

可调谐外差式激光偏频锁定

廖世强 卞淑姮 赵家铭 王玉珠

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文提出一种可调谐外差式激光偏频锁定方法, 讨论了这种技术在频域内测量激光器瞬稳以及不同频谱振荡的激光器之间进行锁定的可能应用。给出了两台选支 CO₂ 激光器上锁定实验的结果。考虑了本振频率不稳定性对锁定精度的影响。

Heterodyne bias frequency-locking of tunable lasers

Liao Shiqiang, Bian Shuheng

Zhao Jiaming, Wang Yuzhu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: We present here a new method for heterodyne bias frequency locking of tunable lasers and give the expression of the locking precision caused by the frequency instability of local signal source. In the experiment we use two CO₂ lasers locked each other, and discussed the potential application of this technique to the measurement of short-term frequency stability of laser in different laser frequency spectra.

一、引言

在高精度稳频激光器中常需要在激光腔上加一个低频调制, 因此输出讯号中总是含有调制频谱, 在要求频谱很纯的应用中, 如激光光谱、光频测量等, 都不宜直接使用这种稳频激光器的输出讯号, 而要求有另一台激光器相对于稳频激光器进行偏频锁定, 以消除其中的调制频谱。这种偏频锁定一般是固定频差的^[1]。我们提出一种可调谐的外差式偏频锁定, 在两台选支 CO₂ 激光器上进行了偏频锁定, 证明它具有很高的锁定精度。

二、工作原理

假定两台激光器在同一谱线上振荡, 它们的增益曲线带宽为 $4f$ 。第一台激光器是稳频激光器, 稳频中心频率为 f_1 。第二台是未稳频激光器, 输出频率为 f_2 。现在要求第二台激光器相对于第一台激光器有一个固定偏频值, 即 $|f_1 - f_2|$ 。显然必须满足条件 $|f_1 - f_2| < 4f$ 。只要考虑选用一个鉴频器, 它的鉴频中心频率为 f_D , 总可以实现将第二台激光器偏频锁定于 f_1 上, 满足条件:

收稿日期: 1983年1月3日。

$$|f_1 - f_2| = f_D \quad (1)$$

这就是目前常用的偏频锁定方法。

设想选择这样一种鉴频元件，它的鉴频中心频率 f_D 远小于激光器的线宽 Δf 。那么就可以再引进一个本振讯号，它的频率为 f_L ，使得满足下面的关系：

$$f_L - |f_1 - f_2| = f_D \quad (2)$$

这时如果改变 f_L 的数值，就可以连续地改变被锁定激光器输出讯号的频率 f_2 ，在增益线宽内取任意值。图 1 给出了本文实验的方框图。

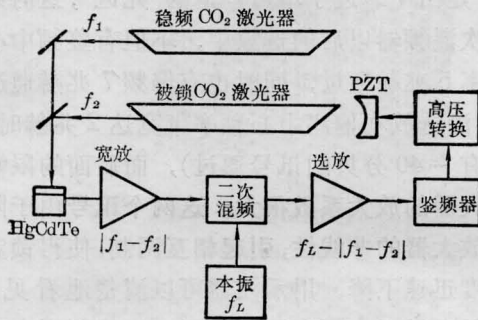


图 1 外差式可调偏频锁定原理图

这一方案有两个不可调谐的“死区”。从图 1 可见，第二次混频器后的选频放大器有一个带宽 Δf_D ，对 f_L 有一个限制，不能取太小数值，如果 f_L 小到接近 Δf_D 时，就会出现 $|f_1 - f_2| \approx f_D$ 的情形，于是 $|f_1 - f_2|$ 将通过选放，造成第一次混频讯号被鉴频器识别，使得第二台激光器被第一台激光器直接锁定，本振失去作用。

另外也不能有 $f_L = f_D$ 情形。由 (2) 式这时要求 $|f_1 - f_2| = 0$ ，即零拍状态，这时本振讯号 f_L 被鉴频器识别， f_2 直接受到本振 f_L 的鉴频特性所牵引，失去了偏频锁定的意义。

外差偏频锁定的精度受到激光器的频率稳定性、本振讯号源稳定性、鉴频元件的稳定性以及环路特性等因素的限制。如果只考虑本振及鉴频元件不稳定性对偏频锁定精度的影响时，得到锁定精度的表示式为：

$$S = S_L \frac{f_L}{f} + S_D \frac{f_D}{f} \quad (3)$$

其中 S 为偏频锁定精度； f 为激光器输出频率； S_L 为本振讯号的频率稳定度； S_D 为鉴频元件的中心频率稳定度。

由于 S_D 总是比较高， f_D 选得也不很大，则 (3) 式中右边第二项可以忽略不计。我们用两台 CO_2 激光器作实验，要求 S 在 10^{-11} 量级，选 f_L 在 $10 \sim 30$ 兆赫内可调，则要求本振讯号频率稳定度仅为 10^{-5} 量级，用一台实验室使用的一般可调讯号源，就能完成高精度的外差偏频锁定，得到一个不带调制谱的高稳定性的可调谐激光器。

三、环路中电路的特点及性能

整个环路系统选择适用于 CO_2 激光器工作。第一次混频器用光伏型 $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ 红外探测器，探测率 $D_{\lambda p}^*$ 为 6.2×10^9 厘米·赫^{1/2}/瓦，响应率 $R_{\lambda p}$ 为 2.2×10^3 微伏/微瓦，工作在 77 K。第一次混频级输出差频从零拍到几十兆赫的中频。第二次混频级采用了平衡混频电路^[2]，本振讯号来自一个可调讯号源。混频线路见图 2。

第二次混频器的输入级是一个带有 LC 滤波器的射极跟随器。LC 滤波器的作用是将等于鉴频器中心频率 f_D 的差频分量滤掉，只让不等于 f_D 的差频讯号通过。第一次差频讯号和本振讯号在一个差分式平衡混频器上混频，得到一个由 LC 组成的选频回路进行滤波和放大。LC 回

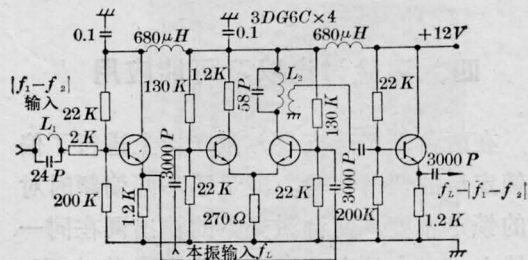


图 2 二次混频及选频级电路

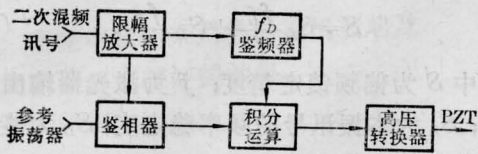


图3 鉴频、鉴相器产生偏频误差讯号及控制电路的原理图

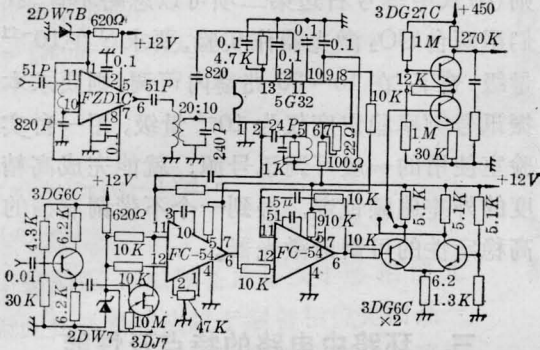


图4 偏频锁定线路图

路的中心频率调得与鉴频器的工作频率 f_D 一致。图3是鉴频、鉴相器及锁定环路的方框图。图4是线路图。

在鉴频器输出误差讯号的同时，还有一个鉴相器，它将差频和一个更高稳定度的讯号源进行相位比较，得到相位误差讯号。这两种误差讯号一同输到积分放大器的两个输入端，用以获得高精度锁定。只有当激光器的短期稳定度很高，在鉴频器已经锁定的条件下，锁相才能实现。实验中当取样时间很短，为 10^{-2} 秒，鉴频锁定精度不高于 10^{-12} 时，就不能用鉴相器，但不会影响环路正常工作。鉴相器是一个场效应管组成的相位开关，鉴频器为 5G32 集成组件。偏频讯号经过限幅放大后，变成了方波。

四、实验讨论以及可能应用

在两台光栅选支 CO_2 激光器上进行了偏频锁定后的调谐实验。测量了不同偏频时对应的锁定精度，两台激光器的输出调在同一支线上。自由状态下激光器的频率稳定度，相互比较取样时间一秒时为 $1 \sim 2 \times 10^{-9}$ 。鉴

频器中心频率 f_D 为 5 兆赫。前级宽放的放大系数为 5×10^2 ，通带为 2~16 兆赫，等效噪声系数约为 20。第二次混频后的选放中心频率调得与鉴频器中心频率一致，带宽为 0.2 兆赫。本振讯号源的频率稳定度为 6×10^{-5} 。图5是取样时间为 1 秒，偏频锁定后从 7 兆赫调谐到 17 兆赫测得各点对应的锁定精度。这些测量点数值不是平坦一致，在 9 至 15 兆赫区域内锁定精度在 5×10^{-12} 以内。在低端和高端锁定精度都变差。

当偏频低到 7 兆赫时，锁定精度下降很快，是由于靠近了不可调谐的“死区”，这时第二次混频器以后的选放中，不但有鉴频中心频率 5 兆赫通过，同时也有偏频 7 兆赫通过（实测选放在偏离中心频率带宽达 2 兆赫时，仍有 -40 分贝的讯号通过），而后面的限幅放大器的放大系数很大。这两个讯号由于限幅放大器的非线性，引起相互调制，使得锁定精度迅速下降，用示波器可以清楚地看见 7 兆赫讯号上有幅度调制波形。当偏频再小于 7 兆赫，就进入了锁定的“死区”，本振 f_L 不再能调谐偏频。由鉴频器直接将两台激光器偏锁在 5 兆赫中心频率上。这时将本振讯号幅度降到零，测得 5 兆赫的锁定精度 1 秒取样时为 1×10^{-12} ，10 秒为 8×10^{-13} 。

当偏频高于 16 兆赫时，锁定精度同样变坏，引起的原因与低频区的情况不相同，主要

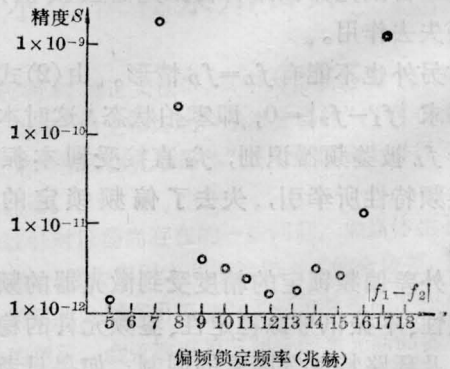


图5 不同偏频对应的锁定精度 (测量取样时间为 1 秒)

是由于前级宽放的带宽不够，而且噪声系数太大，引起偏频锁定精度极快地下降。

为了在更宽范围内得到高精度可调谐偏频锁定，首先应尽可能将鉴频器的中心频率选得很低，使锁定的“死区”变小，这样可以展宽低频区的可调范围。另外需要一个低噪声宽带放大器，提高高频区的讯噪比，以增宽高频区的可调范围和锁定精度。

图 6 为不同取样时间的偏频锁定精度的测量结果，测量是在偏频为 9 兆赫处进行的。曲线的形状与高稳定性讯号源在不同取样时间的频率稳定度所对应的曲线是一致的。在一秒取样以后，精度趋于一个常数值。更长的取样时间没有进行测量。

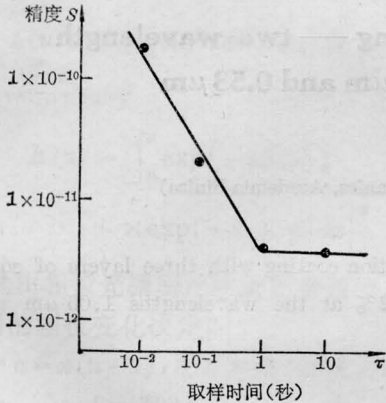


图 6 不同取样时间测量的锁定精度

实验结果证实，外差可调谐偏频锁定是可行的，具有实用价值。

作为一种应用前景，可用于测量激光器的频域内的瞬稳。图 7 是原理图。两台被测激光器经过偏频锁定，同时相对于一高稳定性参考讯号进行“松锁相”，即选择环路的时间常数远大于瞬稳的取样时间，这时激光器

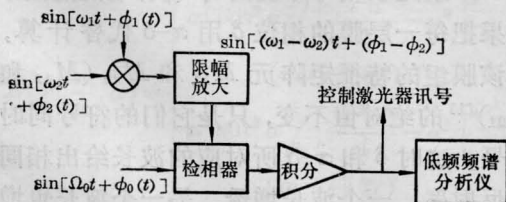


图 7 激光器的瞬稳测量方框图

的振荡相位在瞬时取样时间内不受控制。当 $\Omega_0 = (\omega_1 - \omega_2)$ 时，得到检相输出

$$E_d \propto \sin[\phi_1(t) - \phi_2(t) - \phi_0(t)].$$

如果满足条件：

$$\frac{d\phi_0}{dt} \ll \frac{d\phi_1}{dt} \quad \text{及} \quad \frac{d\phi_0}{dt} \ll \frac{d\phi_2}{dt},$$

这时可直接测量 E_d 的频谱密度 $S_\phi(\omega)$ ，再由谱密度函数与方差的对应关系，即可求出两台激光器的相对瞬间稳定性^[3]。

作为另一种应用前景，从 (2) 式可知，如果 f_1 和 f_2 对应于不同类型的激光器谱线，这时只要 $|f_1 - f_2|$ 差频落在微波频段内，就可以实现外差偏频锁定，图 8 给出一种可行方案，将甲烷吸收稳定的 He-Ne 激光器，偏频锁定一台 CO₂ 激光器。CO₂ 激光器的三次谐波，He-Ne 激光和微波讯号同时在宽波段二极管 MOM 上差拍，产生伺服环路要求的低频鉴频讯号，再将伺服讯号反馈在 CO₂ 激光器的 PZT 上。这一方案的特点是将 He-Ne 激光器的高稳定性转移到 CO₂ 激光器上，如果要求 CO₂ 激光器频率稳定到 1×10^{-12} ，对微波源只要求稳频到 2×10^{-9} ，这是不难达到的。关键是需要一个灵敏度很高的宽频混频器件，如 MOM 点接触二极管。无论如何转移频率稳定性的稳频技术是十分诱人的。

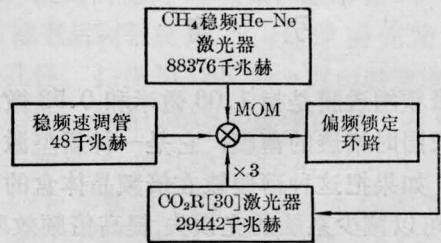


图 8 不同谱线输出的激光器之间外差偏频锁定

参 考 文 献

- [1] D. C. Wilson, W. R. C. Rowley; *J. Sci. Inst.*, 1966, **43**, 314.
- [2] R. D. Middlebrook; *Differential Amplifiers*, N. Y. John Wiley & Sons Inc., 1963, p. 25.
- [3] L. S. Cultler, C. L. Searle; *Proc. IEEE*, 1966, **54**, 136.