

# JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

## 光学频率梳技术性能评价方法

Technical performance evaluation method of optical frequency comb

(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

# 光学频率梳技术 性能评价方法

Technical performance evaluation  
method of optical frequency comb

JJFXXX-XXXX

本规范经国家市场监督管理总局于 202X 年 XX 月 XX 日批准，并自  
202X 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：华东师范大学

中国电子科技集团第四十一研究所

本规范委托全国时间频率计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

方占军（中国计量科学研究院）

林百科（中国计量科学研究院）

孟 飞（中国计量科学研究院）

参加起草人：

马龙生（华东师范大学）

蒋燕义（华东师范大学）

刘志明（中国电子科技集团第四十一研究所）

高业胜（中国电子科技集团第四十一研究所）

# 目 录

引 言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语和计量单位.....	1
3.1 光学频率梳.....	1
3.2 重复频率.....	1
3.3 载波包络偏移频率.....	1
3.4 梳齿序数.....	1
4 概述.....	2
5 评价条件.....	6
5.1 环境条件.....	6
5.2 测量标准器及其它设备.....	7
6 评价项目和评价方法.....	7
6.1 梳齿光学频率稳定度.....	7
6.2 梳齿光学频率值.....	9
7 评价结果表达.....	15
附录 A 评价记录参考格式.....	17
附录 B 证书内页参考格式.....	18
附录 C 梳齿光学频率不确定度评定示例.....	19

# 引 言

本规范依据 JJF1001《通用计量术语及定义》、JJF1071《国家计量校准规范编写规则》编制，测量不确定度的评定按照 JJF1059.1《测量不确定度评定与表示》进行。

本规范为首次发布。

# 光学频率梳技术性能评价方法

## 1 范围

本规范适用于以微波或光学频率为参考的光学频率梳梳齿光学频率稳定性和准确度技术性能评价。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 2007 时间频率计量器具检定系统表

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

GB/T 15313 激光术语

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

下列术语适用于本规范：

### 3.1 光学频率梳 optical frequency comb

输出信号在时域和频域上分别表现为等间隔的脉冲序列和梳状谱线的光学系统，包含频率参考源（微波或光学频率参考）。

### 3.2 重复频率 repetition rate ( $f_r$ )

在频域上体现为光学频率梳相邻梳齿之间的频率间隔，在时域上体现为相邻脉冲之间的时间间隔的倒数。

### 3.3 载波包络偏移频率 carrier-envelope offset frequency ( $f_{ceo}$ )

由于腔内色散的存在，导致飞秒光学频率梳的群速度和载波相速度之间存在差异，因此飞秒激光脉冲在谐振腔内运行一周后载波和包络之间会产生一定的相位差。这个相移导致光学频率梳梳齿光学频率并不严格等于重复频率的整数倍，两者之差即为载波包络偏移频率。

### 3.4 梳齿序数 order number of comb mode ( $n$ )

从零频开始，按照由低频到高频的顺序依次对光学频率梳各梳齿进行编号并区分的非

负整数。当运用光学频率梳与连续激光进行光拍频时，为连续激光频率除以重复频率所得最接近整数。

#### 4 概述

飞秒激光脉冲（以下简称飞秒激光）是产生飞秒光学频率梳的主要技术之一，飞秒激光脉冲在时域上由等间隔的脉冲序列组成，脉冲宽度在几飞秒至几百飞秒；在频域上则表现为等频率间隔的谱线，类似“梳子”，因此被称为飞秒光学频率梳，简称“光梳”，每根谱线称为“梳齿”，如图 1 所示。光梳有两个基本参数：重复频率 $f_r$ 和载波包络偏移频率 $f_{ceo}$ 。只需获得 $f_r$ 和 $f_{ceo}$ 这两个参数并将其通过相位锁定的方式溯源到微波或光学频率参考上，则任何梳齿的绝对频率 $f_n$ 均可描述为 $f_r$ 和 $f_{ceo}$ （均为微波频率）与梳齿序数 $n$ 的组合：

$$f_n = n f_r + f_{ceo} \quad (1)$$

其中， $f_{ceo}$ 为有符号的量，其符号确定方法见 6.2.3 节。重复频率 $f_r$ 可通过控制飞秒激光的腔长实现调谐，如腔内的压电陶瓷（PZT）和微位移台等。其中 PZT 的腔长调谐能力大约为微米量级，微位移台可达到厘米量级甚至更长。例如，对于 $f_r$ 为百兆赫兹量级的光梳，其 PZT 的 $f_r$ 调谐范围约为千赫兹量级，而使用微位移台则可达到兆赫兹量级。而载波包络偏移频率 $f_{ceo}$ 一般通过 $f$  to  $2f$ 干涉法获得，并通过低通滤波滤除高于 $f_r/2$ 的频率成分。如图 1 所示，当光梳输出光谱覆盖一个光学倍频程时，将光谱中低频部分的梳齿光学频率（ $n f_r + f_{ceo}$ ）倍频，与高频部分的对应梳齿（ $2n f_r + f_{ceo}$ ）差频从而获得载波包络偏移频率 $f_{ceo}$ ，并用光电探测器探测，通常，要求使用频谱分析仪测量 $f_{ceo}$ 的信噪比不低于 30 dB（分辨力带宽为 300 kHz）。 $f_{ceo}$ 可通过控制飞秒激光的泵浦电流或功率来实现调谐，在不影响锁模的前提下，其最大调谐范围不超过重复频率的一半。

如图 2 所示，可以将光梳分别溯源至微波或光学频率参考。其中，两种溯源方式的 $f_{ceo}$ 均锁定至对应微波频率标准，而 $f_r$ 可选择微波或光学频率作为频率参考源。对于前者，锁定方式与 $f_{ceo}$ 相同，对于后者，则通过光电探测器提取光学频率参考与对应光梳梳齿光学频率的光拍频 $f_{bias}$ 并将其锁定至对应微波频率参考。光学频率参考一般选用稳频激光器来实现。常见的稳频激光器可以分为三大类：第一类，以特定的原子或分子吸收谱线作为频率参考，实现激光频率的锁定，例如碘稳频 633 nm 氩氟激光器和碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器，其频率准确度可以达到 $10^{-11}$ ~ $10^{-12}$ 量级；第二类，以高精度度 F-P 参考腔作为频率参考，实现激光频率的锁定，其短期频率稳定度可以达到 $10^{-15}$ 甚至 $10^{-17}$ 量级；第三类，以离子阱囚禁的单离子或光晶格囚禁的多个中性原子的窄线宽光频跃迁为参考，实现激光

频率的锁定，例如铯原子光晶格钟和镱离子光钟，其频率稳定性和频率不确定度均可以达到  $10^{-18}$  量级。

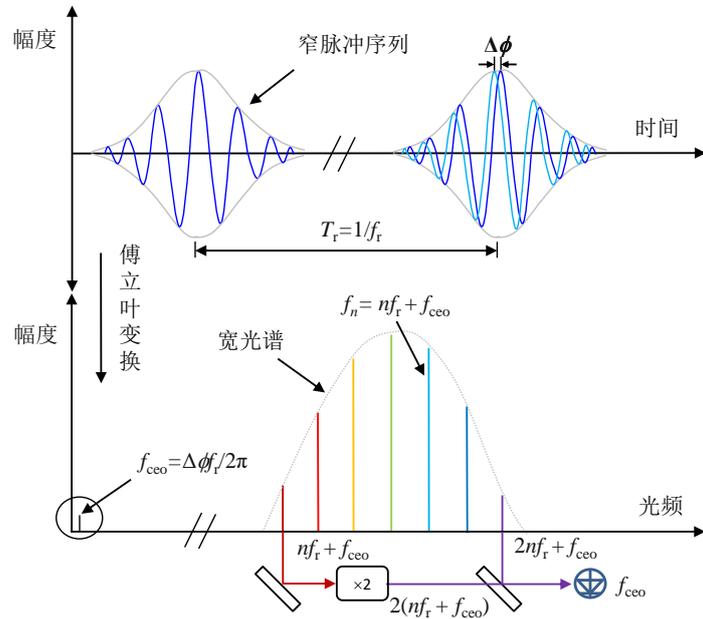


图1 光梳的时域和频域表征

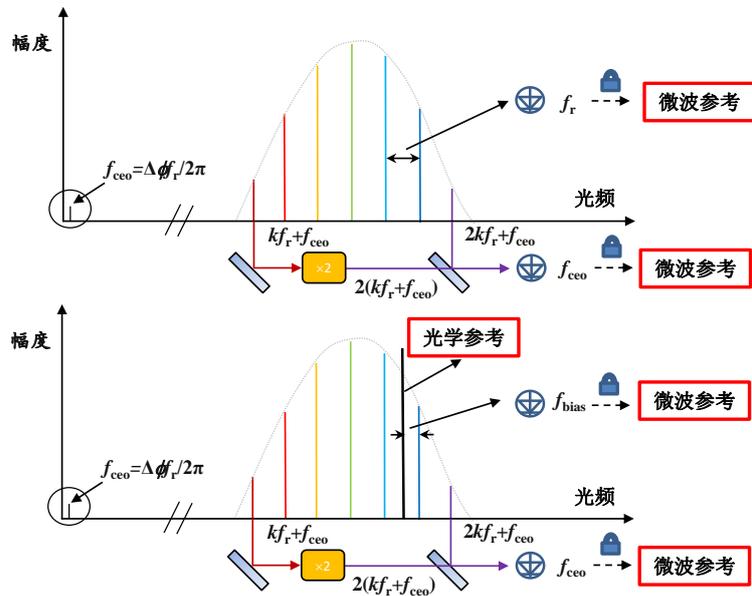


图2 以微波频率或光学频率为参考的光梳锁定示意图

由公式错误!未找到引用源。可知，光梳可作为连接光学频率和微波频率的桥梁，其光谱上的每根梳齿相当于一台稳频激光器。相比于传统谐波频率链和基于原子或分子吸收谱线参考的稳频激光器，光梳具有以下优点：

- 1、测量范围宽：在超过一个光学倍频程的光谱范围内，只需一台光梳即可包含此光

谱范围内的任意光学频率（间隔为重复频率），装置结构更为简单；

2、测量准确度高：光梳将光学频率与时间频率标准联系在一起，理论上每一根梳齿都具有和参考源相同的频率稳定性和不确定度，可优于  $10^{-11}$  量级。

光梳通常分为掺钛蓝宝石固体光梳以及掺铒光纤光梳和掺镱光纤光梳等，它们的典型中心波长和光谱范围如图3、图4、图6和表1所示。

表1 几种光梳的典型光谱参数比较

光梳类型	中心波长 ( $\mu\text{m}$ )	直接扩谱获得的光谱范围 ( $\mu\text{m}$ )
掺钛蓝宝石固体光梳	0.8	0.5-1.1
掺铒光纤光梳	1.5	1.0-2.0
掺镱光纤光梳	1.0	0.6-1.2

对于掺钛蓝宝石固体光梳，飞秒锁模激光输出光谱的中心波长在  $0.8 \mu\text{m}$  附近，输出功率在百毫瓦量级，经过光子晶体光纤（PCF）后可将原光谱展宽到  $0.5 \mu\text{m}$ - $1.1 \mu\text{m}$  波段，覆盖一个光学倍频程。由于 PCF 光谱展宽机理，展宽后光谱中不同频率成分的强度存在较大差异，如图3所示。通常对于  $f_r=200 \text{ MHz}$  的掺钛蓝宝石固体光梳，经过 PCF 光谱展宽后的光功率可达到  $200 \text{ mW}$ ，对应单梳齿平均功率  $P_1 = f_r P_w / \Delta\nu_s \approx 100 \text{ nW}$  ( $P_w$  和  $\Delta\nu_s$  分别为光梳输出光功率和光谱范围)，与被测激光拍频可获得信噪比  $30 \text{ dB}$  以上的拍频信号。

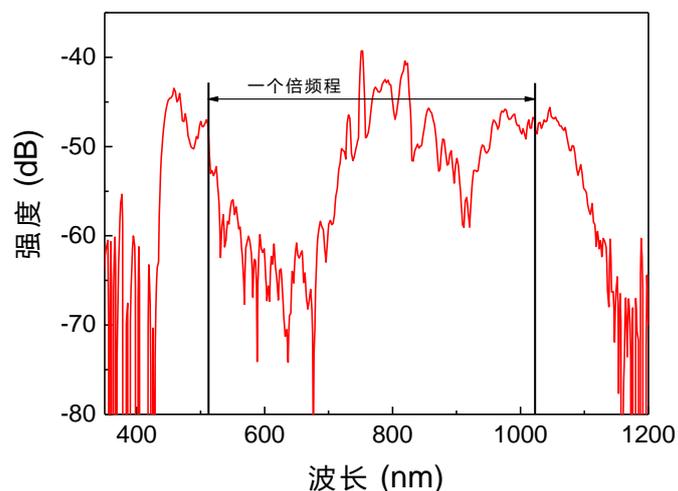


图3 掺钛蓝宝石光梳的倍频程光谱

对于掺铒光纤光梳，飞秒锁模激光输出光谱的中心波长在  $1.5 \mu\text{m}$  附近，经过高非线性光纤（HNLF）扩谱后可将原光谱展宽到  $1.0 \mu\text{m}$ - $2.0 \mu\text{m}$  波段，覆盖一个光学倍频程，如图4所示。

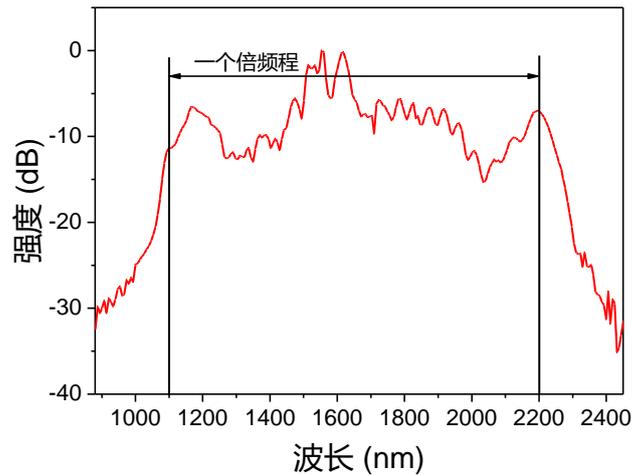


图4 掺铒光纤光梳的倍频程光谱

经过 HNLf 光谱展宽后掺铒光纤光梳的输出光谱覆盖范围仍处于近红外波段,为了将输出光谱扩展到  $1.0\ \mu\text{m}$  以下的波段,将中心波长在  $1.5\ \mu\text{m}$  附近的输出光放大后倍频到  $0.75\ \mu\text{m}$  附近,然后采用 PCF 进行扩谱。

为了克服 PCF 光纤扩谱的缺点,可采用光谱局部增强技术对特定光谱波段进行局部增强和优化。例如,将掺铒光纤光梳的输出光先通过 HNLf 进行光谱展宽和局部增强优化,然后采用扇形光栅结构的 MgO:PPLN 晶体进行倍频,从而实现某一局部范围内的光谱增强,如图 5 所示。

综上所述,对于掺铒光纤光梳,在  $1.0\ \mu\text{m}$ - $2.0\ \mu\text{m}$  波段通常采用 HNLf 方式进行光谱展宽,在  $0.5\ \mu\text{m}$ - $1.1\ \mu\text{m}$  波段则一般采用倍频后结合 PCF 方式进行光谱展宽,或通过光谱局部增强技术可在上述可见光至近红外波段内实现局部光谱增强。在实际应用中通过结合上述三种方法,可在  $0.5\ \mu\text{m}$ - $2.0\ \mu\text{m}$  范围内基本实现全光谱覆盖。例如,对于  $f_r=200\ \text{MHz}$  的掺铒光纤光梳,通常其自身基频光输出光功率可达到  $500\ \text{mW}$  左右,经过倍频后输出功率在  $200\ \text{mW}$  左右,经过 PCF 光谱展宽后输出功率在  $100\ \text{mW}$  以上;采用局部光谱增强技术,单波长点附近输出的功率在  $1\ \text{mW}$ - $3\ \text{mW}$ ;因此,单梳齿平均功率一般可达到  $100\ \text{nW}$  以上。

对于掺铒光纤光梳,飞秒锁模激光输出光谱的中心波长在  $1.0\ \mu\text{m}$  附近,经过 PCF 等高非线性介质扩谱后可将原光谱展宽到  $0.6\ \mu\text{m}$ - $1.2\ \mu\text{m}$ ,覆盖一个光学倍频程,如图 6 所示。通常,对于  $f_r=200\ \text{MHz}$  的掺铒光纤光梳,光谱展宽后的输出光功率可达到  $200\ \text{mW}$  左右,对应的单梳齿平均功率约为  $100\ \text{nW}$ 。

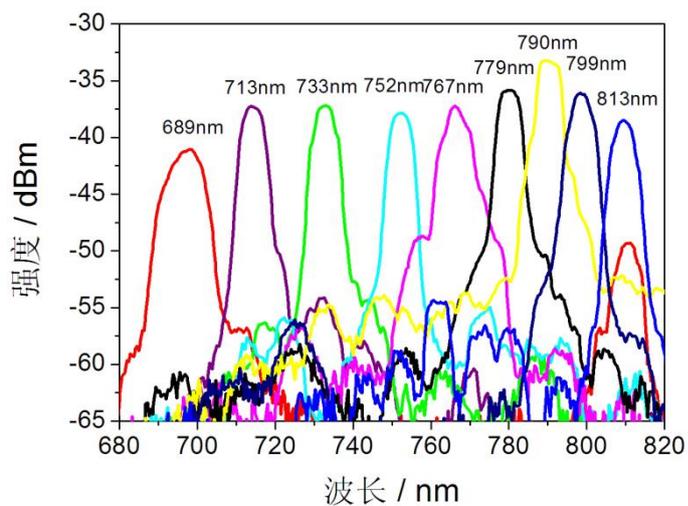


图5 掺铒光纤光梳通过局部增强技术获取不同中心波长的光谱输出

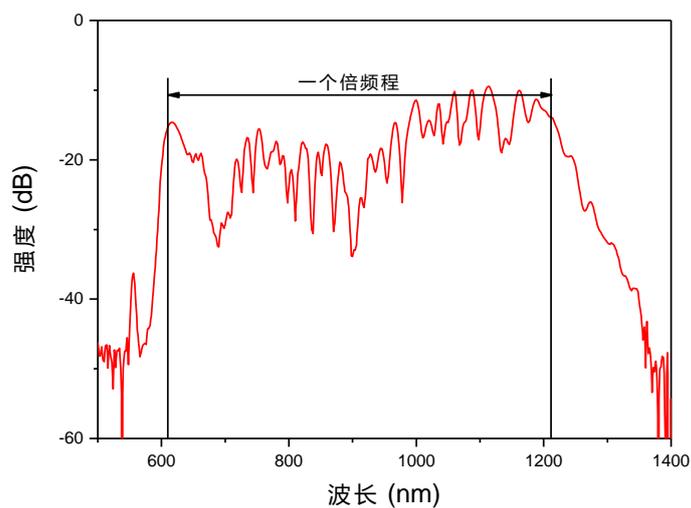


图6 掺铒光纤光梳的倍频程光谱

## 5 评价条件

### 5.1 环境条件

环境温度：(23±3) °C；

相对湿度：≤80%；

供电电源：(220±22) V，(50±1) Hz。

## 5.2 测量标准器及其它设备

### 5.2.1 波长计

波长范围：0.2  $\mu\text{m}$ -2.0  $\mu\text{m}$ ；

测量不确定度： $\leq 100 \text{ pm} (k = 2)$ 。

### 5.2.2 光谱仪

波长范围：0.3  $\mu\text{m}$ -2.0  $\mu\text{m}$ ；

测量不确定度： $\leq 100 \text{ pm} (k = 2)$ 。

### 5.2.3 频谱分析仪

频率范围：100 kHz-1.5 GHz；

分辨力带宽：100 Hz-1 MHz（相对误差 $\pm 2\%$ ）。

### 5.2.4 微波频率计数器

频率范围：100 kHz-1.5 GHz；

频率分辨力：不低于 12 digits/s。

## 6 评价项目和评价方法

由于光梳主要应用于高准确度光学频率测量，其技术性能主要体现为光梳梳齿光学频率特性相关的技术性能，具体评价项目见表 2。

表 2 评价项目一览表

序号	项目名称
1	梳齿光学频率稳定度
2	梳齿光学频率值

### 6.1 梳齿光学频率稳定度

测量梳齿光学频率稳定度一般通过光拍频法实现，其测量原理如图 7 所示。两路激光在入射偏振分光镜 1 之前，通常需要在各自光路上分别采用一对平面反射镜来调整其光路位置（图中未画出），使两路激光在经过偏振分光镜 1 后光路完全重合。半波片 1 和 2 与偏振分光镜 1 的组合用于调整光梳（偏振方向与纸面平行，记为 $\parallel$ ）和连续激光（偏振方向与纸面垂直，记为 $\bullet$ ）的功率。由于两路激光在经过偏振分光镜 1 后偏振方向互相垂直，因此需再经过由半波片 3 和偏振分光镜 2 组成的起偏器。通过调节半波片 3 可同时改变两路激光的偏振方向（仍互相垂直），因此可调节两者在平行 $\parallel$ （或垂直 $\bullet$ ）方向上的功率比。

为了降低光电探测过程的散粒噪声，使用衍射光栅将不同频率成分的激光在空间上分开，并通过小孔光阑入射到光电探测器。光电探测器输出信号经过低通滤波器滤除高于 $f_t/2$ 的频率成分得到光拍频 $f_b$ 信号，放大后送入微波频率计数器进行测量。

由于高信噪比 $f_b$ 信号的提取是实现微波频率计数器准确测量 $f_b$ 的关键，因此为了获得30 dB以上的信噪比，要求光梳与在空间上需尽可能完全重合且偏振方向一致。由于光梳单根梳齿功率仅有百纳瓦量级，光拍频 $f_b$ 信号微弱，信噪比较差，需要根据拍频信噪比仔细优化拍频光路的各项参数，包括光路重合、光斑大小匹配、偏振一致、激光功率比例等。

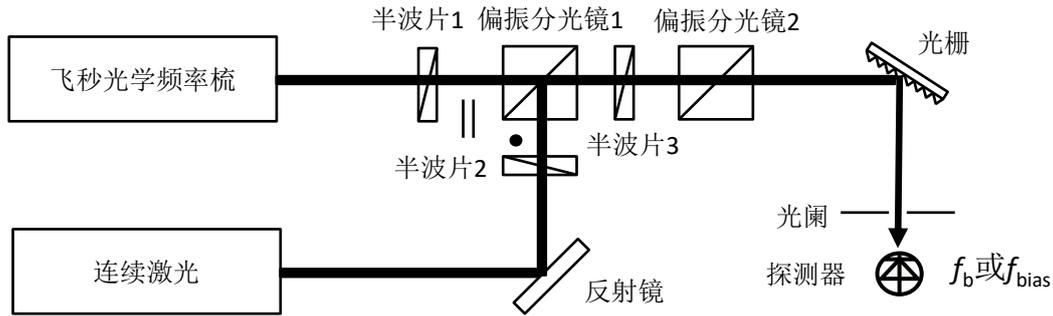


图7 光拍频测量原理

根据测量能力不同，梳齿光学频率稳定度有以下三种测量方法：

方法一：

采用光梳与以特定的原子或分子吸收谱线作为频率参考的稳频激光进行比对的方式，如乙炔稳频 1542 nm 激光器、碘稳频 633 nm 氦氖激光器和碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光器，其频率不确定度可以达到 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 量级，1 s 频率稳定度可以达到 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 量级，因此可满足以铷钟或氢钟为微波频率参考的光梳梳齿光学频率稳定度测量需求。如图 7 所示，上述稳频连续激光频率与对应光梳梳齿产生光拍频 $f_b$ ，并通过微波频率计数器记录光拍频 $f_b$ 的测量数据，计数器的闸门时间设置为 1 s，最后用阿仑标准偏差来计算不同采样平均时间的频率稳定度：

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{f_n} \sqrt{\frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} [f_{b,i+1}(\tau) - f_{b,i}(\tau)]^2} \quad (2)$$

其中， $\tau$ 为采样平均时间， $M$ 为 $\tau$ 对应的采样个数， $f_{b,i}(\tau)$ 为第 $i$ 次采样内所有光拍频 $f_b$ 测量结果的平均值。可计算 $\tau=1$  s、 $\tau=10$  s、 $\tau=100$  s、 $\tau=1000$  s 和 $\tau=10000$  s 的激光频率稳定度，将以上结果记录于附录 A 表 A.1 中。

方法二：

采用光梳与光钟进行比对的方式，如铯原子光晶格钟和镱离子光钟。如图 7 所示，

采用短期频率稳定性和准确度极佳的光钟与对应光梳梳齿进行拍频测量。通过微波频率计数器记录光拍频 $f_b$ 的测量数据，计数器的闸门时间设置为 1 s，代入公式(2)计算不同采样平均时间的光梳梳齿光学频率稳定性，将以上结果记录于附录 A 表 A.1 中。

方法三：

采用两台光梳互相对比的方式，要求两台同参考（以微波或光学频率为参考）光梳的重复频率 $f_r$ 完全相同（ $f_{r1} = f_{r2}$ ），且 $f_{ceo1} \neq f_{ceo2}$ 。如图 8 所示，光电探测器得到两个光梳的拍频信号 $f_b = f_{1,k} - f_{2,k}$ ，其中 $f_{1,k}$ 和 $f_{2,k}$ 分别为两个光梳梳齿序数为 $k$ 的梳齿光学频率值。通过微波频率计数器记录光拍频 $f_b$ 的测量数据，计数器的闸门时间设置为 1 s，代入公式(2)计算不同采样平均时间的光梳梳齿光学频率稳定性，将以上结果记录于附录 A 表 A.1 中。

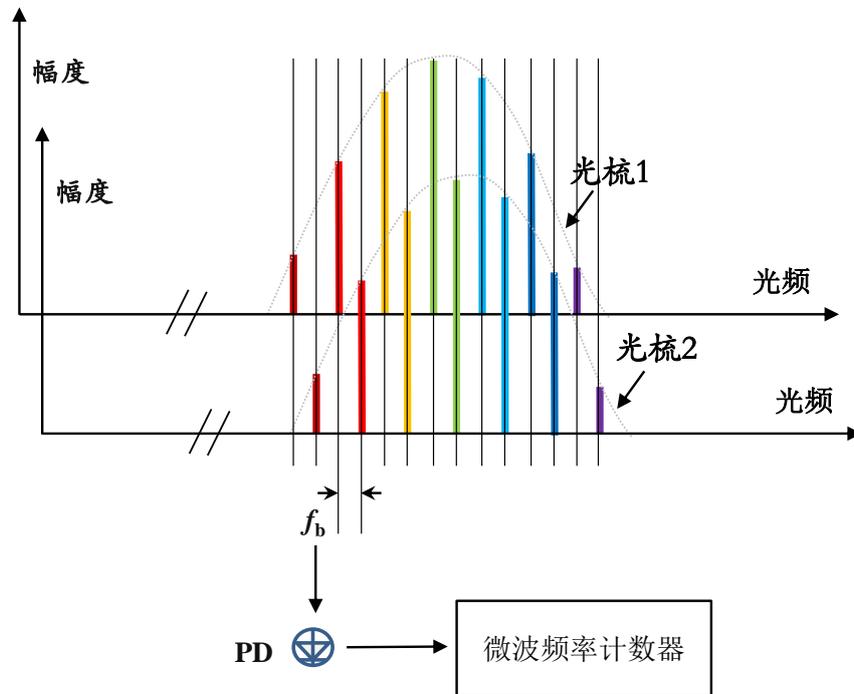


图8 两台共频率参考光梳互相对比的原理

## 6.2 梳齿光学频率值

由公式(1)可知，光梳任意一根梳齿的光学频率值 $f_n$ 均由重复频率 $f_r$ 、载波包络偏移 $f_{ceo}$ 和对应的梳齿序数 $n$ 决定。

### 6.2.1 重复频率值

图 9 为以微波频率源为参考的光梳重复频率锁定和测量示意图，通常可直接用光电探测器探测光梳输出光脉冲获得 $f_r$ ，且使用频谱分析仪测量 $f_r$ 的信噪比不低于 30 dB（分辨力

带宽为 300 kHz)。当通过锁相环将重复频率锁定到 $f_r$ 参考频率（以微波频率为参考）后，直接读取 $f_r$ 参考频率的标称值（如 $f_r$ 频率综合输出频率的显示值或设定值）作为重复频率值，并将结果记录于附录 A 表 A.2 中。

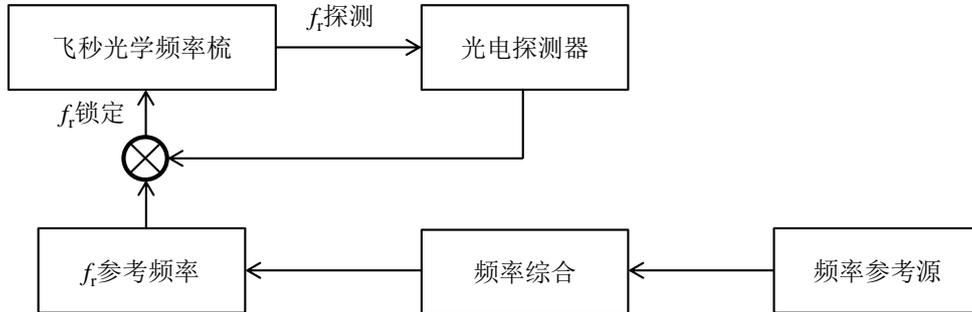


图9 基于微波频率参考的重复频率锁定和测量示意图

当光梳以光学频率为频率参考时，如图 2 所示，将光梳某根梳齿与光学参考的偏频（差频） $f_{\text{bias}}$ 和载波包络偏移频率 $f_{\text{ceo}}$ 同时锁定在相应的微波频率参考，从而将光梳溯源到光学频率参考上（微波频率参考影响通常可忽略不计），此时重复频率的计算公式为：

$$f_r = \frac{\nu_{\text{ref}} - f_{\text{ceo}} - f_{\text{bias}}}{n'} \quad (3)$$

其中， $\nu_{\text{ref}}$ 为已知光学参考的频率值， $n'$ 为梳齿序数。 $f_{\text{bias}}$ 为第 $n'$ 根梳齿与光学参考之间偏频（差频）参考频率的标称值（如 $f_{\text{bias}}$ 频率综合输出频率的显示值或设定值）。 $f_{\text{ceo}}$ 和 $f_{\text{bias}}$ 均为有符号的量。将 $f_r$ 计算结果记录于附录 A 表 A.2 中。

### 6.2.2 载波包络偏移频率值

如图 10 所示，当通过锁相环将载波包络偏移频率锁定到 $f_{\text{ceo}}$ 参考频率时，直接读取 $f_{\text{ceo}}$ 参考频率的标称值（ $f_{\text{ceo}}$ 频率综合输出频率的显示值或设定值）作为载波包络偏移频率值，并将结果记录于附录 A 表 A.2 中。

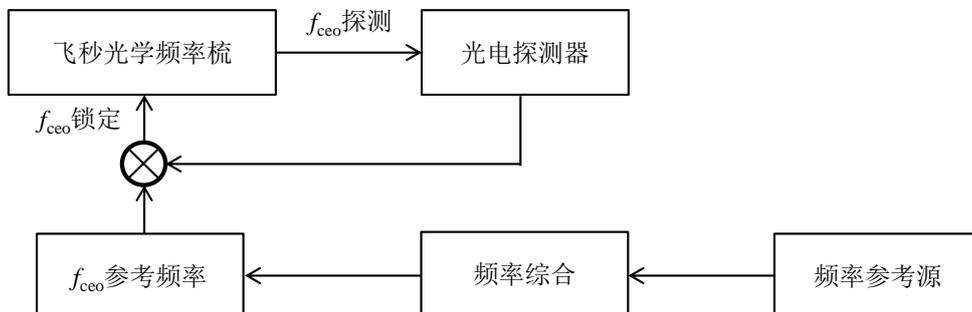


图10 载波包络偏移频率的锁定和测量

### 6.2.3 载波包络偏移频率的符号

通过频谱分析仪或微波频率计数器观察 $f_r$ 、 $f_{ceo}$ 和 $f_b$ 这三个量值相互变化关系，可以确定 $f_b$ 和 $f_{ceo}$ 符号，如图 11 和表 3 所示，具体操作步骤如下：

1、调谐光梳腔长（如 PZT 或微位移台等）来增加或减少 $f_r$ ，并观察 $f_b$ 的变化。当增加 $f_r$ 时若 $f_b$ 减少（增加）则可判断 $f_b$ 的符号为正（负）；当减少 $f_r$ 时若 $f_b$ 增加（减少）则可判断 $f_b$ 的符号为正（负）。推荐 $f_r$ 调谐步长不低于 1 Hz，此时若梳齿序数 $n = 10^6$ 则对应 $f_b$ 的变化量为兆赫兹量级，因此可很容易分辨 $f_b$ 变化。

2、在 $f_b$ 符号已知的情况下，通过改变飞秒激光的泵浦电流（功率）来增加或减少 $f_{ceo}$ ，并观察 $f_b$ 的变化。当增加 $f_{ceo}$ 时若 $f_b$ 增加（减少）则可判断 $f_{ceo}$ 符号与 $f_b$ 相反（相同）；当减少 $f_{ceo}$ 时若 $f_b$ 增加（减少）则可判断 $f_{ceo}$ 符号与 $f_b$ 相同（相反）。为了在上述过程中保证光梳一直处于锁模状态，建议 $f_{ceo}$ 最大调谐量应不高于 $f_r/2$ 。

3、将 $f_{ceo}$ 符号记录于附录 A 表 A.2 中。

当光梳以光学频率为参考时，将上述方法中 $f_b$ 替换成 $f_{bias}$ ，可依次确定 $f_{bias}$ 和 $f_{ceo}$ 的符号。

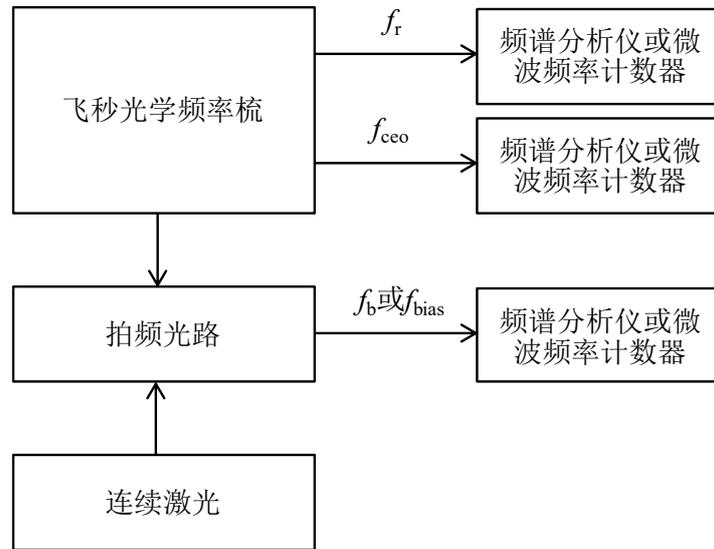


图 11  $f_b$ 和 $f_{ceo}$ 符号判别方法的连接图

表 3  $f_b$ 和 $f_{ceo}$ 符号的判别方法

	$f_b$ 增加	$f_b$ 减少
$f_r$ 增加	$f_b$ 符号为负	$f_b$ 符号为正
$f_r$ 减少	$f_b$ 符号为正	$f_b$ 符号为负

$f_{\text{ceo}}$ 增加	$f_{\text{b}}$ 与 $f_{\text{ceo}}$ 异号	$f_{\text{b}}$ 与 $f_{\text{ceo}}$ 同号
$f_{\text{ceo}}$ 减少	$f_{\text{b}}$ 与 $f_{\text{ceo}}$ 同号	$f_{\text{b}}$ 与 $f_{\text{ceo}}$ 异号

#### 6.2.4 梳齿序数

在已知重复频率 $f_{\text{r}}$ 和载波包络偏移频率 $f_{\text{ceo}}$ （包括符号）的前提下，梳齿序数 $n$ 与对应梳齿光学频率 $f_{\text{n}}$ 有关，因此为了确定梳齿序数 $n$ 大小，必须首先找到对应的梳齿光学频率 $f_{\text{n}}$ 。如图 7 所示，通过已知光学频率 $f_{\text{cw}}$ 与对应光梳梳齿 $f_{\text{n}}$ 拍频，并测量其光拍频信号 $f_{\text{b}}$ 来获得梳齿光学频率 $f_{\text{n}}$ 和梳齿序数 $n$ ，即：

$$f_{\text{n}} = f_{\text{cw}} - f_{\text{b}} \quad (4)$$

将公式(1)代入上式，得到：

$$n = \frac{f_{\text{cw}} - f_{\text{ceo}} - f_{\text{b}}}{f_{\text{r}}} \quad (5)$$

在 $f_{\text{b}}$ 和 $f_{\text{ceo}}$ 符号已知的情况下，根据 $f_{\text{cw}}$ 粗值（记为 $\widetilde{f_{\text{cw}}}$ ）和 $f_{\text{b}}$ 的频率不确定度大小（分别记为 $u(\widetilde{f_{\text{cw}}})$ 和 $\Delta_{\text{cw}}$ ），可计算对应的梳齿序数 $n$ ，分为以下几种情形。

情形一：

已知 $\widetilde{f_{\text{cw}}}$ 、 $u(\widetilde{f_{\text{cw}}})$ 和 $\Delta_{\text{cw}}$ ，并且满足条件 $\sqrt{u^2(\widetilde{f_{\text{cw}}}) + \Delta_{\text{cw}}^2} \leq f_{\text{r}}/4$ ，根据以下公式：

$$n = \frac{\widetilde{f_{\text{cw}}} - f_{\text{ceo}} - f_{\text{b}}}{f_{\text{r}}} \quad (6)$$

计算取最接近整数得到 $n$ 。如图 12 所示， $\widetilde{f_{\text{cw}}}$ 和 $u(\widetilde{f_{\text{cw}}})$ 可以通过经检定或校准的光谱仪或波长计现场实际测量和评估得到，也可以通过上述仪器的技术说明书或者被测激光原检定、校准、测试等证书获取。例如，对于一些参考到原子或分子吸收谱线的稳频激光，如碘稳频 532 nm 和 633 nm 激光，其自身的频率不确定度在兆赫兹量级以下，满足条件 $\sqrt{u^2(\widetilde{f_{\text{cw}}}) + \Delta_{\text{cw}}^2} \leq f_{\text{r}}/4$ ，因此根据公式(6)很容易确定 $n$ 准确值。

情形一的具体操作步骤如下：

1、根据图 2 方法锁定光梳，按照 6.2.1 节和 6.2.2 节所述方法确定 $f_{\text{r}}$ 和 $f_{\text{ceo}}$ 值，以及 6.2.3 节所述方法确定 $f_{\text{b}}$ 和 $f_{\text{ceo}}$ 符号。 $f_{\text{b}}$ 通过微波频率计数器以 1 s 闸门时间测量，测量时间设置为 100 s-1000 s，并将该段时间内微波频率计数器测量结果的算术平均值记为 $f_{\text{b}}$ ，以测量结果的极值差作为 $\Delta_{\text{cw}}$ 的估计值。

2、获取 $f_{\text{cw}}$ 粗值 $\widetilde{f_{\text{cw}}}$ 及其频率不确定度 $u(\widetilde{f_{\text{cw}}})$ 。 $\widetilde{f_{\text{cw}}}$ 和 $u(\widetilde{f_{\text{cw}}})$ 可以通过如图 12 所示经检定或校准的光谱仪或波长计现场实际测量和评估得到，也可以通过其技术说明书或者原检定、校准、测试等证书获取。

3、根据公式(6)计算并取最接近整数获得 $n$ ，并将结果记录于附录 A 表 A.2 中。

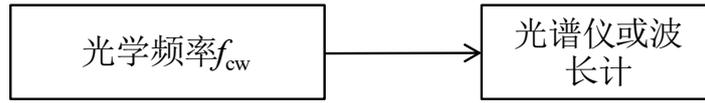


图12 光谱仪或波长计测量光学频率的连接图

情形二:

当 $\sqrt{u^2(\tilde{f}_{cw}) + \Delta_{cw}^2} > f_r/4$ 时,则可能存在多个不同值 $n$ 同时满足公式(6)。为了解决上述问题,可采用游标原理,即通过调谐光梳重复频率 $f_r$ ,以不同“刻度”的尺子(光梳)来分别与同一光频 $f_{cw}$ 拍频,从而求得 $n$ 的准确值。通过调谐不同 $f_r$ ,并考虑 $\Delta_{cw}$ 影响,有以下表达式:

$$f_{cw} = n_1 f_{r1} + f_{ce01} + f_{b1} \pm \Delta_{cw1} \quad (7)$$

$$f_{cw} = n_2 f_{r2} + f_{ce02} + f_{b2} \pm \Delta_{cw2} \quad (8)$$

联立上述两个等式,并令 $n_2 = n_1 + m$ , $m$ 为梳齿序数调谐量, $n_1$ 、 $n_2$ 和 $m$ 均为整数,则 $n_1$ 可通过以下公式计算:

$$n_1 = \frac{m f_{r2} + (f_{ce02} - f_{ce01}) + (f_{b2} - f_{b1})}{f_{r1} - f_{r2}} \pm \frac{\Delta_{cw1} + \Delta_{cw2}}{f_{r1} - f_{r2}} \quad (9)$$

等式右边第二项分量即为 $n_1$ 的测量不确定度,要求该分量尽可能小于1。推荐重复频率调谐量 $|f_{r1} - f_{r2}| \geq 10(\Delta_{cw1} + \Delta_{cw2})$ ,则通过上式计算 $n_1$ 的不确定度可控制在0.1以内,可忽略该分量影响,则公式(9)简化为:

$$n_1 = \frac{m f_{r2} + (f_{ce02} - f_{ce01}) + (f_{b2} - f_{b1})}{f_{r1} - f_{r2}} \quad (10)$$

此时,公式中唯一未知参量为梳齿序数调谐量 $m$ ,且 $m$ 与 $(f_{r1} - f_{r2})$ 成正比。当 $\Delta_{cw} < 50$  Hz时,要求重复频率调谐量 $|f_{r1} - f_{r2}| < 1$  kHz,则 $m < 10$ (假设 $f_r = 100$  MHz, $f_{cw} = 193$  THz),此时 $m$ 的准确值可使用微波频率计数器或频谱分析仪通过人工实时监测 $f_b$ 的方法来确定。

以微波频率计数器为例,根据 $f_b$ 符号情况可分为两种不同情形。当 $f_b$ 符号为正时,如果单调减少(增加) $f_r$ ,则从微波频率计数器实时监测的 $f_b$ (绝对值,下同)经历逐渐增加(减少),到逐渐减少(增加),再重新增加(减少)到 $f_b$ 的过程,即每经历一个“增加—减少—增加”(“减少—增加—减少”)过程,则梳齿序数 $n$ 将增加(减少)1,即 $m$ 增加(减少)1。同理可得 $f_b$ 号为负时的情形,如表4所示。如果将微波频率计数器替换成频谱分析仪,判别方法完全相同。

表4  $m$ 值增减的判别方法

	$f_b$ 经历“增加—减少—增加”	$f_b$ 经历“减少—增加—减少”
$f_b$ 符号为正	$m$ 增加1(减少 $f_r$ )	$m$ 减少1(增加 $f_r$ )

$f_b$ 符号为负	$m$ 减少 1 (增加 $f_r$ )	$m$ 增加 1 (减少 $f_r$ )
------------	----------------------	----------------------

情形二的具体操作步骤如下：

1、按照 6.2.3 节所述方法确定 $f_{b1}$ 和 $f_{ce01}$ 符号，以及 6.2.1 节和 6.2.2 节所述方法确定 $f_{b1}$ 和 $f_{ce0}$ 值（根据图 2 方法锁定光梳）。 $f_{b1}$ 通过微波频率计数器以 1 s 闸门时间测量，测量时间设置为 100 s-1000 s，并将该段时间内微波频率计数器测量结果的算术平均值记为 $f_{b1}$ ，以测量结果的极值差作为 $\Delta_{cw1}$ 的估计值。

2、获取 $f_{cw}$ 粗值 $\widetilde{f_{cw}}$ 及其不确定度 $u(\widetilde{f_{cw}})$ 。 $\widetilde{f_{cw}}$ 和 $u(\widetilde{f_{cw}})$ 可以通过如图 12 所示经检定或校准的光谱仪或波长计现场实际测量和评估得到，也可以通过其技术说明书或者原检定、校准、测试等证书获取。

3、单调改变（增加或减少）重复频率，并使用频谱分析仪（或微波频率计数器）监测 $f_{b2}$ 和 $f_{r2}$ 变化，并按表 4 所示方法记录梳齿序数调谐量 $m$ 。当重复频率调谐 $|f_{r1} - f_{r2}| \geq 10\Delta_{cw1}$ 时，按照 6.2.3 节所述方法确定 $f_{b2}$ 和 $f_{ce02}$ 符号，以及 6.2.1 节和 6.2.2 节所述方法确定 $f_{r2}$ 和 $f_{ce02}$ 值（根据图 2 方法将光梳锁定后）。 $f_{b2}$ 通过微波频率计数器以 1 s 闸门时间测量，测量时间设置为 100 s-1000 s，并以该段时间内微波频率计数器测量结果的算术平均值记为 $f_{b2}$ ，将测量结果的极值差作为 $\Delta_{cw2}$ 的估计值。

4、通过公式(10)计算取最接近整数得到 $n_1$ ，并将结果记录于附录 A 表 A.2 中。

情形三：

当 $\Delta_{cw} > 100$  Hz 时，通过人工实时监测 $f_b$ 变化比较困难，并且很容易出现 $m$ 被错误计数的情况。为此，通过变换公式(9)的形式，可得到 $m$ 的计算公式：

$$m = \frac{n_1(f_{r1} - f_{r2})}{f_{r2}} + \frac{(f_{ce01} - f_{ce02}) + (f_{b1} - f_{b2})}{f_{r2}} \pm \frac{\Delta_{cw1} + \Delta_{cw2}}{f_{r2}} \quad (11)$$

其中， $n_1$ 和 $m$ 均为整数。由于一般情况下 $f_{r2} \gg 10(\Delta_{cw1} + \Delta_{cw2})$ ，因此公式(11)右边第三项分量引入的计算 $m$ 的不确定度远小于 0.1，可忽略。为了得到 $m$ 的准确值， $n_1$ 的测量不确定度 $u(n_1)$ 只需满足条件：

$$u(n_1) \leq \left| \frac{f_{r2}}{10(f_{r1} - f_{r2})} \right| \quad (12)$$

即可将通过公式(11)计算 $m$ 的不确定度控制在 0.1 以内，由于重复频率一般在百兆赫兹量级，即使采用较大的重复频率调谐量，例如 $|f_{r1} - f_{r2}| = 100$  kHz，对 $u(n_1)$ 的要求也十分宽松（约 100），对应的 $u(\widetilde{f_{cw}})$ 要求为 10 GHz 量级，利用波长计或光谱仪可实现该准确度的光频测量。此时梳齿序数 $n_1$ 粗值 $\widetilde{n_1}$ 的计算公式为：

$$\widetilde{n_1} = \frac{\widetilde{f_{cw}} - f_{ce01} - f_{b1}}{f_{r1}} \quad (13)$$

将 $\tilde{n}_1$ 代入以下公式:

$$m = \frac{\tilde{n}_1(f_{r1}-f_{r2})}{f_{r2}} \pm \frac{(f_{ce01}-f_{ce02})+(f_{b1}-f_{b2})}{f_{r2}} \quad (14)$$

取最接近整数得到 $m$ , 代入公式(10)计算取最接近整数得到 $n_1$ 准确值。

情形三的具体操作步骤如下:

1、按照 6.2.3 节所述方法确定 $f_{b1}$ 和 $f_{ce01}$ 符号, 以及 6.2.1 节和 6.2.2 节所述方法确定 $f_{b1}$ 和 $f_{ce0}$ 值(根据图 2 方法锁定光梳)。 $f_{b1}$ 通过微波频率计数器以 1 s 闸门时间测量, 测量时间设置为 100 s-1000 s, 并将该段时间内微波频率计数器测量结果的算术平均值记为 $f_{b1}$ , 以测量结果的极值差作为 $\Delta_{cw1}$ 的估计值。

2、获取 $f_{cw}$ 粗值 $\tilde{f}_{cw}$ 及其不确定度 $u(\tilde{f}_{cw})$ 。 $\tilde{f}_{cw}$ 和 $u(\tilde{f}_{cw})$ 可以通过如图 12 所示经检定或校准的光谱仪或波长计现场实际测量和评估得到, 也可以通过其技术说明书或者原检定、校准、测试等证书获取。

3、单调改变(增加或减少)重复频率, 当重复频率调谐 $|f_{r1} - f_{r2}| \geq 10\Delta_{cw1}$ 时, 按照 6.2.3 节所述方法确定 $f_{b2}$ 和 $f_{ce02}$ 符号, 以及 6.2.1 节和 6.2.2 节的方法确定 $f_{r2}$ 和 $f_{ce02}$ 值(根据图 2 方法锁定光梳)。 $f_{b2}$ 通过微波频率计数器以 1 s 闸门时间测量, 测量时间设置为 100 s-1000 s, 并以该段时间内微波频率计数器测量结果的算术平均值记为 $f_{b2}$ , 以测量结果的极值差作为 $\Delta_{cw2}$ 的估计值。

4、根据公式(13)和公式(14)计算取最接近的整数得到 $m$ , 代入式(10)取最接近的整数获得 $n_1$ , 并将结果记录于附录 A 表 A.2 中。

对于 $n'$ 测量, 可参考上述 $n$ 测量方法。由于作为光学参考 $\nu_{ref}$ 的频率不确定度 $u(\nu_{ref})$ 通常远远低于兆赫兹量级, 因此一般可通过公式(6)直接计算得到 $n'$ 。

## 7 评价结果表达

评价后, 出具测试报告(评价报告), 报告至少应包含以下信息:

- a) 标题: “测试报告”(评价报告);
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行测试的地点;
- 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) 被测试对象的描述和明确标识;
- g) 进行测试的日期;

- h) 测试所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次测试所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- j) 测试环境的描述；
- k) 测试结果，测试结果的格式可参照附录 A 完成；
- l) 报告签发人的签名或等效标识；
- m) 测试结果仅对被测试对象有效的声明；
- n) 未经实验室书面批准，不得部分复制测试报告的声明。

## 附录 A

## 评价记录参考格式

表 A.1 梳齿光学频率稳定度

平均时间 (s)	频率稳定度
1	
10	
100	
1000	
10000	

表 A.2 梳齿光学频率值

$n$	$f_r$	$f_{\text{ceo}}$		$f_n$ (Hz)	$U_{\text{rel}} (k=2)$
	绝对值 (Hz)	符号	绝对值 (Hz)		

## 附录 B

## 证书内页参考格式

表 B.1 梳齿光学频率稳定度

平均时间 (s)	频率稳定度
1	
10	
100	
1000	
10000	

表 B.2 梳齿光学频率值

$n$	$f_r$	$f_{\text{ceo}}$		$f_n$ (Hz)	$U_{\text{rel}} (k=2)$
	绝对值 (Hz)	符号	绝对值 (Hz)		

## 附录 C

## 梳齿光学频率不确定度评定

用户可参照以下方法和流程对光梳梳齿光学频率不确定度进行评定，实验参数如下：

$$f_r = 100 \text{ MHz}、f_{\text{ceo}} = f_{\text{bias}} = 40 \text{ MHz}、f_n \approx 194 \text{ THz} \text{ 和 } \nu_{\text{ref}} \approx 429 \text{ THz}。$$

## C.1 不确定度来源

根据不确定度传播定律，不考虑公式(1)中各不确定度分量的相关性，可推导出光梳梳齿光学频率 $f_n$ 的所有 B 类相对标准不确定度：

$$u_b = \sqrt{c_1^2 u^2(f_r) + c_2^2 u^2(f_{\text{ceo}})} \quad (15)$$

其中， $u(f_r)$ 和 $u(f_{\text{ceo}})$ 分别为 $f_r$ 和 $f_{\text{ceo}}$ 引入的相对标准不确定度，灵敏系数 $c_1 = n f_r / f_n$ ， $c_2 = f_{\text{ceo}} / f_n$ 。

当光梳以微波频率为参考时， $f_r$ 采用频率综合输出频率的标称值，因此评定 $u(f_r)$ 时仅考虑由 $f_r$ 微波频率参考源和锁相过程引入的不确定度分量（B 类评定）。后者包括频率综合电路漂移（主要受温度影响）、频率综合电路分辨力以及锁相环（环内）相位跟踪引入的不确定度分量。首先，由频率综合电路漂移引入的不确定度分量可通过测量得到。如图 13 所示，将频率综合的输出频率 $f_{\text{syn}}$ 分频（/K）至与频率参考源同频信号 $f_{\text{syn}}/K$ ，并与微波频率参考输出频率 $f_{\text{ref}}$ 比相获得两者平均频率差，来评估频率综合电路漂移引入的不确定度分量。其次，频率综合电路的分辨力受频率综合的最低有效位（LSB）限制，可通过查阅其技术说明书获得。最后， $f_r$ 锁相环（环内）相位跟踪能力通过测量 $f_r$ 信号（环内）的剩余相位噪声（根据单边带相位噪声功率谱密度曲线计算）描述，通常，1 Hz 至高频（不低于 1 MHz）频率范围内的剩余相位噪声计算值应小于 1 rad，可认为锁相环正常工作，忽略该项不确定度分量影响，并通过监测锁相环跳周剔除相应测量数据，详见 C.5.1 节。

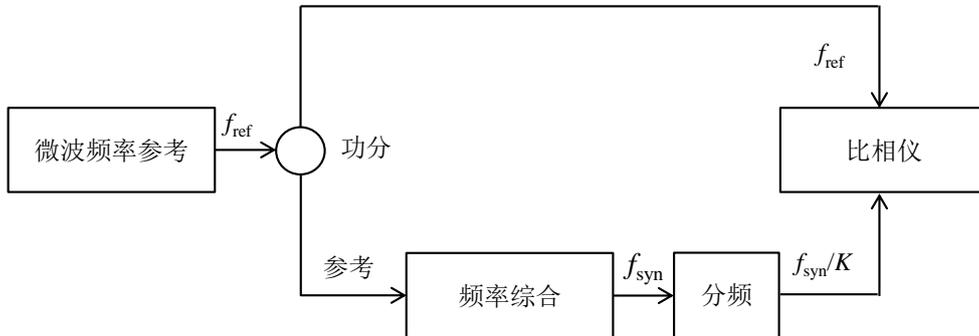


图 13 由频率综合电路漂移引入的不确定度分量测量方法

当光梳以光学频率为参考时，由公式(2)可知 $u(f_r)$ 受到 $u(\nu_{\text{ref}})$ （ $\nu_{\text{ref}}$ 的频率不确定度）、

$u(f_{\text{ceo}})$ 和 $u(f_{\text{bias}})$  ( $f_{\text{bias}}$ 的频率不确定度)影响。由于 $f_{\text{ceo}}$ 和 $f_{\text{bias}}$ 均锁定至微波频率参考,因此 $u(f_{\text{ceo}})$ 和 $u(f_{\text{bias}})$ 均可参考上述过程进行不确定度评定。

综上所述,并考虑梳齿光学频率测量重复性引入的不确定度分量(A类评定),则以微波或光学频率为参考的光梳梳齿光学频率 $f_n$ 的相对合成标准不确定度可分别表示为:

$$u_c = \sqrt{c_1^2(u_1^2 + u_3^2 + u_4^2) + c_2^2(u_1^2 + u_3^2 + u_4^2) + u_5^2} \quad (16)$$

$$u_c = \sqrt{c_1^2[c_3^2 u_2^2 + c_4^2(u_1^2 + u_3^2 + u_4^2) + c_5^2(u_1^2 + u_3^2 + u_4^2)] + c_2^2(u_1^2 + u_3^2 + u_4^2) + u_5^2} \quad (17)$$

$u_1$ ——微波频率参考引入的相对标准不确定度分量, B类评定;

$u_2$ ——光学频率参考引入的相对标准不确定度分量, B类评定;

$u_3$ ——频率综合电路漂移引入的相对标准不确定度分量, B类评定;

$u_4$ ——频率综合电路分辨力引入的相对标准不确定度分量, B类评定;

$u_5$ ——测量重复性引入的相对标准不确定度分量, A类评定;

其中,  $c_1 = n f_r / f_n$ 、 $c_2 = f_{\text{ceo}} / f_n$ 、 $c_3 = \nu_{\text{ref}} / (n' f_r)$ 、 $c_4 = f_{\text{ceo}} / (n' f_r)$ 和 $c_5 = f_{\text{bias}} / (n' f_r)$ 。

## C.2 标准不确定度分量评定

### C.2.1 微波频率参考引入的相对标准不确定度分量 $u_1$ , B类评定

当光梳以中国计量科学研究所的原子时频基准为微波频率参考时,  $u_1 = 5 \times 10^{-15}$ 。

### C.2.2 光学频率参考引入的相对标准不确定度分量 $u_2$ , B类评定

当光梳以中国计量科学研究所昌平园区的第二套  $^{87}\text{Sr}$  光钟为光学频率参考时,  $u_2 = 1.9 \times 10^{-16}$ 。

### C.2.3 频率综合电路漂移引入的相对标准不确定度分量 $u_3$ , B类评定

以罗德施瓦茨 (Rohde & Schwarz) 公司的频率综合器 SMB 100A 为例, 根据图 13 所示方法测试由频率综合电路漂移引入的标准不确定度为 $u_3 = 1 \times 10^{-15}$ 。

### C.2.4 频率综合电路分辨力引入的相对标准不确定度分量 $u_4$ , B类评定

仍以频率综合器 SMB 100A 为例, 通过查阅其技术说明书可知当输出频率为 1 GHz 时分辨力为 0.44  $\mu\text{Hz}$ , 相对分辨力为  $4.4 \times 10^{-16}$ 。因此估计当 SMB 100A 输出频率为 $f_r$ 或 $f_{\text{ceo}}$ 时相对分辨力为  $1 \times 10^{-15}$ , 按均匀分布估计, 则由频率综合电路分辨力引入的相对标准不确定度 $u_4 = 1 \times 10^{-15} / 2\sqrt{3} \approx 2.9 \times 10^{-16}$ 。

### C.2.5 测量重复性引入的相对标准不确定度分量 $u_5$ , A类评定

根据 6.1 节中光拍频 $f_b$ 测量数据, 由测量重复性引入的相对标准不确定度为:

$$u_5 = \frac{1}{f_n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [f_{b,i} - \bar{f}_b]^2}{N(N-1)}} \quad (18)$$

其中,  $N$ 为测量次数(闸门时间设置为1 s),  $f_{b,i}$ 为第*i*次拍频测量结果,  $\bar{f}_b$ 为*N*次测量结果的算术平均值。当光梳以中国计量科学研究所的原子时频基准为微波频率参考时, 采用6.1节中方法一并使用乙炔稳频1542 nm激光(Stabilaser 1542, 丹麦DFM公司)测量  $u_5 = 3 \times 10^{-14}$  ( $N \geq 100$ ); 当光梳以中国计量科学研究所昌平园区的第二套 $^{87}\text{Sr}$ 光钟为光学频率参考源时, 采用6.1节中方法三测量  $u_5 = 1 \times 10^{-17}$  ( $N \geq 100$ )。

### C.3 合成标准不确定度

公式(16)和公式(17)中,  $c_1 = nf_r/f_n \approx 1$ ,  $c_2 = f_{\text{ceo}}/f_n \approx 2 \times 10^{-7} \ll 1$ 、 $c_3 = \nu_{\text{ref}}/(n'f_r) \approx 1$ 、 $c_4 = f_{\text{ceo}}/(n'f_r) \approx 1 \times 10^{-7} \ll 1$ 和 $c_5 = f_{\text{bias}}/(n'f_r) \approx 1 \times 10^{-7} \ll 1$ 。当光梳以中国计量科学研究所的原子时频基准为微波频率参考时,  $u_c = 3 \times 10^{-14}$ ; 当光梳以中国计量科学研究所昌平园区的第二套 $^{87}\text{Sr}$ 光钟为光学频率参考时,  $u_c = 1.9 \times 10^{-16}$ 。

### C.4 扩展不确定度

相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}} = ku_c$ , 取包含因子 $k = 2$ , 对应置信水准为95%。当光梳以中国计量科学研究所的原子时频基准为微波频率参考时,  $U_{\text{rel}} = 6 \times 10^{-14}$  ( $k = 2$ ); 当光梳以中国计量科学研究所昌平园区的第二套 $^{87}\text{Sr}$ 光钟为光学频率参考时,  $U_{\text{rel}} = 3.8 \times 10^{-16}$  ( $k = 2$ )。将 $U_{\text{rel}}$ 结果记录于附录A表A.2中, 如果采用扩展不确定度表示 $U = U_{\text{rel}}f_n$ , 对应上述两种情形的扩展不确定度分别为 $U = 12 \text{ Hz}$  ( $k = 2$ )和 $U = 74 \text{ mHz}$  ( $k = 2$ )。

## C.5 不确定度评估过程的其它影响因素

### C.5.1 锁相环跳周

当锁相环正常工作时, 待锁信号的相位将跟随参考信号的相位变化(即相位锁定), 并将两者之间的相位差维持在一定范围内。通常, 模拟鉴相器的鉴相范围为 $[-\pi/2, +\pi/2]$  rad, 而数字鉴相器则为 $[-2^k \cdot \pi/2, +2^k \cdot \pi/2]$  rad ( $k$ 为数字鉴相器的位数)。跳周(Cycle-slip)是指因锁相环暂时失锁而导致相位差超过上述范围的跳变现象, 即待锁信号对频率参考源的相位跟踪暂时失效。因此如果载波包络偏移频率 $f_{\text{ceo}}$ 、重复频率 $f_r$ 和光偏频 $f_{\text{bias}}$ 的锁相环出现跳周, 将导致 $f_{\text{ceo}}$ 、 $f_r$ 和 $f_{\text{bias}}$ 与各自频率参考值出现偏差, 进而影响光梳梳齿光学频率稳定度的测量和不确定度评估。

跳周监测是判断锁相环是否正常工作的重要方法之一, 一般通过监测单位时间内跳周出现次数即跳周率(Cycle-slip rate)来评价。跳周率与待锁信号信噪比和外部环境随机扰动等因素密切相关。跳周率与待锁信号信噪比的关系可表示为:  $1/2 \times BW \times \text{erfc}(10^{\text{SNR}/20}/20/\sqrt{2})$ , 其中 $BW$ 为锁相环的信号带宽,  $\text{SNR}$ 为信噪比,  $\text{erfc}$ 为互补误差函数。跳周率随信噪比增加呈指数规律下降。通常情况下, 当信噪比大于30 dB(分辨力带

宽为 300 kHz) 时可忽略信噪比对跳周的影响。来自外部环境的随机扰动也可能会破坏锁相环稳定从而引起跳周。通过环境隔离和优化系统结构可以减小跳周率, 但很难完全避免跳周。

跳周的判定法则为: 当待锁信号(环内)的频率偏移量超过一定阈值时, 即认为出现跳周。跳周阈值的设定与微波频率计数器的闸门时间有关。由跳周定义可知, 当相位跟踪偏差  $\Delta\varphi = 2\pi\Delta f t > 2\pi \text{ rad}$ , 判定为出现跳周。因此当频率测量的积分时间(闸门时间)  $t$  为 1 s 时对应频率偏离量  $\Delta f$  的阈值为 1 Hz。以此类推, 如表 5 所示。跳周监测推荐使用无死区时间的微波频率计数器。

当光梳参考至微波频率标准时, 由于  $f_r$  和  $f_{\text{ceo}}$  自身的频率稳定度通常远小于对应的跳周阈值, 因此在使用光梳进行测量的过程中(例如 6.1 节中通过光拍频法测量梳齿光学频率稳定度)可通过两台微波频率计数器分别实时监测环内  $f_r$  和  $f_{\text{ceo}}$  信号, 并与其对应的参考频率标称值相比较, 当其中任意一个锁相环路的差值大于跳周阈值时, 即认为出现跳周, 需要剔除对应的  $f_b$  测量数据点; 当光梳以光学频率标准为参考时, 则将对应监测  $f_r$  信号改为  $f_{\text{bias}}$  即可, 如图 14 所示。

表 5 跳周阈值与微波频率计数器闸门时间的关系

闸门时间	跳周阈值
1 s	1 Hz
10 s	0.1 Hz
100 s	0.01 Hz

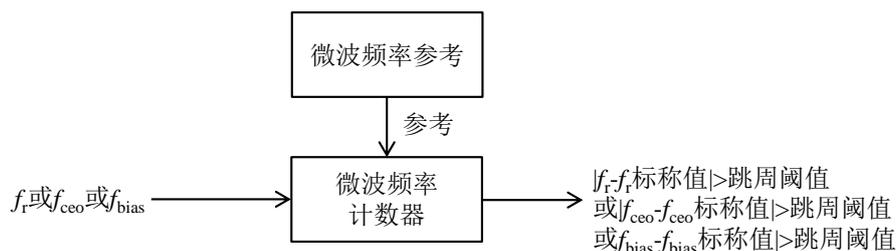


图 14  $f_{\text{ceo}}$ 、 $f_r$  和  $f_{\text{bias}}$  锁相环跳周监测的方法

### C.5.2 光拍频 $f_b$ 错误计数

当使用微波频率计数器来测量光拍频  $f_b$  时, 因  $f_b$  信噪比下降等因素可能导致  $f_b$  被微波频率计数器误触发, 产生错误计数, 因此建议使用两台微波频率计数器在不同的测量带宽条件下同时(同步触发)测量拍频信号  $f_b$ , 如图 15 所示。不同带宽的拍频信号可通过采用不同带宽滤波器来实现。例如, 图 15 中滤波器 1 采用截止频率不高于  $f_r/2$  的低通滤波器,

滤波器 2 采用通带为 2 MHz-10 MHz 的带通滤波器。由于  $f_1$  和  $f_2$  信号带宽的不同，其信号的噪声特性存在差异，因此会导致两台微波频率计数器同步测量的频率值有所不同。使用  $|f_1 - f_2|$  来判断  $f_b$  是否出现错误计数，其判断阈值与被测激光器的频率稳定性和微波频率计数器的闸门时间等因素有关。通常情况下，拍频信号频率值为几十兆赫兹，当设置微波频率计数器的闸门时间为 1 s，建议当  $|f_1 - f_2| > 1$  Hz 时，即认为  $f_b$  出现错误计数，需要剔除相应的测量数据。

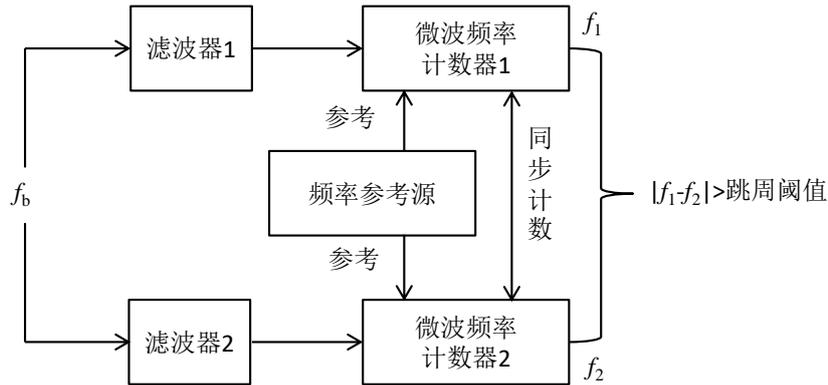


图 15 光拍频  $f_b$  错误计数监测的方法

### C.5.3 光拍频 $f_b$ 测量准确度

由于需要通过微波频率计数器测量光拍频  $f_b$  来评估梳齿光学频率稳定性和 A 类不确定度，因此  $f_b$  测量结果受微波频率计数器频率测量不确定度的影响。按照工作方式不同，微波频率计数器可分为两种基本类型：直接计数（Direct counter）和倒数计数（Reciprocal counter）。直接计数器对闸门时间内的输入信号的周期进行计数并直接显示测量结果，如果微波频率计数器的闸门时间为 1 s，则频率分辨力为 1 Hz。而倒数计数器通过测量输入信号的周期时间然后对其求倒数以获得频率值，其频率分辨力通常以测量位数来表示，即位/秒（digits/s）。

以是德科技（Keysight）公司的微波频率计数器 53230A 为例，根据其产品说明书，单次测量时间分辨力（single-shot time resolution）为 20 ps，频率分辨力为 12 digits/s。另外，53230A 的频率测量不确定度除时基（time base）参考引入的不确定度外，还包括两部分：由测量重复性引入的 A 类不确定度和除时基参考外的所有 B 类不确定度。以 100 MHz 光拍频  $f_b$  值为例，当闸门时间为 1 s 时，后两者的理论计算值分别为  $9.3 \times 10^{-12}$  ( $k = 2$ ) 和  $2 \times 10^{-12}$  ( $k = 2$ )，因此光拍频  $f_b$  的测量不确定度为  $\sqrt{(9.3 \times 10^{-12})^2 + (2 \times 10^{-12})^2} \approx 1 \times 10^{-11}$  ( $k = 2$ )。因此，当使用微波频率计数器测量高稳定度的光拍频  $f_b$  信号时，例如 6.1 节提到的方法二和方法三，其梳齿光学频率稳定性测量结果，以及 A 类不确定度 ( $u_5$ ) 评估结

果可能会受限于微波频率计数器的频率测量不确定度水平。