

文章编号: 0258-7025(2009)01-0119-06

噪声交叉关联程度受时间周期调制下 单模激光的光强关联时间

陈德彝 王忠龙

(三峡大学理学院物理系, 湖北 宜昌 443002)

摘要 用线性化近似方法计算了噪声间关联程度 λ 受时间周期调制下单模激光系统的光强关联时间 T , 结果表明, 无论 $\lambda = 0, \lambda > 0$ 或 $\lambda < 0$, T 随量子噪声强度 D 和抽运噪声强度 Q 的变化均呈单调增长且最终趋于饱和 ($T = 1$), 只是当 $\lambda < 0$ 时 T 随 Q 的变化曲线出现一极小值(存在抑制现象); 当 $\lambda = 0$ 时, T 不随时间周期调制频率 Ω_λ 变化, 当 $\lambda > 0$ 和 $\lambda < 0, \Omega_\lambda$ 取值小时 $T-\Omega_\lambda$ 曲线出现高频振荡, 随着 Ω_λ 值增大振荡频率变低, 振幅变小, 最后趋于与 $\lambda = 0$ 的 T 值一致。

关键词 激光物理; 光强关联时间; 线性化近似; 交叉关联程度; 时间周期调制; 随机共振

中图分类号 TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0119

Intensity Correlation Time of the Single-Mode Laser with the Noise Cross-Correlation Intensity Modulated by Time Period

Chen Deyi Wang Zhonglong

(Department of Physics, Science College, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract By means of the linear approximation method, we calculate the intensity correlation time T of the single-mode laser system with the cross-correlation intensity λ between noises modulated by time period. The results show that whether $\lambda = 0, \lambda > 0$ or $\lambda < 0$, the intensity correlation time T increases monotonously with the quantum noise intensity D and pump noise intensity Q , and tends to saturation finally ($T = 1$). The evolution of the intensity correlation time T with pump noise intensity Q appears a restraint for $\lambda < 0$, i. e. a minimum. When $\lambda = 0$, the intensity correlation time T does not change with the time period modulation frequency Ω_λ . When $\lambda > 0$ and $\lambda < 0$, the evolution of the intensity correlation time T with Ω_λ presents high-frequency oscillation for smaller Ω_λ . Increasing Ω_λ , the oscillation frequency becomes small and amplitude decreases. Finally, the intensity correlation time T is consistent with that of $\lambda = 0$.

Key words laser physics; intensity correlation time; linear approximation method; cross-correlation intensity; time period modulation; stochastic resonance

1 引 言

激光系统的稳定输出, 关系到提高激光器和激光通信的质量。乘法噪声和加法噪声的存在, 会引起激光系统的涨落^[1~5], 从而影响激光系统输出的稳定性。近年来, 人们愈来愈关注对激光光强涨落的研究^[6~8]。

激光光强的关联时间是描述激光系统的基本统计量, 对研究激光系统的动态特性有重要意义。激光光强关联时间又是实验可测的物理量, 对它的讨

论有较强的实用价值。近年来, 不少文献对此问题进行了深入的研究^[9~19]。

激光通信中要对激光进行调制, 这种调制会对系统产生影响。在以前的研究中, 除了考虑对输入信号的调制以外, 还考虑了对激光系统噪声本身的调制, 但激光系统中噪声间交叉关联程度受调制的情况目前还未见报道。2000 年 Claudio J. Tessone 等^[20]首次考虑了对噪声间关联程度复周期调制的双稳系统, 从理论和实验上作了分析。由于两噪声

收稿日期: 2008-01-02; 收到修改稿日期: 2008-04-29

作者简介: 陈德彝(1951—), 男, 副教授, 目前主要从事激光动力学方面的研究。

E-mail: chendeyi@ctgu.edu.cn, chendy12@163.com

间关联程度的正负在统计意义上反映两噪声的相长或相消干涉,因此噪声间关联程度受时间周期调制所反映的物理过程是两噪声项的总噪声强度的大小出现时间周期变化。本文将噪声间关联程度受时间周期调制引入激光系统,旨在探讨在引入噪声间关联程度受时间周期调制这一新的条件下,光强关联时间是否出现新的现象。采用线性化近似的方法计算噪声间交叉关联程度受时间周期调制情况下的单

模激光增益模型的激光光强关联时间,讨论了光强关联时间 T 随量子噪声强度 D , 抽运噪声强度 Q , 时间周期调制频率 Ω_λ 的变化规律。

2 单模激光增益模型的光强关联时间

受信号调制的单模激光增益模型的光强朗之万(Langevin)方程为

$$\frac{dI}{dt} = -2KI + \frac{2\Gamma I}{1+\beta I} + D + \frac{2I}{1+\beta I}\xi(t) + 2\sqrt{I}\eta(t) + A\cos(\Omega t), \quad (1)$$

式中 I 为光强, K 为损失系数, Γ 为增益系数, $\beta = \tilde{A}/\Gamma$, 其中 \tilde{A} 为自饱和系数, D 为量子噪声强度, A 为输入信号强度, Ω 为输入信号频率。(1) 式中噪声 $\xi(t)$ 和 $\eta(t)$ 的统计性质为

$$\begin{aligned} \langle \xi(t) \rangle = \langle \eta(t) \rangle = 0, \quad \langle \xi(t)\xi(t') \rangle = 2Q\delta(t-t'), \quad \langle \eta(t)\eta(t') \rangle = 2D\delta(t-t'), \\ \langle \xi(t)\eta(t') \rangle = \langle \eta(t)\xi(t') \rangle = 2\lambda\cos(\Omega_\lambda t) \sqrt{QD}\delta(t-t'), \quad -1 \leq \lambda \leq 1 \end{aligned} \quad (2)$$

式中 Q 为抽运噪声强度, λ 为噪声间交叉关联程度, Ω_λ 为对交叉关联程度 λ 的时间周期调制频率。

可求出确定论稳定光强为 $I_0 = (\Gamma - K)/\beta K$, 在稳定光强 I_0 附近把(1)式线性化, 令 $I = I_0 + \epsilon(t)$, 其中 $\epsilon(t)$ 为微扰项, 代入(1)式可得线性化方程

$$\frac{d\epsilon(t)}{dt} = -\gamma\epsilon(t) + D + \frac{2I_0}{1+\beta I_0}\xi(t) + 2\sqrt{I_0}\eta(t) + A\cos(\Omega t), \quad (3)$$

式中 $\gamma = 2K(\Gamma - K)/\Gamma$, 为衰减系数。对(3)式直接积分可得 $\epsilon(t')$

$$\epsilon(t') = e^{-\gamma t'} \left[\frac{D}{\gamma} (e^{\gamma t'} - 1) + \frac{2I_0}{1+\beta I_0} \int_0^{t'} \xi(s) e^{\gamma s} ds + 2\sqrt{I_0} \int_0^{t'} \eta(s) e^{\gamma s} ds + A \int_0^{t'} \cos(\Omega s) e^{\gamma s} ds \right], \quad (4)$$

进而可求出 $\langle \epsilon(t') \rangle$

$$\langle \epsilon(t') \rangle = \frac{D}{\gamma} - \left(\frac{D}{\gamma} + \frac{A\gamma}{\gamma^2 + \Omega^2} \right) e^{-\gamma t'} + \frac{A}{\sqrt{\gamma^2 + \Omega^2}} \cos(\Omega t' - \theta), \quad (5)$$

式中 θ 为

$$\cos \theta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \Omega^2}}, \quad \sin \theta = \frac{\Omega}{\sqrt{\gamma^2 + \Omega^2}},$$

可计算出平均光强相关函数

$$\begin{aligned} C'(t) = \lim_{t' \rightarrow \infty} \overline{\langle I(t+t')I(t') \rangle} = \frac{\Omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\Omega} \lim_{t' \rightarrow \infty} \langle I(t+t')I(t') \rangle dt' = \\ \left(I_0 + \frac{D}{\gamma} \right)^2 + \left[4I_0 \frac{D}{\gamma} + \left(\frac{2I_0}{1+\beta I_0} \right)^2 \frac{Q}{\gamma} \right] e^{-\gamma t} + \frac{A^2}{2} \frac{1}{\gamma^2 + \Omega^2} \cos(\Omega t) + \\ \frac{1}{2\pi} \frac{\Omega}{\Omega_\lambda} \left[\sin\left(\frac{\Omega_\lambda}{\Omega} 2\pi - \theta\right) - \sin(-\theta) \right] \frac{8I_0^{3/2}}{1+\beta I_0} 2\lambda \sqrt{QD} \frac{e^{-\gamma t}}{\sqrt{4\gamma^2 + \Omega^2}}, \end{aligned} \quad (6)$$

坐标平移, 去掉常数项后的平均光强关联函数为

$$\begin{aligned} C(t) = \left[4I_0 \frac{D}{\gamma} + \left(\frac{2I_0}{1+\beta I_0} \right)^2 \frac{Q}{\gamma} \right] e^{-\gamma |t|} + \frac{A^2}{2} \frac{1}{\gamma^2 + \Omega^2} \cos(\Omega t) + \\ \frac{1}{2\pi} \frac{\Omega}{\Omega_\lambda} \left[\sin\left(\frac{\Omega_\lambda}{\Omega} 2\pi - \theta\right) - \sin(-\theta) \right] \frac{8I_0^{3/2}}{1+\beta I_0} 2\lambda \sqrt{QD} \frac{e^{-\gamma |t|}}{\sqrt{4\gamma^2 + \Omega^2}}, \end{aligned} \quad (7)$$

光强相对涨落为

$$\begin{aligned} C(0) = \left[4I_0 \frac{D}{\gamma} + \left(\frac{2I_0}{1+\beta I_0} \right)^2 \frac{Q}{\gamma} \right] + \frac{A^2}{2} \frac{1}{\gamma^2 + \Omega^2} + \\ \frac{1}{2\pi} \frac{\Omega}{\Omega_\lambda} \left[\sin\left(\frac{\Omega_\lambda}{\Omega} 2\pi - \theta\right) - \sin(-\theta) \right] \frac{8I_0^{3/2}}{1+\beta I_0} 2\lambda \sqrt{QD} \frac{1}{\sqrt{4\gamma^2 + \Omega^2}}, \end{aligned} \quad (8)$$

光强关联时间

$$T = \int_0^{\infty} \frac{C(t)}{C(0)} dt = \frac{1}{C(0)} \int_0^{\infty} C(t) dt, \quad (9)$$

可得

$$T = \frac{1}{C(0)} \left\{ \left[4I_0 \frac{D}{\gamma} + \left(\frac{2I_0}{1+\beta I_0} \right)^2 \frac{Q}{\gamma} \right] \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{2\pi \Omega_\lambda} \left[\sin\left(\frac{\Omega_\lambda}{\Omega} 2\pi - \theta\right) - \sin(-\theta) \right] \frac{8I_0^{3/2}}{1+\beta I_0} 2\lambda \sqrt{QD} \frac{1}{\sqrt{4\gamma^2 + \Omega^2}} \frac{1}{\gamma} \right\}. \quad (10)$$

以下仅讨论 $\Omega_\lambda \neq n\Omega$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 时的情况。

3 讨论

3.1 光强关联时间 T 随量子噪声强度 D 的变化

图 1 是以噪声间交叉关联程度 λ 为参数的光强关联时间 T 随量子噪声强度 D 的变化曲线。可以看出,光强关联时间 T 随着量子噪声强度 D 的增大而单调增长,最后趋于 1(图中未画出)。不同 λ 的 T - D 曲线起点相同,最初不同 λ 的 T - D 曲线随着量子噪声强度 D 的增大而逐渐分开(约在 $0 \sim 0.5$ 之间),曲线的斜率随噪声间交叉关联程度 λ 的增大而缓慢增长,然后不同 λ 的 T - D 曲线随着量子噪声强度 D 的继续增大而逐渐趋于一致。

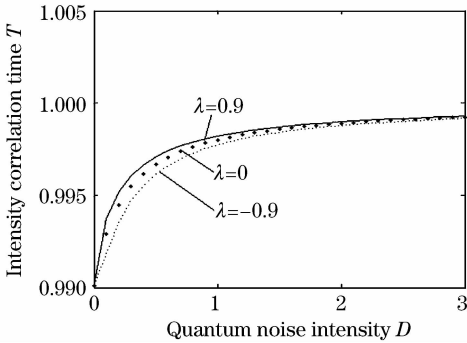


图 1 以 λ 为参数的关联时间 T 随量子噪声强度 D 的变化曲线。其他参数为: $I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, Q = 1, A = 1, \Omega = 1, \Omega_\lambda = 3$

Fig. 1 Evolution curves of the correlation time T with the quantum noise intensity D for parameter λ . Other parameters are: $I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, Q = 1, A = 1, \Omega = 1, \Omega_\lambda = 3$

图 2 是以输入信号频率 Ω 为参数的光强关联时间 T 随量子噪声强度 D 的变化曲线,此曲线与图 1 的变化曲线有区别和相似之处,区别是输入信号频率 Ω 不同的 T - D 曲线在 T 轴上的起点不同,起点随输入信号频率 Ω 升高而升高,导致曲线斜率下降;相似之处是:不同 Ω 的 T - D 曲线随着量子噪声强度 D

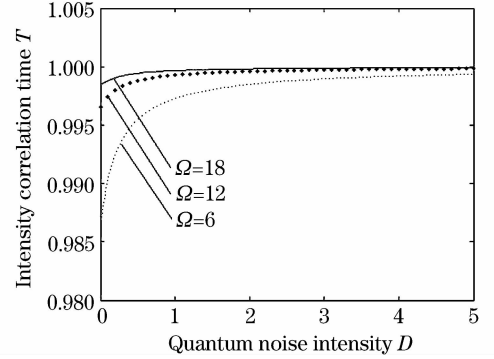


图 2 以 Ω 为参数的关联时间 T 随量子噪声强度 D 的变化曲线。其他参数为: $I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, Q = 1, A = 1, \Omega_\lambda = 7, \lambda = -0.9$

Fig. 2 Evolution curves of the correlation time T with the quantum noise intensity D for parameter Ω . Other parameters are: $I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, Q = 1, A = 1, \Omega_\lambda = 7, \lambda = -0.9$

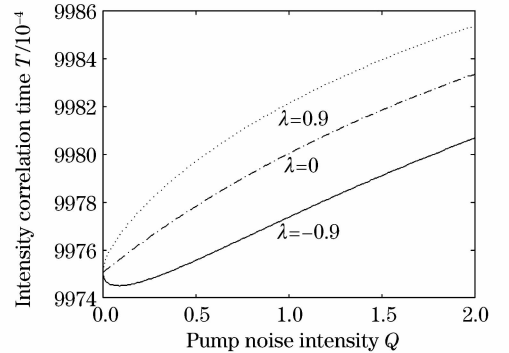


图 3 以 λ 为参数的关联时间 T 随抽运噪声强度 Q 的变化曲线。其他参数为: $I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, D = 1, A = 1, \Omega_\lambda = 3, \Omega = 7$

Fig. 3 Evolution curves of the correlation time T with the pump noise intensity Q for parameter λ . Other parameters are: $I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, D = 1, A = 1, \Omega_\lambda = 3, \Omega = 7$

的增大而逐渐趋于一致,最终趋于 1。

3.2 光强关联时间 T 随抽运噪声强度 Q 的变化

图 3 是以噪声间交叉关联程度 λ 为参数的光强关联时间 T 随抽运噪声强度 Q 的变化曲线。当 λ 为

负数时,曲线出现一个极小值(即出现抑制);当 λ 为零和正值时,曲线单调增长,最终趋于1(图中未画出),且随着 λ 的增长曲线的斜率升高。

以输入信号频率 Ω 为参数的光强关联时间 T 随抽运噪声强度 Q 的变化曲线与 $T-D$ 曲线类似。

3.3 光强关联时间 T 随时间周期调制频率 Ω_λ 的变化

3.3.1 以噪声间交叉关联程度 λ 为参数的 $T-\Omega_\lambda$ 曲线

图4(a)为 $\lambda \geq 0$ 时的曲线,当 $\lambda = 0$ 时,关联时间是一常数,这可以直接从(10)式看出(按图4(a)所取参数可算出 $T = 0.9901$)。当 $\lambda > 0$ 时,在时间周期调制频率 Ω_λ 较小时,关联时间 T 出现高频振荡。随着时间周期调制频率 Ω_λ 的增大关联时间 T 的振荡频率减小,振幅降低,其特点是振荡均发生在 $T > 0.9901$ 。图4(b)为 $\lambda \leq 0$ 时的曲线,当 $\lambda < 0$ 时,关联时间 T 也出现高频振荡,与 $\lambda > 0$ 时不同的是,在时间周期调制频率 Ω_λ 较小时,关联时间 T 的取值既可以大于0.9901,也可以小于0.9901。振荡的振幅取值不规则,当时间周期调制频率较大时,关联时间 T 的取值均小于0.9901,振幅也是逐渐变小,振荡频率变低。在 $\lambda < 0$ 的范围内, λ 本身的变化对

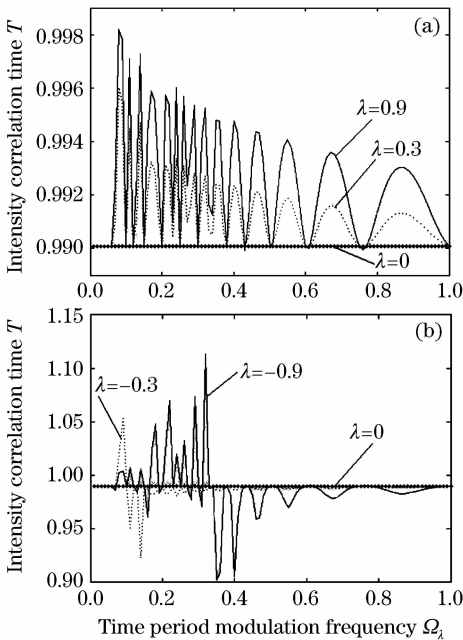


图4 以 λ 为参数的关联时间 T 随时间周期调制频率 Ω_λ 的变化曲线。(a) $\lambda \geq 0$; (b) $\lambda \leq 0$ 。其他参数为:
 $I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, Q = 1, A = 1, D = 1, \Omega = 3$
Fig. 4 Evolution curves of the correlation time T with the time period modulation frequency Ω_λ for parameter $\lambda \geq 0$ (a) and $\lambda \leq 0$ (b). Other parameters are: $I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, Q = 1, A = 1, D = 1, \Omega = 3$

$T-\Omega_\lambda$ 曲线的影响没有一定规律。

3.3.2 以输入信号频率 Ω 为参数的 $T-\Omega_\lambda$ 曲线

图5(a)为 $\lambda \geq 0$ 时的曲线,光强关联时间 T 随时间周期调制频率 Ω_λ 变化呈振荡图形,特点是:1) 所有曲线均在对应 $\lambda = 0$ 的关联时间以上;2) 在时间周期调制频率 Ω_λ 不太大时,关联时间高频振荡,随着时间周期调制频率 Ω_λ 的增大,振荡逐渐趋于平缓,振荡的周期延长,振幅降低;3) 随着输入信号频率的增大,振荡曲线整条曲线抬高,振荡幅度减小,曲线的形状不变。

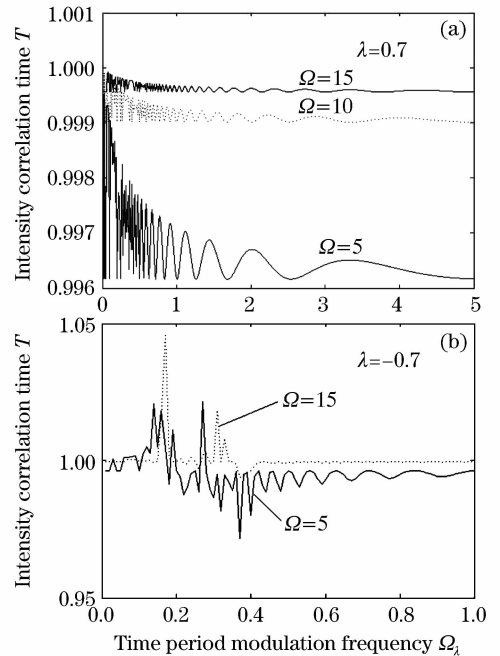


图5 以 Ω 为参数的关联时间 T 随时间周期调制频率 Ω_λ 的变化曲线。(a) $\lambda \geq 0$; (b) $\lambda < 0$ 。其他参数为:
 $I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, Q = 1, A = 1, D = 1$
Fig. 5 Evolution curves of the correlation time T with the time period modulation frequency Ω_λ for parameter Ω . (a) $\lambda \geq 0$; (b) $\lambda < 0$. Other parameters are: $I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, Q = 1, A = 1, D = 1$

图5(b)为 $\lambda < 0$ 时的曲线,仍然是振荡图形。当时间周期调制频率 Ω_λ 不大时,关联时间 T 的取值既可以大于对应 $\lambda = 0$ 的关联时间也可以小于对应 $\lambda = 0$ 的关联时间,振荡的振幅取值不规则;当时间周期调制频率 Ω_λ 较大时,关联时间 T 的取值均小于对应 $\lambda = 0$ 的关联时间,振幅也是逐渐变小,振荡频率变低。 $\lambda < 0$ 的情况下输入信号频率 Ω 的变化对 $T-\Omega_\lambda$ 曲线的影响没有一定规律。

3.3.3 以噪声强度为参数的 $T-\Omega_\lambda$ 曲线

研究发现量子噪声强度 D 和抽运噪声强度 Q 对光强关联时间 T 随时间周期调制频率 Ω_λ 变化曲

线有相同的变化规律,所以仅讨论以抽运噪声强度 Q 为参数时对光强关联时间 T 随时间周期调制频率 Ω_λ 变化曲线的影响。

图 6(a)为 $\lambda > 0$ 时的曲线,由图可见,光强关联时间 T 随时间周期调制频率 Ω_λ 的变化情况,当 Ω_λ 的值小时出现高频振荡,随着时间周期调制频率 Ω_λ 值的增大,振荡逐渐趋于平缓,振荡的周期变长,振幅降低;所有曲线均在对应 $\lambda = 0$ 的关联时间以上。随着抽运噪声强度 Q 的增加,振荡曲线整条上移,振荡的幅度增加,曲线形状不变。

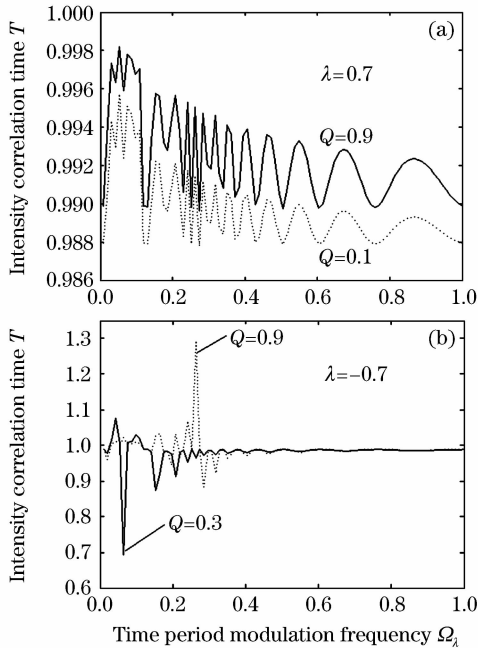


图 6 以 Q 为参数的关联时间 T 随时间周期调制频率 Ω_λ 的变化曲线。(a) $\lambda > 0$; (b) $\lambda < 0$ 。其他参数为:

$$I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, \Omega = 3, A = 1, D = 1$$

Fig. 6 Evolution curves of the correlation time T with the time period modulation frequency Ω_λ for parameter Q . (a) $\lambda > 0$; (b) $\lambda < 0$. Other parameters are:

$$I_0 = 1, \gamma = 1, \beta = 1, \Omega = 3, A = 1, D = 1$$

图 6(b)为 $\lambda < 0$ 的曲线,仍然是振荡图形,当时间周期调制频率 Ω_λ 不大时,关联时间 T 的取值既可以大于对应 $\lambda = 0$ 的关联时间也可以小于对应 $\lambda = 0$ 的关联时间,振荡的振幅取值不规则;当时间周期调制频率较大时,关联时间 T 的取值均小于对应 $\lambda = 0$ 的关联时间,振幅也逐渐变小,振荡频率变低。 $\lambda < 0$ 时,抽运噪声强度 Q 的变化对 $T-\Omega_\lambda$ 曲线的影响没有一定规律。

4 结 论

由讨论可以看出,一方面,光强关联时间 T 随

噪声强度的变化单调增加,最后趋于饱和($T \rightarrow 1$),且不受噪声间关联程度 λ 以及外噪声频率 Ω 的影响。表明光强关联时间 T 随量子噪声 D 和抽运噪声 Q 的变化平稳,最后总趋于定值。当 $\lambda < 0$ 时(即两噪声出现相消干涉时),调整抽运噪声强度会使光强关联时间出现一个极小值(图 3)。 $T-Q$ 曲线极小值的存在,表明在 Q 取 Q_{\min} (对应 T 极小值的 Q 值)时,激光光强作为随机变量随时间的变化剧烈,即光强涨落大。另一方面,光强关联时间 T 随时间周期调制频率 Ω_λ 的变化很不平稳,无论以噪声间关联程度 λ 还是噪声强度 Q, D 为参数, T 随 Ω_λ 的变化在 Ω_λ 值比较小时都会出现高频振荡,表明随机变量(即光强)极不稳定。随后,随着 Ω_λ 值的增大, T 随 Ω_λ 的变化出现普通的周期变化,最后达到一定值,表明光强涨落维持在一定水平,不再随 Ω_λ 而变。特别是在 $\lambda < 0$ 时,小 Ω_λ 值将导致光强关联时间 T 的取值既可以大于 $\lambda = 0$ 时的取值,也可以小于 $\lambda = 0$ 时的取值(图 4(b)),振荡幅度很大,即光强涨落幅度大,因此,应尽量避免 Ω_λ 取小值从而导致系统不稳定。

参 考 文 献

- 1 E. Hernandez-Garcia, R. Tordl, M. San Miguel *et al.*. Intensity correlation functions for the colored gain-noise model of dye lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 1990, **42**(11):6823~6830
- 2 Shiqun Zhu, Jianping Yin. Saturation effect in a laser at steady state [J]. *Phys. Rev. A*, 1992, **45**(7):4969~4973
- 3 Shiqun Zhu. Steady-state analysis of a single-model laser with correlations between additive and multiplicative noise [J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**(3):2405~2408
- 4 Hu Gang. Stochastic Force and Nonlinear Systems [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 1994
胡 岗. 随机力与非线性系统[M]. 上海:上海科技教育出版社, 1994
- 5 L. Zhang, L. Cao, D. J. Wu. Effect of the cross-correlation between the real and imaginary parts of quantum noise in the transient properties of single-mode laser [J]. *Phys. Lett. A*, 2003, **309**(1):29~38
- 6 Luo Xianqin, Zhu Shiqun. Correlated colored noises in a nonlinear system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(5):977~981
罗晓琴,朱士群. 非线性系统中的关联色噪声[J]. *物理学报*, 2002, **51**(5):977~981
- 7 Zhou Xiaoji, Cao Li, Wu Dajin. Effects of correlated noises on dynamic properties of a single-mode laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1):7~12
周小计,曹 力,吴大进. 关联噪声对单模激光动力学性质的影响[J]. *光学学报*, 1999, **19**(1):7~12
- 8 Liang Gunyun, Cao Li, Wu Dajin. Modulated stochastic multiresonance in single-mode laser system without input periodic signal [J]. *Chinese Physics*, 2003, **12**(10):1105~1108
- 9 Wang Zhonglong, Shi Yafei, Cao Li *et al.*. Effects of the noise-correlation-time of a single-mode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11):1019~1024
王忠龙,石亚非,曹 力等. 单模激光的噪声关联时间效应[J].

- 中国激光, 2000, **A27**(11):1019~1024
- 10 Wang Zhonglong, Shi Yafei. Correlation function and time-dependent moment of the intensity for a single-mode laser with exponential function correlation noise [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):691~693
王忠龙, 石亚非. 具有 e 指数关联噪声的单模激光的光强关联函数和含时矩[J]. 中国激光, 2002, **A29**(8):691~693
- 11 Chen Limei, Cao Li, Wu Dajin. Intensity correlation time of a single-mode laser driven by two white noises with colored cross-correlation with an additive signal modulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6):885~888
陈黎梅, 曹力, 吴大进. 加性信号调制下指数形式关联噪声驱动的单模激光的光强关联时间[J]. 光子学报, 2005, **34**(6):885~888
- 12 Chen Limei, Cao Li, Wu Dajin. Intensity correlation time of a single-mode laser driven by two colored noises with cross-correlation [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition)*, 2005, **33**(8):116~118
陈黎梅, 曹力, 吴大进. 关联色噪声驱动的单模激光的光强关联时间[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, **33**(8):116~118
- 13 Chen Limei, Cao Li, Wu Dajin. Intensity correlation time of a single-mode laser driven by two colored noises with colored cross-correlation with additive signal [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2006, **23**(2):167~172
陈黎梅, 曹力, 吴大进. 加性信号调制下色关联噪声驱动的单模激光的光强关联时间[J]. 量子电子学报, 2006, **23**(2):167~172
- 14 Jin Wang, Shiqun Zhu. Dynamical properties of a laser with correlations between additive and multiplicative noise [J]. *Phys. Lett. A*, 1995, **207**:47~52
- 15 Chongwei Xie, Dongcheng Mei. Effects of correlated noises on the intensity fluctuation of a single-mode laser system [J]. *Phys. Lett. A*, 2004, **323**:421~426
- 16 Yanfei Jin, Wei Xu, Wenxian Xie *et al.*. The relaxation time of a single-mode dye laser system driven by cross-correlated additive and multiplicative noises [J]. *Physica A*, 2005, **354**:143~152
- 17 Chen Gang, Pan Bailiang, Yao Zhixin. Dynamic model for CuBr UV laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):206~209
陈钢, 潘佰良, 姚志欣. CuBr 紫外激光动力学模型[J]. 中国激光, 2006, **33**(增刊):206~209
- 18 Ding Changlin, Wan Chongyi. Numerical simulation of injection locking of pulsed CO₂ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11):1705~1709
丁长林, 万重怡. 脉冲 CO₂ 激光器注入锁定特性的数值模拟[J]. 光学学报, 2006, **26**(11):1705~1709
- 19 Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):255~258
于永爱, 张玲玲, 唐前进等. 激光束质量实时测量技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2):255~258
- 20 Claudio J. Tessone, Horacio S. Wio, Pater Hanggi. Stochastic resonance driven by time-modulated correlated white noise sources [J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **62**(4):4623~4632