

基于光纤电光调制器的 PDH 频率锁定稳定性研究

马维光 赵刚 付小芳 李志新 谭巍 董磊 张雷 尹王保 贾锁堂

(山西大学激光光谱研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西太原 030006)

摘要 光纤器件尤其是光纤电光调制器(EOM)在简化 PDH 频率锁定装置的同时会诱发残余幅度调制(RAM),该效应会使 PDH 误差信号出现一个受环境温度影响的直流偏置,同时线型也出现一定程度的扭曲,这不仅可以使频率锁定点发生漂移,同时也会影响频率锁定的时间。对 PDH 误差信号中存在 RAM 的线型进行理论和实验分析,并利用 Hänsch-Couillaud(HC)技术抑制 RAM,在实验上获得了无偏置且信号对称的 PDH 误差信号。分别利用 RAM 抑制闭环和开环的误差信号,进行了激光到腔模的频率锁定,验证了 RAM 抑制方案可以极大地增加基于光纤 EOM 的 PDH 频率锁定技术的稳定性。

关键词 激光技术;PDH 频率锁定;残余幅度调制;Hänsch-Couillaud 技术;电光调制器

中图分类号 O433.1; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0115002

Stability Analysis of Fiber Electro-Optic Modulator Based PDH Frequency Locking Technique

Ma Weiguang Zhao Gang Fu Xiaofang Li Zhixin Tan Wei Dong Lei
Zhang Lei Yin Wangbao Jia Suotang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Laser Spectroscopy Laboratory of Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract The structure of PDH technique is greatly simplified when the fiber components especially fiber electro-optic modulator (EOM) are applied to it. Since the key of this locking technique is frequency modulation, unaligned modulation process induces residual amplitude modulation (RAM), which produces a temperature dependent direct current (DC) offset and a lineshape distortion. This effect may induce the drifting of frequency locking point and shortening of locking time. A theoretical and experimental analysis of PDH error signal including RAM is given, and the symmetric PDH error signal of RAM reducing method based on Hänsch-Couillaud technique is obtained experimentally. The locking performance of the laser to the cavity is analyzed with and without RAM reducing feedback, and it is verified that the RAM reducing scheme greatly increases the stability of fiber EOM based PDH frequency locking technique.

Key words laser technique; PDH frequency locking technique; residual amplitude modulation; Hänsch-Couillaud technique; electro-optic modulator

OCIS codes 140.3425; 300.6310; 060.2340

1 引言

激光频率稳定作为频率标准、原子分子物理、痕量气体检测等应用中的关键技术成为多年来研究的一个热点。该技术可以是绝对频率锁定,即将激光频率锁定到某条气体吸收线,也可以是相对频率锁

定,即将激光锁定到谐振腔的腔模^[1-2]。目前稳定激光频率的方法有两种:一种是被动稳定,即通过降低环境振动、减小激光腔内空气流动、对环境温度进行控制等将激光频率控制在一定的范围;另一种是主动稳定,这就是通常意义上的基于误差信号反馈

收稿日期: 2013-07-26; **收到修改稿日期**: 2013-09-04

基金项目: 国家 973 计划(2012CB921603)、国家自然科学基金(61127017, 61178009, 61108030, 61275213, 61205216, 61378047)、山西省青年科学基金(2012021022-1, 2013021004-1)、山西省回国留学人员科研资助项目(2013011)、山西省留学回国人员科技活动资金(201301)

作者简介: 马维光(1976—),男,博士,副教授,主要从事激光技术、超灵敏红外痕量气体探测技术等方面的研究。

E-mail: mwg@sxu.edu.cn

的频率锁定技术。频率锁定主要有三部分：激光相对于参考频率的误差信号、激光频率控制器件以及比例积分微分(PID)控制电路,而误差信号的产生是频率锁定的核心之一。经过频率锁定后,激光的中心频率被绝对或者相对稳定到某一参考频率处,同时激光的线宽也能被有效地压窄。因此如何产生一种稳定、信噪比高的误差信号就成为频率锁定的研究目标。通常作为激光频率锁定参考的可以是几兆赫兹的原子饱和吸收线、几百兆赫兹的原子吸收线以及腔模宽度在千赫兹到兆赫兹的光学腔。

目前可以获得激光到腔模参考误差信号的方法主要有: Pound-Drever-Hall (PDH) 技术、Hänsch-Couillaud(HC)技术、低频调制技术、空间模干涉技术、边模偏频锁定技术^[2-8]等。其中 PDH 技术相对于其他技术由于采用了频率调制(FM)技术而使得误差信号信噪比更高,可以获得更大带宽的频率锁定。其基本原理是激光被电光调制器(EOM)调制后入射到光学腔,腔反射光由环形器提取后被高速探测器探测,获得的光强信号与经过移相后的调制信号进行混频,通过调节相位获得色散信号即可作为误差信号来实现频率锁定。

作为 PDH 核心的 FM 技术,需要 EOM 来使激光获得高频调制,当输入到 EOM 前的光为非线偏振光或者线偏振方向与电光晶体的调制方向不一致时,则会产生残余幅度调制(RAM),该 RAM 将会使 FM 光谱信号中出现一个依赖于晶体两特征轴向折射率的直流偏置,同时扭曲光谱线型^[9]。如果 RAM 存在于 PDH 技术中,由于晶体两特征轴方向折射率会受温度等的影响而变化,必定造成频率锁定点的漂移,从而使激光输出频率变化,达不到高稳定频率锁定的效果。然而随着光纤技术的快速发展,光纤波导 EOM 的出现使得 PDH 技术及装置更加简单,由于波导型 EOM 的半波电压只有几伏,相比于自由空间 EOM 的小两个数量级,不需要专门的驱动器,仅用函数发生器即可实现频率调制;另外,波导型 EOM 可以在较低电压下实现低频调制,特别是直流控制,即通过外加电压实现调制方向偏振光变量的相位变化。然而由于大量光纤及光纤器件的使用,在外界

温度及应力变化时,由于偏振模色散等效应的影响使得传输光具有接近线偏的椭圆偏振态,同时其长轴有可能偏离传输特征轴,这种偏振态光进入 EOM 即可诱发 RAM。如何提高基于光纤 EOM 的 PDH 频率锁定技术的稳定度就成了研究的一个重要内容。基于 FM 光谱中 RAM 的抑制最早由 Wong 等^[10]针对自由空间 EOM 提出,即由无吸收时的 FM 光谱信号作为误差信号反馈到 EOM 来实现,后来所有的针对 FM 光谱中的 RAM 抑制都沿用了该技术^[11],但由于其高的半波电压使得操作不便。近年来本研究组原创性地提出了基于 HC 偏振态检测技术来获得抑制 RAM 的误差信号,相比于 Wong 等的方法,本方案具有信号幅度强、稳定度高、信噪比高和不受探测相位影响等优点。本文以激光到腔模的频率锁定为研究对象,分析 EOM 对 PDH 技术产生误差信号的影响并对频率锁定特性进行分析,期望获得高稳定的频率锁定性能。

2 理论分析

2.1 存在 RAM 的 PDH 误差信号

当一束激光具有椭圆偏振态,且该激光沿 EOM 寻常光轴(o 轴)和非寻常光轴(e 轴)两个方向光场分量为 E_o^i 和 E_e^i ,该光场可以通过琼斯矩阵向量表示为

$$\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} E_o^i \exp(i\varphi_o) \\ E_e^i \exp(i\varphi_e) \end{bmatrix} \exp(-i\omega_c t), \quad (1)$$

式中 ω_c 为激光频率, φ_o 和 φ_e 分别为 o 轴和 e 轴方向的初始相位。考虑射频调制只沿 e 轴方向,当该激光通过 EOM 后,该激光场 \mathbf{E}_0 可表示为

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} E_o^i \exp[i(\phi_o + \varphi_e + \phi_{ff} + \beta \sin \omega_m t)] \\ E_e^i \exp[i(\phi_o + \varphi_o)] \end{bmatrix} \exp(-i\omega_c t), \quad (2)$$

式中 ϕ_o 和 ϕ_e 为沿 EOM 的 o 轴和 e 轴方向传输光的相移, ϕ_{ff} 为 EOM 低频控制相移, ω_m 为射频调制频率, β 为调制幅度。基于该调制光且 $\beta \ll 1$ 时,有近似频率调制光谱信号 I_{PDH}^m 为^[12]

$$\begin{aligned} I_{PDH}^m = & \exp(-2\delta_0) \{ J_0(\beta) J_1(\beta) E_o^i E_e^i \sin^2 \gamma [\exp(\delta_0 - \delta_1) \cos(\phi_o - \phi_1) - \exp(\delta_0 - \delta_{-1}) \cos(\phi_o - \phi_{-1})] + \\ & 0.5 J_1(\beta) E_o^i E_e^i \sin 2\gamma [\exp(\delta_0 - \delta_1) \cos(\phi_o - \phi_1 - \Delta\phi) - \exp(\delta_0 - \delta_{-1}) \cos(\phi_o - \phi_{-1} - \Delta\phi)] \} \sin \varphi - \\ & \exp(-2\delta_0) \{ J_0(\beta) J_1(\beta) E_o^i E_e^i \sin^2 \gamma [\exp(\delta_0 - \delta_1) \sin(\phi_o - \phi_1) + \exp(\delta_0 - \delta_{-1}) \sin(\phi_o - \phi_{-1})] + \\ & 0.5 J_1(\beta) E_o^i E_e^i \sin 2\gamma [\exp(\delta_0 - \delta_1) \sin(\phi_o - \phi_1 - \Delta\phi) + \exp(\delta_0 - \delta_{-1}) \sin(\phi_o - \phi_{-1} - \Delta\phi)] \} \cos \varphi, \quad (3) \end{aligned}$$

式中 $J_{0,1}(\beta)$ 为宗量为 β 的零阶和一阶贝塞尔函数, $\Delta\phi = \varphi_o - \varphi_e + \phi_o - \phi_e - \phi_{if}$, φ 为探测相位, 定义为混频器两端探测器探测到的调制频率信号与解调信号之间的相位差, γ 为腔反射光场进入探测器前偏振片角度, 该设置主要考虑到探测器前各种玻璃窗口的偏振效应, δ_i 和 ϕ_i 分别表示第 i 阶边带对应光场的幅度衰减和光学相移, 对于腔反射信号可以分别表示为

$$\delta_i = \frac{(1-R)(1-R\cos\theta_0)}{1-2R\cos\theta_0+R^2}, \quad (4)$$

$$I_{\text{PDH}}^{\text{sb}} = -\exp(-2\delta_0) \{ J_0 J_1 E_o^c E_e^c \sin^2 \gamma [\exp(\delta_0 - \delta_1) \sin(\phi_0 - \phi_1) + \exp(\delta_0 - \delta_{-1}) \sin(\phi_0 - \phi_{-1})] + 0.5 J_1 E_o^c E_e^c \sin 2\gamma [\exp(\delta_0 - \delta_1) \sin(\phi_0 - \phi_1 - \Delta\phi) + \exp(\delta_0 - \delta_{-1}) \sin(\phi_0 - \phi_{-1} - \Delta\phi)] \}. \quad (6)$$

由(6)式可见, 误差信号的背景偏置可表示为

$$I_{\text{PDH}}^{\text{sb}} = -J_1 E_o^c E_e^c \sin 2\gamma \sin \Delta\phi. \quad (7)$$

因此该背景偏置依赖于入射到 EOM 的光在 o 轴方向的分量 E_o^c 、 e 轴方向的分量 E_e^c , γ 以及 e 轴与 o 轴方向的总相位差 $\Delta\phi$ 。当锁频装置固定时, 前两个量为常数, 而 $\Delta\phi$ 不仅包括光纤引起的相位差, 同时还包括 EOM 晶体引起的相位差, 这两个相位差都会受到温度的影响而改变, 从而诱发 PDH 误差信号产生背景漂移, 使频率锁定点发生变化。图 1 为存在 RAM 时 PDH 误差信号线型随 $\Delta\phi$ 和 γ 的变化图, 模拟过程设置 $E_o^c : E_e^c = 0.06$, 腔镜反射率为 99.95%, 腔自由光

$$\phi_i = \frac{(1-R)R\sin\theta_0}{1-2R\cos\theta_0+R^2}, \quad (5)$$

式中 R 为腔镜反射率, $\theta_0 = 4\pi(v_i - v_0)L/c$ 为往返相移, L 为腔长, c 为光速, v_i 和 v_0 分别为激光频率与腔模中心频率。

PDH 的误差信号 $I_{\text{PDH}}^{\text{sb}}$ 为 FM 光谱的色散信号, 也即(3)式中探测相位 φ 为零时的情况, 即

谱区为 380 MHz, 调制频率为 20 MHz, 与后面的实验条件一致。图 1(b)~(d) 分别表示 $\Delta\phi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 时, $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 的误差信号曲线。由图 1(b) 可见, 当 $\Delta\phi = 0^\circ$ 时, 曲线为正负对称, 当 γ 变化时仅仅是幅度发生变化, 这样信号不会引起锁定点的变化, 但幅度变化会使锁定过程增益不足, 从而导致性能变差; 由图 1(c)、(d) 可见, 当 $\Delta\phi = 45^\circ, 90^\circ$ 时, 线型的对称性变化较大, 尤其是 γ 接近 90° 时, 随着 γ 的变化, 曲线偏置越来越大。基于此, 要获得曲线对称且无直流偏置的 PDH 误差信号就需要设置 E_e^c 为零或者 γ 和 $\Delta\phi$ 其中一个为 π 的整数倍。

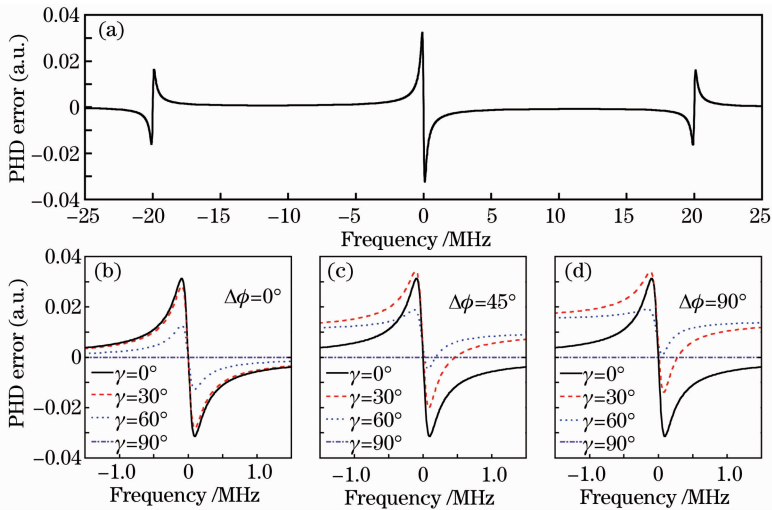


图 1 当 $E_o^c : E_e^c = 0.06$ 时 PDH 误差信号随 $\Delta\phi$ 和 γ 的变化关系理论模拟图

Fig. 1 Theoretical simulations of PDH error signal as functions of $\Delta\phi$ and γ on the condition of $E_o^c : E_e^c = 0.06$

2.2 基于 HC 技术的 RAM 抑制误差信号

依据前面的分析可知, 如果 $\Delta\phi$ 为 π 的整数倍即可获得完美的 PDH 频率锁定误差信号。当 $\Delta\phi$ 为 π 的整数倍时, 经过 EOM 的光为线偏振光, 因此可以

考虑利用偏振态检测技术来获得 RAM 抑制的误差信号。而对相位的控制, 市场上存在的光纤 EOM 既可进行射频调制还可以进行低频甚至直流的相位控制, 本文的理论方案产生的误差信号即要反馈到

该类型的 EOM 来抑制 RAM。

考虑到偏振态检测及控制,常用的方案即为 HC 偏振态检测技术,装置如图 2(a)所示,它由 1/4 波片、偏振分束棱镜 PBS 以及两个低频探测器 PD1 和 PD2 构成。图 2(b)为该技术应用到 FM 过程中的各个特征轴关系,其中 x 和 y 分别为 PBS 对应的透射和反射轴方向,与 EOM 的 e 轴和 o 轴重合, f 和 s 分别为 1/4 波片的快轴和慢轴, s 与 x 轴的夹角 α 为 45° 。FM 的激光输入到 HC 偏振态检测装置,两探测器的信号差即为抑制 RAM 的误差信号。

当(2)式表示的椭圆偏振光入射到 HC 系统后,首先通过 1/4 波片,其琼斯矩阵可表示为

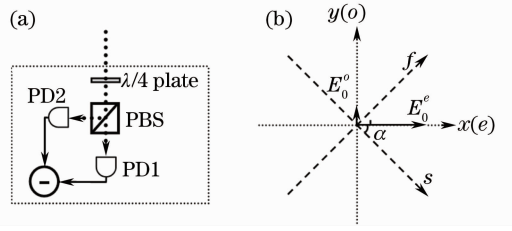


图 2 HC 技术获得 RAM 抑制误差信号原理图。

(a) 实验装置; (b) 特征轴关系

Fig. 2 Schematic of error signal of RAM reducing based on HC technique. (a) Experimental setup; (b) relationship among eigenaxes

$$J_{QWP} = \frac{1-i}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

透过 1/4 波片的光场可表示为

$$E_t = J_{QWP} E_o = \frac{1-i}{2} \begin{bmatrix} E_o^e \exp[-i(\Delta\phi - \beta \sin \omega_m t)] - iE_o^o \\ -iE_o^e \exp[-i(\Delta\phi - \beta \sin \omega_m t)] + E_o^o \end{bmatrix} \exp[-i(\omega_c t - \phi_o - \varphi_o)]. \quad (9)$$

通过 PBS 和减法器后采用 Jacob-Bessel 公式展开可得两探测器信号差为

$$I_{PD1} - I_{PD2} = 4E_o^e E_o^o [J_0(\beta) \sin \Delta\phi - 2J_1(\beta) \cos \Delta\phi \sin \omega_m t]. \quad (10)$$

由于相位检测系统中使用的是低频探测器,(10)式中包括调制频率的项被忽略,所以抑制 RAM 的误差信号 I_{RAM}^{es} 可表示为

$$I_{RAM}^{es} = 4E_o^e E_o^o J_0(\beta) \sin(\varphi_o - \varphi_e + \phi_o - \phi_e - \phi_f). \quad (11)$$

该函数的零点在 $\Delta\phi$ 等于 π 的整数倍处,且在零点附近成单调关系,因此可以通过对 EOM 的低频相位 ϕ_f 的控制使 $\sin \Delta\phi=0$ 来实现 RAM 的反馈抑制。

3 实验过程及结果

高稳定 PDH 频率锁定装置如图 3 所示,图中虚线代表自由空间光传输,实线表示光纤光传输,箭头实线表示电信号传输。其中实验中光源为连续窄线宽 1531 nm 光纤激光器(丹麦 NKT 公司, E15 PztS

PM),线宽约为 1 kHz,压电陶瓷快速调谐范围约为 3 GHz。光纤激光器的输出光纤与光纤 EOM(法国 Photline 公司,MPX-LN-0.5)相接,该光纤 EOM 具有直流(DC)500 MHz 的宽带调制端口,可用于对激光进行频率调制和低频反馈。法布里-珀罗(FP)腔是由一个平面镜和一个凹面镜组成的平凹腔,镜面的反射率为 99.95%,两镜片之间相距 393.6 mm,腔模线宽小于 100 kHz,腔体为微晶玻璃。

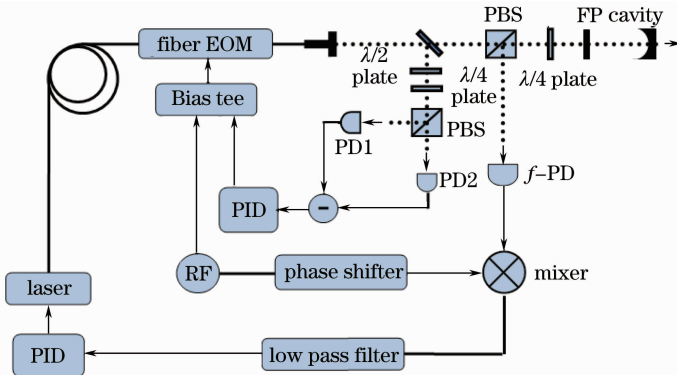


图 3 抑制 RAM 的 PDH 频率锁定装置示意图

Fig. 3 Schematic of PDH frequency locking setup based on RAM reducing

函数发生器(美国 NF 公司, WF1973)产生的频率为 10 Hz, 幅度为 2 V 的三角波信号送到光纤激光源的高压驱动器(德国 PI 公司, SVR 200-3)对激光频率进行扫描, 扫描频率幅度可通过调节高压驱动器的增益来实现。光纤激光源输出的激光通过光纤 EOM, 由射频源(RF, 美国 New Focus 公司, Model 3363)产生的 20 MHz 信号通过射频直流偏置器件 Bias tee(美国 MiniCircuits 公司, ZFBT-282-1.5A+)后输入到 EOM 的控制端口对激光进行频率调制。经过调制的激光被部分反射镜反射后入射到 HC 偏振态检测装置, 分别通过 1/4 波片和偏振分束棱镜 PBS, 为了使 PBS 与 EOM 特征轴方向一致, 在激光入射到 1/4 波片前先通过一个 1/2 波片, PBS 两个透射光光强被探测器 PD1(美国 Thorlabs 公司, PDA10CS-EC)和 PD2 探测后相减, 所得信号经过比例积分微分(PID)控制器(美国 SRS 公司, SIM960)滤波后反馈到 Bias tee 的 DC 输入端, 实现对 RAM 的抑制; 通过部分反射镜的透射调制激光入射到 PBS 与 1/4 波片组成的环形器, 由 PBS 反射的腔反射光, 被一高速探测器 f -PD(美国 NEW FOCUS 公司, Model 1611)探测, 其信号与移相器(美国 MiniCircuits 公司, JSPHS-26)移相的射频信号通过混频器(美国 MiniCircuits 公司, ZLW-1)进行混频, 通过低通滤波器(美国 MiniCircuits 公司, BLP-1.9+)滤波后获得 PDH 的误差信号, 然后经过 PID 控制器后反馈到激光器的控制端, 进行激光到腔模的频率锁定。

为了验证存在 RAM 时的频率锁定, 通过轻微扭转光纤激光器输出光纤接头与光纤 EOM 的输入接头, 使两保偏光纤特征轴成一小角度, 当 RAM 抑制控制开环和闭环时分别测量的 PDH 误差信号如

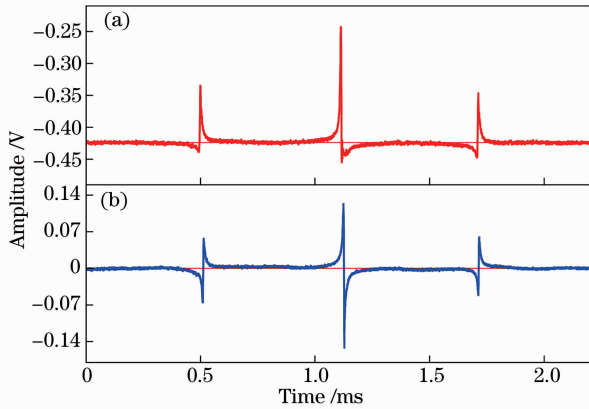


图 4 RAM(a)抑制前和(b)抑制后的 PDH 误差信号
Fig. 4 PDH error signals (a) before and (b) after RAM reducing

图 4 所示, 这里腔模宽度约 100 kHz。由图 4(a)可见, 其误差信号除了 0.425 V 的直流偏置外, 线型也有很大的扭曲, 与图 2(c)、(d)中 $\gamma > 60^\circ$ 的理论信号相似, 间接证明了理论分析的准确性。图 4(b)为经过 RAM 抑制控制后的 PDH 误差信号, 可见中心的直流偏置消失, 同时线型具有很好的对称性。经过测量, 无反馈控制时的直流偏置受室温影响很大, 当 PID 控制器设置点设置好后, 该直流偏置会使锁定点发生漂移, 并很快就会使系统失锁。

图 5 中曲线 a 和 b 分别为 RAM 抑制控制闭环和开环时, 激光到 FP 腔锁定的结果, 对应上方横坐标。图 5 中曲线 c 为调制光的腔模透射信号, 其中中间高峰为载频, 两边小峰为一阶边带, 对应下方横坐标。可见当开环时, FP 腔透射光功率逐渐降低并有一定的起伏, 主要是由于 PDH 误差信号直流偏置受室内温度变化等的影响, 由前面分析知温度变化会改变光在 EOM 和保偏光纤中的传输相位。而当闭环后, RAM 被抑制, PDH 误差信号直流偏置始终保持在零点, 透射光功率保持稳定。考虑到腔的精细度约为 6200, 腔长 393.6 cm, 因此腔模半峰全宽小于 60 kHz, 按照透射光的幅度噪声与腔模幅度之间的关系可估计出 RAM 抑制后激光频率稳定范围小于 10 kHz, 而无 RAM 抑制时的激光频率稳定范围大于 40 kHz, 随着测量时间的增加其频率会有更大的漂移。

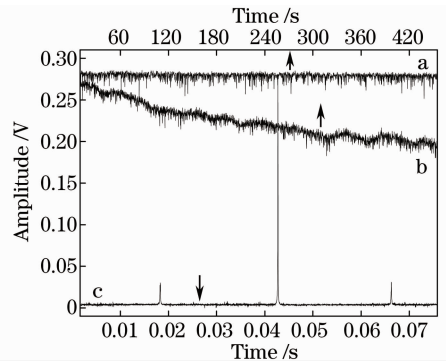


图 5 RAM 抑制控制闭环(曲线 a)、开环(曲线 b)时 PDH 频率锁定性能和调制光的腔模透射信号(曲线 c)
Fig. 5 PDH frequency locking performances when the feedback loop is on (curve a) and off (curve b) and cavity transmission signal of modulation light (curve c)

为了更清楚地表明频率锁定的效果, 对 RAM 抑制前和抑制后的腔透射光强信号做了 Allan 方差分析, 如图 6 所示^[13]。图 6 中曲线 a, b 分别为 RAM 抑制反馈开环和闭环后腔透射信号的 Allan

方差方根结果,图6中曲线c为白噪声对应的 Allan 方差方根,反比于平均时间 τ 。从图中可以看出,当 RAM 抑制反馈开环时,在平均时间为 3 s 时即发生漂移,而 RAM 抑制反馈闭环后,在平均时间为 20 s 之前呈现一种白噪声的依赖关系,RAM 的抑制极大地提高了 PDH 频率锁定的长期稳定性。

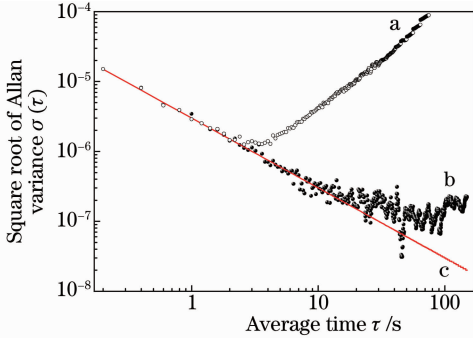


图6 RAM抑制控制开环(曲线a)和闭环(曲线b)腔透射光强信号及白噪声的Allan方差方根曲线(曲线c)

Fig. 6 Square root curves of Allan variances of cavity transmission signals when the feedback loop is off (curve a) and on (curve b) and white noise (curve c)

4 结 论

对 PDH 误差信号存在 RAM 时的线型进行了理论分析,结果表明若要获得线型对称且无直流偏置的 PDH 误差信号,需要设置 E_0 为零或者 γ 和 $\Delta\phi$ 其中一个为 π 的整数倍。考虑到实现 RAM 抑制时的激光偏振态为线偏振光,因此从理论上分析了利用 HC 偏振态检测技术获得 RAM 抑制的误差信号。实验上通过该方案获得了无偏置且信号对称的 PDH 误差信号,最后基于 RAM 抑制开环和闭环时的误差信号分别进行了激光到腔模的频率锁定。当开环时,FP 腔透射光功率随着室温变化,PDH 误差信号的直流偏置发生漂移,透射光功率逐渐降低。当 HC 反馈闭环后,透射光功率保持稳定。基于 Allan 方差方根的分析,可见平均漂移时间由 3 s 提

高到了大于 20 s,验证了 RAM 抑制方案极大地提高了基于光纤 EOM 的 PDH 频率锁定的稳定性。

参 考 文 献

- 1 A Ratnapala, C J Vale, A G White, *et al.*. Laser frequency locking by direct measurement of detuning[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(23): 2704–2706.
- 2 R W P Drever, J L Hall, F V Kowalski, *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Appl Phys B*, 1983, 31(2): 97–105.
- 3 E D Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *Am J Phys*, 2001, 69(1): 79–87.
- 4 T W Hansch, B Couillaud. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity[J]. *Opt Commun*, 1980, 35(3): 441–444.
- 5 J M Boon-Engering, W E van der Veer, E A J M Bent, *et al.*. Stabilization of an optical cavity containing a birefringent element [J]. *Opt Commun*, 1997, 140(4): 285–288.
- 6 A Banerjee, D Das, U D Rapol, *et al.*. Frequency locking of tunable diode lasers to a rubidium-stabilized ring-cavity resonator [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(12): 2528–2531.
- 7 D A Shaddock, M B Gray, D E McClelland, *et al.*. Frequency locking a laser to an optical cavity by use of spatial mode interference[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(21): 1499–1501.
- 8 R L Barger, M S Sorem, J L Hall. Frequency stabilization of a cw dye laser[J]. *Appl Phys Lett*, 1973, 22(11): 573–575.
- 9 Zhang Yongzhi, Li Zhixin, Yan Xiaojuan, *et al.*. Optimization of frequency modulation spectral lineshape influenced by the residual amplitude modulation based on the low frequency control of electro-optic modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0330001.
- 10 张永智,李志新,闫晓娟,等. 电光调制器低频控制对受残余幅度调制影响的频率调制光谱线型优化研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0330001.
- 11 N C Wong, J L Hall. Servo control of amplitude modulation in frequency modulation spectroscopy: demonstration of shot-noise-limited detection[J]. *J Opt Soc Am B*, 1985, 2(9): 1527–1533.
- 12 C L Bell, G Hancock, R Peverall, *et al.*. Characterization of an external cavity diode laser based ring cavity NICE-OHMS system [J]. *Opt Express*, 2009, 17(12): 9834–9839.
- 13 Zhang Hu, Zhang Yongzhi, Yin Zhaoxia, *et al.*. Theoretical analysis of the residual amplitude modulation of frequency modulation strong absorption spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(5): 1334–1338.
- 14 张 虎,张永智,尹朝霞,等. 频率调制强吸收光谱中残余幅度调制的理论分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(5): 1334–1338.
- 15 David W Allan. Statistics of atomic frequency standards[J]. *Proc IEEE*, 1966, 54(2): 221–230.

栏目编辑:史 敏