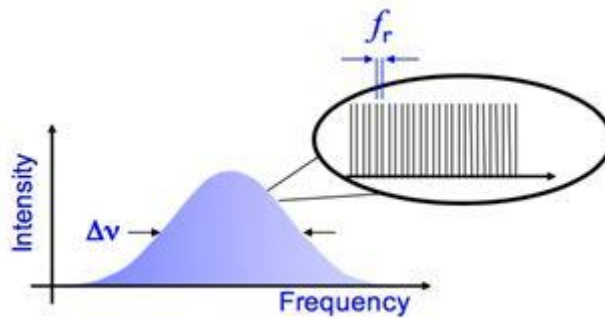


经验 | 怎样得到稳定的光学频率梳?

光学频率梳是什么



现实中的梳子（上），离散的且等间距频率的像梳子一样形状的光谱（下）

光学频率梳就像是一把拥有精密刻度的光尺，一般的仪器以毫米、毫秒为单位，而光学频率梳的精确度，在长度的测量上胜过纳米，在时间上则胜过飞秒、甚至达到阿托秒。

频率梳提供的是波长尺，可以在非常多的波长上进行精密的频域与时域校准，其精度是前所未有的。频率梳研究是下一代原子钟、天文观测、阿托秒光学物理、精密光谱测量、高速数据传输等领域的突破口。

稳定的光学频率梳出现以后，超精确测量得以实现。因此**稳定光学频率梳**的产生成为国内外专家学者的研究热点。

构建光学频率梳的关键步骤

构建光学频率梳的关键一步就是稳定梳齿间隔，连续抽运激光器的主动锁模，是将电光或声光调制器插入其谐振腔得以实现的。

光学频率梳是由锁模激光器产生，其光学载波由单一频率的光构成，这种光的频率在光谱上显示为一条竖线，表示只存在该频率的光波。序列光的频谱不是以载波频率为中心向两边连续延展，而是形成许多离散的频率。这个频谱分布很像梳齿，彼此间隔与激光器的重复频率精确相等，光频梳系统在频域上产生等间隔的光频齿（Comb Line）。通常情况下，前后两个相位会发生一些不可预知且固定不变的偏移，这时，梳齿的频率会偏离重复频率的整数倍，出现零点漂移，使得梳齿频率不可确定，因此稳定梳齿间隔使得光梳真正的可以被用作“光尺”。

对于基于电光调制器的光频梳，其梳齿间隔的调谐范围受限于所用调制器的带宽。飞秒锁模激光的光频梳的频域关键参数包括表征梳齿间隔的重复频率和表征零阶梳齿频率的偏置频率。任何一个梳齿的频率都可以通过其阶数乘以重复频率，再加上偏置频率进行计算。为实现上述高精度测量，飞秒光频梳的重复频率稳频控制必不可少。同时，为精确了解飞秒光频梳的时域状态，其梳齿间隔的稳定显得尤为重要。光频梳系统在频域上产生等间隔光频齿，其每一根光频齿的频率如下式表示：

$$f_n = n f_{\text{rep}} + \Delta$$

式中， f_{rep} 为锁模激光器激光脉冲的重复频率，而 Δ 为偏差频率， n 为整数。

光频梳最大的功能在于可将难以精确测量的未知光频 以下式表示：

$$f_u = n f_{\text{rep}} \pm \Delta \pm f_{\text{beat}}$$

式中， f_{beat} 为 和第 n 根光梳齿的拍频，其必小于 f_{beat} 。

如果确定了光频梳的不同频率之间的相对稳定相位关系，就会导致时域上的脉冲极其窄而强，即超快激光。时域上越窄，锁模的效果越好；锁模的效果越好，时域上越窄，两者是等价的。

目前常用的方法是对光频梳的梳齿频率间隔进行连续的相干调谐，通过改变锁模激光器腔内的可调节透镜的位置，从而改变腔长，达到频率调谐的目的，构建时域与频域兼具频率高稳定度的飞秒光学频率梳，将锁模激光器的输出序列的重复频率信号与载波包络相位频率信号锁定，即保证频率梳的每根梳齿与梳齿的间隔稳定，进而保证在整个调谐过程中可以保持梳齿间稳定的相干性。

获得稳定频率梳的方法

下文以加州大学的高级研究员 Dr. Shu-wei Huang 采用窄线宽连续激光器抽运克尔微谐振腔为例，介绍得到稳定光学频率梳的方法。

✓ Photonics Requirements Met

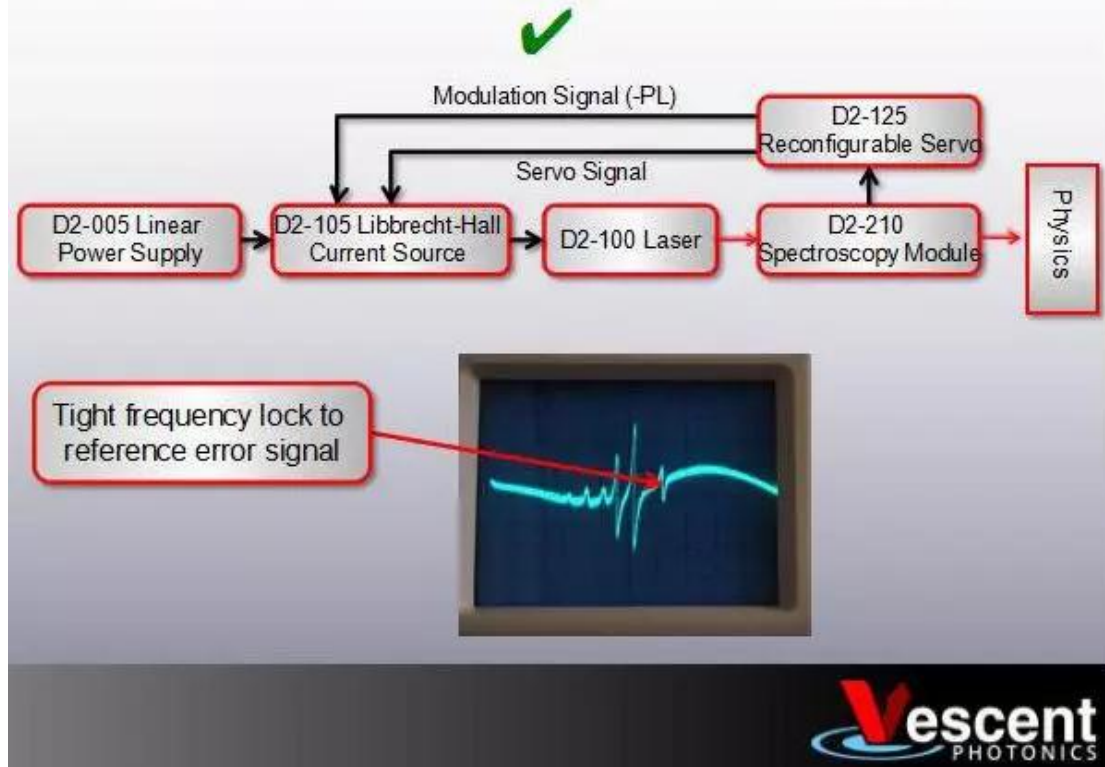


图 美国加州大学的 Dr. Shu-wei Huang 采用 Vescent D2-125 可重构伺服器实现了光学频率梳的稳定输出。该图为系统图，基本简要显示了 Vescent D2 系列激光控制系统对单个激光器的峰值锁定以及边带锁定的所需的相关仪器及技术路线。需要 D2-105 对 D2-100 激光器进行温度电流控制，使用 D2-125 对单个激光器进行峰值或边带锁定，并由 D2-210 为 D2-125 提供参考频率，且均由 D2-005 为控制器及锁频器提供电源供应。

Dr. Shu-wei Huang 采用 Vescent D2-125 可重构伺服器稳定了频率梳的梳齿间隔，其光学频率梳基于微腔激光器。该微谐振腔设计用于输出 1600 nm、17.9 GHz 的自由光谱。频率梳的两个自由度：梳齿间隔与载波包络相位频移分别独立锁相到两个微波合成器。微谐振腔的热容只有 $2 \times 10^{-15} \text{m}^3$ ，梳齿间隔极易受到抽运功率扰动、温度变化、光学准直漂移等技术性噪音的影响。因此，带宽 500 kHz 以上的伺服循环对于稳定微谐振器频率梳的梳齿间隔是非常关键的。

通过高速光电探测器（EOT，ET-3500）测量 17.9 GHz 的梳齿间隔，并采用低噪前置放大器进行了放大。

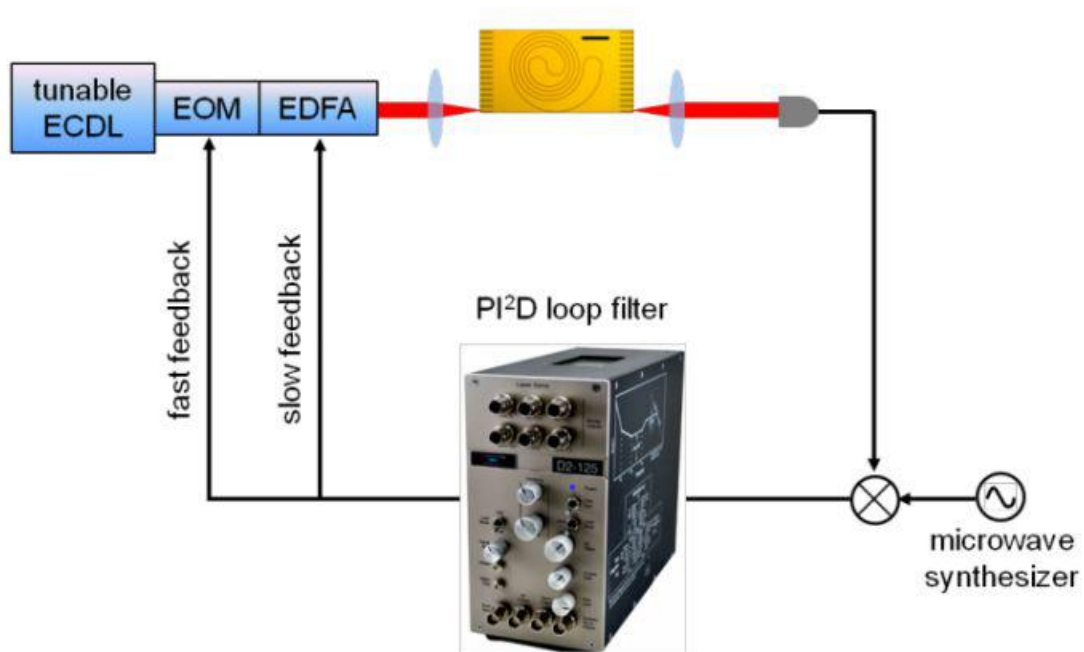


图 1 PI²D 伺服循环过程

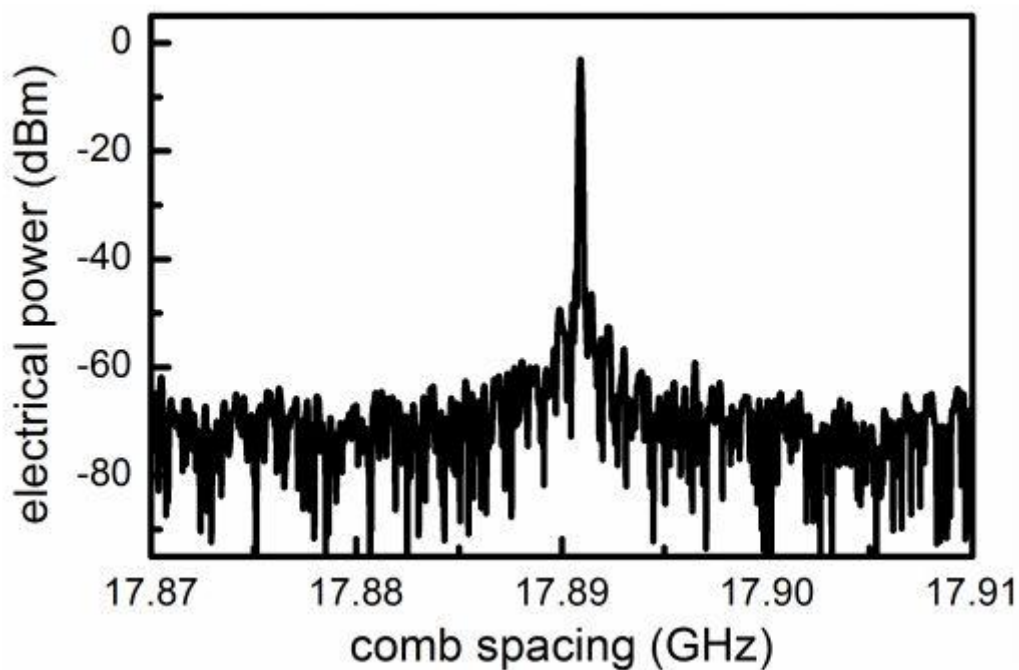


图 2 解调后的梳齿间隔拍音信号

图 2 是解调后的梳齿间隔拍音信号，可见信噪比高于 60 dB，分辨率 100 kHz。该电学信号与微波合成器（Gigatronics 905）采用双平衡混频器（Pasternack PE8653）进行混频，缩混信号经过 2.5 MHz 低通滤波（Minicircuits BLP-1.9+）后作为参考信号，反馈给 PID 伺服循环（Vescent Photonics D2-125）。

为了得到最好的噪声抑制，他们将第一级积分器的频率设置为 1 kHz，第二级积分器的频率设置在 200 kHz。为了得到更加稳定的伺服循环，他们将衍生控制频率设置在 500 kHz，微分增益设置为 10 dB。伺服输出通过光纤光电调制器接收，以此来控制掺铒放大器（EDFA）的输入功率，EDFA 是用来抽运微谐振腔的。EDFA 在电流控制模式下运行，输入调制可以直接转换成输出功率。对抽运功率的调制是通过热扩散、热光效应、非线性相位累积来控制梳齿间隔的有效途径。图 3 展示了微谐振腔的光学频率梳自由运行（红色线）与稳定状态（黑色线）下的 AC 错误信号。

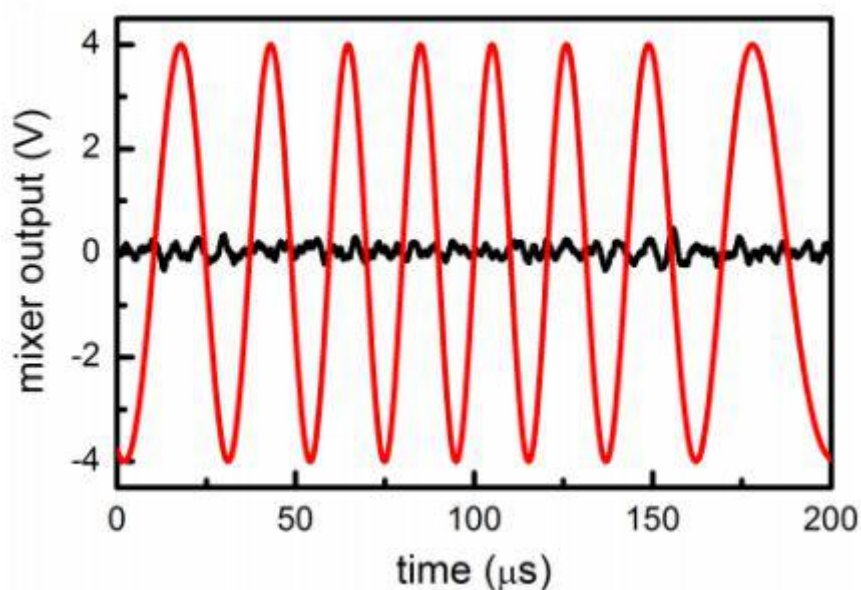


图 3 光学频率梳自由及稳定状态错误信号

由于光学准直的漂移，伺服输出的平均水平会持续增加，直到 10 分钟后失锁。因此，他们采用 D2-125 伺服器的第二路伺服输出进行了慢伺服。增益设置为 1s，通过 DIP 选择增益系数。第二路伺服输出用于调制 EDFA 的驱动电流，这延长了数个小时的稳定锁定状态。

图 4 展示了在自由出射（黑色空心方块）与稳定梳齿间隔（蓝色实心方块）条件下的阿伦方差，可见梳齿间隔的主动伺服循环相比于自由出射提高了大于 5 个数量级的稳定性。

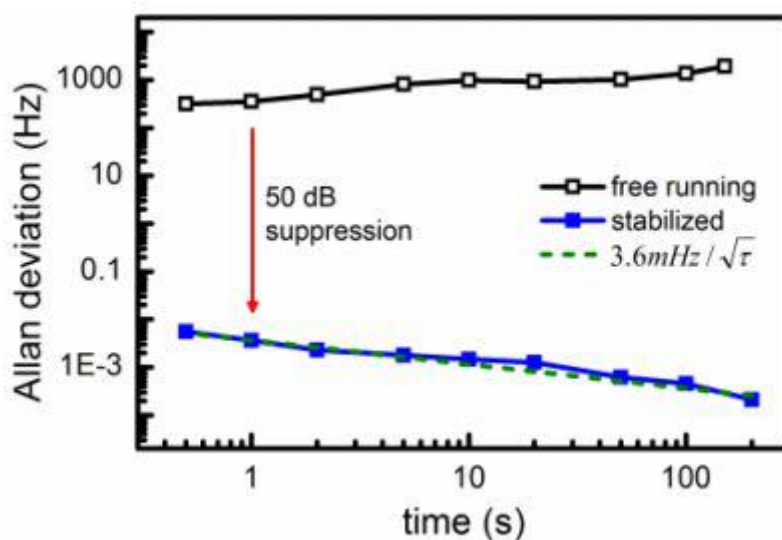


图 4 时域阿伦方差图

结论

随着光电子行业发展，自锁定技术能够实现对外部的环境温度与振动具有自反馈调节的能力，而 Dr. Shu-wei Huang 使参考信号反馈给 Vescent D2-125PID 伺服循环达到稳定梳齿间隔的目的，实验证明梳齿间隔的主动伺服循环相比于自由出射提高了大于 5 个数量级的稳定性。

稳定的梳齿间隔使得光梳真正的可以被作为“光尺”使用，同时使得精确测量连续波激光器的频率就变得轻而易举了。光梳的这些优点使得时间标准从微波向光学转变。