.1 测量模型

$$\delta_T = t_{1\text{PPS}(\text{OUT})} - t_{1\text{PPS}(\text{REF})} \quad (\text{C.23})$$

式中：

δ_T ——被校飞行器 1PPS 的定时偏差，ns

$t_{1\text{PPS}(\text{OUT})}$ ——被校飞行器 1PPS 的到达时间，ns；

$t_{1\text{PPS}(\text{REF})}$ ——参考时间频率源 1PPS 的到达时间，ns；

C.4.2 测量不确定度来源

测量不确定度来源主要有：参考频率源引入的标准不确定度，时间间隔测量仪引入的标准不确定度，引出电缆和电缆转接头延迟测量引入的标准不确定度和测量重复性引入的标准不确定度。

C.4.2.1 参考频率源引入的标准不确定度 u_1

根据参考频率源的溯源证书可知，其扩展不确定度为 0.5ns， $k=2$ ，则：

$$u_1 = \frac{0.5\text{ns}}{2} = 0.25\text{ns} \quad (\text{C.24})$$

C.4.2.2 时间间隔测量仪引入的标准不确定度 u_2

$$u_2 = \frac{5\text{ns}}{2} = 2.5\text{ns} \quad (\text{C.25})$$

C.4.2.3 引出电缆和电缆转接头延迟测量引入的标准不确定度 u_3

本装置使用的引出电缆和电缆转接头延迟测量引入的标准不确定度不超过 2ns，则：

$$u_3 = 2\text{ns} \quad (\text{C.26})$$

C.4.2.4 测量重复性引入的标准不确定度 u_4

在相同的实验条件下，重复测量 10 次时 1PPS 定时偏差，测得的结果如表

C.7 所示，按 A 类评定。

表 C.7 1PPS 定时偏差测量 10 次的结果

次数 i	定时偏差 X_i (ns)	次数 i	定时偏差 X_i (ns)
1	152	6	153
2	150	7	155
3	148	8	157
4	148	9	152
5	145	10	142

测量结果的试验标准偏差为：

$$u_4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 4.6\text{ns} \quad (\text{C.27})$$

C.4.3 标准不确定度一览表

表 C.8 速度偏差测量标准不确定度一览表

不确定度来源	类型	值	分布	因子	标准不确定度
参考频率源	B	0.5ns	/	2	0.25ns
时间间隔测量仪	B	5ns	/	2	2.5ns
引出电缆和电缆转接头延迟测量	B	2ns	/	/	2ns
测量重复性	A	4.6ns	/	/	4.6ns

C.4.4 不确定度分量之间相关性

各不确定度分量之间无相关性。

C.4.5 合成标准不确定度

合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 5.6\text{ns} \quad (\text{C.28})$$

C.4.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为

$$U = ku_c = 11\text{ns} \quad (\text{C.29})$$