

一种激光稳频电路

丁 籍 平

(北京科学仪器厂)

A circuit for laser frequency stabilization

Ding Jiping

(Beijing Scientific Instrument Factory)

Abstract

The characteristics of the error signal in a laser frequency stabilizer are discussed. A new method for controlling the length of laser cavity is presented. The relative stability for the two-frequency laser stabilizer is up to 5×10^{-10} .

一、引 言

单模 He-Ne 激光器的激光频率由谐振腔的一个腔频率决定,

$$\nu = N \frac{c}{2nL} \quad (1)$$

式中, c ——真空中的光速; n ——谐振腔内介质的折射率; L ——谐振腔几何长度; N ——纵模序数。

N 是恰好使频率 ν 处在激光器增益带宽内的某个正整数。当 N 值一定时, nL 的变化可使激光频率在增益带宽内连续改变, 常温下这个变化范围大约为 1.5 千兆赫。如果 nL 的变化超过半波长 $\lambda/2$, N 值将加 1 或减 1, 激光频率还要发生突变。因此, 为了获得稳定的激光频率, 必须用一个自动调节系统把它锁定到某个不变的参考频率上去。

n 和 L 都可以改变激光频率, 稳频器中常用压电陶瓷作为腔长 L 的控制手段。压

电陶瓷上所需的电压变化范围一般在 0~1 千伏左右。

锁定后激光频率的稳定性取决于鉴频方式和稳频器的控制精度。而反映激光频率及参考频率差别的误差信号的检出和处理是稳频电路的核心。

二、误差信号的特征 和控制方式

无论采用何种方式鉴频, 在误差信号已等于零的锁定点附近 $e \sim \nu$ 的变化规律都具有图 1 所示的特征。

(1) $e=0$ 的点有两类, 按 $de/d\nu$ 的符号区分。其中一类是我们需要的锁定点。

(2) 在锁定点 ν_0 附近, e 的符号相反, 并有一个单调变化的区间 Δ 。

(3) 符号相反的区域大于单调变化的区间, 即 $\delta > \Delta$ 。

收稿日期: 1979 年 3 月 28 日。

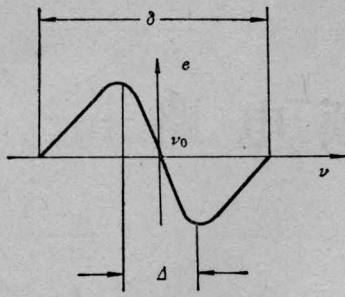


图 1

常见的稳频电路大多同时把误差信号的大小和符号用作控制信息，工作在 Δ 区内。本文提出的另一种控制方式把可供利用的误差区间扩大为 δ ，具体方案参看图 2。

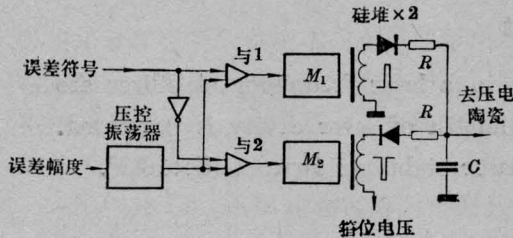


图 2

M_1 、 M_2 为两个他激式间歇振荡器，两者之一每接受一次触发，在其变压器输出端产生一个高压脉冲。与门 1、2 受到由误差符号决定的两个电平的控制，这两个电平的作用相反。触发脉冲由压控振荡器产生，脉冲的重复频率比例于误差信号幅度。

在与门 1 开通期间，电容 C 在正脉冲的作用下以步进方式充电，使压电陶瓷的控制电压上升；在与门 2 开通期间，电容 C 在负脉冲作用下放电，控制电压逐步下降。在脉冲间隔期内，电容 C 上的电压基本上保持不变。

高压脉冲幅度在 2 千伏以上，适当选择脉冲宽度和电路参数可使电容 C 上每一步电压变化足够小，适合所要求的控制精度。

箝位电压的作用是限制控制电压变化范围，保证调节的直线性。

这种控制方式有以下几个优点：

(1) 锁定后激光频率在锁定点左右摆动，没有单方向残差。

(2) 简化了控制条件，便于实现自动调谐。

(3) 提高了系统抵抗瞬时扰动的能力，特别适合于窄带鉴频。

(4) 误差信号大小通过脉冲的重复频率反映，缓冲了系统响应速度与带宽的矛盾。在一定条件下，允许进一步压缩带宽抑制噪声，提高锁定精度。

(5) 电路工作可靠。电压调节范围扩大到几千伏，技术上没有困难。

三、一个双频激光稳频电路

双频激光的频率锁定常用外调制方式取得误差信号。当以电光晶体 KD^*P 或 LN 作为调制器时，作者导出误差信号取如下形式：

$$e = K(L^2 - R^2) \sin 2\theta \cos(2\Delta\varphi_0 + \alpha) \times J_1(2\Delta\varphi_m) \sin \Omega t \quad (2)$$

式中， K ——比例常数； $L^2 - R^2$ ——左右圆偏振光强度之差； θ ——调制器检偏振片光轴与晶体感应主轴之一的夹角； $J_1(2\Delta\varphi_m)$ ——宗数为 $2\Delta\varphi_m$ 的第一类贝塞耳函数； $\Delta\varphi_0$ 、 $\Delta\varphi_m$ ——调制电压直流分量和交流振幅对应的相位变化； α ——晶体内应力引起的附加相移； Ω ——调制电压角频率。

该式说明，在其它因子是不为零的常数时，误差信号幅度与分裂后的左、右圆偏振光光强度差成正比。

对于使用环状永久磁铁作磁场的双频激光器，由于磁场不均匀，分裂后的光强频率曲线不再有兰姆凹陷，若磁场强度适当， $e \sim \nu$ 曲线也是图 1 所示的形状。图 4 中标有 I 字的锁定点为单纵模锁定点， II 类点为双纵模锁定点。

在 I 类锁定点上，左、右圆偏振光的腔频率稍有不同，它们的平均值与参考频率（分裂前 Ne 原子谱线中心频率）重合。

图3是一个采用前述控制方式,带自动调谐的双频激光稳频器。

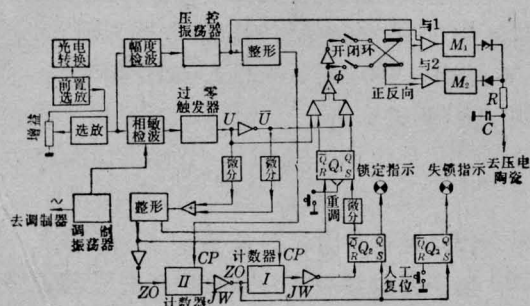


图 3

如图所示,正比于左、右圆偏振光光强度差的交流误差信号经过两级选频放大加到幅度检波器和相敏检波器上去整流,变成直流误差信号。相敏检波的输出与过零触发器的“零”电平比较,得到只反映误差符号的控制电平。在双频激光的特殊情况下,与图1所示的 $e \sim \nu$ 曲线对应,过零触发器输出电平 U 与腔长 L 的关系如图4所示。

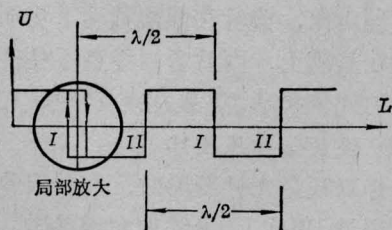


图 4

U 电平和它的反相信号 \bar{U} 通过异或逻辑电路与触发器 Q_1 的状态比较

$$\phi = U\bar{Q}_1 + \bar{U}Q_1 \quad (3)$$

再经过正反向开关控制着与门1和与门2。压控振荡器的触发脉冲也同时加到与门1、2上。

幅度检波器的输出电压控制着压控振荡器的频率,误差信号越小,触发脉冲重复频率越低,电容 C 充电或放电的速度越慢。

假设腔长 L 在系统闭环前不在锁定点上,过零触发器输出电平 U 为某个一定的电平。系统闭环后 L 在这个电平的 control 下将

发生变化。 L 的变化方向(朝向I类或II类锁定点)可以人为地用正反向开关选择。当 L 变化到经过锁定点时, U 电平翻转,使 L 朝相反方向变化。这时, L 再一次经过锁定点, U 电平又翻回原来的电平,重复前面的过程。因而,腔长 L 最后被动态地锁定到这一点上,保持误差信号的大小在过零触发器阈值的半宽度上变化。

过零触发器的来回翻转可用作系统锁定的标志。这里把它微分,整形后送给10进制的MOS计数器I的CP端进行计数,用它的进位(JW)脉冲将触发器 Q_2 置“0”,发出锁定指示信号。

与此同时,还把它送到100进制的MOS计数器II的“ZO”端把后者不断地清除。这里人为地规定了:如果过零触发器两次翻转之间的触发脉冲数超过100,作为失锁处理。当计数器II有进位脉冲输出时,触发器 Q_2 、 Q_3 被置“1”,就解除锁定指示,并发出失锁报警信号。

因为系统具有自动调谐功能,失锁报警信号不应在重新锁定后自动解除,所以触发器 Q_3 要靠人工复位,以便“记住”系统在某一时间内是否发生过失锁或“跳模”。

自动调谐的逻辑思想是:在系统已经锁定的条件下,当腔长的变化超出压电陶瓷所能补偿的范围时,自动地把压电陶瓷长度朝相反方向改变 $\lambda/2$,锁定在另一个纵模序数上。

这一功能的实现过程如下:系统锁定时, U 电平的来回翻转使触发器 Q_1 保持在“0”状态,如前所述,计数器I的进位脉冲把 Q_2 也置成“0”状态。发生失锁时, Q_2 被置“1”, \bar{Q}_2 有一负跳变,这个负跳变随即把 Q_1 也置“1”。 Q_1 的翻转改变了与门1、2上的控制电平,使压电陶瓷上的控制电压按与失锁时的相反方向变化,腔长趋向于最近的另一类型锁定点。值得注意的是 L 在通过该点时,过零触发器也有一次翻转。可是在下一个触发脉冲到来

之前,这个翻转已把 Q_1 复位,与门 1、2 上的控制电平和原来一样。因而腔长不会在这一点锁定,继续沿着原来的方向变化,直到重新锁定在下一个同类锁定点上。

下面是该稳频器的主要技术参数,为了兼顾单频激光稳频,调制频率选得比较低。

- | | |
|-----------------|------------------------|
| (1) 调制频率 | 1 千赫 |
| (2) 调制电压幅度 | 400 伏 |
| (3) 选频放大器带宽 | 10 赫 |
| (4) 选放中心频率和振荡频率 | |
| 相对稳定性 | $\Delta f/f < 10^{-3}$ |
| (5) 放大器电压增益 | 1.5×10^6 |
| (6) 放大器噪声水平 | 0.05 微伏 |
| (7) 过零触发器阈值 | 0 ± 0.1 伏 |
| (8) 控制电压范围 | 0~1 千伏 |
| (9) 每个脉冲电压变化 | ≤ 0.1 伏 |
| (10) 脉冲重复频率 | 20~200 赫 |

四、实验情况

利用上述电路分别在双频激光器和窄带(3兆赫)法-珀腔上做了锁定实验。

(1) 锁定后双频激光器的相对频率稳定度

如前所述,该稳频器原理上是无差调节系统,锁定后腔长对理想锁定点的波动与控制电压大小无关。因而,在热平衡状态下,锁定后腔长的相对不稳定性可以通过测量控制电压波动推算。测量方法是:先测出激光管相邻两个同类锁定点控制电压之差 ΔV ,再测出与门 1 和与门 2 开通期间的触发脉冲数 n (两者应相等,否则说明激光管预热时间不够,尚未达到热平衡)。锁定状态下激光频率的相对不稳定性为:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \left| \frac{\Delta L}{L} \right| = \frac{n}{2} \delta \frac{1}{\Delta V} \frac{\lambda}{2} \frac{1}{L} \quad (4)$$

其中 $\delta = 0.1$ 伏,为每个脉冲控制电压的变化量,以一支激光管的测量数据为例,

$$\Delta V = 360 \text{ 伏}, n = 2, L = 170 \text{ 毫米}$$

由(4)式算出

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = 5 \times 10^{-10}$$

(2) 电气可靠性的改善

第一台双频激光稳频器已经用了将近 3 年,最近复测了它的主要技术指标,其中选放中心频率和调制频率长期稳定度不劣于 1×10^{-3} ,说明电路结构和元件选用方面有所改进。高压部分从未发生过元件损坏,证明上述控制电压产生方式比用高压直流放大器可靠。

(3) 窄带鉴频实验效果

所用鉴频器为腔长 $L = 150$ 毫米,反射率 $R = 0.99$ 的法-珀腔,介质是空气。

通过该种稳频器与直放控制的比例积分式稳频器对比,前者在强烈扰动下仍能保证空腔锁在基模上,而后者则经受不住开关房门引起的气流扰动,常常失锁或“跳模”。

(4) 误差信号压缩比

用作双频激光稳频器时,实测误差信号压缩比超过 1000:1,继续加大增益时,系统稳定性还有余量,但不能改善控制精度,说明误差信号已压低到与噪声同等水平。

参 考 文 献

- [1] G. Birnbaum; *Proc. IEEE*, 1967, **55**, No. 6, 1015~1025.
 [2] 赵克功;《物理》,1977, **6**, No. 2, 75~78.
 [3] 张培林,张连芳,阮苏苏;《激光》,1978, **5**, No. 3, 1~8.