

文章编号: 1001-3806(2003)01-0050-03

碘分子 532nm 激光稳频系统的参数优化*

李 坚 白晓东

(北京工业大学应用数理学院,北京,100022)

沈乃 臧二军 曹建平

(中国计量科学研究院,北京,100013)

摘要: 根据 FM 光谱通过吸收介质后,经检测、相干解调的理论分析,建立了线性吸收稳频的数学模型;得到不同调制频率和调制度的误差控制信号。由此给出用于碘分子线性吸收激光稳频的最佳调制频率和最佳调制度。

关键词: FM 光谱;激光稳频;多普勒加宽

中图分类号: O657.38;O433.1 **文献标识码:** A

The parameters optimization of Doppler-broadened iodine at 532nm Nd YVO₄ laser frequency stabilization

Li Jian, Bai Xiaodong

(Institute of Applied Science, Beijing Polytechnic University, Beijing, 100022)

Shen Naicheng, Zang Erjun, Cao Jianping

(National Institute of Metrology, Beijing, 100013)

Abstract: The mathematical model of linear absorption frequency stabilization is established. According to the model for FM laser passing the absorber, the error signal of different modulation frequency and modulation index is obtained. Then the optimal modulation frequency and the optimal modulation index is given.

Key words: FM spectroscopy; laser frequency stabilization; Doppler-broadened lines

引 言

Nd YAG 和 Nd YVO₄ 激光倍频输出的频率为 532nm 绿光,碘分子在此波段内具有非常丰富的强吸收谱线,因而成为当前激光频率稳定研究的热点之一^[1,2]。在稳频方法中,可以利用 FM 光谱技术。早在 80 年代初期,IBM Research Laboratory 的 Bjorklund 就提出了线性吸收的 FM 光谱技术^[3],为激光稳频开辟出新的有效途径。美国 JILA 的 Hall 则将 FM 光谱技术用于饱和吸收激光稳频^[4]。1993 年,斯坦福大学的 Arie 和 Byer 等人利用 FM 光谱线性吸收技术,首次将 532nm 固体激光器稳定在碘吸收的多普勒加宽谱线的中心^[1]。

饱和吸收稳频技术对激光器和光学系统均有较高的要求,应用难度较高;而线性吸收稳频技术,可以降低对激光功率和光学系统的要求,但在电路上要采用 100MHz 以上的射频电路系统。在线性吸收

稳频实验中,需对激光束进行相位调制。调制频率和调制度应根据吸收介质的吸收谱线的特点来确定。目前,各个研究小组通常将调制频率选择在 100MHz 附近^[1,5]。Arie 等人曾提出调制频率增高到 1GHz,有可能改善频率稳定度^[1],然而并未在理论和实验上给予论证。下面将主要从理论上讨论 532nm Nd YVO₄/KTP 多普勒加宽稳频系统中调制频率和调制度的选取。

1 线性吸收稳频的数学模型

在线性吸收稳频中首先将激光束通过电光调制器 EOM,进行高频相位调制,形成 FM 光谱。该调制光透过碘吸收介质时,由于激光中心频率可能偏离碘分子多普勒加宽线型的中心频率,会导致调制光的上下边频分量在碘室内被吸收的程度不同。因此透射光强度受到调制,经光电探测器检测、放大以及相干解调后,得到直流信号。此信号直接反映激光中心频率与碘吸收的多普勒加宽谱线中心频率之间的误差。由此误差信号来控制压电陶瓷,调整激光腔的长度,可使激光器的输出频率稳定在碘分子 532nm 附近的某条谱线的中心频率上。

* 国家自然科学基金项目。

作者简介:李 坚,男,1975 年 12 月出生。研究生。现主要从事光通信、移动通信方面的研究工作。

收稿日期:2002-01-15;收到修改稿日期:2002-03-18

设频率为 ω_0 的光波场,用频率为 ω_m 、调制度为 M 的正弦相位调制时,光波场可以下式表示:

$$E(t) = E_0 \exp[i(\omega_0 t + M \sin \omega_m t)] = E_0 \exp(i \omega_0 t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(M) \exp(i n \omega_m t) \quad (1)$$

式中 $J_n(M)$ 为 n 阶贝塞尔函数,(1)式以级数的形式显示被调制光场的频谱。

被调制光通过长度为 L 、吸收线宽为 $\Delta\nu$ 的碘室。由于碘的吸收系数、折射率 n 均与频率有关,每一频谱分量的透射系数可写为 $T_n = \exp(-\alpha_n L - i \phi_n)$ (其中 $n = 0, \pm 1, \dots$)。在线性吸收过程中,激光功率为毫瓦量级,因而可忽略饱和吸收效应。则 $\alpha_n = \alpha_0 L / 2$ 反映吸收特性, $\phi_n = \phi_0 + n \phi_m / c$ 反映色散特性。透射光波场可写为:

$$E_t(t) = E_0 \exp(i \omega_0 t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} T_n J_n(M) \times \exp(i n \omega_m t) \quad (2)$$

由于每一频率分量的衰减和相移各不相同,使得透射光波的频谱受到调制,因而导致透射光强 $I_t(t)$ 随时间变化。碘分子 532nm 附近相邻频谱分量的吸收和色散系数之间差别很小,即 $|\alpha_n - \alpha_{n+1}| \ll 1$ 和 $|\phi_n - \phi_{n+1}| \ll 1$ 。由于仅在调制频率处进行相干解调,故可忽略高次谐波项,即仅保留一次项。则透射光强信号可简化为^[6]:

$$|E_m(t)|^2 = E_0^2 \exp(-2\alpha_0 L) [1 + 2 \cos \omega_m t \times \sum_{n=0}^{+\infty} J_n(M) J_{n+1}(M) (\alpha_{n-1} - \alpha_{n+1} + \alpha_n - \alpha_n) + 2 \sin \omega_m t \sum_{n=0}^{+\infty} J_n(M) J_{n+1}(M) (\phi_{n-1} - \phi_{n+1} - \phi_n + \phi_n)] \quad (3)$$

式中给出了调制光波通过具有吸收 $\alpha(\nu)$ 和色散 $\phi(\nu)$ 的碘蒸气后透射光强的表述。其中包含直流分量和调制频率为 ω_m 的两个交变分量,即吸收分量 $(\cos \omega_m t)$ 和色散分量 $(\sin \omega_m t)$,二者源于相邻边频的外差效应。

光电探测器接收到透射光后,将光信号转变成电信号。经过滤波、放大和相干解调,得到仅与吸收分量成正比的直流信号 I ,用于作为控制激光腔长的反馈信号:

$$I = 2 \sum_{n=0}^{+\infty} J_n(M) J_{n+1}(M) (\alpha_{n-1} - \alpha_{n+1} + \alpha_n - \alpha_n) \quad (4)$$

(4)式表示在确定的调制频率和调制度下,得到的误差控制信号随着激光的频率变化。对于不同的调制

频率和调制度,则将得到不同的曲线。显然,(4)式的线型会直接影响稳频的效果。

为便于分析,此处定义归一化频率 $R(\nu) = 2(\nu - \nu_0) / \Delta\nu$,其中, ν_0 为吸收谱线中心频率, $\Delta\nu$ 为吸收谱线的半峰值处半宽度。因此, $R_0 = R(\nu_0)$ 表示激光频率偏离多普勒加宽谱线中心频率的程度。由于碘吸收多普勒加宽线型近似为高斯线型,则吸收系数和相移系数可分别表述为 $\alpha(\nu) = \alpha_{peak} \cdot e^{-R^2(\nu)}$ 和 $\phi(\nu) = \phi_{peak} \cdot R(\nu) \cdot e^{-R^2(\nu)}$ 。其中 α_{peak} , ϕ_{peak} 分别为谱线中心峰值衰减和相移。对 FM 光谱的每个频谱分量,吸收和相移是频率的函数,即 $\alpha_j = \alpha(\nu_j)$, $\phi_j = \phi(\nu_j)$ 。将此关系代入(4)式,即可得到不同调制度 M 和不同调制频率 ω_m 情况下的误差控制信号线形,如图 1 所示。

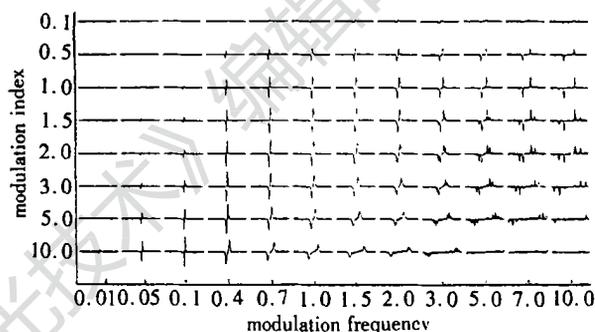


Fig. 1 The absorbed signal via modulation frequency and modulation index

为表征调制频率和碘吸收谱线宽度之间的关系,定义归一化频偏参数 $R = \omega_m / (\Delta\nu / 2)$ 。通过简单的计算可知,当 $R_0 = -R$ 时,边频 $\omega_0 + \omega_m$ 与谱线谐振,即激光频率处于参考频率之低频处且偏移量为 ω_m ;当 $R_0 = 0$ 时,载频 ω_0 与谱线谐振,即激光频率处于参考频率中心;当 $R_0 = R$ 时,边频 $\omega_0 - \omega_m$ 与谱线谐振,即激光频率处于参考频率之高频处且偏移量为 ω_m 。

2 调制频率和调制度的优化

经过计算,在图 1 中给出了归一化调制频率在 0.01 ~ 10 和调制度在 0.1 ~ 10 之间的误差信号线形。在调制度较小时 ($M < 0.5$),无论调制频率如何变化,曲线均只有两个峰值。随着调制频率的增高,峰值增大,两个吸收峰之间的频率间隔也相应增大。当调制频率远大于碘吸收谱线宽度时,两吸收峰之间出现一段平直的区域。在这一区间,稳频控制系统的误差信号不随激光频率变化,激光器处于自由运转状态,即反馈系统失效。调制度较大时 ($M > 3$),随着调制频率的增高,将出现多个谐振峰

的复杂曲线,同样不利于稳频控制。

在稳频控制系统中,当激光频率偏离多普勒加宽谱线的中心频率时,要求系统给出误差信号来调整激光器腔长,使激光频率向参考频率逼近。激光频率的偏差越大,相应的误差信号也应随之变大。理想情况下,二者呈线性关系。这一特点反应到 FM 吸收曲线上,则是在 $-R \sim +R$ 区间内 FM 吸收曲线是一条斜线。与之对应的导数曲线则形如梯形,类似带通滤波器的图形特点。

对于较好的线性控制的组合分布在图 1 中心的对角线附近。由图可见,其最佳调制频率在 $0.4 \sim 1.5$ 之间,最佳调制度在 $0.5 \sim 2.5$ 之间。

为了进一步确定参数的最佳值,取 $R = 1.2$, $M = 1.4$,计算出该稳频信号的导数曲线,如图 2 所示。其中图 2a 为 $M = 1.4$ 时,对应不同调制频率的控制信号导数曲线,图 2b 是其峰值的局部放大。可以看出,当 $R = 1.0$,导数曲线有一尖峰,说明误差信号曲线在此有拐点;当 $R = 1.2$,导数曲线在中心频率附近有一平台(近似为直线),说明误差信号幅度与激光的频偏成正比;当 $R = 1.3$,曲线在中心频率处有一下凹;说明稳频信号幅度与激光的频偏在此不成线性关系。当 $R = 1.5$,曲线在中心频率下凹明显。

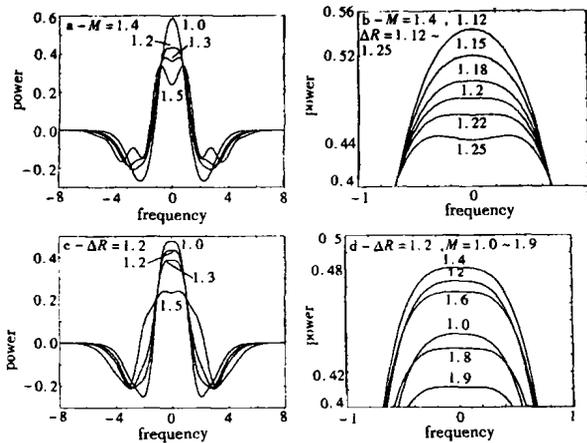


Fig. 2 The differential curves via different modulation frequency and modulation index

a - $M = 1.4$ b - $M = 1.4$, $R = 1.12 \sim 1.25$ c - $R = 1.2$
d - $R = 1.2$, $M = 1.0 \sim 1.9$

图 2c 是 $R = 1.2$ 时对应不同调制度的控制信号导数曲线,图 2d 是其峰值的局部放大。当

$M = 1.4$,曲线的峰值最高,但线性范围并不是最大。在该值附近无论是调制度减小还是增大,曲线峰值均在下降。调制度增大($M > 1.9$),曲线在参考频率处出现下凹。调制度减小,线性范围将缩小。

调制频率和调制度的选取应兼顾信号强度和线性度,经过计算和分析, R 在 $1.18 \sim 1.2$ 之间,即:调制度 M 在 $1.2 \sim 1.6$ 之间,能获得较好的误差控制信号,可作为最佳调制频率和调制度的范围。

根据理论分析,若碘分子多普勒谱线宽度为 850MHz ,取 $R = 1.2$,则最佳调制频率为 510MHz ;若多普勒谱线宽度为 900MHz ,则最佳调制频率为 540MHz 。故线性吸收稳频系统的调制器驱动源应设计在 500MHz 附近,最佳值应通过实验来最终确定。

由上述分析可以看出,对于线性吸收稳频系统,调制频率的选择比调制度的选择更为重要。考察图 2b 和图 2d,调制频率变化百分之几时,控制信号的形状都会发生很大的变化。这是因为,调制频率决定了吸收峰的间距,调制频率过高时,将把上下边频的差距超出多普勒加宽的范围,使误差信号双峰分离;调制频率过低时,误差信号双峰会重叠在一起,以至于互相抵消。此特点颇像电子学中双调谐回路的性质。对于调制度来说,变化百分之十几时,对信号线形的影响不大,主要影响系统输出信号的幅度。而这一点可通过放大电路予以补偿。因此,建议采用锁相环路作为调制器驱动源的频率源。

需要指出的是,在上述推导中,假设多普勒加宽线型是对称的。实际上,碘的超精细能级的扩展是不等距的,多普勒加宽线具有微小的不对称性^[5,7]。但上述分析方法仍然是适用的,更精确的分析应对吸收线型进行修正。

参 考 文 献

- [1] Arie A, Byer R. Appl Opt, 1993, 32(36): 7382.
- [2] Hall J L, Ma L Sh. IEEE Trans Instrum & Measure, 1999, 48(2): 583 ~ 586.
- [3] Bjorklund G C. Opt Lett, 1980, 5(1): 15 ~ 17.
- [4] Hall J L, Hollberg L, Baer T et al. A P L, 1981, 24(1): 166 ~ 169.
- [5] 沈乃霖, 徐春林, 曹红军 et al. 计量学报, 1999, 20(1): 1 ~ 5.
- [6] Supplee J M, Whittaker E A, Lenth W. Appl Opt, 1994, 33(27): 6294.
- [7] 沈乃霖, 曹红军, 张学斌 et al. 现代计量测试, 1998(5): 14 ~ 17.