

文章编号: 0253-2239(2007)10-1877-6

利用法布里-珀罗腔抑制电光相位调制中的 剩余幅度调制*

陈玉华 蒋燕义** 毕志毅 马龙生

(华东师范大学物理系光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)

摘要: 激光经电光相位调制后, 由于剩余幅度调制的存在造成调制边带幅度不相等。利用法布里-珀罗腔的透射特性和 Pound-Drever-Hall 技术对通过法布里-珀罗腔的调制光正、负一级边带的幅度产生不同的衰减, 使得调制边带的幅度相等, 从而实现对电光相位调制中剩余幅度调制的抑制。采用该方法, 理论上计算了调制光经法布里-珀罗腔后的光外差光谱信号, 获得锁定法布里-珀罗腔后调制边带幅度的不对称度较腔锁定前减小四个数量级。实验研究了调制光经法布里-珀罗腔透射的光外差光谱, 结果表明将法布里-珀罗腔锁定于该透射光外差光谱中心零位时, 对剩余幅度调制的抑制程度可达 45 dB。

关键词: 光谱学; 剩余幅度调制; 法布里-珀罗腔; 电光相位调制; 伺服控制

中图分类号: O433.5⁺4 文献标识码: A

Suppression of Residual Amplitude Modulation in Electro-Optical Phase Modulators Using Fabry-Pérot Cavity

Chen Yuhua Jiang Yanyi Bi Zhiyi Ma Longsheng

(Key Laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Department of Physics,
East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract: Residual amplitude modulation (RAM) in electro-optical phase modulators (EOM) results in unequal amplitude of modulation sidebands. Different amplitude attenuation of the first-order sidebands is undergone by means of transmission characteristic of Fabry-Pérot cavity and the Pound-Drever-Hall technique. Thus the amplitude of modulation sidebands is equal and the residual amplitude modulation can be suppressed. The beat signal between carrier and modulation sidebands is calculated theoretically after transmitting the Fabry-Pérot cavity, and the asymmetry of sidebands is reduced by four orders of magnitude once the Fabry-Pérot cavity is locked properly. Finally in experiment, the optical heterodyne spectrum is obtained after the modulated laser beam transmitted the Fabry-Pérot cavity. The result shows that the suppression of the residual amplitude modulation in electro-optical phase modulators is about 45 dB when the Fabry-Pérot cavity is locked to the central zero point of optical heterodyne spectrum.

Key words: spectroscopy; residual amplitude modulation; Fabry-Pérot cavity; electro-optical phase modulation; servo control

1 引 言

激光经电光相位调制后, 在产生相位调制的同时还出现了剩余幅度调制 (Residual amplitude modulation, RAM), 表现为调制光的正、负一级边

带幅度不对称^[1], 而且这种边带的不对称性还会随着环境和实验条件的变化而发生变化。在精密激光光谱和光场精密控制^[2~8]中, 剩余幅度调制的存在会使作为鉴频信号的谱线中心零点的频率发生偏

* 国家自然科学基金(60490280)、国家 973 计划(2006CB806005)和上海市科学技术委员会(04JC14086)资助课题。

作者简介: 陈玉华(1979—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事精密激光光谱及激光稳频技术等方面的研究。

E-mail: chenYuhua79@163.com

导师简介: 毕志毅(1956—), 男, 上海人, 教授, 主要从事精密激光光谱及激光稳频技术等方面的研究。

E-mail: zybi@phy.ecnu.edu.cn

** 通讯联系人。E-mail: yjjiang@phy.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2007-03-12; 收到修改稿日期: 2007-04-20

移,从而影响测控精度。为解决这一问题,国内外一些实验室对此作了理论和实验方面的研究,文献[9]利用多光程(Multi-pass)模型从理论上解释了电光相位调制中剩余幅度调制的产生机理,指出这种剩余幅度调制可以由相位调制晶体的双折射对温度的依赖性、晶体散射以及由晶体表面所形成类似法布里-珀罗腔的干涉效应、晶体的缺陷以及晶体内部射频频场的空间不均匀性等因素产生。美国科罗拉多大学天体物理联合实验室(JILA)在实验上通过改变加在电光晶体上的电压^[10]以改变晶体内部场的分布来抑制剩余幅度调制,这种方法会引入一些额外的低频噪声和频率起伏。中国计量科学研究院在采用调制转移光外差光谱技术进行精密激光稳频的研究中,通过精密控制电光晶体温度的方法来抑制剩余幅度调制^[11],取得了很好的实验效果。

本文采用法布里-珀罗腔的透射特性和 Pound-Drever-Hall(PDH)技术^[12,13]——把法布里-珀罗腔锁定在透射光外差光谱中心过零点处(即对应边带幅度相等),实现对电光相位调制中剩余幅度调制的抑制。理论计算了正、负一级边带幅度不相等的调制光透过法布里-珀罗腔后的光外差拍频信号,数值分析了采用法布里-珀罗腔抑制剩余幅度调制的效果。实验上研究了相位调制光经法布里-珀罗腔后的透射光外差光谱,并且将法布里-珀罗腔锁定于该透射光外差光谱中心零位处,实现对电光相位调制中剩余幅度调制的抑制。

2 理论分析

单频激光经电光相位调制后的激光场表示为

$$E_{in} = E_0 \exp[i(\omega t + \beta \sin \Omega t)] + c. c. \quad (1)$$

其中 ω 为入射激光的圆频率, Ω 为电光相位调制器的调制频率, β 为调制度。利用贝塞尔函数将(1)式在频率域展开,当调制度小于1时,可取一阶近似

$$E_{in} \approx E_0 \{ J_0(\beta) \exp(i\omega t) + J_1(\beta) \exp[i(\omega + \Omega)t] + J_{-1}(\beta) \exp[i(\omega - \Omega)t] \} + c. c. \quad (2)$$

其中 $J_0(\beta)$ 、 $J_1(\beta)$ 和 $J_{-1}(\beta)$ 分别为0阶、1阶和-1阶的贝塞尔函数。

激光经电光相位调制后,由于存在着剩余幅度调制,使得调制边带的幅度不相等。为描述由于剩余幅度调制而导致的调制边带幅度的不相等,分别引入正、负一级边带幅度的非对称因子 B_1 和 B_{-1} 。(2)式可表示为

$$E_{in} \approx E_0 \{ J_0(\beta) \exp(i\omega t) + J_1(\beta) B_1 \exp[i(\omega + \Omega)t] + J_{-1}(\beta) B_{-1} \exp[i(\omega - \Omega)t] \} + c. c. \quad (3)$$

2.1 剩余幅度调制抑制机理

激光经电光相位调制后,载波和正、负一级调制边带的频率分布如图1(a)所示,这里以正一级边带的幅度大于负一级边带的幅度为例($B_1 > B_{-1}$)。由法布里-珀罗腔的透射特性可知,载波相对于法布里-珀罗腔的不同的谐振状态对正、负一级调制边带的幅度产生不同的衰减,而载波与调制边带的光外差拍频为零即对应两边带的幅度相等且相位相反,该机理提供了抑制电光相位调制中剩余幅度调制的新方法。图1(b)描述了相位调制光在法布里-珀罗腔半峰全宽 $\Delta\nu_c$ 范围内的频率分布,图中弧形实线表示法布里-珀罗腔的透射频谱,此时载波位于透射峰的中心;弧形虚线表示法布里-珀罗腔锁定在相位调制光透射光外差光谱中心零位时的透射谱,此时载波相对于法布里-珀罗腔透射峰的中心发生了频移,从而使经法布里-珀罗腔透射的调制光边带幅度相等。

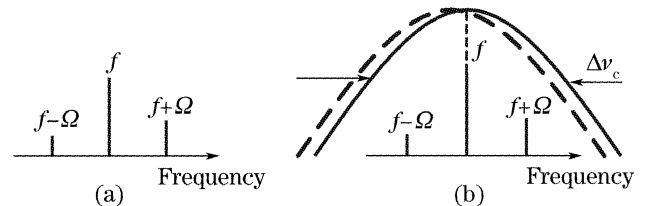


图1 相位调制光载波(a)和边带相对法布里-珀罗腔透射峰的频率分布(b)

Fig.1 Phase modulation of carrier (a) and frequency spectrum of sidebands related to Fabry-Pérot cavity transmission peak

2.2 法布里-珀罗腔透射光拍频信号分析

激光经电光相位调制后入射到法布里-珀罗腔,其入射镜 M_1 对振幅的反射因数和透射因数分别为 r_1 和 t_1 ,理想情况下 $r_1^2 + t_1^2 = 1$;出射镜 M_2 对振幅的反射因数和透射因数分别为 r_2 和 t_2 ,理想情况下同样有 $r_2^2 + t_2^2 = 1$,如图2所示。

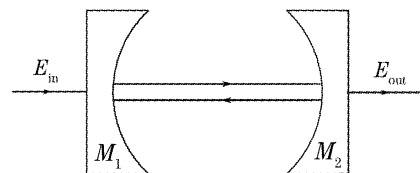


图2 法布里-珀罗腔的理论模型

Fig.2 Theoretical model of Fabry-Pérot cavity

设 E_{in} 和 E_{out} 分别表示法布里-珀罗腔的入射场和出射场。理论推导可得^[14,15]

$$E_{out} = \frac{\sqrt{(1-r_1^2)(1-r_2^2)} \exp(i\phi/2) E_{in}}{1-r_1 r_2 \exp(i\phi)}, \quad (4)$$

式中 ϕ 为入射光在法布里-珀罗腔中往返一周的相位延迟 ($\phi = 2\pi f / \Delta\nu_{fsr}$, 其中 $\Delta\nu_{fsr}$ 为法布里-珀罗腔的自由光谱程, f 为载波或调制边带的频率, $\Delta\nu_{fsr} =$

$c/(2nL)$, L 为法布里-珀罗腔的腔长, c 为真空中的光速, n 为空气的折射率, 计算中 n 近似取 1), 则法布里-珀罗腔的透射因数为

$$T = E_{out}/E_{in} = A_{\delta} \exp(iA_{\varphi}), \quad (5)$$

其中

$$A_{\delta} = \frac{\sqrt{1-r_1^2} \sqrt{1-r_2^2}}{\sqrt{1+r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \phi}}, \quad (5a)$$

$$A_{\varphi} = \arctan \left[\frac{r_1 r_2 \cos(\phi/2) \sin \phi + (1-r_1 r_2 \cos \phi) \sin(\phi/2)}{\cos(\phi/2) (1-r_1 r_2 \cos \phi) - r_1 r_2 \sin(\phi/2) \sin \phi} \right], \quad (5b)$$

利用(3)式, 得到调制光经法布里-珀罗腔后透射出的光场表示为

$$E_{out} = E_0 \{ T(\omega) J_0(\beta) \exp(i\omega t) + T(\omega + \Omega) J_1(\beta) B_1 \exp[i(\omega + \Omega)t] + T(\omega - \Omega) J_{-1}(\beta) B_{-1} \exp[i(\omega - \Omega)t] \} + c. c. \quad (6)$$

在光电探测器上得到边带与载波的光外差拍频信号为^[12]

$$i(\Omega) \propto |E_{out}|^2 = E_0^2 J_0^2 |T(\omega)|^2 + E_0^2 J_1^2 B_1^2 |T(\omega + \Omega)|^2 + E_0^2 J_{-1}^2 B_{-1}^2 |T(\omega - \Omega)|^2 + 2E_0^2 J_0 \{ \text{Re}[T(\omega) T^*(\omega + \Omega) (\omega + \Omega) J_1 B_1 + T(\omega - \Omega) T^*(\omega) J_{-1} B_{-1}] \cos(\Omega t) + \text{Im}[T(\omega) T^*(\omega + \Omega) J_1 B_1 + T(\omega - \Omega) T^*(\omega) J_{-1} B_{-1}] \sin(\Omega t) + \dots \}, \quad (7)$$

式中省略了 2Ω 项, $\cos(\Omega t)$ 项反映了腔的吸收特性, 而 $\sin(\Omega t)$ 项反映了腔的色散特性。上式中, 光外差拍频信号不只受两边带非对称因子的影响, 还与两边带及载波的透射因数有关。

2.3 法布里-珀罗腔的分析

利用法布里-珀罗腔抑制电光相位调制中的剩余幅度调制, 腔的特性尤为重要。不仅要求兼顾调制边带的透射因数和对边带的控制灵敏度(即法布里-珀罗腔透射谱的斜率), 还要求考虑腔的模式分布对光谱线型的影响。根据已有的实验条件, 取镜片的反射率都为 99.2%, 电光调制器的调制频率为 386 kHz, 利用(5a)式得到调制边带的透射因数以及控制灵敏度随调制频率 Ω 与腔的半峰全宽 $\Delta\nu_c$ 比值的关系如图 3 所示, 显示调制边带的透射因数随 $\Omega/\Delta\nu_c$ 的增加而减小, 而法布里-珀罗腔对边带的控制灵敏度随 $\Omega/\Delta\nu_c$ 的增加呈先增后减趋势。为了使载波和两调制边带都能够分布在腔的半峰全宽 $\Delta\nu_c$ 频率范围内以增加调制边带的透射因数, $\Omega/\Delta\nu_c$ 取值要比较小, 但须避免太小而影响腔对边带的控制灵敏度。综合考虑调制边带的透射因数以及控制灵敏度, $\Omega/\Delta\nu_c$ 的值取 0.2 左右。另外, 还应考虑腔的模式分布对光外差信号谱线线型的影响, 使低阶横模距离纵模的间隔应尽可能大于调制频率。理想的共焦腔能够满足这一要求, 但当腔长或腔镜曲率半径存在微小误差时, 会对光外差信号谱线线型产生影响。因此, 选择对称非共焦腔较为合适。

综合上述分析, 采用由两个相同反射镜组成的对称非共焦法布里-珀罗腔, 镜片的反射率都为 99.2% 左右, 镜片的曲率半径为 1 m, 腔长为 150 mm 左右。并且其十阶以内横模距离纵模的最小间距大于 57 MHz; 若腔长变化量为 ± 1 mm 时, 十阶以内的横模距离纵模的最小间距大于 51 MHz, 这种腔完全满足要求。

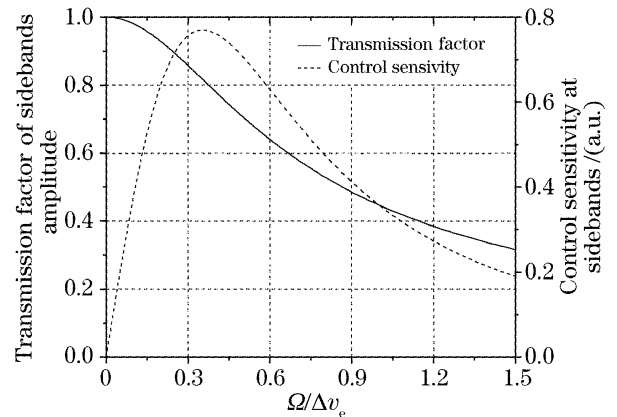


图 3 调制边带透射因数和灵敏度随 $\Omega/\Delta\nu_c$ 变化的关系
Fig. 3 Transmission factor of sidebands and control sensitivity as a function of $\Omega/\Delta\nu_c$

2.4 法布里-珀罗腔抑制剩余幅度调制的理论计算

将法布里-珀罗腔参量代入(5a)式、(5b)式和(7)式数值计算, 分别得到调制光的光外差拍频信号的吸收型和色散型谱线, 如图 4 所示, 其中图 4(a)表示两边带幅度相等的情况 (B_1 和 B_{-1} 都取 1), 图 4(b)中两边带幅度的非对称因子 B_1 和 B_{-1} 分别取 1.015 和 1。

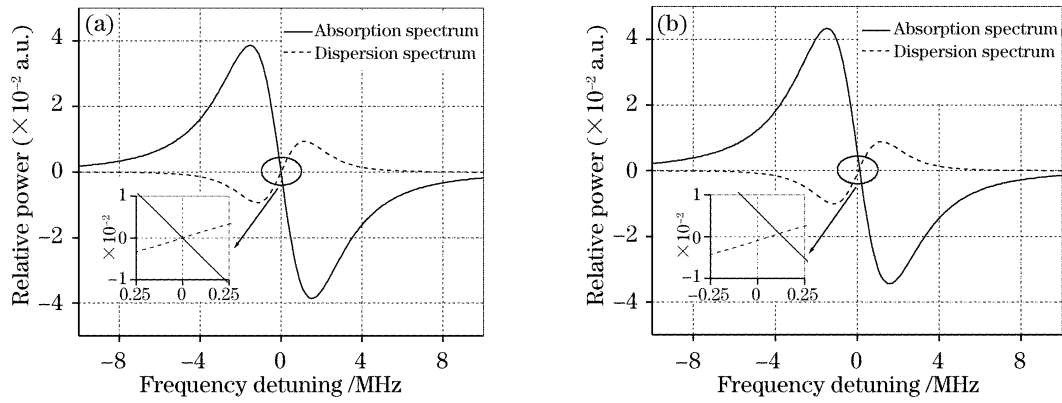


图 4 拍频信号的吸收型和色散型谱线(a)边带幅度相等, (b)边带幅度不相等

Fig. 4 Absorption and dispersion spectra of beat signal when the amplitude of sidebands is (a) equal, (b) unequal

从图 4 可以得到:边带幅度相等时,调制光的光外差拍频信号吸收型和色散型谱线中心过零点位于法布里-珀罗腔透射峰的中心;而当边带幅度不相等时,会引起吸收型和色散型谱线中心过零点的频移,对应的频移量分别为 132 kHz 和 64.3 kHz。因此,可以通过拍频信号中心过零点频移量的大小来衡量剩余幅度调制的大小,而剩余幅度调制的大小与边带幅度的不对称度直接有关。定义不对称度为 $(E_1 - E_{-1})/E_{-1}$, E_1, E_{-1} 分别表示正、负一级边带的振幅。为了最大程度地减小边带的不对称度,计算中解调相位取 171.6° , 得到调制光的光外差拍频信号的谱线如图 5 所示。谱线中心零位的频移量为 129 kHz。将法布里-珀罗腔锁定在该谱线中心零位,利用(5a)式得到透射出法布里-珀罗腔的正、负一级边带和载波的幅度分别为 0.403945、0.403948 和 0.806974。由边带不对称度的定义式得到,两调制边带幅度的不对称度由 1.5×10^{-2} 下降到 7.427×10^{-6} 。结果表明,采用该方法可使调制边带幅度的不对称度减小四个数量级。

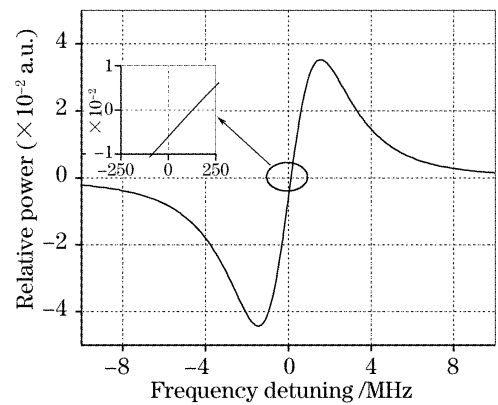


图 5 光外差拍频信号谱线

Fig. 5 Spectrum of beat signal

3 实验装置

实验装置如图 6 所示,以 He-Ne 激光为光源,输出光经过作为光隔离器的声光调制器(AOM)其调制频率为 80 MHz,取其一级衍射光经透镜耦合和半波片调节偏振方向后入射到电光相位调制器(EOM),它采用 $MgO:LiNbO_3$ 晶体,射频驱动频率

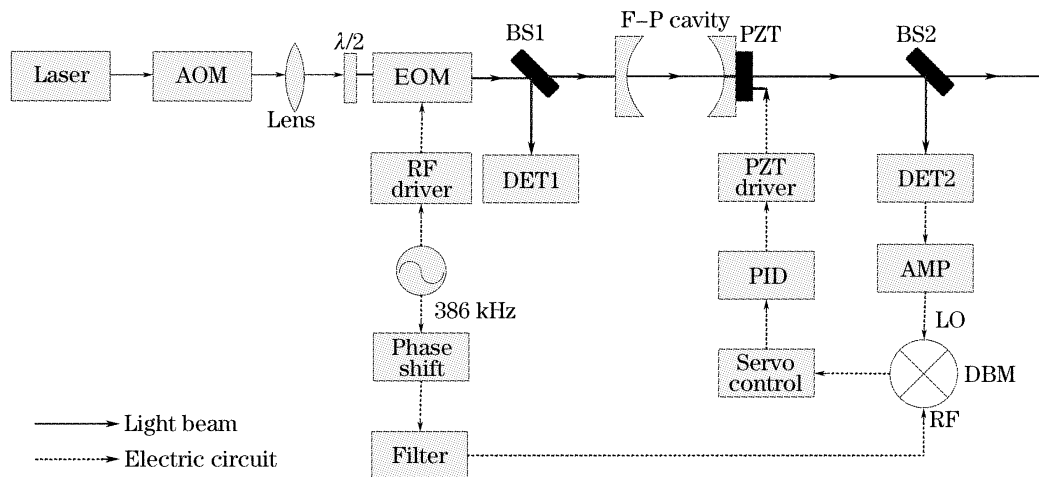


图 6 法布里-珀罗腔抑制剩余幅度调制的实验装置图

Fig. 6 Experimental setup of suppressing the residual amplitude modulation with Fabry-Pérot cavity

为 386 kHz, 调制度为 0.9。入射光经电光相位调制器相位调制后被分束镜 (BS1) 分成光强不等的两束, 较弱的一束入射到探测器 (DET1) 以观测电光相位调制器中的剩余幅度调制, 另一束入射到由两块相同凹面镜组成的对称非共焦法布里-珀罗腔中, 腔镜的曲率半径为 1 m, 腔长约为 150 mm, 腔的自由光谱程约为 1 GHz, 精细度约为 500, 半峰全宽约为 2 MHz。为减小气流扰动对腔稳定性的影响, 法布里-珀罗腔放置于有机玻璃盒内。调制光经腔后被分束镜 (BS2) 分成两束, 使其中一束入射到光电探测器 (DET2) 获得调制光的光外差拍频信号, 然后经放大器 (AMP) 放大, 和经移相器移相后的射频解调参考信号一起送入到双平衡混频器 (DBM) 中, 解调得到调制光经法布里-珀罗腔后的光外差光谱信号, 经伺服控制电路 (Servo control) 和高压驱动电路 (PZT Driver) 后控制法布里-珀罗腔上的压电陶瓷 (PZT) 来改变其腔长, 从而将法布里-珀罗腔锁定在透射光外差拍频信号谱线中心过零处, 实现对电光相位调制中剩余幅度调制的抑制。

4 实验结果

实验记录了相位调制光经法布里-珀罗腔后光外差光谱信号, 如图 7 所示。将法布里-珀罗腔锁定在该谱线中心上, 锁定误差信号如图 8 所示。检测系统带宽为 10 kHz。

实验采用频谱仪观察了电光相位调制中的剩余幅度调制, 频谱如图 9(a) 所示, 由于剩余幅度调制受环境温度的影响而起伏变化, 平均周期约为 80 s 左右, 剩余幅度调制变化范围在 45 dB 左右, 二次谐波的变化范围在 20 dB 左右, 频谱仪检测带宽为 3 kHz。剩余幅度调制的相对大小与电光调制器的

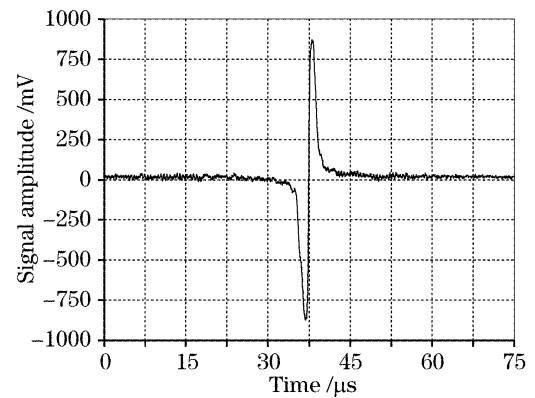


图 7 相位调制光外差光谱

Fig. 7 Optical heterodyne spectrum of phase modulation

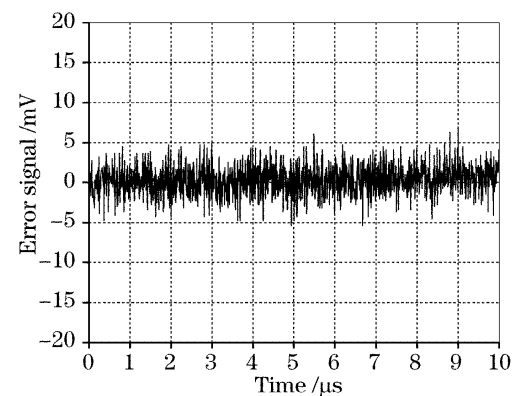


图 8 抑制剩余幅度调制系统锁定误差信号

Fig. 8 Servo error signal of suppressing the residual amplitude modulation system as a function of time

驱动功率和调制度等因素有关。同时还观察了相位调制光经法布里-珀罗腔后入射到光电探测器 (DET2) 的光外差拍频信号。当法布里-珀罗腔未被伺服控制时, 得到的拍频信号频谱如图 9(b), 剩余幅度调制变化范围亦在 45 dB 左右。法布里-珀罗腔锁定在谱线中心零位后, 在观察的 600 s 左右的时间, 剩余幅度调制被控制在几乎为零的状态, 其抑制程度达到 45 dB, 高次谐波也为零, 如图 9(c) 所示。

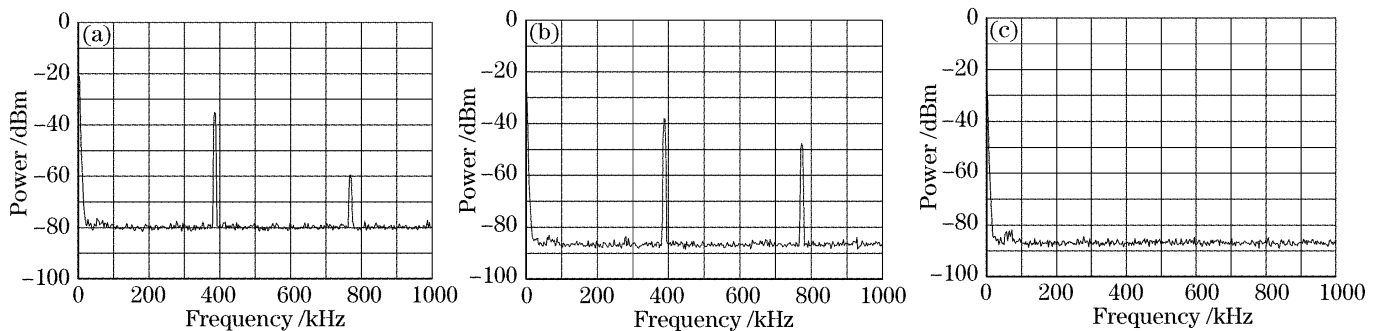


图 9 伺服控制系统 (a)、(b) 开环和 (c) 闭环时的剩余幅度调制频谱

Fig. 9 Frequency spectrum of residual amplitude modulation with servo control (a), (b) off and (c) on

实验结果表明, 采用法布里-珀罗腔抑制电光相位调制中的剩余幅度调制, 其抑制程度可达 45 dB。采用法布里-珀罗腔来抑制电光相位调制中的剩余

幅度调制是一种有效的方法。由于法布里-珀罗腔的响应较快, 可快速抑制剩余幅度调制以提高控制精度。

5 结 论

利用法布里-珀罗腔的透射特性和 PDH 技术,研究了运用法布里-珀罗腔抑制电光相位调制中剩余幅度调制的效果。数值计算和实验结果表明,采用法布里-珀罗腔可以有效地抑制电光相位调制中的剩余幅度调制。这一结果对相位调制光外差精密光谱和光场精密控制等方面有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Luo Ming, Bi Zhiyi, Chen Yangqin *et al.*. Line-center shift of modulation transfer spectroscopy due to the asymmetry of sidebands[J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, **48**(10): 1845~1851 (in Chinese)
罗 明,毕志毅,陈扬袞等. 边带非对称性对调制转移光谱中心斜率的影响[J]. *物理学报*, 1999, **48**(10): 1845~1851
- 2 John L. Hall, Long-Sheng Ma, Matthew Taubman *et al.*. Stabilization and frequency measurement of the I₂-stabilized Nd:YAG laser[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1999, **48**(2): 583~586
- 3 L. Robertsson, Long-Sheng Ma, S. Picard. Improved iodine-stabilized Nd:YAG lasers [C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4269**: 268~271
- 4 S. Picard, L. Robertsson, L.-S. Ma *et al.*. Results from international comparisons at the BIPM providing a world-wide reference network of ¹²⁷I₂ stabilized frequency-doubled Nd:YAG lasers[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2003, **52**(2): 236~239
- 5 Zuo Aibin, Li Wenbo, Peng Yuexiang *et al.*. Research on frequency stabilization of modulation transfer spectroscopy[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 164~166 (in Chinese)
左爱斌,李文博,彭月祥等. 调制转移光谱稳频的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 164~166
- 6 Long-Sheng Ma, Jun Ye, Pierre Dubé *et al.*. Ultrasensitive frequency-modulation spectroscopy enhanced by a high-finesse

- optical cavity: theory and application to overtone transitions of C₂H₂ and C₂HD[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(12): 2255~2268
- 7 Jun Ye, Long-Sheng Ma, John L. Hall. Ultrasensitive detections in atomic and molecular physics: demonstration in molecular overtone spectroscopy[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(1): 6~15
 - 8 H. Stoehr, F. Mensing, J. Helmcke *et al.*. Diode laser with 1 Hz linewidth[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(6): 736~738
 - 9 Edward A. Whittaker, Manfred Gehrtz, Gary C. Bjorklund. Residual amplitude modulation in laser electro-optic phase modulation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985, **2**(8): 1320~1326
 - 10 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
 - 11 Deng Yongkai, Li Ye, Cao Jianping *et al.*. Suppression of fluctuation of residual amplitude modulation in electro-optical phase modulators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1063~1068 (in Chinese)
邓勇开,李 烨,曹建平 等. 电光相位调制器中剩余幅度调制变化的抑制[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1063~1068
 - 12 Eric D. Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *Am. J. Phys.*, 2001, **69**(1): 79~87
 - 13 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
 - 14 Zhang Yun, Zhang Tiancai, Li Tingyu *et al.*. Phase noise measurement by F-P cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 465~471 (in Chinese)
张 云,张天才,李廷鱼等. 法布里-珀罗腔对相位噪声测量的影响[J]. *光学学报*, 2000, **20**(4): 465~471
 - 15 Su Hong, Zhang Yun, Wang Hai *et al.*. Theoretical analysis of nonideal phase-modulation sideband system to lock OPO cavity [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2001, **18**(4): 297~299 (in Chinese)
苏 红,张 云,王 海等. 非理想相位调制边带锁腔系统的理论分析[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(4): 297~299