

JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—XXXX

高精度时间频率传递技术指标及 测试方法

Technical Indicators and Test Methods of High-precision
Time and Frequency Transfer

(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

JJF XXX-XXXX

高精度时间频率传递技术指标及测试方法

Technical Indicators and Test Methods of
High-precision Time and Frequency Transfer

JJF XXXX—XXXX

本规范经国家市场监督管理总局 XXXX 年 XX 月 XX 日批准，并自
XXXX 年 XX 月 XX 日起施行。

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：XXX

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：

XXX

XXX

参加起草人：

XXX

XXX

目 录

引 言.....	I
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语及定义.....	1
4 概述.....	1
5 技术指标.....	2
5.1 时间传递附加稳定度.....	2
5.2 频率传递附加稳定度.....	2
5.3 时间传递不确定度.....	3
5.4 频率传递不确定度.....	3
6 测试条件.....	3
6.1 环境要求.....	3
6.2 测试设备.....	3
7 测试方法.....	4
7.1 测试原理.....	4
7.2 时间传递附加稳定度.....	5
7.3 频率传递附加稳定度.....	6
7.4 时间传递不确定度.....	7
7.5 频率传递不确定度.....	7
8 测试结果表达.....	8
9 复测时间间隔.....	8
附录 A GNSS 时间频率传递及其不确定度评定示例.....	10
附录 B 卫星双向时间频率传递及其不确定度评定示例.....	16
附录 C 自由空间光学双向时间频率传递及其不确定度评定示例.....	23
附录 D 光纤时间频率传递及其不确定度评定示例.....	29

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》和 JJF 1059.1《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。

高精度时间频率传递技术指标及测试方法

1 范围

本规范规定了高精度时间频率传递的技术指标要求和测试方法。

本规范适用于高精度时间频率传递链路及设备的测试、评估和计量等相关工作。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

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 1206-2018 时间与频率标准远程校准规范

JJF 1403-2013 全球导航卫星系统（GNSS）接收机（时间测量型）校准规范

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 术语及定义

3.1 时间频率传递（Time and Frequency Transfer）

将时间或频率通过有线或无线的方法传送到异地的过程，一般用于时间或频率的比对与同步。简称时频传递。

3.2 参考时间频率传递设备（Reference of Time and Frequency Transfer Device）

经过校准的时间频率传递设备，一般具备标准时间信号 1 PPS 和标准频率信号 5 MHz/10 MHz/100 MHz 输入功能。简称参考传递设备。

4 概述

高精度时间频率传递技术广泛应用于通信、电网、交通、金融、导航、定位以及科学观测等领域。目前，主要包括全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）时间频率传递、卫星双向时间频率传递、自由空间光学双向时间频率传递和光纤时间频率传递四种。

（1）GNSS 时间频率传递

利用 GNSS 作为传输媒介，双方将各方 GNSS 时间频率传递装置时基参考到本地参考时间频率标准，分别记录同时段的 GNSS 观测数据，通过解算得到两站参考时间频率标准与 GNSS 系统时间的偏差，两者之差作为两站时间传递结果、进一步可计算

得到频率传递结果。基于不同测量信号，可分为 GNSS 码基时间频率传递和 GNSS 载波相位时间频率传递。目前，主要的全球卫星导航系统包括：中国 BDS、美国 GPS、俄罗斯 GLONASS 和欧洲 Galileo。

(2) 卫星双向时间频率传递

利用卫星作为信号转发媒介（一般利用地球同步卫星的转发器作为媒介），两地同时发送各自的时钟信号，通常为秒脉冲信号，测量本地钟秒脉冲信号与接收到的对方发来的秒脉冲信号间的时差，两个测量结果相减并去掉传送中的附加延迟后，得到两地时钟的时间偏差或频率偏差。

(3) 自由空间光学双向时间频率传递

利用自由空间作为传输媒介，两端各自的光学时间频率标准作为参考，分别同时向对方发射光学频率梳（脉冲）信号，经自由空间后互相接收对方信号并与本地光学频率梳信号形成干涉花样，从中解算出两地时差信息经数据交换后计算两端时间或频率偏差。

(4) 光纤时间频率传递

利用光纤作为传输媒介，采用电光转换将时间频率信号调制到光载波上，通过光纤链路传递到远端，再通过光电探测解调得到时间频率信号；或将光学频率信号作为光载波传递到远端，直接在远端得到光学频率信号。一般可分为光纤时间传递、光纤微波频率传递和光纤光学频率传递。

5 技术指标

5.1 时间传递附加稳定度

表 1 时间传递附加稳定度

取样时间 τ	时间传递附加稳定度 $\sigma_x(\tau)$
100 s	(0.01 ~ 5) ns
1000 s	(0.01 ~ 5) ns
10000 s	(0.01 ~ 3) ns
1 d	(0.01 ~ 3) ns

τ 表示取样时间， $\sigma_x(\tau)$ （时间标准偏差 TDEV）表示时间传递附加稳定度。

5.2 频率传递附加稳定度

表 2 频率传递附加稳定度

取样时间 τ	频率传递附加稳定度 $\sigma_y(\tau)$
-------------	----------------------------

1 s	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-13}$
10 s	$1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-14}$
100 s	$1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-15}$
1000 s	$1 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-16}$
10000 s	$1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-17}$
1 d	$1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-19}$

τ 表示取样时间， $\sigma_y(\tau)$ （阿伦标准偏差）表示频率传递附加稳定度。

5.3 时间传递不确定度

合成标准不确定度：（0.1 ~ 5.5）ns

5.4 频率传递不确定度

合成标准不确定度： $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-18}$

注：以上技术指标不作合格性评定，仅供参考。

6 测试条件

6.1 环境要求

测量设备的环境要求如下：

温度：在（23±5）℃内任选一点，测试过程中变化不超过±1℃；

相对湿度：≤80%；

电源电压：220（1±5%）V；电源频率：50（1±2%）Hz；

无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 测试设备

6.2.1 参考时间频率标准

具备 1 PPS、5 MHz/10 MHz/100 MHz 信号输出功能；

1 PPS 信号不确定度优于 40 ns（ $k=2$ ）；

5 MHz/10 MHz/100 MHz 信号的相对频率偏差优于 5×10^{-11} 、频率稳定度优于 $5 \times 10^{-12}/s$ 。

6.2.2 参考时间频率传递设备

具备 1 PPS、5 MHz/10 MHz/100 MHz 信号输入功能；

一般频率稳定度不低于被测设备。

7 测试方法

7.1 测试原理

(1) 共钟法

仪器连接如图 1 所示，A、B 两端各安装 1 台被测设备，二者共用 1 台参考时间频率标准作为参考。

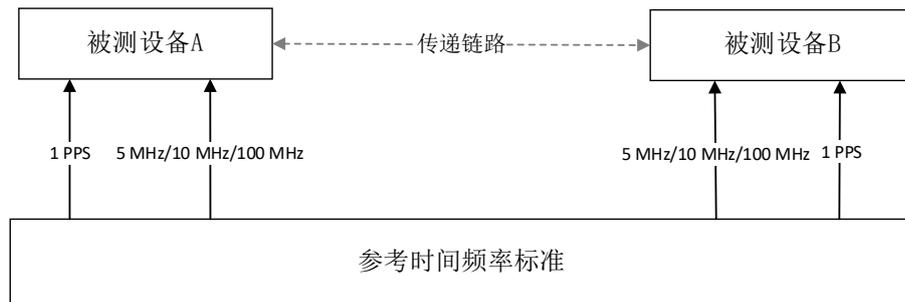


图 1 共钟法原理

利用 A、B 两端的被测设备通过传递链路实现时间频率传递，测得两端的时间偏差，记为 Δt_1 ，其中传递链路指 GNSS 时间频率传递链路、卫星双向时间频率传递链路、自由空间光学双向时间频率传递链路和光纤时间频率传递链路中的一种。利用式 (1) 计算时间偏差：

$$\Delta T(\tau) = \Delta t_1(\tau) \quad (1)$$

式中：

Δt_1 —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的时间偏差，s。

τ —取样时间，s；

(2) 双差法

仪器连接如图 2 所示，A、B 两端各安装 1 台参考传递设备、1 台被测设备和 1 台参考时间频率标准。

利用 A、B 两端的参考传递设备和被测设备分别通过传递链路实现时间频率传递，同时测得两端参考时间频率标准的时间偏差，记为 Δt_0 和 Δt_1 。利用式 (2) 计算双差法测量结果：

$$\Delta T(\tau) = \Delta t_0(\tau) - \Delta t_1(\tau) \quad (2)$$

式中：

Δt_0 —参考传递设备测量的 A 端和 B 端之间的时间偏差，s；

Δt_1 —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的时间偏差，s；

τ —取样时间，s。

利用公式（3）计算 A 端和 B 端之间的相对频率偏差：

$$y_i(\tau) = \frac{\Delta T_{i+1}(\tau) - \Delta T_i(\tau)}{\tau} \quad (3)$$

式中：

$y_i(\tau)$ —第 $i+1$ 次与第 i 次测量之间的平均相对频率偏差；

$\Delta T_{i+1}, \Delta T_i$ —相邻两次测量中 A 端和 B 端之间的时间偏差，s；

τ —取样时间，s。

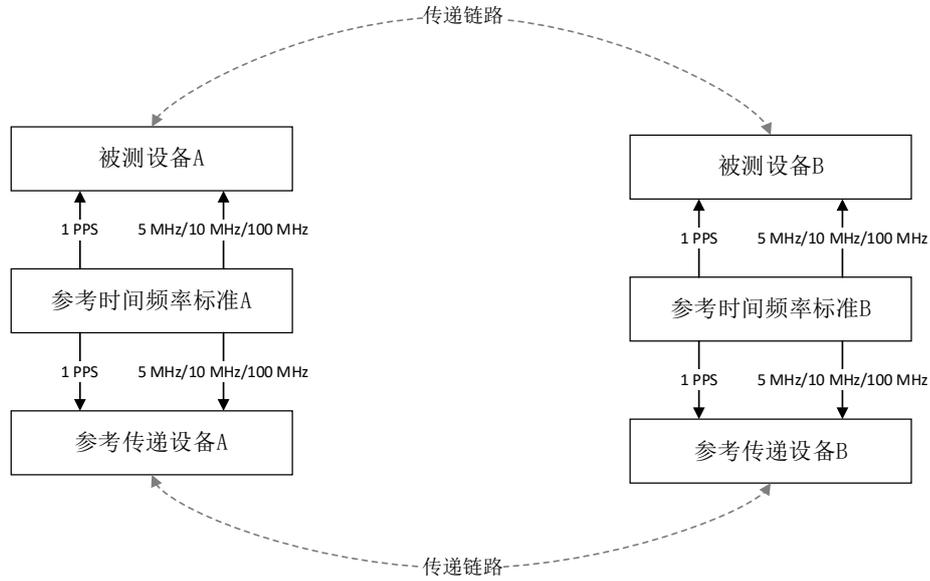


图 2 双差法原理

上述两种方法在多次重复测量过程中，一般取样时间 $1\text{ s} \leq \tau \leq 1\text{ d}$ 。

7.2 时间传递附加稳定度

采用共钟法或双差法测试 A 端和 B 端的时间偏差，利用式（4）计算时间标准偏差（TDEV），作为时间频率传递链路的时间传递附加稳定度。

$$\sigma_x(\tau) = \frac{\tau}{\sqrt{3}} \cdot \text{Mod } \sigma_y(\tau) \quad (4)$$

式中：

τ —取样时间，s；

$\text{Mod } \sigma_y(\tau)$ —修正阿伦标准偏差。

其中，修正阿伦标准偏差采用式（5）计算：

$$\text{Mod } \sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2m^4(M-3m+2)} \sum_{j=1}^{M-3m+2} \left\{ \sum_{i=j}^{j+m-1} \left(\sum_{k=i}^{i+m-1} [y_{k+m}(\tau_0) - y_k(\tau_0)] \right) \right\}^2} \quad (5)$$

式中：

$\text{Mod}\sigma_y(\tau)$ —修正阿伦标准偏差；

M —相对频率偏差取样个数，按表 3 选取；

m —平均因子， $m \leq \lfloor \frac{M}{3} \rfloor$ ；

τ_0 —测量时间间隔，单位：s；

τ —取样时间， $\tau = m \cdot \tau_0$ ，单位：s，按表 3 选取；

y_{k+m}, y_k —第 $k+m$ 次和第 k 次测量的相对频率偏差。

表 3 取样时间与测量次数

取样时间 τ	测量次数 M
1 s	≥ 100
10 s	≥ 100
100 s	≥ 50
1000 s	≥ 15
10000 s	≥ 15
1 d	≥ 15

当参考传递设备的时间传递附加稳定度优于被测设备的 1/3 时，可直接采用测量结果作为被测设备的时间传递附加稳定度；当参考传递设备与被测设备性能相近时，可采用测量结果的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍表征被测设备的时间传递附加稳定度。

7.3 频率传递附加稳定度

采用共钟法或双差法测试 A 端和 B 端的时间偏差。当采用双差法测试时，优选技术指标更高的传递设备作为参考时间频率传递设备；当不具备上述条件时，可采用不同厂家的、不同原理的传递设备作为参考时间频率传递设备。

利用式 (6) 计算阿伦标准偏差，作为频率传递附加稳定度：

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} [y_{i+1}(\tau) - y_i(\tau)]^2} \quad (6)$$

式中：

$\sigma_y(\tau)$ —阿伦标准偏差；

τ —取样时间，单位：s，按表 3 选取；

y_{i+1}, y_i —第 $i+1$ 次和第 i 次测量的相对频率偏差；

M —取样个数，按表 3 选取；

或通过测量得到的时间偏差得到 $\Delta T_i(\tau)$ ，相应的计算采用式（7）：

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} [\Delta T_{i+2}(\tau) - 2\Delta T_{i+1}(\tau) + \Delta T_i(\tau)]^2} \quad (7)$$

式中：

τ —取样时间，单位：s，按表 3 选取；

N —测量的时间偏差数量，取样个数 $M = N - 2$ ，按表 3 选取；

ΔT_{i+2} ， ΔT_{i+1} ， ΔT_i —第 $i+2$ 次、第 $i+1$ 次和第 i 次测量的时间偏差；

当参考传递设备的频率传递附加稳定度优于被测设备的 1/3 时，可直接采用测量结果作为被测设备的频率传递附加稳定度；当参考传递设备与被测设备性能相近时，可采用测量结果的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍表征被测设备的频率传递附加稳定度。

7.4 时间传递不确定度

根据 JJF 1059.1 规定的相关内容评定时间传递不确定度，一般主要不确定度来源见表 4，利用式（8）评估合成标准不确定度：

$$u_x = \sqrt{u_{x1}^2 + u_{x2}^2 + u_{x3}^2 + u_{x4}^2 + u_{x5}^2 + u_{x6}^2} \quad (8)$$

各不确定度分量的评定细节可参考附录中的不确定度评定示例。

表 4 标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	推荐评定方法	备注
被测设备	u_{x1}	B 类	
传递媒介	u_{x2}	B 类	
参考传递设备	u_{x3}	B 类	共钟法测试不包括此项
被测设备及链路的时延补偿	u_{x4}	B 类	
时间偏差的重复性测量	u_{x5}	A 类	
其他	u_{x6}	B 类	

7.5 频率传递不确定度

根据 JJF 1059.1 规定的相关内容评定频率传递不确定度，一般主要不确定度来源见表 5，利用公式（9）评估合成标准不确定度：

$$u_y = \sqrt{u_{y1}^2 + u_{y2}^2 + u_{y3}^2 + u_{y4}^2 + u_{y5}^2} \quad (9)$$

各不确定度分量的评定细节可参考附录中的不确定度评定示例。

表 5 标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	推荐评定方法	备注
被测设备	u_{y1}	B 类	
传递媒介	u_{y2}	B 类	
参考传递设备	u_{y3}	B 类	共钟法测试不包括此项
相对频率偏差的重复测量	u_{y4}	A 类	
其他	u_{y5}	B 类	

8 测试结果表达

测试后，出具测试报告。测试报告中明确标明测试过程中涉及的具体实验条件，如测试场景、传递标准、传递链路等相关的信息，并至少应包含以下信息：

- a) 标题：“测试报告”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行测试的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 测试报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被测对象的描述和明确标识；
- g) 进行测试的日期，如果与测试结果的有效性和应用有关时，应说明被测对象的接收日期；
- h) 如果与测试结果的有效性应用有关时，应对被测样品的抽样程序进行说明；
- i) 测试所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次测试所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 测试环境的描述；
- l) 测试结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对测试规范的偏离的说明；
- n) 测试报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 测试结果仅对被测对象有效的说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制测试报告的声明。

9 复测时间间隔

复测时间间隔由用户根据使用情况自行确定，推荐测试周期不超过 1 年。

附录 A GNSS 时间频率传递及其不确定度评定示例

A.1 概述

GNSS 时间频率传递一般分为 GNSS 码基时间频率传递和 GNSS 载波相位时间频率传递，前者相比后者传递精密度更低，但具备更高的实时性，其不确定度水平在 1.5 ns ~3.0 ns 之间。在长基线 (≥ 1000 km) 比对中，GNSS 码基时频传递和载波相位时间频率传递的不确定度 A 类评定结果一般为 0.3 ns 和 0.7 ns；而 B 类不确定度评定结果主要受 GNSS 接收机硬件延迟及比对链路校准的影响，评定结果一般为 1.5 ns ~2.5 ns。GNSS 时间频率传递又可分为卫星共视法、卫星全视法和精密单点定位 (PPP) 法。其中前两者采用伪随机码测量技术，后者采用载波相位测量技术。三种方法的优缺点如下：

(1) 共视法

- 优点：可严格消除导航卫星相关的误差效应；
- 缺点：由于不是所有可见卫星的信号都被用于测量，基线越长共同可见卫星越少，方法精密度和可用性越差。

(2) 全视法

- 优点：不受基线长度的限制，同时通过接收尽可能多的卫星信号，可以提高时间和频率的测量精度和可靠性，尤其在遮挡较少的开阔区域；
- 缺点：与导航卫星相关的误差效应不能严格消除，影响时间频率传递的准确性。

(3) 精密单点定位

- 优点：测量精密度高，不依赖于基站网络，可以实现全球范围内的高精度时间频率传递，适用于海洋、远程地区等无基础设施的场所；
- 缺点：需要精密星历和钟差信息，消耗更多的计算资源，并在计算初始阶段需要较长的收敛时间。

A.2 不确定度评定示例

A.2.1 时间传递不确定度评定

1. 测量方法

利用北斗共视技术实现 AB 两地（相距约 50 km）的时间频率传递，以光纤时间频率传递链路作为参考，具体方法见 7.1 节中双差法测试。

2. 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- (1) 被测设备的固定点坐标误差；
- (2) 被测设备的环境多径；
- (3) 被测设备的电缆转接头延迟误差；
- (4) 电离层和对流层延迟补偿误差（链路）；
- (5) 北斗卫星轨道误差（链路）
- (6) 被测设备及链路的时延补偿误差（校准）；
- (7) 时间频率传递的测量抖动（重复性）。

3. 标准不确定度分量评定

- (1) 被测设备的固定点坐标误差引入的不确定度分量 u_1

被测设备的固定点坐标引入的误差~10cm，换算成时间误差 0.33ns，按 B 类方法评定，设其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{0.33 \text{ ns}}{\sqrt{3}} = 0.19 \text{ ns}$$

- (2) 被测设备的环境多径引入的不确定度分量 u_2

被测设备的环境多径引入的时间误差 0.40，按 B 类方法评定，设其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{0.40 \text{ ns}}{\sqrt{3}} = 0.23 \text{ ns}$$

- (3) 被测设备的电缆转接头延迟误差引入的不确定度分量 u_3

被测设备的电缆转接头延迟误差引入的时间误差 0.50 ns，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_3 = 0.50 \text{ ns}$$

- (4) 电离层和对流层延迟补偿误差引入的不确定度分量 u_4

北斗时间频率传递中电离层和对流层延迟补偿误差 2.10 ns，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_4 = 2.10 \text{ ns}$$

- (5) 北斗卫星轨道误差引入的不确定度分量 u_5

北斗卫星轨道误差引入的时间误差 0.47 ns，按 B 类方法评定，设其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_5 = \frac{0.47 \text{ ns}}{\sqrt{3}} = 0.27 \text{ ns}$$

(6) 被测设备及链路的时延补偿误差引入的不确定度分量 u_6

被测设备及链路的时延补偿采用光纤时间频率传递进行校准，引入的时间误差为光纤时间频率传递系统的校准不确定度 1 ns，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_6 = 1.00 \text{ ns}$$

(7) 时间频率传递的测量抖动引入的不确定度分量 u_7

采用 A 类方法进行评定，被测设备采样间隔为 16 分钟，记录 7 天的数据量共计 N 组，计算标准偏差作为时间频率传递的测量抖动引入的不确定度分量 u_7 ：

$$u_7 = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_{i=1}^N [\Delta t_{1i}(\tau) - \overline{\Delta t_1(\tau)}]^2} = 1.00 \text{ ns}$$

式中：

Δt_{1i} —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的时间偏差，s；

$\overline{\Delta t_1}$ —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的平均时间偏差，s；

N —取样数量；

τ —取样时间，s。

4. 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 A.1：

表 A.1 标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度 (ns)
被测设备的固定点坐标误差	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.19
被测设备的环境多径	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.23
被测设备的电缆转接头延迟误差	u_3	B 类	正态	1	0.50
电离层和对流层延迟补偿误差 (链路)	u_4	B 类	正态	1	2.10
北斗卫星轨道误差 (链路)	u_5	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.27
被测设备及链路的时延补偿误差 (校准)	u_6	B 类	正态	1	1.00

时间频率传递的测量抖动（重复性）	u_7	A 类	/	/	1.00
------------------	-------	-----	---	---	------

5. 合成标准不确定度

以上各分量相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} = 2.7 \text{ ns}$$

6. 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 5.4 \text{ ns}$$

A.2.2 频率传递不确定度评定

1. 测量方法

同 A.2.1。

2. 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- (1) 被测设备的固定点坐标误差；
- (2) 被测设备的环境多径；
- (3) 被测设备的电缆转接头延迟误差；
- (4) 电离层和对流层延迟补偿误差（链路）；
- (5) 北斗卫星轨道误差（链路）
- (6) 时间频率传递的测量抖动（重复性）。

3. 标准不确定度分量评定

- (1) 被测设备的固定点坐标误差引入的不确定度分量 u_1

被测设备的固定点坐标引入的误差 3.8×10^{-15} ，按 B 类方法评定，设其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{3.8 \times 10^{-15}}{\sqrt{3}} = 2.2 \times 10^{-15}$$

- (2) 被测设备的环境多径引入的不确定度分量 u_2

被测设备的环境多径引入的时间误差 4.6×10^{-15} ，按 B 类方法评定，设其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{4.6 \times 10^{-15}}{\sqrt{3}} = 2.7 \times 10^{-15}$$

(3) 被测设备的电缆转接头延迟误差引入的不确定度分量 u_3

被测设备的电缆转接头延迟误差引入的时间误差 6×10^{-15} ，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_3 = 6.0 \times 10^{-15}$$

(4) 电离层和对流层延迟补偿误差引入的不确定度分量 u_4

北斗时间频率传递中电离层和对流层延迟补偿误差 2.4×10^{-14} ，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_4 = 2.4 \times 10^{-14}$$

(5) 北斗卫星轨道误差引入的不确定度分量 u_5

北斗卫星轨道误差引入的时间误差 5.4×10^{-15} ，按 B 类方法评定，设其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_5 = \frac{5.4 \times 10^{-15}}{\sqrt{3}} = 3.1 \times 10^{-15}$$

(6) 时间频率传递的测量抖动引入的不确定度分量 u_7

采用 A 类方法进行评定，被测设备采样间隔为 1 d，记录 15 天的数据量共计 $N=15$ 组，计算标准偏差作为时间频率传递的测量抖动引入的不确定度分量 u_6 ：

$$u_6 = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_{i=1}^N [\Delta y_{1i}(\tau) - \overline{\Delta y_1(\tau)}]^2} = 8.1 \times 10^{-15}$$

式中：

Δy_{1i} —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的时间偏差，s；

$\overline{\Delta y_1}$ —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的平均时间偏差，s；

N —取样数量；

τ —取样时间，s。

4. 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 A.2：

表 A.2 标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
--------	--------	------	----	-------	--------

被测设备的固定点坐标误差	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	2.2×10^{-15}
被测设备的环境多径	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	2.7×10^{-15}
被测设备的电缆转接头延迟误差	u_3	B 类	正态	1	6.0×10^{-15}
电离层和对流层延迟补偿误差（链路）	u_4	B 类	正态	1	2.4×10^{-14}
北斗卫星轨道误差（链路）	u_5	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	3.1×10^{-15}
时间频率传递的测量抖动（重复性）	u_6	A 类	/	/	8.1×10^{-15}

5. 合成标准不确定度

以上各分量相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} = 2.6 \times 10^{-14}$$

6. 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 5.2 \times 10^{-14}$$

附录 B 卫星双向时间频率传递及其不确定度评定示例

B.1 概述

卫星双向时间频率传递以通信卫星作为信号和信息传输载体，对地面上两站的时间进行精确比对；参与比对的两站向卫星发射调制的时间频率信号，接收经过卫星转发来自对方的时频信号，经过解调测量和数据交互，得到两站间时差。

基本原理框图如图 B.1 所示，由于两信号经过的路径基本对称，能够极大程度上消除传输路径时延影响。

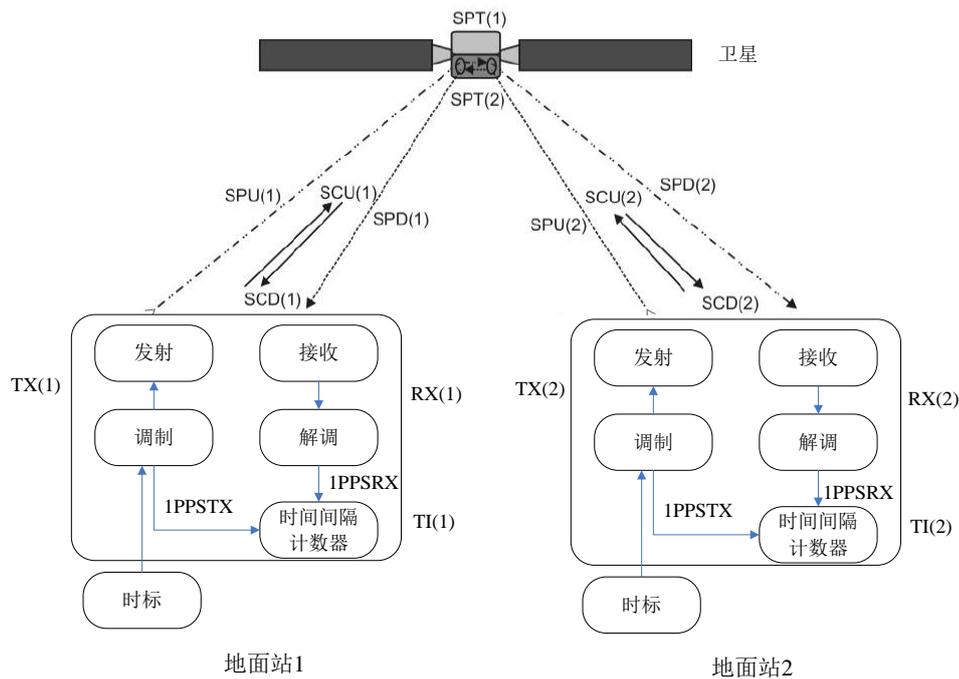


图 B.1 卫星双向时间频率传递原理框

图 1 中各符号含义如下：

TS(k): 地面站 k (1 或 2) 参考点的时标 1PPSTX

TI(k): 时间间隔读数

TX(k): 发射延迟

RX(k): 接收延迟

SPU(k): 上行链路传播延迟

SPD(k): 下行链路传播延迟

SPT(k): 卫星延迟

SCU(k): 上行链路 Sagnac 修正延迟

SCD(k): 下行链路 Sagnac 修正延迟

卫星双向比对系统主要由卫星地面站，调制解调器，时间间隔计数器组成。在实际工作中，地面站 1 时标输出的 1PPS 信号分成两路，一路经过调制发送到卫星并由卫星转发到地面站 2；另一路用作本地时间间隔计数器的开门脉冲使计数器开始计数。地面站 2 的信号流与站 1 完全相同，当站 2 的信号经卫星转发到达站 1 后，由调制解调器恢复出站 2 的 1PPS 脉冲信号，此信号用作站 1 计数器的关门脉冲。

则两站的时差由公式 (B.1) 给出：

$$\begin{aligned}
 TS(1) - TS(2) = & +0.5[TI(1)] \\
 & - 0.5[TI(2)] \\
 & + 0.5[SPT(1) - SPT(2)] \\
 & - 0.5[SCD(1) - SCU(1)] \\
 & + 0.5[SCD(2) - SCU(2)] \\
 & + 0.5[SPU(1) - SPD(1)] \\
 & - 0.5[SPU(2) - SPD(2)] \\
 & + 0.5[TX(1) - RX(1)] \\
 & - 0.5[TX(2) - RX(2)]
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

与其他的时间频率传递方法相比，TWSTSFT 方法具有覆盖范围广、时频传递基线长等优点，可以实现跨大洲的时间频率比对；TWSTSFT 地面站天线波束小，受周边电磁信号影响小，具有较好的抗干扰能力；TWSTSFT 系统相对简单，对外依赖小，时间频率比对精度高，时差测量数据可共信道传输，可实现实时测量数据交互和时频比对；TWSTSFT 采用无线信道传输，链路比对对站点位置不敏感，可用于相对运动节点间的时频传递。基于以上优势，TWSTSFT 技术具有很强的生命力，除用于守时系统比对外，在卫星导航、卫星定轨和时间统一等领域也具有重要应用价值。TWSTSFT 在时间传递上的理论极限精度大约在亚皮秒量级，相比当前能够实现的最高水平还要高 2 个数量级。当然，要达到亚皮秒量级，不仅信号测量精度要达到亚皮秒级，还需要解决亚皮秒量级大气层时延、设备通道时延和物理机制等一系列更深层的理论问题。

在时间传递附加稳定度指标方面，TWSTFT 的理论极限大约为亚皮秒量级。这不仅要求信号测量分辨率要达到亚皮秒级，还需要解决亚皮秒分辨的大气层时延、设备通道时延和物理机制等一系列理论问题。

在时间传递不确定度指标方面，TWSTFT 的理论极限大约为亚纳秒量级，主要来源于设备时延误差、路径延迟误差和卫星和地面站相对运动误差。其中，设备时延误差包括调制解调器、时间间隔计数器、地面发射和接收设备（包括线缆）、卫星转发器的设

备时延漂移，可通过标定方式校准至亚纳秒量级；路径延迟误差包括电离层延迟和对流层延迟波动，可通过双频测量方式，将误差控制在亚纳秒水平；卫星和地面站运动误差包括两站到卫星的距离差、两站时间不同步、卫星位置误差、地面站位置误差等，整体约为 30 ps~50 ps。

B.2 不确定度评定示例

B.2.1 时间传递不确定度评定

1. 测量方法

利用亚太 6C 卫星实现 AB 两地（相距约 900 km）的卫星双向时间频率传递，以 GNSS 时间频率传递链路作为参考，具体方法见 7.1 节中双差法测试。

2. 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- (1) 被测设备比对信号码速率抖动；
- (2) 被测设备线缆及转接头延迟测量误差；
- (3) 电离层和对流层延迟误差；
- (4) Sagnac 效应；
- (5) 被测设备及链路的时延补偿误差（校准）
- (6) 时间频率传递的测量抖动（重复性）

3. 标准不确定度分量评定

- (1) 比对信号码速率抖动引入的不确定度分量 u_1

比对信号码速率抖动（以 2.5MHz 码速率为例）引入的时间误差 0.50 ns，按 B 类方法评定，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_1 = 0.50 \text{ ns}$$

- (2) 被测设备线缆及转接头延迟测量误差引入的不确定度分量 u_2

被测设备的电缆转接头延迟误差引入的时间误差 0.50 ns，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_2 = 0.50 \text{ ns}$$

- (3) 电离层和对流层延迟误差引入的不确定度分量 u_3

电离层和对流层延迟误差引入的时间误差 0.20 ns，按 B 类方法评定，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_3 = 0.20 \text{ ns}$$

(4) Sagnac 效应引入的不确定度分量 u_4

Sagnac 效应引入的时间误差 0.60 ns，按 B 类方法评定，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_4 = 0.60 \text{ ns}$$

(5) 被测设备及链路的时延补偿误差引入的不确定度分量 u_5

采用 GNSS 时间频率传递链路作为参考，校准卫星双向时间频率传递系统的时间延迟引入的不确定度分量，按 B 类方法评定，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_5 = 1.6 \text{ ns}$$

(6) 时间频率传递的测量抖动（重复性）引入的不确定度分量 u_6

采用 A 类方法进行评定，被测设备采样间隔为 $\tau=1 \text{ d}$ ，记录 15 天的数据量共计 $N=15$ 组，计算标准偏差作为时间频率传递的测量抖动引入的不确定度分量 u_6 ：

$$u_6 = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_{i=1}^N [\Delta t_{1i}(\tau) - \overline{\Delta t_1(\tau)}]^2} = 1.00 \text{ ns}$$

式中：

Δt_{1i} —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的时间偏差，s；

$\overline{\Delta t_1}$ —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的平均时间偏差，s；

N —取样数量；

τ —取样时间，s。

4. 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 B.1：

表 B.1 标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度 (ns)
被测设备比对信号速率抖动	u_1	B 类	正态	1	0.5
被测设备线缆及转接头延迟测量误差	u_2	B 类	正态	1	0.5
电离层和对流层延迟误差	u_3	B 类	正态	1	0.2
Sagnac 效应	u_4	B 类	正态	1	0.5
被测设备及链路的时延补偿误差	u_5	B 类	正态	1	1.6

(校准)					
时间频率传递的 测量抖动(重复 性)	u_6	A 类	/	/	0.5

5 合成标准不确定度

以上各分量相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} = 1.9 \text{ ns}$$

6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 3.8 \text{ ns}$$

B.2.2 频率传递不确定度评定

1. 测量方法

同 B.2.1。

2 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- (1) 被测设备比对信号码速率抖动；
- (2) 被测设备线缆及转接头延迟测量误差；
- (3) 电离层和对流层延迟误差；
- (4) Sagnac 效应；
- (5) 时间频率传递的测量抖动（重复性）

3 标准不确定度分量评定

- (1) 比对信号码速率抖动引入的不确定度分量 u_1

比对信号码速率抖动（以 2.5MHz 码速率为例）引入的频率误差 6.0×10^{-15} ，按 B 类方法评定，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_1 = 6.0 \times 10^{-15}$$

- (2) 被测设备线缆及转接头延迟测量误差引入的不确定度分量 u_2

被测设备的电缆转接头延迟误差引入的频率误差 6.0×10^{-15} ，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_2 = 6.0 \times 10^{-15}$$

(3) 电离层和对流层延迟误差引入的不确定度分量 u_3

电离层和对流层延迟误差引入的频率误差 2.4×10^{-15} ，按 B 类方法评定，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_3 = 2.4 \times 10^{-15}$$

(4) Sagnac 效应引入的不确定度分量 u_4

Sagnac 效应引入的频率误差 6.0×10^{-15} ，按 B 类方法评定，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_4 = 6.0 \times 10^{-15}$$

(5) 时间频率传递的测量抖动（重复性）引入的不确定度分量 u_5

采用 A 类方法进行评定，被测设备采样间隔为 $\tau=1$ d，记录 15 天的数据量共计 $N=15$ 组，计算标准偏差作为频率传递的测量抖动引入的不确定度分量 u_5 ：

$$u_5 = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_{i=1}^N [\Delta y_{1i}(\tau) - \overline{\Delta y_1(\tau)}]^2} = 6.0 \times 10^{-15}$$

式中：

Δy_{1i} —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的相对频率偏差，s；

$\overline{\Delta y_1}$ —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的平均相对频率偏差，s；

N —取样数量；

τ —取样时间，s。

4 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 B.2：

表 B.2 标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度 (ns)
被测设备比对信号速率抖动	u_1	B 类	正态	1	6.0×10^{-15}
被测设备线缆及转接头延迟测量误差	u_2	B 类	正态	1	6.0×10^{-15}
电离层和对流层延迟误差	u_3	B 类	正态	1	2.4×10^{-15}
Sagnac 效应	u_4	B 类	正态	1	6.0×10^{-15}
时间频率传递的测量抖动（重复性）	u_5	A 类	/	/	6.0×10^{-15}

5 合成标准不确定度

以上各分量相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 1.2 \times 10^{-14}$$

6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 2.4 \times 10^{-14}$$

附录 C 自由空间光学双向时间频率传递及其不确定度评定示例

C.1 概述

高质量的远程自由空间时间频率信号传递技术在诸多研究领域有重要的应用价值，包括精确导航和授时，广义相对论验证，基于时频基准的大地测量、甚长基线干涉测量、相干雷达阵列和基本常数的测量，以及未来对国际单位制“秒”的重新定义。在这些应用中，本地时间频率标准信号通过地面与卫星之间的自由空间链路，与远程时间频率信号进行比对或同步。目前世界上最先进的光频标其频率准确度和长期稳定度已进入 10^{-18} 量级，时间分辨力达到飞秒量级（1 飞秒为 10^{-15} 秒）。然而，基于微波的时间频率传递技术其时间分辨力仅有 10 到 100 皮秒（1 皮秒为 10^{-12} 秒），稳定度为皮秒量级，比光钟差 100 倍，不足以支撑上述高准确度时间频率传递。光纤链路时间频率传递技术已可以实现数千公里内亚皮秒量级时间传递、 10^{-18} 量级频率传递；不过，此技术较适宜位置相对固定的实验室之间的高精度时频比对。对于涉及移动站或临时站的时钟网络，须要通过自由空间链路进行高精度时间频率信号传递。

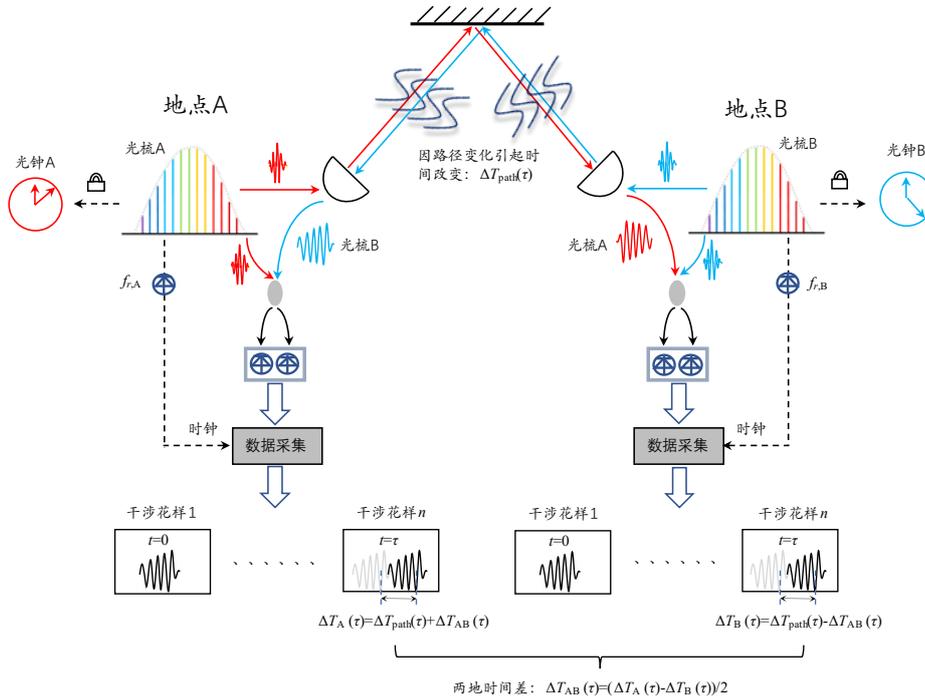


图 C.1 基于双光梳的自由空间光学双向时间频率传递原理

近年来，基于双光学频率梳（以下简称光梳）的光学时间频率传递技术能够解决上述问题，其具有以下优点：

a) 测量分辨力高：可达飞秒量级，长期稳定度可达到亚飞秒量级，相对于微波链路时间频率传递技术所需的测量时间更短，非常适合高准确度光学频率标准之间的远

程比对和校准：

b) 测量灵活性高：由于只需分别测量两地的同序数干涉花样在起始和停止时刻的时间差，因此当测量过程中自由空间传递链路因天气等原因发生短暂中断时，只要两地时间频率标准仍在连续运行，链路恢复后，只需重新对两地的飞秒脉冲进行计数，便可计算出两地时标时间差。

基于光梳的自由空间光学频率双向传递技术的基本原理如 0 所示。两个对称站点（A 和 B）包括相同三部分：本地光学频率标准、信号传递以及数据处理单元。光学时间频率标准输出的时频信号通过大气湍流链路进行比对和同步。以 A 站为例，通过对 A 站本地光梳（频率参考到 A 站光学频率标准）产生的飞秒脉冲计时，形成 A 站的本地时标。与此同时，光梳 A 作为本振，（异步光学）采样经大气湍流链路传输到达 A 站的光梳 B 信号，得到干涉花样。由双光梳的原理可知，每一帧干涉花样的长度为 $K_A = f_{r,A}/|f_{r,A} - f_{r,B}|$ （ $f_{r,A}$ 和 $f_{r,B}$ 分别为两地光梳的重复频率，为了描述方便假设 K_A 为整数），对应的时间为 $1/|f_{r,A} - f_{r,B}|$ 。假设在某时刻 $t = \tau_1$ 时，开始对飞秒脉冲 A 进行计数，则经过 nK_A 个飞秒脉冲后，可采集到第 n 个干涉花样（此时对应的时刻为 $t = \tau_2$ ），通过对第 n 个干涉花样的傅里叶变换解析相位谱，得到延迟时间 ΔT_A ，其中包含因传递路径变化引起的延时 ΔT_{path} 和两地时标之差 ΔT_{AB} ，即：

$$\Delta T_A = \Delta T_{path} + \Delta T_{AB} \quad (C.1)$$

同理，得到 B 点干涉花样的延迟时间：

$$\Delta T_B = \Delta T_{path} - \Delta T_{AB} \quad (C.2)$$

将两者相减可消除路径延时 ΔT_{path} ，最终得到两地时标之差：

$$\Delta T_{AB} = (\Delta T_A - \Delta T_B)/2 \quad (C.3)$$

为了确保公式 (C.1) 和 (C.2) 中 ΔT_{path} 相等，自由空间双向传递链路不仅需要在空间上互易，在时间上也需保持一致，即 ΔT_A 和 ΔT_B 所对应干涉花样的序数 n 应完全相同。因此，除了要求连续不间断对两地飞秒脉冲计数外，两地的时标之差应保持在远小于 $1/|f_{r,A} - f_{r,B}|$ （约毫秒量级）水平。基于微波的时间频率传递技术很容易实现上述目标。此外，满足 K_A 和 K_B 为整数条件使得上述计算更为简单，虽然技术上不难实现，但并非测量 ΔT_{AB} 的必要条件。

C.2 不确定度评定示例

C.2.1 时间传递不确定度评定

1. 测量方法

通过双光梳实现 AB 两地（相距约 4 km）的自由空间光学双向时间频率传递，具体方法见 7.1 节中共钟法测试。

2. 不确定度来源

不确定度主要来源包括：

- (1) 时间测量分辨力；
- (2) 干涉花样信噪比；
- (3) 传递链路互易性；
- (4) 时间频率传递测量抖动（重复性）。

3. 标准不确定度分量评定

- (1) 时间测量分辨力引入的不确定度 u_1

根据图 C.1 所示测量原理，取重频差 $\Delta f_r = |f_{r,A} - f_{r,B}| = 2 \text{ kHz}$ ， $f_{r,A} \approx f_{r,B} = 200 \text{ MHz}$ ，时间测量分辨力为双光梳异步光学线性采样的等效采样时间间隔 $\Delta T = \Delta f_r / (f_{r,A} \times f_{r,B}) = 50 \text{ fs}$ 。采用 B 类方法进行评定，设其为均匀分布，则 $u_1 = \frac{50 \text{ fs}}{\sqrt{3}} = 29 \text{ fs}$ 。

- (2) 干涉花样信噪比引入的不确定度 u_2

时间传递附加稳定度 $\sigma_x(\tau)$ 其散粒噪声理论极限为：

$$\sigma_{x,limit}(\tau) = \frac{DC^2\tau_p}{P_p 2\sqrt{2}\ln(2)} \sqrt{\frac{h\nu}{\eta P\tau}}$$

其中， ν 为光梳中心频率， h 为普朗克常数， η 为探测器的量子效率， P 为探测器接收的光功率， τ_p 为光脉冲宽度， D 为由探测器噪声引入的惩罚因子， C 为光脉冲展宽倍数， $P_p = f_r \tau_p$ 为由脉冲能量不连续引入的惩罚因子。取 $\nu = 200 \text{ THz}$ ， $f_{r,A} \approx f_{r,B} = 200 \text{ MHz}$ ， $\tau_p = 355 \text{ fs}$ ， $\eta = 0.8$ ， $P = 1 \mu\text{W}$ ， $D = 1.2$ ， $C = 1.7$ ，则 $\sigma_{x,limit}(\tau) = 3.6 \text{ fs}/\sqrt{\tau}$ 。根据两地时间传递附加稳定度测量结果 $\sigma_x(\tau) = 7.2 \text{ fs}/\sqrt{\tau}$ 和公式 C.4 计算的理论极限 $\sigma_{x,limit}(\tau) = 3.6 \text{ fs}/\sqrt{\tau}$ ，由于干涉花样信噪比引入的不确定度为 $\sqrt{7.2^2 - 3.6^2} = 6.2 \text{ fs}/\sqrt{\tau}$ ，

采用 B 类方法进行评定, 设其为均匀分布, 取 $\tau = 10000 \text{ s}$, 则 $u_2 = \frac{6.2 \text{ fs}/\sqrt{10000}}{\sqrt{3}} = 0.036 \text{ fs}$ 。

(3) 传递链路互易性引入的不确定度 u_3

根据图 C.1 所示测量原理, 传递链路互易性要求两地传输脉冲穿过相同的大气湍流结构。而大气湍流通常随时间变化, 且这种变化在传递链路中分布并不均匀。由于时间延迟的关系, 两地传递脉冲到达空间上同一位置时的大气湍流结构并不一定相同。如果传递时间 (即链路延迟时间) 接近湍流变化的特征时间, 则大气湍流引起的路径延迟不再是双向可逆, 因此通过公式 C.1 和 C.2 相减并不能完全抵消链路延时 ΔT_{path} , 所引入不确定度分量大小与传递链路长度正相关。以 GEO 卫星-地之间空间传递链路 ($>10000 \text{ km}$) 为例, 通过理论计算, 由链路互易性引入的不确定度区间为 $[2 \text{ fs}/\sqrt{\tau}, 3 \text{ fs}]$ 。取最大值 3 fs , 采用 B 类方法进行评定, 设其为均匀分布, 则 $u_3 = \frac{3 \text{ fs}}{\sqrt{3}} = 1.7 \text{ fs}$ 。此外, 由于 Sagnac 效应, 处于不同经度的 A、B 两点的传递时延存在差异, 与地球自转方向相同的信号实际传递时延变长, 反之则相反。约 20° 经度差造成的传递时延大约为 87 ns , 该分量的不确定度影响取决于其校准不确定度, 假设校准不确定度为 0.1 fs , 可忽略不计。

(4) 时间频率测量抖动 (重复性) 引入的不确定度 u_5

采用 A 类方法进行评定, 根据式 (4) 计算得到两地时间传递附加稳定度测量结果, 取 $\tau = 100 \text{ s}$, 则 $u_5 = \sigma_x(\tau) = 1 \text{ fs}$ 。

4. 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 C.1:

表 C.1 标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	包含因子 k	标准不确定度 (fs)
时间测量分辨力	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	29
干涉花样信噪比	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.036
传递链路互易性	u_3	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	1.7
时间频率传递测量抖动 (重复性)	u_4	A 类	/	/	1.0

5. 合成标准不确定度

以上各分量相互独立, 合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 29 \text{ fs}$$

6. 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 58 \text{ fs}$$

C.2.2 频率传递不确定度评定

1. 测量方法

同 C.2.1。

2. 不确定度来源

不确定度主要来源包括：

- (1) 时间测量分辨力；
- (2) 干涉花样信噪比；
- (3) 传递链路互易性；
- (4) 时间频率传递测量抖动（重复性）。

3. 标准不确定度分量评定

- (1) 时间测量分辨力引入的不确定度 u_1

时间测量分辨力引入不确定度为 5×10^{-18} ，采用 B 类方法进行评定，设其为均匀分布，则 $u_1 = \frac{5 \times 10^{-18}}{\sqrt{3}} = 2.9 \times 10^{-18}$ 。

- (2) 干涉花样信噪比引入的不确定度 u_2

干涉花样信噪比引入不确定度为 6.2×10^{-21} ，采用 B 类方法进行评定，设其为均匀分布，则 $u_2 = \frac{6.2 \times 10^{-21}}{\sqrt{3}} = 3.6 \times 10^{-21}$ 。

- (3) 传递链路互易性引入的不确定度 u_3

传递链路互易性引入不确定度为 3×10^{-19} ，采用 B 类方法进行评定，设其为均匀分布，则 $u_3 = \frac{3 \times 10^{-19}}{\sqrt{3}} = 1.7 \times 10^{-19}$ 。

- (4) 时间频率测量抖动（重复性）引入的不确定度 u_4

采用 A 类方法进行评定，根据公式（6）计算得到两地频率传递附加稳定度测量结果，取 $\tau = 10000 \text{ s}$ ，则 $u_4 = \sigma_y(\tau) = 1 \times 10^{-19}$ 。

4. 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 C.2：

表 C.2 标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	包含因子 k	标准不确定度
时间测量分辨力	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	2.9×10^{-18}
干涉花样信噪比	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	3.6×10^{-21}
传递链路互易性	u_3	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	1.7×10^{-19}
时间频率传递测量抖动（重复性）	u_4	A 类	/	/	1×10^{-19}

5. 合成标准不确定度

以上各分量相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 2.9 \times 10^{-18}$$

6. 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 5.8 \times 10^{-18}$$

附录 D 光纤时间频率传递及其不确定度评定示例

D.1 概述

基于光纤的时间频率传递是一项利用光纤传输介质将高精度的时间和频率信号从一个地点传递到另一个地点的技术。与传统的无线电波传输相比，光纤信道是优良的传输介质，在损耗、抗干扰、抗毁伤、可靠性和可信性方面比微波信道更具优势。光纤传输具有更高的精度和稳定性，在原子钟比对、引力波探测、基本常数测量和高精度导航定位等领域有着重要应用。

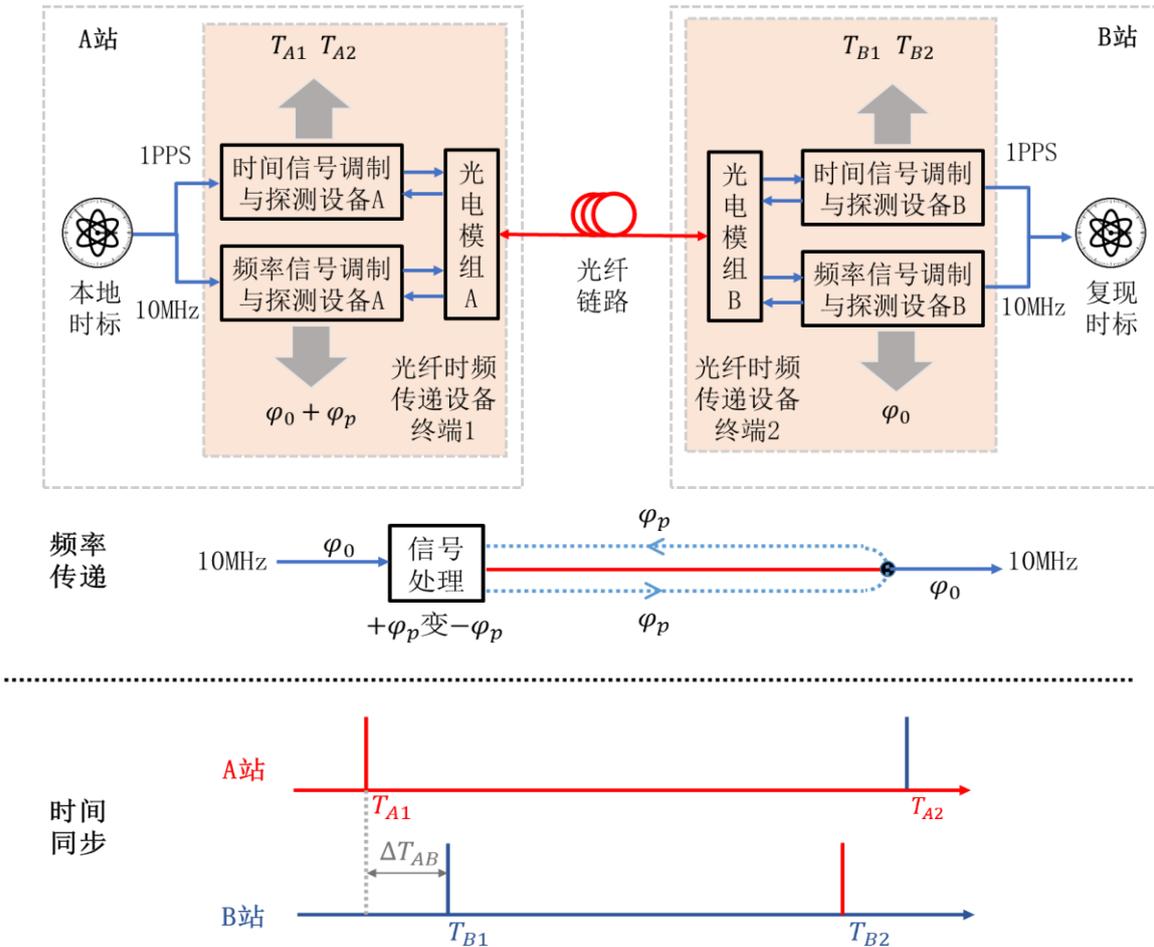


图 D.1 光纤时频传递原理

相较于自由空间和同轴电缆的时间频率传递与比对方法，光纤时间频率传递在传递时间频率信号方面具有以下优势：

(a) 高精度：光纤传输相对于无线电波传输具有更低的相位噪声，使频率信号的传输更加稳定和精确，并且单位频率色散参量小，较同轴电缆具备实现更精密时间频率传递的物理属性优势，在长距离传输中优势更为明显。

(b) 损耗小：相较于同轴电缆，光纤可以在相对长距离内保持较高的信号强度，显

著减小信号衰减和失真；采用合适的光放大器和中继器，光纤时间频率传递可以实现数千公里以上高精度时频传递。

(c) 抗干扰能力强：光纤对电磁干扰不敏感，能够在复杂电磁环境中稳定工作，避免了电磁干扰对频率信号的影响。光纤链路相对封闭，能够在各种环境条件下稳定工作，包括高温、低温、潮湿等极端环境。

光纤时频传递的基本原理如图 D.1 所示。两个对称站点（A 站和 B 站）设有本地时频标准和光纤时频传递终端设备。

对于频率传递设备，频率信号利用光纤链路对称性噪声抵消来进行频率传递。以射频调制传递为例，频率基准由 A 站中的频率信号调制设备进行处理后发出，经由光纤链路后到达 B 站，B 站将信号回传，在频率信号调制与探测设备 A 中进行检测，获取光纤链路波动信息 $+\varphi_p$ ，进行信号处理后将链路波动由 $+\varphi_p$ 转换为 $-\varphi_p$ ，经由频率信号调制设备 A 和光电模组 A 后传递到 B 站，利用在同一光纤中传递其相位波动一致性的特点，对链路波动进行抵消，在 B 端获取稳定的频率信号。

在稳定运行状态下 A 站发出频率信号的相位可表示为

$$\varphi_A = \varphi_o - \varphi_p \quad (\text{D.1})$$

经过链路波动为 φ_p 的光纤链路后，B 站获取的相位可表示为

$$\varphi_B = \varphi_o \quad (\text{D.2})$$

B 站回传信号到达 A 站的频率信号与探测设备时的相位可表示为

$$\varphi'_A = \varphi_o + \varphi_p \quad (\text{D.3})$$

公式 (D.3) 成立的前提是，信号往返传递处于同一光纤链路上，且在往返时间内光纤所处环境基本无变化，即 φ_p 须尽可能保证在传递过程中时不变性。

对于时间同步设备，A、B 站之间通过光纤链路进行时标比对，时差记为 ΔT_{AB} 。以 A 站至 B 站的测量过程为例。在 A 站，本地时标输出 10 MHz 频率信号和 1 PPS 脉冲信号作为站内时频标准信号。时间信号调制与探测设备以本地时标输出信号为参考，产生时频调制信号，并发送至光电模组，发射时刻记为 T_{A1} （在 A 站时间尺度下）。单频激光器输出单频激光至光电模组，通过电光过程将时频调制信号加载至单频激光。被调制单频激光经过光纤链路传输至 B 站。在 B 站，光电模组将接收的 A 站调制激光信号转换为电信号，再将此信号送入时间信号调制与探测设备。探测信号的到达时刻为 T_{B2} （在

B 站时间尺度下)。类似地, 在 B 站至 A 站的测量过程, 可以获得 B 站信号发射时刻 T_{B1} (在 B 站时间尺度下) 和 A 站信号接收时刻 T_{A2} (在 A 站时间尺度下)。

在 A 站时间尺度下, A 站发射与接收时延为

$$\Delta T_A = T_{A2} - T_{A1} \quad (\text{D.4})$$

同理, 在 B 站时间尺度下, B 站发射与接收时延为

$$\Delta T_B = T_{B2} - T_{B1} \quad (\text{D.5})$$

将两者相减可消除路径时延变化, 最终得到两地时标之差:

$$\Delta T_{AB} = (\Delta T_A - \Delta T_B)/2 \quad (\text{D.6})$$

公式 (D.6) 成立的前提是, 公式 (D.1) 和 (D.2) 对应的测量过程须在时间上保持同时性, 即 T_{A1} 与 T_{B1} , T_{A2} 与 T_{B2} 须尽可能保证在全局时间尺度下的同时性。

D.2 不确定度评定示例

D.2.1 时间传递不确定度评定

1. 测量方法

通过光纤双向时间频率传递, 具体方法见 7.1 节中共钟法测试。

2. 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括:

- (1) 被测设备有限测量能力;
- (2) 被测设备的电缆转接头延迟误差;
- (3) 被测设备的调制频率噪声;
- (4) 被测设备光电转换;
- (5) 光纤传输波长抖动;
- (6) 链路残余色散;
- (7) 链路温度非对称;
- (8) 链路长度非对称;
- (9) Sagnac 效应;
- (10) 链路延时未抑制噪声;
- (11) 重复性测量。

3. 标准不确定度分量评定

- (1) 被测设备有限测量能力引入的不确定度 u_1

被测设备受限与测量能力引入的测量不确定度，用常用时间间隔计数器的时间测量误差 10 ps，按 B 类方法评定，设其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{10 \text{ ps}}{\sqrt{3}} = 5.77 \text{ ps}$$

(2) 被测设备的电缆转接头延迟误差引入的不确定度 u_2

被测设备的电缆转接头延迟误差引入的时间误差 50 ps，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_2 = 50 \text{ ps}$$

(3) 被测设备的调制频率噪声引入的不确定度 u_3

假设被测设备测量频率抖动变化量 1 μHz ，100MHz 信号引入的时间偏差秒稳误差为 10 fs，按 B 类方法评定，设其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = \frac{10 \text{ fs}}{\sqrt{3}} = 5.77 \text{ fs}$$

(4) 被测设备光电转换引入的不确定度 u_4

发送 1 PPS 秒脉冲信号，电光和光电转换时延抖动为 3.5 ps，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_4 = 3.50 \text{ ps}$$

(5) 光纤传输波长抖动引入的不确定度 u_5

对于 100 km 的 G.652 型光纤链路，波长不稳定性为 $\pm 0.0001 \text{ nm}$ ，其引入不确定度为 3.4 ps，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_5 = 3.4 \text{ ps}$$

(6) 链路残余色散引入的不确定度 u_6

对于长度为 100 km 的 G.652 型光纤链路，假定其补偿值为 99%，则其残余色散值为 17ps@1550 nm，当两信号光波长差为 1 nm 时，可以估算双向传输的残余色散引入单程不对称性时延为 8.5 ps，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_6 = 8.5 \text{ ps}$$

(7) 链路温度非对称引入的不确定度 u_7

对于长度为 100 km 的 G.652 型光纤链路，温度变换范围为 10 $^{\circ}\text{C}$ 的光纤链路，其光纤色散系数为 $-4.5 \times 10^{-3} \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，光纤热膨胀系数为 $0.811 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，激光器温漂系数为 0.01 nm/ $^{\circ}\text{C}$ ，温度变换引入的不确定度为 14.6 ps，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_7 = 14.6 \text{ ps}$$

(8) 链路长度非对称引入的不确定度 u_8

光纤双向电放大器所引入不对称性, 保持其他实验设置和温度变换一致的情况下, 对于经典掺铒光纤双向光放大器, 主要取决于非共有部分铒纤的长度差别, 假设对于长度差别 0.3 mm 的长度, 其引入的不确定度为 1.1 ps, 按 B 类方法评定, 设其为正态分布, 包含因子 $k = 1$, 则:

$$u_8 = 1.1 \text{ ps}$$

(9) Sagnac 效应引入的不确定度 u_9

在光纤双向时间传递系统中, 由于 Sagnac 效应, 与地球自转方向相同信号实际传递时延变长, 对于长度 100 km 的 G.652 型光纤链路, 其布设方向与地球自转方向一致, 所引入的不确定度为 2.3 ps, 按 B 类方法评定, 设其为正态分布, 包含因子 $k = 1$, 则:

$$u_9 = 2.3 \text{ ps}$$

(10) 链路延时未抑制噪声引入不确定度 u_{10}

传输时延限制传递能力极限, 对于 250 公里链路, 链路延时未抑制噪声引入的不确定度为 0.3 fs, 按 B 类方法评定, 设其为正态分布, 包含因子 $k = 1$, 则:

$$u_{10} = 0.3 \text{ fs}$$

(11) 重复性测量引入的不确定度 u_{11} 。

采用 A 类方法进行评定, 被测设备采样间隔为 $\tau=1 \text{ d}$, 记录 15 天的数据量共计 $N=15$ 组, 计算标准偏差作为时间频率传递的测量抖动引入的不确定度分量 u_{11} :

$$u_{11} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_{i=1}^N [\Delta t_i(\tau) - \overline{\Delta t(\tau)}]^2} = 50 \text{ ps}$$

式中:

Δt_i —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的时间偏差, s;

$\overline{\Delta t}$ —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的平均时间偏差, s;

N —取样数量;

τ —取样时间, s。

4. 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 D.1:

表 D.1 标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度 (ps)
被测设备有限测量能力	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	5.77
被测设备的电缆转接头延迟误差	u_2	B 类	正态	1	50
被测设备的调制频率噪声	u_3	B 类	正态	1	0.0058
被测设备光电转换	u_4	B 类	正态	1	3.5
光纤传输波长抖动	u_5	B 类	正态	1	3.4
链路残余色散	u_6	B 类	正态	1	8.5
链路温度非对称	u_7	B 类	正态	1	14.6
链路长度非对称	u_8	B 类	正态	1	1.1
Sagnac 效应	u_9	B 类	正态	1	2.3
链路延时未抑制噪声	u_{10}	B 类	正态	1	0.0003
重复性测量	u_{11}	A 类	/	/	50

5. 合成标准不确定度

以上各分量相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2 + u_{11}^2} = 74 \text{ ps}$$

6. 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 148 \text{ ps}$$

D.2.2 频率传递不确定度评定

1. 测量方法

同 D.2.1。

2. 不确定度来源

不确定度主要来源包括：

- (1) 被测设备重复性测量能力；
- (2) 被测设备的电缆转接头延迟误差；
- (3) 被测设备的调制频率噪声；

- (4) 被测设备光电转换;
- (5) 光纤传输波长抖动
- (6) 链路残余色散
- (7) 链路温度非对称
- (8) 链路长度非对称
- (9) Sagnac 效应
- (10) 链路延时未抑制噪声;
- (11) 重复性测量。

3. 标准不确定度分量评定

- (1) 被测设备有限测量能力引入的不确定度 u_1

被测设备受限与测量能力所引入的测量不确定度，用常用相噪仪的测量误差 3×10^{-15} ，按 B 类方法评定，设其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{3 \times 10^{-15}}{\sqrt{3}} = 1.73 \times 10^{-15}$$

- (2) 被测设备的电缆转接头延迟误差引入的不确定度 u_2

被测设备的电缆转接头延迟误差引入的时间误差 6.0×10^{-15} ，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_2 = 6.0 \times 10^{-15}$$

- (3) 被测设备的调制频率噪声引入的不确定度 u_3

假设被测设备测量频率抖动变化量 $1\mu\text{Hz}$ ， 100MHz 信号引入的时间偏差秒稳误差为 1×10^{-14} ，按 B 类方法评定，设其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = 5.8 \times 10^{-15}$$

- (4) 被测设备光电转换引入的不确定度 u_4

发送 1 PPS 秒脉冲信号，电光和光电转换时延抖动为 1.6×10^{-15} ，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_4 = 1.6 \times 10^{-15}$$

- (5) 光纤传输波长抖动引入的不确定度 u_5

对于 100 km 的 G.652 型光纤链路，波长不稳定性为 $\pm 0.0001 \text{ nm}$ ，其引入不确定度为 2.3×10^{-17} ，按 B 类方法评定，设其为正态分布，包含因子 $k = 1$ ，则：

$$u_5 = 2.3 \times 10^{-17}$$

(6) 链路残余色散引入的不确定度 u_6

对于长度为 100 km 的 G.652 型光纤链路, 假定其补偿值为 99%, 则其残余色散值为 17ps@1550 nm, 当两信号光波长差为 1 nm 时, 可以估算双向传输的残余色散引入单程不对称性时延为 2.2×10^{-16} , 按 B 类方法评定, 设其为正态分布, 包含因子 $k = 1$, 则:

$$u_6 = 2.2 \times 10^{-16}$$

(7) 链路温度非对称引入的不确定度 u_7

对于长度为 100 km 的 G.652 型光纤链路, 温度变换范围为 10°C 的光纤链路, 其光纤色散系数为 -4.5×10^{-3} ps/(nm · km · °C), 光纤热膨胀系数为 0.811×10^{-5} °C⁻¹, 激光器温漂系数为 0.01 nm/°C, 温度变换引入的不确定度为 6.2×10^{-15} , 按 B 类方法评定, 设其为正态分布, 包含因子 $k = 1$, 则:

$$u_7 = 6.2 \times 10^{-15}$$

(8) 链路长度非对称引入的不确定度 u_8

光纤双向电放大器所引入不对称性, 保持其他实验设置和温度变换一致的情况下, 对于经典掺铒光纤双向光放大器, 主要取决于其非共有部分铒纤的长度差别, 假设对于长度差别 0.3 mm 的长度, 其引入的不确定度为 1.2×10^{-20} , 按 B 类方法评定, 设其为正态分布, 包含因子 $k = 1$, 则:

$$u_8 = 1.2 \times 10^{-20}$$

(9) Sagnac 效应引入的不确定度 u_9

在光纤双向时间传递系统中, 由于 Sagnac 效应, 与地球自转方向相同信号实际传递时延变长, 对于长度 100 km 的 G.652 型光纤链路, 其铺设方向与地球自转方向一致, 所引入的不确定度为 4.6×10^{-22} , 按 B 类方法评定, 设其为正态分布, 包含因子 $k = 1$, 则:

$$u_9 = 4.6 \times 10^{-22}$$

(10) 链路延时未抑制噪声引入不确定度 u_{10}

传输时延限制传递能力极限, 对于 250 公里链路, 链路延时未抑制噪声引入的不确定度为 3×10^{-16} , 按 B 类方法评定, 设其为正态分布, 包含因子 $k = 1$, 则:

$$u_{10} = 3 \times 10^{-16}$$

(11) 重复性测量引入的不确定度 u_{11}

采用 A 类方法进行评定, 被测设备采样间隔为 $\tau=1$ d, 记录 15 天的数据量共计 $N=15$

组，计算标准偏差作为时间频率传递的测量抖动引入的不确定度分量 u_{11} ：

$$u_{11} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_{i=1}^N [\Delta y_i(\tau) - \overline{\Delta y(\tau)}]^2} = 3 \times 10^{-19}$$

式中：

Δy_i —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的相对频率偏差，s；

$\overline{\Delta y}$ —被测设备测量的 A 端和 B 端之间的平均相对频率偏差，s；

N —取样数量；

τ —取样时间，s。

4. 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 D.1：

表 D.1 标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
被测设备有限测量能力	u_1	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	1.73×10^{-15}
被测设备的电缆接头延迟误差	u_2	B 类	正态	1	6.0×10^{-15}
被测设备的调制频率噪声	u_3	B 类	正态	1	5.8×10^{-15}
被测设备光电转换	u_4	B 类	正态	1	1.6×10^{-15}
光纤传输波长抖动	u_5	B 类	正态	1	2.3×10^{-17}
链路残余偿色散	u_6	B 类	正态	1	2.2×10^{-16}
链路温度非对称	u_7	B 类	正态	1	6.2×10^{-15}
链路长度非对称	u_8	B 类	正态	1	1.2×10^{-20}
Sagnac 效应	u_9	B 类	正态	1	4.6×10^{-22}
链路延时未抑制噪声	u_{10}	B 类	正态	1	3.0×10^{-16}
重复性测量	u_{11}	A 类	/	/	3.0×10^{-19}

5. 合成标准不确定度

以上各分量相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2 + u_{11}^2} = 1.1 \times 10^{-14}$$

6. 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 2.2 \times 10^{-14}$$