

激光线宽对光学锁相环锁相效果的影响

梁井波, 张蓉竹*, 孙年春

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 为了获得利于相干合成的具有高相干性的单元光束, 可利用光学锁相环(OPLL)来实现本振激光的相位锁定。推导了锁相后激光复振幅的互相关函数表达式, 并以此评价锁相后光束间的相干性。具体计算了参考光线宽、时间常数和与本振激光线宽差对互相关函数值的影响。定义与本振激光线宽差相关的评价参数 M , 以此表征当其他参数一定时本振激光线宽差对锁相后激光相干性的影响。进一步针对本振激光线宽不一致对锁相效果的影响进行详细分析, 得到相关参数合理值范围的计算公式。结果表明对于不同的本振激光线宽差范围需要设计不同的 OPLL 系统时间常数来实现有效锁相。

关键词 激光器; 激光锁相; 光学锁相环; 互相关函数; 相干合成

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1214003

Influence of Laser Linewidth on Phase-Locking of Optical Phase Locked Loop

Liang Jingbo, Zhang Rongzhu*, Sun Nianchun

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract Herein, we use an optical phase locked loop (OPLL) for locking the local laser's phase to achieve better laser phase-lock and obtain highly coherent unit beams. First, the cross-correlation function of the phase-locked laser's complex amplitude is determined, and the coherence between different phase-locked lasers is evaluated with a cross-correlation function. The influences of several key parameters, such as the linewidth of the reference light, time constant of the OPLL system, and the difference values of the local laser's linewidth on the function's value are analyzed. The evaluation parameter M is used to characterize the influence of the difference values of the local laser's linewidth on the coherence of the phase-locked laser keeping other parameters constant. Furthermore, the influence of the difference values of the local laser's linewidth on the phase-locking effect is analyzed in detail, and the related formula for calculating a reasonable value range of the related parameter is obtained. Our results indicate that the time constant of the OPLL system must be designed on the basis of the linewidth interval of a local laser to achieve effective phase-locking.

Key words lasers; laser phase-locked; optical phase locked loop; cross-correlation function; coherent combining

OCIS codes 140.3460; 270.1670

1 引 言

激光相干合成技术是实现高平均功率和高光束质量激光的一种有效方式, 在遥感遥测、相控阵系统、星间激光通信、定向能武器等领域有着广泛的应用前景。要实现高质量的激光合成输出, 要求参与合成的所有光束具有相同的频率和确定的相位关系, 因此在系统设计中需要对光束的相对相位、振幅、偏振和指向进行精确控制^[1]。在影响合成效率

的各种因素中, 激光束之间的相位关系一直是控制的难点。为解决这一难点, 目前已发展出共谐振腔^[2]、倏逝波耦合、自组织^[3]、注入锁定^[4]和有源反馈机制^[5-6]等不同的技术方案来实现相干合成。以上这些控制相位关系的方法, 主要是通过使激光在受激振荡过程中同步输出的方式来实现的, 因此难以进一步扩大相干合成的规模, 实际输出功率有限。相位噪声是独立激光之间相位关系不能确定的根源, 采用可以直接抑制的相位噪声, 就可以有效提高

收稿日期: 2018-06-11; 修回日期: 2018-07-16; 录用日期: 2018-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(2015AA8042038)

* E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn

相干合成阵列的规模,真正实现高平均功率输出。光学锁相环^[7-10]是一种利用电反馈控制结合电光相位调制的方法对光信号的相位进行锁定的技术,其目的是在多个不同的光束之间实现相位的同步^[11]。光学锁相环因其能够主动抑制激光器的相位噪声,在相干功率合成领域具有重要的研究价值,对激光相干合成效率的提高有重要意义^[12-16]。

利用光学锁相环(OPLL)锁定不同独立单元激光的相位,从而使得参与相干合成的单元激光间具有较高的互相关性,这一思路已得到了证实^[16]。利用一个理想无噪声激光作为参考光束,则可以证明OPLL系统在相干合成中能够起到很好的相位控制作用^[17]。但实际情况下,激光都不可能是理想无噪声的,因此在非理想参考光情况下,本振激光线宽对激光锁相效果的影响、不同OPLL系统参数下本振激光的合理选择等问题还需要仔细的分析研究。本文利用激光复振幅的互相关函数来分析锁相后激光

的相干性,通过相关函数值的高低来判定相干合成的效果。

2 OPLL 结构及锁相原理

如图1所示,OPLL锁相系统主要是由参考激光 U_c 、本振激光 U_1 、混频器(Mixer)、鉴相器(PD)、信号处理系统(SPS)和相位调制器(PM)组成。相位噪声是独立激光之间相位关系不稳定的根源,同时也是影响激光相干性的主要因素,而本振激光通过OPLL系统的相位调制后可以与参考光同相。 U_1 通过一个分束器分成两部分,一部分通过相位调制器后输出,另一部分与 U_c 一起输入混频器和鉴相器,经SPS后得到包括两束光之间相位差信息的输出反馈信号 U_e 。调制器根据反馈信号 U_e 对 U_1 进行相位调制,使其延迟或提前,以达到同参考光相同的相位。因此,从理论上讲,只要参考光质量优于本振激光,就可以改善本振激光的相干性。

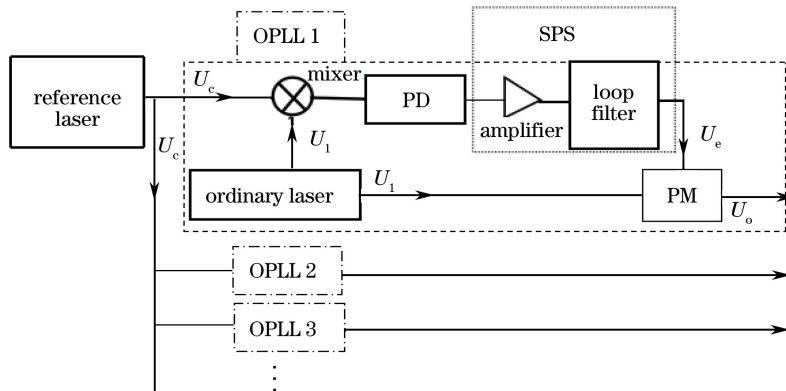


图1 相干合成的基本结构示意图

Fig. 1 Schematic of basic structure of coherent combining

OPLL系统从原理上说,可以由一个线性系统来表示^[17],如图2所示。该线性系统的输入是本振激光 U_1 和参考激光 U_c 的相位差 $\Delta\phi(t)$,输出则是输出锁相后本振激光 U_o 与参考光 U_c 之间的相位差 $\Delta\phi_o(t)$ 。整个系统的传递函数 $H(s) = \frac{1}{T \cdot s + 1}$,主要由探测器、控制电路和电光调相器的特性决定,其中, s 为复变量, T 为系统时间常数。考虑惯性环节锁相,系统时间常数 T 主要由混频器、鉴相器、放大器、滤波器和相位调制器的响应速度、放大器的增益、调制器类型及其驱动电路的电压等特性决定。惯性环节的点扩散函数 $h(t) = \frac{1}{T} \exp(-t/T)$,系统总的点扩展函数为 $\delta(t) - h(t)$ 。

设本振激光的复振幅为 $U_1 = \exp\{j[\omega_1 t + \phi_1$

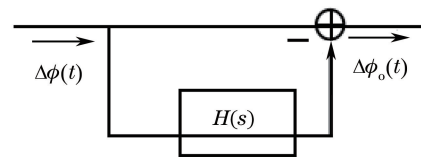


图2 锁相环系统的原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of OPLL system

$(t)]\}$,参考激光的复振幅为 $U_c = \exp\{j[\omega_0 t + \phi_c(t)]\}$,其中, ω_0, ω_1 分别为本振激光和参考激光的角频率, $\phi_1(t), \phi_c(t)$ 分别为本振激光和参考激光的相位噪声,符合维纳随机过程条件^[18]。通过OPLL系统后,输出激光与参考激光的相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\phi_o &= [\beta t + \phi_1(t) - \phi_c(t)] * [\delta(t) - h(t)] = \\ &= \beta T + [\phi_1(t) - \phi_1(t) * h(t)] - [\phi_c(t) - \phi_c(t) * h(t)] = \beta T + \xi_1 - \xi_2, \end{aligned} \quad (1)$$

式中： β 为 $(\omega_1 - \omega_0)$ ； $\xi_1 = \phi_1(t) - \phi_1(t) * h(t)$ ； $\xi_c = \phi_c(t) - \phi_c(t) * h(t)$ ；“ $*$ ”表示卷积运算。令 $\xi_t = \xi_1 - \xi_c$ ，则输出激光的复振幅形式可以写作

$$U_o = \exp[j(\omega_0 t + \phi_c(t) + \beta T + \xi_t)] \quad (2)$$

为了分析 OPLL 系统将本振激光相位锁定到参考光相位的效果，可利用锁相激光的互相关函数期望值来

$$E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)] = E[\langle U_{o1}(t) \cdot U_{o2}^*(t+s) \rangle] = \exp\{j[(\beta_1 - \beta_2)T - \omega_0 s]\} \cdot \exp\left\{-\frac{2\sigma_c^2 s + 2\sigma_c^2 T[1 - \exp(-s/T)] + (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)T}{4}\right\} \quad (3)$$

式中： $\langle f(t) \rangle = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} f(t) dt$ ，表示对时间 t 求平均， T_0 为积分时间上限。

由(3)式可知，任意两个锁相激光的互相关函数的期望值受多个参数的影响，包括 OPLL 系统时间常数 T 、参考激光线宽 σ_c^2 以及两本振激光线宽 σ_1^2 和 σ_2^2 。其中， T 作为 OPLL 系统设计的关键参数，对锁相效果的影响十分显著。由于一般单纵模的激光器线宽为兆赫兹量级，故取两本振激光线宽为 2 MHz，参考光线宽为 20 kHz，则可以得到互相关函数的期望值随 T 的变化情况，如图 3 所示。

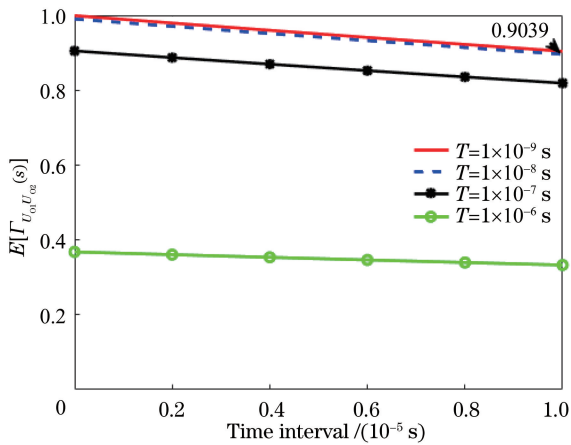


图 3 参数 T 对 $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 的影响

Fig. 3 Influence of parameter T on $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$

由图 3 可知， $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 的最大值随着 T 值的减小而增加， T 每减小一个量级， $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 的值都会增长。但是，随着 T 的取值变小， $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 值的增加，幅度明显减缓。当 T 值小于 10 ns 时，减小 T 值对相关函数期望值的提高作用已经不大，并且能在 10 μ s 的间隔时间里保证 $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 高于 0.9，此时可以视为实现了较好的锁相效果。因此，为了使锁相激光间有较好的互相关性，OPLL 的时

表示锁相后激光之间的相干性(即参与相干合成的激光相干性)^[15]。锁相激光的互相关函数期望值越高，则锁相后的激光相干性越好，即锁相效果越好。

计算可得任意两个通过 OPLL 系统后的激光 $U_{o1} = \exp\{j[\omega_0 t + \phi_c(t) + \beta_1 T + \xi_{1t}]\}$ 和 $U_{o2} = \exp\{j[\omega_0 t + \phi_c(t) + \beta_2 T + \xi_{2t}]\}$ 的互相关函数的期望为

间常数 T 应不大于 10 ns。

在确定时间常数后，首先需要考虑作为锁相标准的参考光性质。在系统时间常数 $T=10$ ns 时，针对 2 MHz 线宽的本振激光锁相，分析了参考光线宽对锁相效果的影响，如图 4 所示。

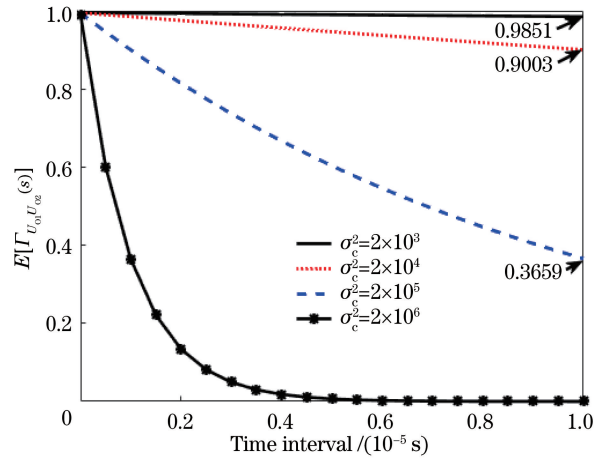


图 4 σ_c^2 对 $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 的影响 ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 2$ MHz)

Fig. 4 Influence of σ_c^2 on $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 2$ MHz)

由图 4 可知，随着 σ_c^2 的增大， $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 值减小速度明显变快，即参考光线宽越大，相干性越差，OPLL 系统对本振激光的锁相效果越差。因此，所选参考激光的线宽窄于本振激光线宽仅仅是一项基本要求，线宽越窄，锁相效果越好。当 σ_c^2 不超过 20 kHz 时，能在 10 μ s 的间隔时间里保证 $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 高于 0.9，此时可以视为实现了较好的锁相效果。

3 本振激光线宽对锁相效果的影响

由以上分析可知，利用(3)式以及已知的线宽参数，通过分析任意两个锁相激光的互相关函数期望值大小就可得到合理的 OPLL 系统设计参数 T 和参考光线宽。对于 2 MHz 线宽的本振激光锁相，

OPLL 系统时间常数 T 应不大于 10 ns, σ_c^2 不超过 20 kHz。而在实际相关合成中, 所选择的多束本振激光的线宽总不能保持相同, 因此有必要讨论本振激光线宽的不一致性对锁相后激光相干性影响情

况。为方便分析, 以两束激光的合成作为例。

首先, 定义两束激光的线宽差为 $\Delta\sigma^2 = \sigma_2^2 - \sigma_1^2$, 表示两束本振激光线宽的不一致性。则通过(3)式可得

$$E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)] = E[\langle U_{o1}(t) \cdot U_{o2}^*(t+s) \rangle] = \exp\{j[(\beta_1 - \beta_2)T - \omega_0 s]\} \cdot \exp\left\{-\frac{2\sigma_c^2 s + 2\sigma_c^2 T[1 - \exp(-s/T)] + (2\sigma_1^2 + \Delta\sigma^2)T}{4}\right\}. \quad (4)$$

由(4)式可知, $\Delta\sigma^2$ 只影响其互相关函数期望值的最大值 $\exp[-(2\sigma_1^2 + \Delta\sigma^2)T/4]$ 。如图 5 所示, 可以看出随着 $\Delta\sigma^2$ 的变大, 锁相输出激光的互相关函数期望值的最大值逐渐减小, 即本振激光线宽差越

大, 锁相输出激光之间的相干性越差, 越不利于相干合成。

由上述分析可知, 本振激光线宽差的存在会影响锁相效果。从(4)式可以看出, T 也是影响 $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 最大值的重要参数, 要得到较好的锁相效果需要考虑 T 与 $\Delta\sigma^2$ 的共同作用效果。因此研究了当 T 不同时, $\Delta\sigma^2$ 对锁相后激光相干性的影响, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, T 越大, $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 随 $\Delta\sigma^2$ 增大而减小的速度越快, 即线宽差对锁相后激光相干性的影响越大。当 $\Delta\sigma^2 = 0$ 时, 随着 T 的增大, $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 的最大值逐渐减小。比较图 6(a)和(b), 不难看出, 当 $T < 10$ ns 时, $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 的最大值基本稳定不变, 且 $\Delta\sigma^2$ 在 4 MHz(2 倍于本振激光线宽的线宽差)的线宽差范围内几乎不影响 $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 的值。

以上为针对特定线宽激光锁相的分析, 为定量地评价激光线宽差变化对锁相后激光相干性的影响, 将(4)式写为

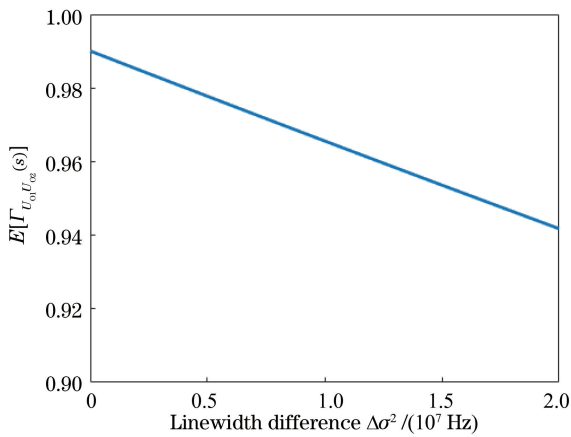


图 5 $\Delta\sigma^2$ 对输出光互相关函数值的影响
($T=10$ ns, $\sigma_1^2=2$ MHz, $\sigma_c^2=20$ kHz)
Fig. 5 Influence of $\Delta\sigma^2$ on $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$
($T=10$ ns, $\sigma_1^2=2$ MHz, $\sigma_c^2=20$ kHz)

$$E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)] = E[\langle U_{o1}(t) \cdot U_{o2}^*(t+s) \rangle] = \exp\{j[(\beta_1 - \beta_2)T - \omega_0 s]\} \cdot \exp\left\{-\frac{2\sigma_c^2 s + 2\sigma_c^2 T[1 - \exp(-s/T)] + 2\sigma_1^2 T}{4}\right\} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta\sigma^2 T}{4}\right). \quad (5)$$

定义 $M = \exp(-\Delta\sigma^2 T/4)$, 可视为线宽差不一致对锁相效果的扰动项或噪声项, 即可以表示线宽差对锁相后激光间相干性的影响因子。表 1 展示了

不同 $\Delta\sigma^2$ 所对应的 M 值, 从中可以看出, 当 T 值确定时, 线宽差越大, M 的值越小, 即线宽差对锁相后激光间相干性影响越大。

表 1 不同 $\Delta\sigma^2$ 所对应的 M 值($T=10$ ns)

Table 1 Values of M with different $\Delta\sigma^2$ ($T=10$ ns)

Linewidth difference $\Delta\sigma^2$ / MHz	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	10	20	50
M	0.9988	0.9975	0.9963	0.9950	0.9925	0.9753	0.9512	0.8825

由于 OPLL 系统时间常数 T 也存在于 M 中, 因此有必要分析 T 不同时, 线宽差对锁相后激光间相干性的影响。

如图 7 所示, 当 T 较大时, M 值随 $\Delta\sigma^2$ 的增大而呈指数下降; 当 T 越小时(小于 10 ns), M 值下降越缓慢, 即 T 越小, 线宽差对 M 的影响越小。

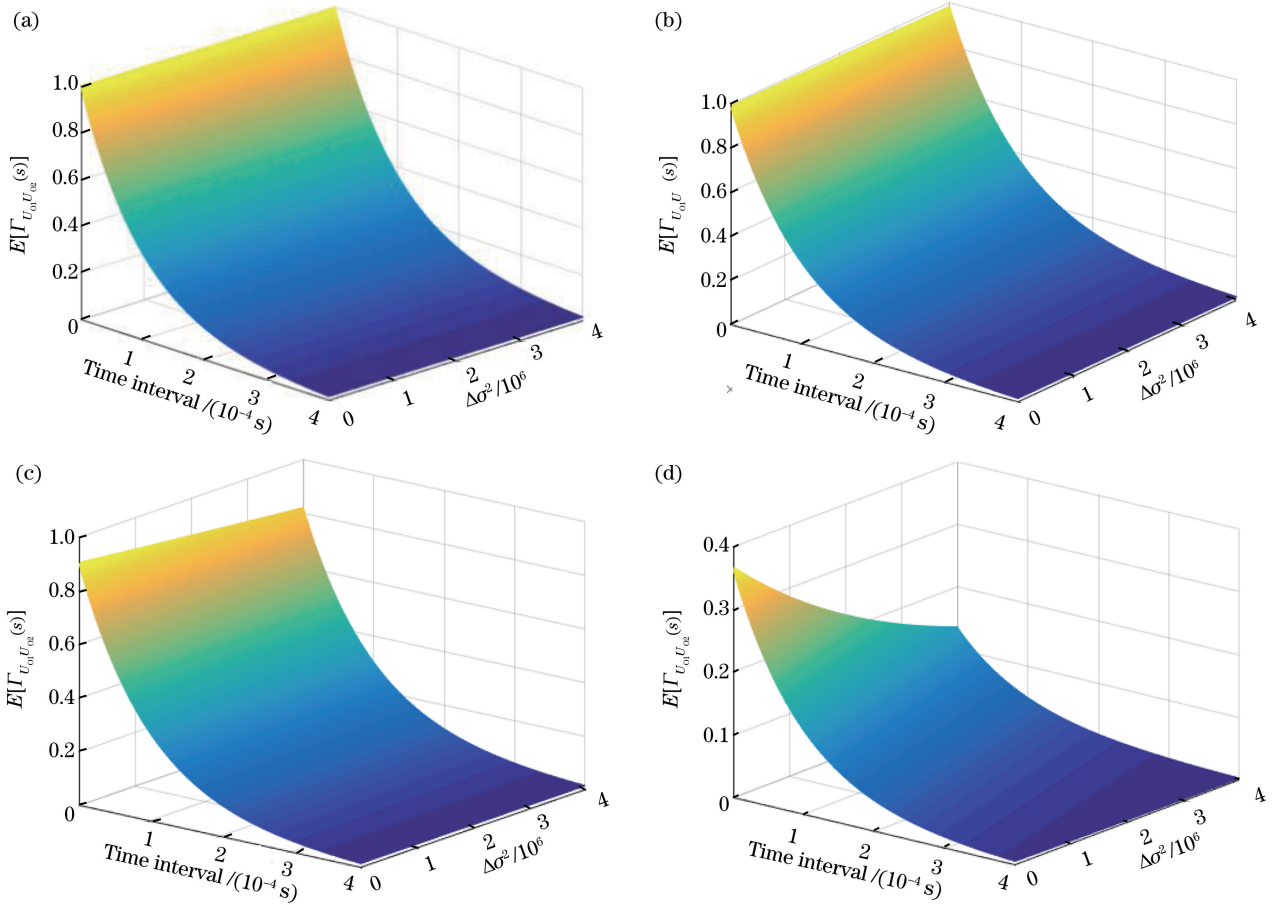


图 6 当 T 取不同值时, $\Delta\sigma^2$ 对 $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ 的影响。(a) $T=1$ ns; (b) $T=10$ ns; (c) $T=100$ ns; (d) $T=1000$ ns

Fig. 6 Influence of $\Delta\sigma^2$ on $E[\Gamma_{U_{o1}U_{o2}}(s)]$ when T is different. (a) $T=1$ ns; (b) $T=10$ ns; (c) $T=100$ ns; (d) $T=1000$ ns

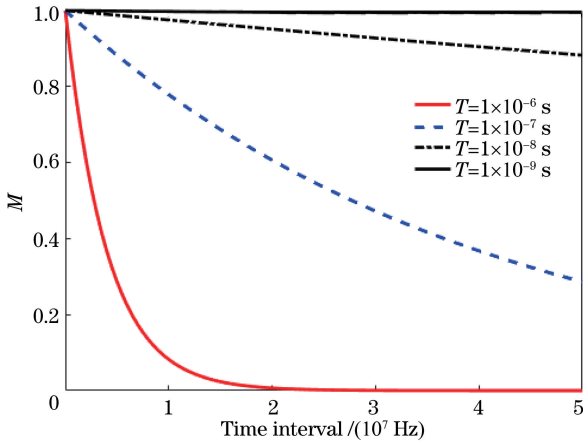


图 7 不同 T 值时, M 随 $\Delta\sigma^2$ 的变化

Fig. 7 M changes with $\Delta\sigma^2$ at different T values

为确定可接受的线宽差范围,假设 M 值不小于 0.9999 是可以接受的(即 $\Delta\sigma^2$ 对锁相效果只有万分之一的影 响),则 $\exp(-\Delta\sigma^2 T/4) \geq 0.9999$, 计算可得

$$\Delta\sigma^2 \leq -\frac{4\ln 0.9999}{T} \quad (6)$$

利用(6)式可以得到可接受的线宽差范围,例

如;当 $T=10$ ns 时,计算可得 $\Delta\sigma^2 \leq 4.0002 \times 10^4$ Hz,即两本振激光的线宽差不应超过 40 kHz。

4 结 论

推导了锁相后激光复振幅的互相关函数期望值的表达式,并以该表达式来表示锁相后激光的相干性,其函数期望值越高,表明锁相后激光间的相干性越好,越有利于后续的相干合成。分析了几个关键参数对互相关函数期望值的影响,计算结果表明,对 2 MHz 线宽的激光锁相,为达到较好的相位锁定,要求 OPLL 系统时间常数 T 小于 10 ns,参考激光线宽小于 20 kHz。在此基础上,定义了表示本振激光线宽的不一致性对锁相影响的影响因子 M 以及可接受的 M 值范围,分析得到了相关参数的合理值范围的计算公式。当 $T=10$ ns 时,两本振激光的线宽差不应超过 40 kHz。结果表明,对于不同的本振激光线宽差范围需要设置不同的 T 值来实现有效锁相,为激光相干合成 OPLL 系统的设计提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- [2] Kono Y, Takeoka M, Uto K, *et al.* A coherent all-solid-state laser array using the Talbot effect in a three-mirror cavity [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(5): 607-614.
- [3] Shirakawa A, Saitou T, Sekiguchi T, *et al.* Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. Optics Express, 2002, 10(21): 1167-1172.
- [4] Bartelt-Berger L, Brauch U, Giesen A, *et al.* Power-scalable system of phase-locked single-mode diode lasers [J]. Applied Optics, 1999, 38(27): 5752-5760.
- [5] Demoustier S, Bellanger C, Brignon A, *et al.* Coherent beam combining of 1.5 μm Er/Yb doped fiber amplifiers [J]. Fiber and Integrated Optics, 2008, 27(5): 392-406.
- [6] Augst S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers [J]. Optics Letters, 2004, 29(5): 474-476.
- [7] Santarelli G, Clairon A, Lea S N, *et al.* Heterodyne optical phase-locking of extended-cavity semiconductor lasers at 9 GHz [J]. Optics Communications, 1994, 104(4/5/6): 339-344.
- [8] Steele R C. Optical phase-locked loop using semiconductor laser diodes [J]. Electronics Letters, 1983, 19(2): 69-71.
- [9] Liang W. Study of optical phase lock loops and the applications in coherent beam combining and coherence cloning [D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2008.
- [10] Yim S H, Lee S B, Kwon T Y, *et al.* Optical phase locking of two extended-cavity diode lasers with ultra-low phase noise for atom interferometry [J]. Applied Physics B, 2013, 115(4): 491-495.
- [11] Shi H X. Research on optical phase-locked loop [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
石宏霄. 光学锁相环技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [12] Liang W. Application of optical phase lock loops in coherent beam combining [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6873: 68731Y.
- [13] Liang W, Yariv A, Kewitsch A, *et al.* Coherent combining of the output of two semiconductor lasers using optical phase-lock loops [J]. Optics Letters, 2007, 32(4): 370-372.
- [14] Cao X K, He Y, Zhang R Z. Study of laser phase noise and its suppression [J]. Optical Technique, 2008, 34(s1): 188-189.
曹翔科, 何耀, 张蓉竹. 激光的相位噪声特性以及抑制方法研究 [J]. 光学技术, 2008, 34(s1): 188-189.
- [15] Chang S, Tong S F, Jiang H L, *et al.* Optical phase-locked loop technology in inter-satellite high-speed coherent laser communication systems [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206004.
常帅, 佟首峰, 姜会林, 等. 星间高速相干激光通信系统中的光学锁相环技术 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206004.
- [16] Wang J, Chen D J, Cai H W, *et al.* Optical phase-locked loop of single section distributed feedback semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401001.
王建, 陈迪俊, 蔡海文, 等. 单段式分布式反馈半导体激光器光学锁相环研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401001.
- [17] Cao F L, Zhang R Z. Discussion on the effect of an optical phase-locked loop on the coherence properties of a laser [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(5): 910-914.
- [18] Zhang R Z, Yang C L. Active phase-locked technology of laser arrays [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(1): 54-57.
张蓉竹, 杨春林. 阵列激光器主动锁相技术研究 [J]. 半导体光电, 2005, 26(1): 54-57.