

JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

原子钟组合成器校准规范

Calibration Specification for Atomic Clock Group Combiner Synthesizers

(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

原子钟组合成器校准规范

Calibration Specification for Atomic Clock Group
Combiner Synthesizers

JJF xxxx-xxxx

归口单位：全国时间频率计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：国防科技大学

北京无线电计量测试研究所

北京大学

成都同相科技有限公司

本规范委托全国时间频率计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

刘年丰（中国计量科学研究院）

杨东方（中国计量科学研究院）

参加起草人：

龚 航（国防科技大学）

彭 竞（国防科技大学）

杨 军（北京无线电计量测试研究所）

王延辉（北京大学）

高 超（成都同相科技有限公司）

目 录

引 言	I
1 范围	1
2 引用文件	1
3 概述	1
4 计量特性	1
4.1 输出频率及功率	1
4.2 输出频率谐波失真与非谐波失真	2
4.3 隔离度	2
4.4 相对频率偏差 ($\Delta f=0$)	2
4.5 附加频率稳定度	2
4.6 相位噪声	2
4.7 频率调整范围	3
4.8 1 PPS 输出	3
4.9 1PPS 同步偏差	3
4.10 切换前后输出相位跳变	3
4.11 切换前后输出频率跳变	3
5 校准条件	3
5.1 环境条件	3
5.2 测量标准及其它设备	4
6 校准项目和校准方法	6
6.1 校准项目	6
6.2 校准方法	6
7 校准结果表达	13
8 复校时间间隔	14
附录 A 原始记录格式	15
附录 B 校准证书(内页)格式	19
附录 C 主要校准结果不确定度评定示例	23

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定工作的基础性文件。

本规范为首次制定。

原子钟组合成器校准规范

1 范围

本规范适用于输入频率为 5 MHz、10 MHz、100 MHz 的原子钟组合成器的校准。

2 引用文件

JJF1001 通用计量术语及定义

JJF1180 时间频率计量名词术语及定义

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

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 概述

原子钟组合成器（以下简称合成器）是用于守时实验室中提供不间断时间和频率信号的设备，通常由频率比对模块、切换控制模块及综合信号输出模块组成，如图 1 所示。

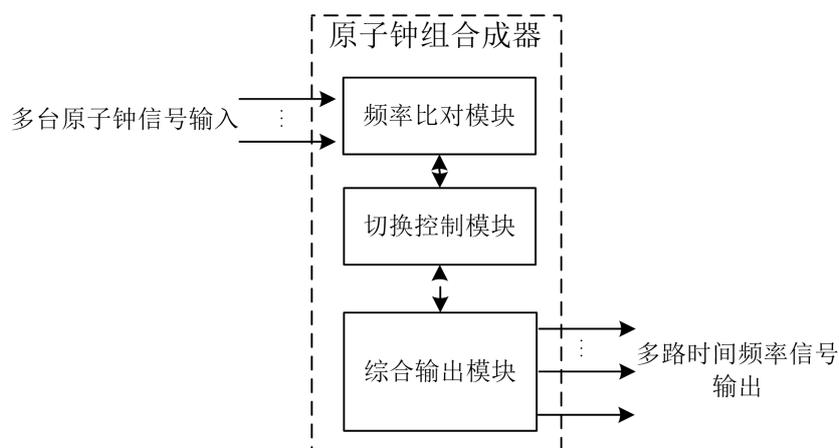


图 1 合成器原理框图

其中：

频率比对模块：用于对多路原子钟频率信号相较于输出信号状态进行监测；

切换控制模块：用于根据频率比对模块监测结果来无损切换输入信号；

综合输出模块：用于多路原子钟信号综合和低损耗分配。

4 计量特性

4.1 输出频率及功率

频率：5 MHz、10 MHz、100 MHz ；

功率：(7~15) dBm 。

4.2 输出频率谐波失真与非谐波失真

谐波：≤-40 dBc ；

非谐波：≤-80 dBc 。

4.3 隔离度

≤-100 dB 。

4.4 相对频率偏差 ($\Delta f=0$)

Δf 表示合成器对输入信号的频率偏置量，下同。

$-1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-14}$ 。

4.5 附加频率稳定度

见表 1。

τ 表示取样时间， $\sigma_y(\tau)$ （阿仑标准偏差）表示频率稳定度。

表 1 附加频率稳定度

取样时间 τ	频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$	
	$\Delta f=0$	$\Delta f=1 \times 10^{-12}$
1 s	$\leq 1 \times 10^{-13}$	$\leq 1 \times 10^{-13}$
10 s	$\leq 5 \times 10^{-14}$	$\leq 5 \times 10^{-14}$
100 s	$\leq 8 \times 10^{-15}$	$\leq 8 \times 10^{-15}$

4.6 相位噪声

见表 2、表 3。

表 2 相位噪声 ($\Delta f=0$)

频率 频偏	5 MHz	10 MHz
10 Hz	≤-120 dBc/Hz	≤-120 dBc/Hz
100 Hz	≤-145 dBc/Hz	≤-145 dBc/Hz
1 kHz	≤-150 dBc/Hz	≤-150 dBc/Hz
10 kHz	≤-155 dBc/Hz	≤-155 dBc/Hz

表 3 相位噪声 ($\Delta f=1 \times 10^{-12}$)

频率 频偏	5 MHz	10 MHz
10 Hz	≤ -120 dBc/Hz	≤ -120 dBc/Hz
100 Hz	≤ -145 dBc/Hz	≤ -145 dBc/Hz
1 kHz	≤ -150 dBc/Hz	≤ -150 dBc/Hz
10 kHz	≤ -155 dBc/Hz	≤ -155 dBc/Hz

4.7 频率调整范围

$-1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-8}$

4.8 1 PPS 输出

幅度 (50Ω): ≥ 2 V

上升时间: ≤ 10 ns

脉冲宽度: ≥ 800 ns

抖动: ≤ 1 ns (RMS)

4.9 1PPS 同步偏差

优于 ± 200 ns

4.10 切换前后输出相位跳变

≤ 0.5 ns

4.11 切换前后输出频率跳变

$\leq 3 \times 10^{-15}$

注: 以上技术指标仅供参考。

5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 环境温度

在 $20^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 范围内任选一值, 温度最大允许变化 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 。

5.1.2 环境湿度

相对湿度 $\leq 80\%$ 。

5.1.3 供电电源

电压：220（1±10%）V；

频率：50（1±2%）Hz。

5.1.4 其它

周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

5.2 测量标准及其它设备

5.2.1 参考频标、参考频标 1

输出频率：5 MHz、10 MHz、100 MHz；

输出功率：（7~15）dBm；

频率稳定度： $\leq 1 \times 10^{-13}/s$ ；

相位噪声（见表 4）：

表 4 参考频标相位噪声

频率 \ 频偏	5 MHz	10 MHz	100 MHz
1 Hz	≤ -110 dBc/Hz	≤ -104 dBc/Hz	≤ -84 dBc/Hz
10 Hz	≤ -130 dBc/Hz	≤ -124 dBc/Hz	≤ -94 dBc/Hz
100 Hz	≤ -150 dBc/Hz	≤ -144 dBc/Hz	≤ -124 dBc/Hz
1 kHz	≤ -160 dBc/Hz	≤ -154 dBc/Hz	≤ -134 dBc/Hz
10 kHz	≤ -165 dBc/Hz	≤ -159 dBc/Hz	≤ -139 dBc/Hz

谐波失真： ≤ -50 dBc；

1PPS 输出：脉冲宽度 ≥ 800 ns；

脉冲幅度符合 TTL 电平。

5.2.2 频标比对器

频率范围：5MHz，10MHz，100MHz；

比对不确定度： $\leq 3 \times 10^{-14}/s$ ；

$\leq 3 \times 10^{-15}/10 s$ ；

$\leq 3 \times 10^{-16}/100 s$ 。

5.2.3 相位噪声测量装置

频率范围：（1~ 100）MHz；

本底噪声： ≤ -120 dBc/Hz（1Hz 频偏）；

≤ -130 dBc/Hz（10Hz 频偏）；

≤ -150 dBc/Hz (100Hz 频偏) ;

≤ -160 dBc/Hz (1kHz 频偏) ;

≤ -165 dBc/Hz (10kHz 频偏)。

5.2.4 频谱分析仪

频率范围：0.1 MHz~100 MHz;

电平测量最大允许误差： ± 1 dB;

动态范围： ≥ 100 dB。

5.2.5 时间间隔计数器

时间间隔：1 ns~1 s;

最大允许误差： ± 1 ns;

触发电平：在 (0~5) V 范围内连续可调，并能指示电平值;

有外接频标功能。

5.2.6 功率计

频率范围：(0.1~200)MHz;

功率范围：(-20~+20) dBm;

最大允许误差： ± 0.1 dB。

5.2.7 信号发生器

频率范围：(1~200) MHz;

功率范围：(0~20) dBm;

最大允许误差： ± 0.1 dB。

5.2.8 功分器

频率范围：DC ~ 200 MHz。

5.2.9 数字示波器

示波器带宽： ≥ 500 MHz;

幅度测量最大允许误差： $\pm 5\%$ 。

5.2.10 低噪声频率标准

相位噪声： $\mathcal{L}(10\text{ kHz}) \leq -170$ dBc/Hz。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

见表 5。

表 5 校准项目

序号	项目名称
1	外观及工作正常性检查
2	输出频率及功率
3	谐波与非谐波失真
4	隔离度
5	相对频率偏差
6	附加频率稳定度
7	相位噪声
8	频率调整范围
9	秒脉冲（1PPS）幅度及宽度
10	秒脉冲（1PPS）上升时间
11	秒脉冲（1PPS）抖动
12	1 PPS 输出同步偏差
13	切换前后输出相位跳变
14	切换前后输出频率跳变

6.2 校准方法

6.2.1 外观及工作正常性检查

1) 外观检查

前面板或后面板上应标有：仪器名称、型号、制造厂、出厂编号及电源要求。

电源开关、输入输出端口、功能设置开关等均应有识别标志，显示屏能正常显示工作参数。

各接口应牢固可靠、各功能旋钮应灵活可用，无影响正常工作的机械损伤。

2) 工作正常性检查

被校合成器应在说明书规定的预热时间内正常锁定。锁定后通过显示窗口或计算机软件窗口查看各有关性能参数，显示的数值应在说明书给定的范围内。

6.2.2 输出频率及功率

仪器连接如图 2。



图 2 输出功率校准示意图

校准步骤如下：

- 1) 参考频标输出频率信号幅度满足被校合成器锁定要求。
- 2) 功率计分别连接合成器的各个频率信号输出端，测量输出频率及功率，并记录测量结果。

6.2.3 谐波与非谐波失真

仪器连接如图 3。

被校合成器的 5 MHz、10 MHz 信号分别接入频谱分析仪。

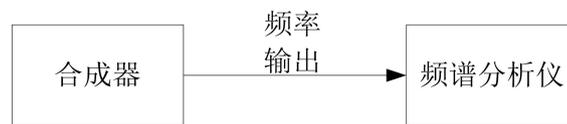


图 3 谐波与非谐波失真校准示意图

1) 谐波失真

频谱分析仪的分辨力带宽 (RBW)、视频带宽 (VBW) 均设置为 1 kHz，合理设置频谱分析仪的起始和终止频率，分别测量基波功率电平及 n 次谐波的功率电平。

n 次谐波失真按公式 (1) 计算。

$$H_n = P_n - P_1 \quad (1)$$

式中：

P_1 —基波功率电平，dBm；

P_n —n 次谐波（一般 n 取 2、3、4、5）的功率电平，dBm；

H_n —n 次谐波失真，dBc；

选取 H_n 最大值作为测量结果。

2) 非谐波失真

频谱分析仪的分辨力带宽 (RBW)、视频带宽 (VBW) 均设置为 1 kHz，合理设置频谱分析仪的起始和终止频率，测量基波功率电平及偏离载频 10 kHz 以外频偏范围内最大的非谐波功率电平。非谐波失真按公式 (2) 计算。

$$N = P_N - P_1 \quad (2)$$

式中：

P_N —偏离载频 10 kHz 以外频偏范围内最大的非谐波功率电平, dBm;

N —非谐波失真, dBc。

6.2.4 隔离度

仪器连接如图 4 所示。



图 4 隔离度校准示意图

校准步骤如下：

1) 设定信号发生器输出信号频率为 $(f_c - 0.1)$ MHz (f_c 表示合成器输出信号频率标称值, 单位 MHz)；输出功率一般设为 10dBm, 将信号发生器的输出信号接入合成器的一个频率信号输出端；

2) 频谱仪分别连接合成器的其它输出端及输入端, 测量端口输出的 $(f_c - 0.1)$ MHz 信号的功率电平；

3) 按公式(3)计算隔离度：

$$I = \max \{P_{im}\} - P_i \quad (3)$$

式中：

P_i ：信号发生器输出功率, 单位 dBm；

P_{im} ：合成器输入口及其它输出口输出的 $(f_c - 0.1)$ MHz 信号的功率, 单位 dBm；

I ：隔离度, 单位 dB。

6.2.5 相对频率偏差

仪器连接如图 5 所示。

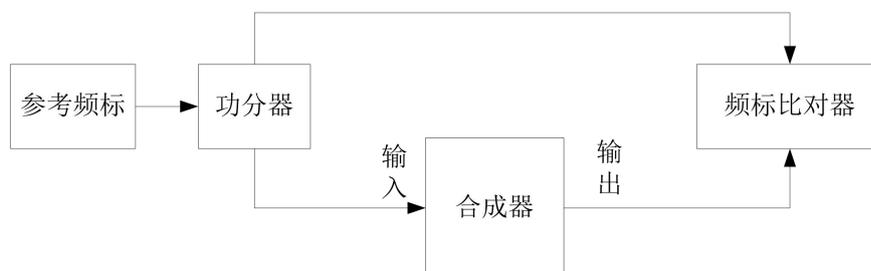


图 5 相对频率偏差、附加频率稳定度校准示意图

校准步骤如下：

合成器锁定外部参考信号后, 设置频率偏置 $\Delta f=0$, 利用频标比对器直接测量相对频

率偏差，作为校准结果，取样时间 $\tau \geq 1 \text{ d}$ 。

6.2.6 附加频率稳定度

仪器连接如图 5 所示。

校准步骤如下：

1) 合成器锁定外部参考信号后，分别设置频率偏置 $\Delta f=0$ 和 $\Delta f=1 \times 10^{-12}$ ，利用频标比对器分别测量 $\Delta f=0$ 和 $\Delta f=1 \times 10^{-12}$ 时的频率稳定度，取样时间为 1 s, 10 s, 100 s；取样时间和取样组数可按表 6 选取。

表 6 取样时间与取样组数

取样时间 τ	取样组数 m
1 s	≥ 100
10 s	≥ 100
100 s	≥ 50

2) 记录测量结果。

6.2.7 相位噪声

仪器连接如图 6 所示。

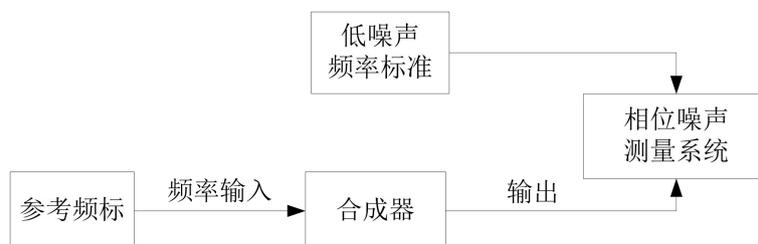


图 6 附加相位噪声校准示意图

校准步骤如下：

1) 合成器锁定外部参考信号后，分别设置频率偏置 $\Delta f=0$ 和 $\Delta f=1 \times 10^{-12}$ ，利用相位噪声测量系统对合成器相位噪声进行测量；

2) 分别记录频偏 1 Hz、10 Hz、100 Hz、1 kHz、10 kHz 处的相位噪声 $\mathcal{L}(f)$ 。

6.2.8 频率调整范围

仪器连接如图 7 所示。

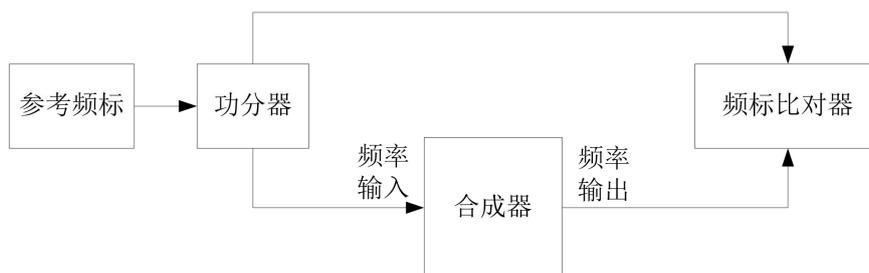


图 7 频率调整范围校准示意图

校准步骤如下：

1) 合成器锁定后，分别设定合成器的频率调整量为其最大与最小可调值，使用频标比对器测量合成器的输出频率信号与参考频率信号的频率偏差，记录测量结果。

2) 设定被校合成器的频率调整量为 $\pm 1 \times 10^{-13}$ ，频率调整完成后，使用频标比对器测量被校合成器的输出频率信号与参考频率信号的频率偏差（取样组数 ≥ 100 ），记录测量结果验证被校合成器的频率调整能力。

6.2.9 秒脉冲（1PPS）幅度及宽度

仪器连接如图 8。

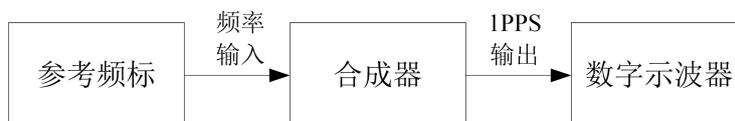


图 8 秒脉冲校准示意图

校准步骤如下：

1) 合成器锁定外部参考信号后，合理设置数字示波器的相关参数，测量被校合成器的 1PPS 输出信号的幅度及脉冲宽度；

2) 测量 10 次，取平均值；记录测量结果。

6.2.10 秒脉冲（1PPS）上升时间

仪器连接如图 8。被校合成器的秒脉冲接入数字示波器，示波器的输入阻抗选为 50Ω ，调节示波器，使屏幕上显示稳定的脉冲波形且上升沿占示波器水平方向一格或以上，测出秒脉冲幅度从 10% 上升到 90% 所对应的时间间隔即为秒脉冲上升时间。

6.2.11 秒脉冲（1PPS）抖动

仪器连接如图 9。

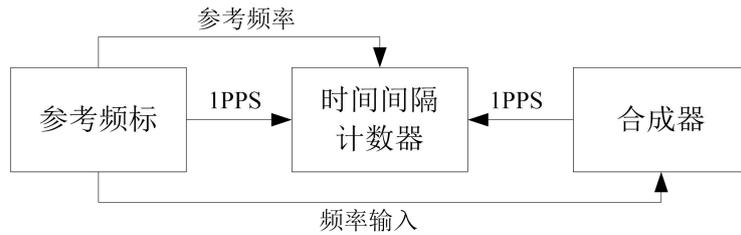


图 9 秒脉冲抖动校准

被校合成器的秒脉冲接入时间间隔计数器，时间间隔计数器接外参考频标，设置为周期测量模式，直流耦合、输入阻抗 $50\ \Omega$ ，触发电平为脉冲幅度的 $1/2$ ，测量 100 个数据以上，计算其实验标准偏差作为秒脉冲抖动校准结果。

6.2.12 1PPS 同步偏差

仪器连接如图 10。

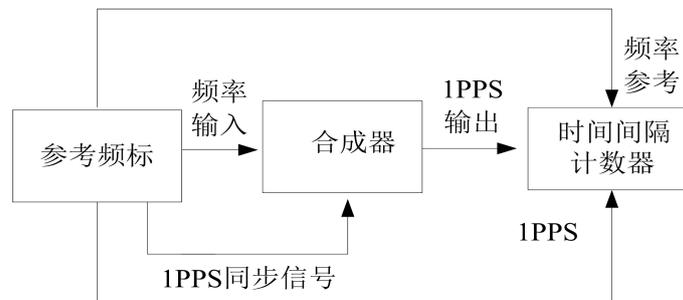


图 10 1PPS 同步偏差校准示意图

校准步骤如下：

1) 参考频标同时输出频率信号和 1PPS 信号至被校合成器；待被校合成器锁定外部参考信号，设置频率偏置 $\Delta f=0$ 。

2) 设置被校合成器进行同步，被校合成器显示同步成功后，利用时间间隔计数器测量被校合成器与参考频标的 1PPS 输出信号之间的时差，去掉线缆引入的时延偏差后的时差作为同步偏差；

3) 测量 10 次，取平均值；记录测量结果。

6.2.13 切换前后输出相位跳变

(1) 时差法

仪器连接如图 11 所示。

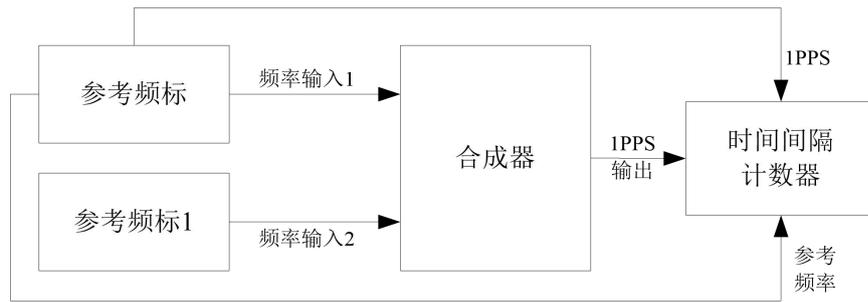


图 11 切换前后输出相位跳变校准（时差法）示意图

校准步骤如下：

1) 合成器先锁定到频率输入 1，参考频标的 1PPS 信号输出连接到时间间隔计数器作为开门信号，合成器的 1PPS 输出端口连接到时间间隔计数器作为关门信号，测量并记录两个秒信号的时间间隔作为 Δt_1 。

2) 手动切换合成器的主频率输入信号，使合成器锁定到频率输入 2，参考频标的 1PPS 信号输出连接到时间间隔计数器作为开门信号，合成器的 1PPS 输出端口连接到时间间隔计数器作为关门信号，测量并记录两个秒信号的时间间隔作为 Δt_2 。

3) 计算 $(|\Delta t_2 - \Delta t_1|)$ 作为切换输入信号后合成器的相位变化值。

(2) 频标比对器法

仪器连接如图 12 所示。

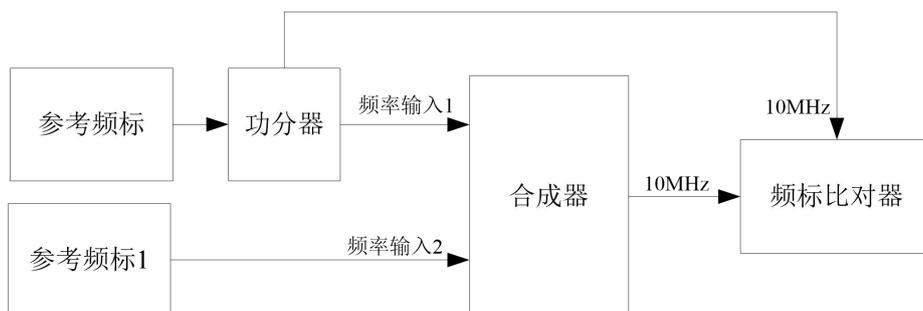


图 12 切换前后输出相位跳变校准（频标比对器法）示意图

校准步骤如下：

1) 合成器先锁定到频率输入 1，待合成器稳定运行后，从频标比对器直接读取相位差 Δt_1 。

2) 手动切换合成器的主频率输入信号，使合成器锁定到频率输入 2，待合成器稳定运行后，从频标比对器直接读取相位差 Δt_2 。

3) 计算 $(|\Delta t_2 - \Delta t_1|)$ 作为切换输入信号后合成器的相位变化值。

6.2.14 切换前后输出频率跳变

(1) 时差法

仪器连接如图 11 所示。

校准步骤如下：

1) 合成器先锁定到频率输入 1, 参考频标的 1PPS 信号输出连接到时间间隔计数器作为开门信号, 合成器的 1PPS 输出端口连接到时间间隔计数器作为关门信号, 测量并记录两个秒信号的时间间隔作为 Δt_1 , 取样时间 $\tau \geq 1 \text{ d}$, 再次测量结果为 Δt_2 。

依据公式 (4) 计算相对频率偏差:

$$f_1 = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\tau} \quad (4)$$

式中:

$\Delta t_1, \Delta t_2$ —两次测量的相位时间差, s;

f_1 —相对频率偏差。

2) 手动切换合成器的主频率输入信号, 使合成器锁定到频率输入 2, 测得相对频率偏差为 f_2 。

3) 计算 $(|f_2 - f_1|)$ 作为切换输入信号后合成器的频率变化值。

(2) 频标比对器法

仪器连接如图 12 所示。

校准步骤如下：

1) 合成器先锁定到频率输入 1, 待合成器稳定运行后, 从频标比对器直接读取相对频率偏差 f_1 。

2) 手动切换合成器的主频率输入信号, 使合成器锁定到频率输入 2, 待合成器稳定运行后, 从频标比对器直接读取相对频率偏差 f_2 。

3) 计算 $(|f_2 - f_1|)$ 作为切换输入信号后合成器的频率变化值。

7 校准结果表达

原子钟组合成器校准后, 出具校准证书。校准证书至少应包含以下信息:

- 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。

8 复校时间间隔

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定，推荐校准周期不超过 1 年。

附录 A 原始记录格式

A1. 外观及工作正常性检查

检查项目	结果
外观	
工作正常性	

A2. 输出功率

频率 (MHz)	功率 (dBm)	不确定度 U (dBm) ($k=2$)
5		
10		

A3. 谐波与非谐波失真

频率 (MHz)	谐波 (dBc)	非谐波(dBc)	不确定度 U (dB) ($k=2$)
5			
10			

A4. 隔离度

输出端口	隔离度(dB)	不确定度 U (dB) ($k=2$)
1		
2		

A5. 相对频率偏差

取样时间 τ (s)	相对频率偏差 y (τ)	不确定度 U ($k=2$)

A6. 附加频率稳定度

$\Delta f=0$:

取样时间 τ	频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$	不确定度 U ($k=2$)
1 s		
10 s		
100 s		

$\Delta f = 1 \times 10^{-12}$:

取样时间 τ	频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$	不确定度 U ($k=2$)
1 s		
10 s		
100 s		

A7.相位噪声

$\Delta f = 0$ (5 MHz) :

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

$\Delta f = 1 \times 10^{-12}$ (5 MHz) :

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

$\Delta f=0$ (10 MHz) :

f	$\xi(f)$ dBc/Hz	不确定度 U (dB) ($k=2$)
10 Hz		
100 Hz		
1 kHz		
10 kHz		

$\Delta f=1 \times 10^{-12}$ (10 MHz) :

f	$\xi(f)$ dBc/Hz	不确定度 U (dB) ($k=2$)
10 Hz		
100 Hz		
1 kHz		
10 kHz		

A8. 频率调整范围

频率调整范围:

频率调整范围 设定值	频偏测量值			不确定度 $U(k=2)$
	调整前	调整后	差值	

频率调整:

频率调整 设定值	频偏测量值			不确定度 $U(k=2)$
	调整前	调整后	差值	
1E-13				
-1E-13				

A9. 秒脉冲幅度与宽度

项目	测量值	不确定度 $U(k=2)$
幅度 U/V		
宽度 t_w/s		

A10. 秒脉冲上升时间

秒脉冲上升时间 (ns)	不确定度 $U(k=2)$

A11. 秒脉冲上升抖动

秒脉冲抖动 (ns)	不确定度 $U(k=2)$

A12. 秒脉冲 (1PPS) 同步偏差

同步偏差 (ns)	不确定度 $U(k=2)$

A13. 输出相位跳变

时间偏差测量值			不确定度 $U(ns)$ ($k=2$)
信号切换前	信号切换后	差值	

A14. 输出频率跳变

相对频率偏差测量值			不确定度 $U(k=2)$
信号切换前	信号切换后	差值	

附录 B 校准证书(内页)格式

B1. 外观及工作正常性检查

检查项目	结果
外观	
工作正常性	

B2. 输出功率

频率 (MHz)	功率 (dBm)	不确定度 U (dBm) ($k = 2$)
5		
10		

B3. 谐波与非谐波失真

频率 (MHz)	谐波 (dBc)	非谐波(dBc)	不确定度 U (dB) ($k = 2$)
5			
10			

B4. 隔离度

参考端口	输出端口	隔离度(dB)	不确定度 U (dB) ($k = 2$)

B5. 相对频率偏差

相对频率偏差 y (τ)	不确定度 U ($k = 2$)

B6. 附加频率稳定度

$\Delta f=0$:

取样时间 τ	频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$	不确定度 U ($k=2$)
1 s		
10 s		
100 s		

$\Delta f=1 \times 10^{-12}$:

取样时间 τ	频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$	不确定度 U ($k=2$)
1 s		
10 s		
100 s		

B7. 相位噪声

$\Delta f=0$ (5 MHz) :

f	$\mathfrak{f}(f)$ dBc/Hz	不确定度 U (dB) ($k=2$)
10 Hz		
100 Hz		
1 kHz		
10 kHz		

$\Delta f=1 \times 10^{-12}$ (5 MHz) :

f	$\mathfrak{f}(f)$ dBc/Hz	不确定度 U (dB) ($k=2$)
10 Hz		
100 Hz		
1 kHz		
10 kHz		

$\Delta f=0$ (10 MHz) :

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

$\Delta f=1 \times 10^{-12}$ (10 MHz) :

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

B8. 频率调整范围

输出端口	频率调整范围	频率调整	不确定度 $U(k=2)$

B9. 秒脉冲幅度与宽度

项目	测量值	不确定度 U ($k=2$)
幅度 U/V		
宽度 t_w/s		

B10. 秒脉冲上升时间

秒脉冲上升时间 (ns)	不确定度 U ($k=2$)

B11. 秒脉冲上升抖动

秒脉冲抖动 (ns)	不确定度 $U (k=2)$

B12. 秒脉冲 (1PPS) 同步偏差

同步偏差 (ns)	不确定度 $U (k=2)$

B13. 相位变化

相位变化	不确定度 $U(\text{ns})$ ($k=2$)

B14. 频差变化

相对频率偏差变化	不确定度 U ($k=2$)

附录 C 主要校准结果不确定度评定示例

附录 C

主要校准项目不确定度评定示例

由于合成器的输出端口功能一致，故只选取其中一个为例。本示例以 VCH 公司的 VCH317 为例进行不确定度分析。

C.1 输出功率

以 1 端口为例，输出频率 5MHz，使用功率计为 Agilent 公司的 8481D，测量输出功率如下（本示例以 10 次测量为例）。

测量序号	输出功率(dBm)
1	13.52
2	13.52
3	13.52
4	13.52
5	13.52
6	13.52
7	13.52
8	13.52
9	13.52
10	13.52

重复性为 0.00dB，应考虑功率计分辨率，为 0.01dBm。不确定度来源如表 C.2 所示，各项分量相互独立。

表 C.2 功率测量不确定度来源

不确定度来源	类型	值	分布	包含因子	标准不确定度
功率计测量误差 u_2	B	0.10dB	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.06dB
功率计分辨率 u_3	B	0.01dB	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.006dB

合成标准不确定度： $u(G) = \sqrt{\sum u_i^2} = 0.06dB$ ；

扩展不确定度： $U(G) = 2u(G) = 0.12 dB (k = 2)$ 。

C.2 谐波失真

谐波失真为二次、三次谐波中功率较高的功率值与基波功率的差值，按公式(C.1)计算谐波失真：

$$P_H = \max\{P_2, P_3\} - P_1 \quad (C.1)$$

式中： P_2 ：二次谐波功率，单位 dBm； P_3 ：三次谐波功率，单位 dBm； P_1 ：基波功率，单位 dBm； P_H ：谐波失真，单位 dBc。其中 $\max\{\}$ 为取最大值函数。

以 1 端口为例，基波功率 $P_1=13.17\text{dBm}$ ； $\max\{P_2, P_3\}$ 如下（本示例以 10 次测量为例）。

测量序号	最大谐波功率 $\max\{P_2, P_3\}$ (dBm)
1	-31.15
2	-31.17
3	-31.22
4	-31.18
5	-31.20
6	-30.39
7	-31.26
8	-31.23
9	-31.25
10	-31.19

重复性： $u_2 = \frac{0.26}{\sqrt{10}} = 0.08\text{dB}$ 。不确定度来源如表 C.3 所示，各项分量相互独立。

表 C.3 谐波失真不确定度来源

不确定度来源	类型	值	分布	包含因子	标准不确定度
频谱仪测量 u_1	B	0.30dB	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.17dB
测量重复性 u_2	A	0.08 dB			0.08 dB

输出 1 端口的谐波失真为： $P_H = \max\{P_2, P_3\} - P_1 = -44.29\text{dBc}$ ；

合成标准不确定度： $u(P_H) = \sqrt{\sum u_i^2} = 0.19\text{dB}$ ；

扩展不确定度 $U(P_H) = 2u(P_H) = 0.38\text{dB} (k = 2)$ 。

C.3 非谐波失真

按公式(C.3)计算非谐波失真：

$$P_N = P_{Nm} - P_1 \quad (C.3)$$

式中： P_1 ：基波功率，单位 dBm； P_{Nm} ：离 f_c 频点 10kHz 以外的非谐波功率最大值，单位 dBm； P_N ：非谐波失真，单位 dBc。

以 1 端口为例，基波 $P_1=13.17\text{dBm}$ ，频谱仪 RBW 设定为 1KHz， P_{Nm} 如下（本示例以 10 次测量为例）。

测量序号	离 f_c 频点 10kHz 以外的非谐波功率最大值 P_{Nm} (dBm)
1	-95.19
2	-94.65
3	-94.98
4	-94.87
5	-94.79
6	-94.89
7	-95.26
8	-95.11
9	-94.97
10	-94.76

重复性： $u_2 = \frac{0.19}{\sqrt{10}} = 0.06\text{dB}$ 。不确定度来源如表 C.4 所示，各项分量相互独立。

表 C4 非谐波失真不确定度来源

不确定度来源	类型	值	分布	包含因子	标准不确定度
频谱仪测量 u_1	B	0.30dB	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.17dB
测量重复性 u_2	A	0.06dB			0.06dB

注：严格意义上频率源的输出幅度的波动会引入不确定度，但是频率源充分预热后功率输出相对稳定，在短时间测量中不会对结果产生影响。这里省略这一项。

合成标准不确定度： $u(P_N) = \sqrt{\sum u_i^2} = 0.18\text{dB}$ ；

扩展不确定度 $U(P_N) = 2u(P_N) = 0.36\text{dB}(k = 2)$ 。

C.4 隔离度

按公式(C.4)计算隔离度：

$$I = \max\{P_{1m}\} - P_i \quad (\text{C.4})$$

式中： P_i ：信号发生器输出功率，单位 dBm； P_{1m} ：合成器输入口及该放大器其它输出口输出功率，单位 dBm； I ：隔离度，单位 dB。

以输出 1 端口为例，输入频率 4.9MHz，输入功率 $P_i=12.32\text{dBm}$ ，测量输入端口（反向隔离度）、输出端口 2（通道间隔度）的输出信号功率。以反向隔离度 10 次测量为例，测量值 $\max\{P_{1m}\}$ 如

下:

测量序号	输入端口输出功率 P_{1m} (dBm)
1	-63.51
2	-63.66
3	-63.19
4	-63.31
5	-63.15
6	-63.37
7	-63.61
8	-63.93
9	-63.68
10	-63.11

输入端口测量重复性: $u_2 = \frac{0.45}{\sqrt{10}} = 0.14dB$ 。不确定度来源如表 C.5 所示, 各项分量相互独立。

表 C.5 隔离度不确定度来源

不确定度来源	类型	值	分布	包含因子	标准不确定度
频谱仪测量 u_1	B	0.30dB	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.17dB
测量重复性 u_2	A	0.14dB			0.14dB

注: 严格意义上频率源的输出幅度的波动会引入不确定度, 但是频率源充分预热后功率输出相对稳定, 在短时间测量中不会对结果产生影响。这里省略这一项。

合成标准不确定度: $u(I) = \sqrt{\sum u_i^2} = 0.22dB$;

扩展不确定度 $U(I) = 2u(I) = 0.44dB(k = 2)$ 。

C.5 相位噪声

以输出端口 1 为例, 相位噪声测量结果如下:

频率偏置(Hz)	相位噪声(dBc/Hz)
10	-149.1
100	-159.9
1 000	-169.1

10 000	-170.9
--------	--------

不确定度来源如表 C.6 所示。

表 C.6 相位噪声不确定度来源

不确定度来源	类型	值	分布	包含因子	标准不确定度
相位噪声测量系统	B	2.00dB	正态分布	2	1.00dB

合成标准不确定度： $u(\psi) = 1.0\text{dB}$ ；

扩展不确定度 $U(\psi) = 2.0\text{dB}(k = 2)$ 。

C.6 附加频率稳定度

以输出端口 1 的 1s 频率稳定度为例： $\sigma_y(1s) = 1.1 \times 10^{-13}$ ，取样组数 100。

有限次测量引入的不确定度： $u_2(\sigma_y) = \frac{1.1 \times 10^{-13}}{\sqrt{100}} \approx 1 \times 10^{-14}$ ；不确定度来源如表 C.7 所示。

表 C.7 频率稳定度不确定度来源

不确定度来源	类型	值	分布	包含因子	标准不确定度
频标比对器 u_1	B	3×10^{-15}	均匀分布	$\sqrt{3}$	2×10^{-15}
有限次测量 u_2	A	1×10^{-14}		1	1×10^{-14}

合成标准不确定度： $u(\sigma_y) = \sqrt{\sum u_i^2} = 1 \times 10^{-14}$ ；

扩展不确定度 $U(\sigma_y) = 2u(\sigma_y) = 2 \times 10^{-14}(k = 2)$ 。

C.7 1PPS 输出

以合成器的秒输出端口 1 为例，使用泰克示波器 DPO71604 测量秒输出信号，实际测量值如下（本示例以幅度 10 次测量为例）

测量序号	幅度测量值(V)
1	2.60
2	2.59
3	2.60
4	2.58
5	2.60
6	2.60

7	2.57
8	2.56
9	2.58
10	2.60

重复性： $u_2 = \frac{0.02}{\sqrt{10}} \approx 0.01V$ 。不确定度来源如表 C.8 所示，各项分量相互独立。

C.8 1PPS 输出幅度测量不确定度来源

不确定度来源	类型	值	分布	包含因子	标准不确定度
示波器测量 u_1	B	0.1V	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.06V
测量重复性 u_2	A	0.01V			0.01V

合成标准不确定度： $u(P_r) = \sqrt{\sum u_i^2} = 0.06V$ ；

扩展不确定度 $U(P_r) = 2u(P_r) = 0.12V (k = 2)$ 。

C.8 1PPS 同步偏差

以合成器的秒输出端口 1 为例，使用时间间隔计数器 SR620 测量秒输出信号，实际测量值如下（本示例以 10 次测量为例）。

测量序号	测量值(ns)
1	-67.9
2	-67.8
3	-67.9
4	-67.9
5	-67.8
6	-67.9
7	-67.9
8	-67.9
9	-67.9
10	-67.8

重复性： $u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{10}} = 0.02ns$ 。不确定度来源如表 C.9 所示，各项分量相互独立。

C.9 1PPS 同步输入测量不确定度来源

不确定度来源	类型	值	分布	包含因子	标准不确定度
时间间隔计数器测量 u_1	B	0.5ns	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.28ns
测量重复性 u_2	A	0.02ns			0.02ns

合成标准不确定度： $u(P_r) = \sqrt{\sum u_i^2} = 0.28ns$ ；

扩展不确定度 $U(P_r) = 2u(P_r) = 0.56ns(k = 2)$ 。

C.9 相对频率偏差调整范围

以合成器的频率输出端口 1 为例，使用 5120A 测量输出信号，设定合成器的频移值为 1.0E-13。频移实际测量值 1.0E-13，取样组数 100。

有限次测量引入的不确定度： $u_2(\sigma_y) = \frac{1.0 \times 10^{-13}}{\sqrt{100}} = 1 \times 10^{-14}$

不确定度来源如表 C.10 所示。

表 C.11 频率调整准确度不确定度来源

不确定度来源	类型	值	分布	包含因子	标准不确定度
频标比对器 u_1	B	3×10^{-15}	均匀分布	$\sqrt{3}$	2×10^{-15}
有限次测量 u_2	A	1×10^{-14}		1	1×10^{-14}

合成标准不确定度： $u(\sigma_y) = \sqrt{\sum u_i^2} = 1 \times 10^{-14}$ ；

扩展不确定度 $U(\sigma_y) = 2u(\sigma_y) = 2 \times 10^{-14}(k = 2)$ 。

注：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忽略不计，不再单独列出。