



中华人民共和国国家标准

GB/T 43736—2024

精密光频测量中光学频率梳性能 参数测试方法

Test method for performance parameters of optical frequency comb in
precision optical frequency measurement

2024-03-15发布

2024-10-01实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 测试环境要求 3

5 测试设备配置要求 3

6 测试方法 3

 6.1 重复频率调谐范围 3

 6.2 载波包络相移频率调谐范围 4

 6.3 载波包络相移频率信噪比 4

 6.4 载波包络相移频率线宽 5

 6.5 单梳齿平均功率 5

 6.6 输出光谱平坦度 6

 6.7 重复频率不稳定性 6

 6.8 载波包络相移频率不稳定性 7

 6.9 光学频率梳梳齿线宽 7

7 测试报告 8

附录 A (资料性) 测试报告记录信息 9

参考文献 11

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分 :标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国量子计算与测量标准化技术委员会(SAC/TC578)提出并归口。

本文件起草单位 :中国科学技术大学、济南量子技术研究院、中国科学院物理研究所、中国计量科学研究院、中国信息通信研究院、华东师范大学、中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所。

本文件主要起草人 :姜海峰、张强、侯磊、王明磊、陈法喜、韩海年、曹士英、沈奇、管建宇、蒋燕义、武腾飞、缪新育。

精密光频测量中光学频率梳性能 参数测试方法

1 范围

本文件描述了精密光频测量应用中光学频率梳性能参数的测试环境要求、测试设备配置要求、测试方法、测试报告。
本文件适用于精密光频测量系统中所用光学频率梳的性能参数测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 15313—2008 激光术语
- GB/T 25915.1—2021 洁净室及相关受控环境 第1部分：按粒子浓度划分空气洁净度等级

3 术语和定义

GB/T 15313—2008 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

- 3.1
重复频率 repetition rate
 f_{rep}
脉冲激光器每秒发出的激光脉冲数。
- 3.2
载波包络相移频率 carrier-envelope offset frequency
 f_o
脉冲激光的载波包络和光载波之间的相位变化所对应的频率。
- 3.3
光学频率梳 optical frequency comb
一种重复频率(3.1)和载波包络相移频率(3.2)精密可控的光学信号产生系统。
- 3.4
重复频率调谐范围 tuning range of repetition rate
 Δf_{rep}
光学频率梳(3.3)重复频率(3.1)的输出频率范围。
- 3.5
载波包络相移频率调谐范围 tuning range of carrier-envelope offset frequency
 Δf_o
光学频率梳(3.3)载波包络相移频率(3.2)的输出频率范围。

3.6

载波包络相移频率信噪比 signal-to-noise ratio of carrier-envelope offset frequency

SNR_{fo}

光学频率梳(3.3)载波包络相移频率(3.2)的信号与噪声的比值。

3.7

载波包络相移频率线宽 linewidth of carrier-envelope offset frequency

$\Delta\nu_{fo}$

光学频率梳(3.3)载波包络相移频率(3.2)的半高全宽。

3.8

单梳齿平均功率 average power of single comb tooth

P_λ

在规定波长条件下,光学频率梳(3.3)单个梳齿功率的平均值。

3.9

输出光谱平坦度 flatness of output optical spectrum

F_λ

在规定波长范围内,光学频率梳(3.3)输出光谱最大功率和最小功率的差值。

3.10

阿伦标准偏差 allan deviation

$\sigma_y(\tau)$ 时长为 τ 的相邻两个取样时间内频率平均值之差的均方根的 $1/2$ 。

注:对于 M 个频率测量数据,阿伦标准偏差按公式(1)计算:

$$\sigma_y(\tau) \approx \sqrt{\frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中:
 $\sigma_y(\tau)$ — 阿伦标准偏差;
 τ — 取样时间;
 y_k — 平均频率偏差;
 M — 频率取样个数。

3.11

重复频率不稳定性 instability of repetition rate frequency

σ_{frep}

光学频率梳(3.3)重复频率(3.1)的随机起伏程度。

注:采用阿伦标准偏差进行表征。

3.12

载波包络相移频率不稳定性 instability of carrier-envelope offset frequency

σ_{fo}

光学频率梳(3.3)载波包络相移频率(3.2)的随机起伏程度。

注:采用阿伦标准偏差进行表征。

3.13

光学频率梳梳齿线宽 linewidth of comb teeth

$\Delta\nu$

在规定的波长和分辨率条件下,光学频率梳(3.3)梳齿的半高全宽。

4 测试环境要求

测试间的环境应保持空气过滤、无尘,残留尘埃应按照 GB/T 25915.1—2021 中定义的 ISO 4 级洁净度要求执行。测试间环境的相对湿度小于 65%,温度为 23℃±3℃,检定时的温度波动应小于 1℃。

5 测试设备配置要求

测量设备应满足以下要求：

- a) 测量设备的量程和准确度满足相应测试要求；
- b) 测量设备的测试波长范围能够覆盖被测光学频率梳波长范围；
- c) 测试时仪器和设备良好接地；
- d) 测试采用的电源电压、纹波及噪声等满足测试设备说明书和光学频率梳的使用要求。

6 测试方法

6.1 重复频率调谐范围

测试光学频率梳重复频率调谐范围,应按以下步骤进行。

- a) 对被测光学频率梳和测试仪器进行预热。
- b) 按图 1 连接测试系统,重复频率信号幅度在 -20dBm~ 0 dBm 范围内,信号在 300 kHz分辨率条件下,信噪比大于 20 dB,其中光学频率梳与频谱分析设备采用 50 Ω 的同轴电缆连接。

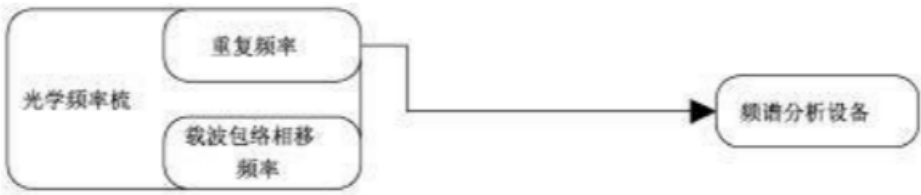


图 1 重复频率调谐范围测试框图

- c) 设置重复频率控制装置,改变被测光学频率梳的重复频率,记录重复频率最大值 f_{rmax} 和最小值 f_{rmin} ,有效位数不小于 2 位,重复测量 $n(n \geq 5)$ 次。按照公式(2)和公式(3)计算 n 次测量数据的均值,得出重复频率最大值 f_{rmax} 和最小值 f_{rmin} ：

$$f_{rmax} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{rmaxi} \dots\dots\dots (2)$$

$$f_{rmin} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{rmini} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

f_{rmax} —重复频率最大值的平均值,单位为千赫兹(kHz)；

n —测量次数；

f_{rmaxi} —第 i 次测量的重复频率最大值,单位为千赫兹(kHz)；

f_{rmin} —重复频率最小值的平均值,单位为千赫兹(kHz)；

f_{rmini} —第 i 次测量的重复频率最小值,单位为千赫兹(kHz)。

- d) 按公式(4)计算重复频率的调谐范围 Δf_{rep} ：

$$\Delta f_{\text{rep}} = f_{\text{rmax}} - f_{\text{rmin}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：
 Δf_{rep} —重复频率调谐范围，单位为千赫兹(kHz)。

6.2 载波包络相移频率调谐范围

测试光学频率梳载波包络相移频率调谐范围，应按以下步骤进行。

- a) 对被测光学频率梳和测试仪器进行预热。
- b) 按图 2 连接测试系统，载波包络相移频率信号幅度在 -20 dBm~ 0 dBm 范围内，信号在 300 kHz分辨率条件下，信噪比大于 20 dB，其中光学频率梳与频谱分析设备采用 50 Ω 的同轴电缆连接。

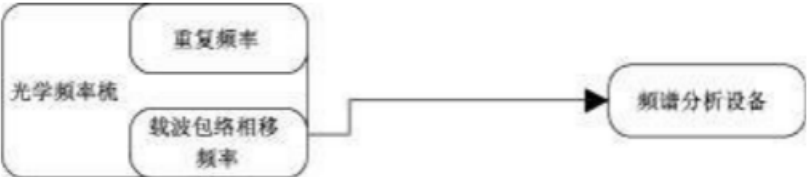


图 2 载波包络相移频率调谐范围测试框图

- c) 设置载波包络相移频率控制装置，改变被测光学频率梳的载波包络相移频率，记录载波包络相移频率最大值 $f_{0\text{max}i}$ 和最小值 $f_{0\text{min}i}$ ，有效位数不小于 2 位，重复测量 n 次($n \geq 5$)。按照公式(5)和公式(6)计算 n 次测量数据的平均值，得出载波包络相移频率最大值 $f_{0\text{max}}$ 和最小值 $f_{0\text{min}}$ ：

$$f_{0\text{max}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{0\text{max}i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$f_{0\text{min}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{0\text{min}i} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：
 $f_{0\text{max}}$ —载波包络相移频率最大值的平均值，单位为千赫兹(kHz)；
 n —测量次数；
 $f_{0\text{max}i}$ —第 i 次测量载波包络相移频率的最大值，单位为千赫兹(kHz)；
 $f_{0\text{min}}$ —载波包络相移频率最小值的平均值，单位为千赫兹(kHz)；
 $f_{0\text{min}i}$ —第 i 次测量的载波包络相移频率的最小值，单位为千赫兹(kHz)。

- d) 按公式(7)计算载波包络相移频率的调谐范围 Δf_0 ：

$$\Delta f_0 = f_{0\text{max}} - f_{0\text{min}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：
 Δf_0 —载波包络相移频率调谐范围，单位为千赫兹(kHz)。

6.3 载波包络相移频率信噪比

在载波包络相移频率未锁定状态下，测试光学频率梳载波包络相移频率信噪比应按以下步骤进行。

- a) 按图 2 连接测试系统，其中光学频率梳与频谱分析设备采用 50 Ω 的同轴电缆连接。
- b) 利用频谱分析设备，设定其分辨率为 300 kHz，对载波包络相移频率信号的峰值功率 $P_{f_{0i}}$ 和距离载波包络相移频率 10 MHz或 1/4重复频率处噪底功率 P_{0i} 进行记录，有效位数不小于 2 位，重复测量 n 次($n \geq 5$)，按照公式(8)和公式(9)计算 n 次测量数据的平均值，得到峰值功率 P_{f_0} 和噪底功率 P_{0i} ：

$$P_{f_0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{f_{0i}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$P_{oi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{oi} \dots\dots\dots (9)$$

- 式中：
- P_{f0} — 载波包络相移频率信号的峰值功率，单位为毫瓦分贝(dBm)；
 - n — 测量次数；
 - P_{f0i} — 第 i 次测量载波包络相移频率的峰值功率，单位为毫瓦分贝(dBm)；
 - P_0 — 载波包络相移频率信号的噪底功率，单位为毫瓦分贝(dBm)；
 - P_{0i} — 第 i 次测量载波包络相移频率的噪底功率，单位为毫瓦分贝(dBm)。

- c) 按公式(10)计算光学频率梳载波包络相移频率信噪比
- $$SNR_{f0} = P_{f0} - P_0 \dots\dots\dots (10)$$

- 式中：
- SNR_{f0} — 载波包络相移频率信噪比，单位为分贝(dB)。

6.4 载波包络相移频率线宽

- 在载波包络相移频率未锁定状态下，测试光学频率梳载波包络相移频率线宽，应按以下步骤进行：
- a) 按图 2 连接测试系统，其中光学频率梳与频谱分析设备采用 50 Ω 的同轴电缆连接；
 - b) 利用频谱分析设备，测试载波包络相移频率信号的半高全宽 Δv_{f0} ，设置频谱分析设备分辨率优于载波包络相移频率信号线宽的 1/3。

6.5 单梳齿平均功率

测试光学频率梳在某一波长条件下单梳齿平均功率，应按以下步骤进行。

- a) 对被测光学频率梳和测试仪器进行预热。
- b) 将光学频率梳与光谱分析仪采用相应波段的普通单模光纤连接。
- c) 设置光谱分析仪分辨率为 0.1 nm，测量光学频率梳输出的完整光谱曲线，完成 n 次光谱测量，其中 $n \geq 5$ 。
- d) 对所测光谱强度做归一化处理，其中光谱强度最强处设置为 1，计算光谱积分面积 S_i ，根据公式(11)计算光学频率梳输出光谱的平均积分面积 S ：

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \dots\dots\dots (11)$$

- 式中：
- S — 光学频率梳输出光谱平均积分面积，单位为纳米(nm)；
 - n — 测量次数；
 - S_i — 第 i 次测量光学频率梳输出光谱积分面积，单位为纳米(nm)。

- e) 采用热敏功率计测量光学频率梳输出功率 P_i ，重复测量 n 次($n \geq 5$)，根据公式(12)，计算光学频率梳平均输出功率 P ：

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \dots\dots\dots (12)$$

- 式中：
- P — 光学频率梳平均输出功率，单位为瓦特(W)；
 - n — 测量次数；
 - P_i — 第 i 次测量光学频率梳输出功率，单位为瓦特(W)。

- f) 根据公式(13)，计算获得功率谱 P_s ：
- $$P_s = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

P_s ——光学频率梳的不同光谱成分的功率谱，单位为瓦特每纳米(W/nm)；

P ——光学频率梳平均输出功率，单位为瓦特(W)；

S ——光学频率梳输出光谱平均积分面积，单位为纳米(nm)。

- g) 从功率谱 P_s 中，读取被测光学频率梳在波长 λ 处光谱强度 $P_{s\lambda}$ ，根据公式(14) 计算波长 λ 下的单梳齿平均功率为 P_λ ：

$$P_\lambda = \frac{P_s \lambda^2 f_{rep}}{c} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

P_λ ——被测光学频率梳波长 λ 处单个梳齿平均功率，单位为毫瓦特(mW)；

$P_{s\lambda}$ ——被测光学频率梳在波长 λ 处光谱强度，单位为瓦特每纳米(W/nm)；

λ ——光学频率梳的测试波长，单位为纳米 (nm)；

f_{rep} ——光学频率梳重复频率，单位为兆赫兹(MHz)；

c ——真空中光速，单位为米每秒(m/s)。

6.6 输出光谱平坦度

测试规定波长范围内，光学频率梳输出光谱平坦度，应按以下步骤进行：

- a) 对被测光学频率梳和测试仪器进行预热；
- b) 将光学频率梳与光谱分析仪采用相应波段的普通单模光纤连接；
- c) 设置光谱分析仪的分辨率，记录测量规定波长范围内光学频率梳输出最大功率值 P_{max} 和最小功率值 P_{min} ；
- d) 按公式(15)计算光学频率梳在该波长范围内的平坦度

$$F_\lambda = P_{max} - P_{min} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

F_λ ——光学频率梳在规定波长范围内的输出光谱的平坦度，单位为分贝(dB)；

P_{max} ——光学频率梳在规定波长范围内的最大功率，单位为毫瓦分贝(dBm)；

P_{min} ——光学频率梳在规定波长范围内的最小功率，单位为毫瓦分贝(dBm)。

6.7 重复频率不稳定性

测试光学频率梳重复频率不稳定性，应按以下步骤进行：

- a) 对被测光学频率梳和测试仪器进行预热，将光学频率梳重复频率和载波包络相移频率锁定；
- b) 按图 3 连接测试系统，其中重复频率信号与频率计数器采用 50 Ω 阻抗的同轴电缆连接；



图 3 重复频率不稳定的测试框图

- c) 利用计数器对重复频率信号 f_{rep} 进行计数；
- d) 频率计数器采用不同于光学频率梳的微波参考源作为参考，该参考信号稳定度应优于光学频率梳射频参考源的稳定度的 3 倍；

- e) 频率计数器门时间设置为 1 s,测量时间长度不小于 5 h;
- f) 对采集获得的重复频率信号 f_{rep} 数据,计算重复频率在平均时间 1 s,10 s,100 s和 1000 s的阿伦标准偏差 $\sigma_{f_{rep}}$ 。

6.8 载波包络相移频率不稳定性

测试光学频率梳载波包络相移频率不稳定性,应按以下步骤进行:

- a) 对被测光学频率梳和测试仪器进行预热,将光学频率梳重复频率和载波包络相移频率锁定;
- b) 按图 4 连接测试系统,其中载波包络相移频率信号与频率计数器采用 50 Ω 阻抗的同轴电缆连接;



图 4 载波包络相移频率不稳定性测试框图

- c) 利用计数器对载波包络相移频率信号 f_0 进行计数;
- d) 频率计数器采用不同于光学频率梳的微波参考源作为参考,该参考信号稳定度应优于光学频率梳微波参考源的稳定度的 3 倍;
- e) 频率计数器门时间设置为 1 s,测量时间长度不小于 5 h;
- f) 对采集获得的载波包络相移频率信号 f_0 数据,计算载波包络相移频率在平均时间 1 s, 10 s,100 s和 1 000 s的阿伦标准偏差 σ_{f_0} 。

6.9 光学频率梳梳齿线宽

测试规定波长和分辨率条件下的光学频率梳梳齿线宽,应按以下步骤进行:

- a) 对被测光学频率梳和测试仪器进行预热;
- b) 按图 5 连接测试系统,光学频率梳和超稳激光进行拍频,将拍频信号通过 50 Ω 阻抗的同轴电缆与频谱分析设备连接;
- c) 利用频谱分析设备,对拍频信号进行线宽测量,分辨率小于线宽的 1/3或者设定为最高分辨率,拍频信号线宽就是光学频率梳梳齿线宽 $\Delta\nu$ 。

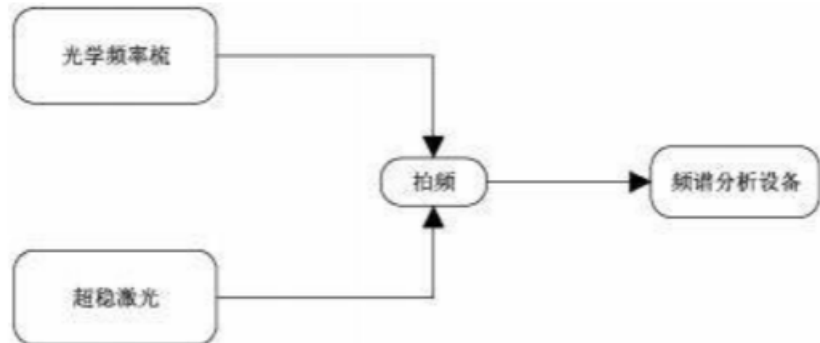


图 5 光学频率梳梳齿线宽框图

7 测试报告

测试报告应包含以下内容：

- a) 测试报告的唯一编号；
- b) 测试光学频率梳型号；
- c) 测试日期；
- d) 测试内容及要求；
- e) 测试仪器的型号和工作条件；
- f) 测试结果以及必要的结果说明；
- g) 测试人及审核人签字；
- h) 测试实验室的名称和单位地址；
- i) 测试报告页码。

测试报告记录内容见附录 A。

附 录 A
(资料性)
测试报告记录信息

测试报告记录信息见表 A. 1。

表 A. 1 测试报告记录信息

序号	项 目	内 容	
1	报告编号		
2	测试光学频率梳型号		
3	光学频率梳状态		
4	测试内容与要求		
5	测试仪器	频谱分析仪型号	
		光谱分析仪型号	
		功率计型号	
		频率计数器型号	
		射频参考源型号	
6	测试环境	相对湿度	
		温度	
		温度波动范围	
		洁净度	
7	测试结果		
7.1	重复频率调谐范围		
7.2	载波包络相移频率调谐范围		
7.3	载波包络相移频率信噪比		
7.4	载波包络相移频率线宽	光谱分析设备分辨率	
		载波包络相移频率线宽	
7.5	单梳齿平均功率	波长	
		单梳齿平均功率	
7.6	输出光谱平坦度	光谱分析设备分辨率	
		输出光谱平坦度	
7.7	重复频率不稳定性	计数器类型	
		阿伦标准偏差(1 s平均时间)	
		阿伦标准偏差(10 s平均时间)	
		阿伦标准偏差(100 s平均时间)	
		阿伦标准偏差(1 000 s平均时间)	

表 A.1 测试报告记录信息 (续)

序号	项 目	内 容	
7.8	载波包络频率不稳定性	计数器类型	
		阿伦标准偏差(1 s平均时间)	
		阿伦标准偏差(10 s平均时间)	
		阿伦标准偏差(100 s平均时间)	
		阿伦标准偏差(1 000 s平均时间)	
7.9	光学频率梳梳齿线宽	频谱分析设备的分辨率	
		波长	
		光学频率梳梳齿线宽	
测试人姓名：测试单位联系电话： 测试单位地址：审核人姓名： 测试单位(公章)：测试日期： 年 月 日 报告书共 页			

参 考 文 献

- [1] IEEE 1139—2022 DefinitionsofPhysicalQuantitiesforFundamentalFrequency and Time Metrology—
Random Instabilities
-