

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*

陈黎梅¹ 曹力^{2,3} 吴大进^{3,4}

(1 深圳大学物理教育系, 深圳 518060)

(2 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

(3 中国高等科学技术中心(世界实验室), 北京 100080)

(4 华中科技大学物理系, 武汉 430074)

摘要 采用线性化近似, 计算了加性信号调制下的由具有指数关联的两白噪声驱动的单模激光增益模型的光强关联时间. 发现两噪声间关联程度对光强关联时间随噪声强度的变化曲线有很大的影响, 两噪声间关联程度取不同值时, 光强关联时间随噪声强度的变化曲线中将出现极大值(即出现共振)或极小值(即出现抑制).

关键词 光强关联时间; 加性信号调制; 指数形式关联噪声; 线性化近似

中图分类号 O410 **文献标识码** A

0 引言

由于量子噪声和泵噪声的存在, 激光器工作时总伴随着涨落的出现^[1~3]. 减小激光输出光强的涨落, 可以增加激光的输出稳定性, 提高激光器和激光通讯的质量, 因而对激光光强涨落的研究已成为近年来人们普遍关注的课题^[9~11].

激光光强的关联时间是描述激光系统的基本统计量, 对研究激光的动态特性具有重要的意义. 由于该量在实验上可以测量, 因此具有一定的实用价值. 本文采用线性化近似, 着重研究了加性信号调制下由具有指数形式关联的两白噪声驱动的单模激光增益模型的光强关联时间 T . 研究发现当两噪声间互关联程度 $\lambda > 0$ 时, 光强关联时间 T 随量子噪声强度 D 和泵噪声强度 Q 的变化曲线中出现极大值(即出现共振); 当 $\lambda < 0$ 时, 光强关联时间 T 随 D 和 Q 的变化曲线中出现极小值(即出现抑制); 当 $\lambda = 0$ 时, 关联时间 T 随 D 和 Q 的增加而单调增加. 同时本文还分析了噪声互关联时间 τ 以及周期信号频率 Q 对 T - D 和 T - Q 曲线的影响.

1 单模激光输出光强的关联时间

加性信号调制下的由具有指数形式关联的白泵噪声和白量子噪声驱动的单模激光增益模型的光强方程为

$$\frac{dI}{dt} = -2KI + \frac{2\Gamma}{1+\beta I}I + D + \frac{2I}{1+\beta I}\xi(t) +$$

$$2\sqrt{I}\eta(t) + A\cos(\Omega t) \quad (1)$$

式中泵噪声 $\xi(t)$ 和量子噪声 $\eta(t)$ 满足如下的统计性质

$$\begin{aligned} \langle \xi(t) \rangle &= \langle \eta(t) \rangle = 0, \langle \xi(t)\xi(t') \rangle = Q\delta(t-t'), \\ \langle \eta(t)\eta(t') \rangle &= D\delta(t-t'), \langle \xi(t)\eta(t') \rangle = \\ \langle \eta(t)\xi(t') \rangle &= \frac{\lambda\sqrt{QD}}{2\tau} \exp\left(-\frac{|t-t'|}{\tau}\right) \\ (-1 \leq \lambda \leq 1) \end{aligned} \quad (2)$$

当式(2)中 τ 趋近 0 时, 就过渡到噪声间为 δ 函数关联形式

$$\langle \xi(t)\eta(t') \rangle = \langle \eta(t)\xi(t') \rangle = \lambda\sqrt{DQ}\delta(t-t') \quad (3)$$

式中 I 为激光光强, K 为损失系数, $\beta = \tilde{A}/\Gamma$, \tilde{A} 和 Γ 分别为自饱和系数和增益系数, λ 为两噪声间关联强度, D 、 Q 分别为量子噪声和泵噪声强度, τ 为两噪声间的互关联时间. Ω 为周期信号的频率, A 为周期信号的振幅.

将式(1)在稳态光强 $I_0 = (\Gamma - K)/\beta K$ 附近线性化

$$I = I_0 + \delta(t) \quad (4)$$

式中 $\delta(t)$ 为微扰项, 可得线性化方程

$$\begin{aligned} \frac{d\delta(t)}{dt} &= -\gamma\delta(t) + D + \frac{2I_0}{1+\beta I_0}\xi(t) + \\ &2\sqrt{I_0}\eta(t) + A\cos(\Omega t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\gamma = 2K(\Gamma - K)/\Gamma$ 为衰减系数.

根据平均光强关联函数的定义

$$C(t) = \lim_{t' \rightarrow \infty} \langle \overline{I(t'+t)I(t')} \rangle \quad (6)$$

式中 $\langle \overline{I(t'+t)I(t')} \rangle = \frac{\Omega}{2\pi} \int_{t'}^{t'+\frac{2\pi}{\Omega}} \langle I(t'+t)I(t') \rangle dt'$. 可得光强关联函数(本文只讨论 $\gamma \neq \frac{1}{\tau}$ 的情况)

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10275025)

Tel: 0755-21003943 Email: chenlm@szu.edu.cn

收稿日期: 2004-08-23

$$C(t) = \frac{A^2}{2(\Omega^2 + \gamma^2)} \cos(\Omega t) + \left(\frac{2I_0^2 \Omega}{\gamma(1 + \beta I_0)^2} + \frac{2I_0 D}{\gamma} - \frac{4I_0^{3/2} \lambda \sqrt{DQ}}{\gamma(1 + \beta I_0)(\gamma^2 \tau^2 - 1)} \right) e^{-\gamma|t|} + \frac{4I_0^{3/2} \lambda \tau_3 \sqrt{DQ}}{(1 + \beta I_0)(\gamma^2 \tau^2 - 1)} e^{-\frac{|t|}{\tau}} \quad (7)$$

根据光强关联时间的定义

$$T = \int_0^{\infty} \Phi(t) dt \quad (8)$$

式中 $\Phi(t) = C(t)/C(0)$, $C(0)$ 为光强相对涨落

$$C(0) = \frac{A^2}{2(\Omega^2 + \gamma^2)} + \frac{2I_0^2 Q}{\gamma(1 + \beta I_0)^2} + \frac{2I_0 D}{\gamma} + \frac{4I_0^{3/2} \lambda \sqrt{DQ}}{\gamma(1 + \beta I_0)(\gamma\tau + 1)} \quad (9)$$

得

$$T = \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{C(0)} \left[\frac{4I_0^{3/2} \lambda \tau \sqrt{DQ}}{\gamma(1 + \beta I_0)(\gamma\tau + 1)} - \frac{A^2}{2\gamma(\Omega^2 + \gamma^2)} \right] \quad (10)$$

2 讨论

下面根据式(10)讨论光强关联时间 T 受噪声, 信号的影响.

2.1 以噪声间互关联程度 λ 为参数的 $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线的分析

图 1 和图 2 是根据式(10)以噪声间互关联程度 λ 为参数分别画出的 $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线 ($I_0=1, A=1, \beta=1, \gamma=20, \Omega=3, \tau=0.2$, 图 1 中 $Q=1$, 图 2 中 $D=1$). 由图 1(a) 和图 2(a) 可以看出, 当噪声间互关联程度 $\lambda > 0$ 时, $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线中都出现极大值, 这表明当 λ 为正时, 光强关联时间 T 随量子噪声强度 D 和泵噪声强度 Q 的增大出现共振现象, 且共振峰随着 λ 值的增加峰值增高. 由图 1(b) 和图

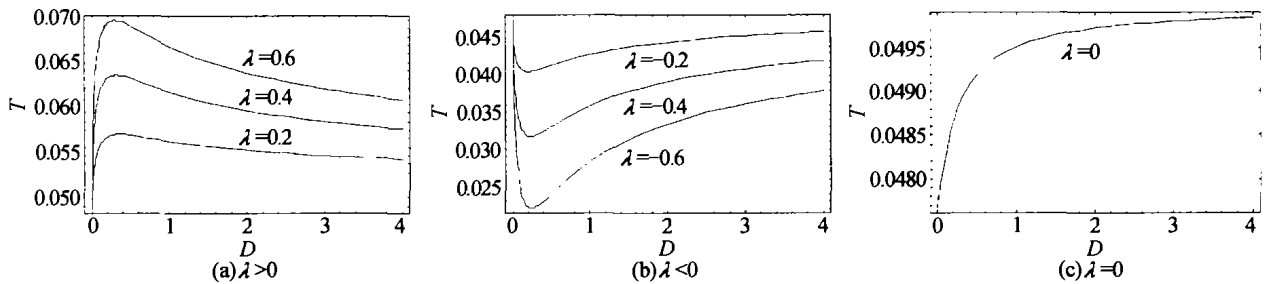


图 1 噪声间互关联程度 λ 为参数的 $T-D$ 曲线

Fig. 1 $T-D$ curve with the cross-correlation coefficient λ as the parameter

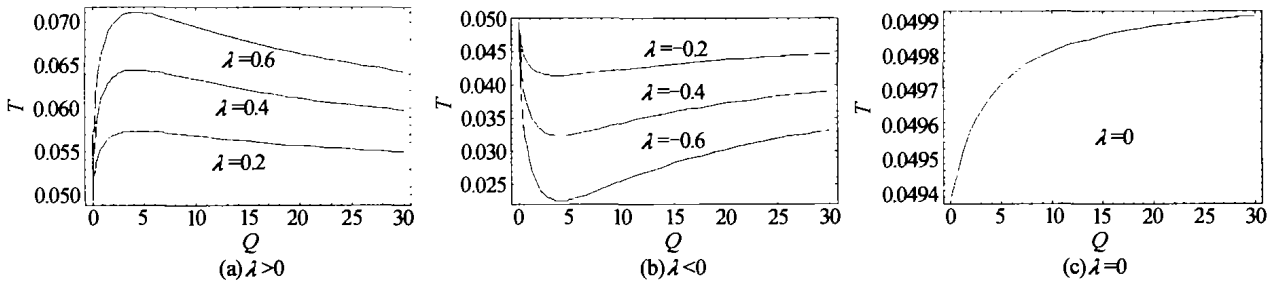


图 2 噪声间互关联程度 λ 为参数的 $T-Q$ 曲线

Fig. 2 $T-Q$ curve with the cross-correlation coefficient λ as the parameter

2(b) 看出, 当 $\lambda < 0$ 时, $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线中都出现极小值, 表明当 λ 为负时, 光强关联时间 T 随 D 和 Q 的增加出现抑制现象, 且随着 λ 的绝对值的增加, 极小值减小. 由图 1(c) 和图 2(c) 看出, 当 $\lambda = 0$ 时 $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线中都不出现极值, 此时光强关联时间 T 随 D 和 Q 的增加而单调增加.

在具体实施中, 可以将噪声发生器产生的平稳高斯噪声 $\eta(t)$ 输入到一个线性系统中, 则其输出噪声 $\xi(t)$ 也是高斯的且与输入噪声 $\eta(t)$ 是交叉关联的. 这样可以将 $\eta(t)$ 和 $\xi(t)$ 同时引入到被研究的激光系统, 就得到由一对关联噪声驱动的激光系统. 至于这对关联噪声 $\eta(t)$ 和 $\xi(t)$ 间的互关联程度 λ 的正负, 可以通过调解线性系统的一些具体物理量来实现. 具体地说, 可以通过调解输入噪声 $\eta(t)$ 的零频率的功率密度 $S_\eta(0)$ 及其对时间的二阶倒数

$S_\eta(0)$, 和冲击响应函数 $H(t)$ 及其对时间的二阶倒数 $H''(t)$ 来控制 λ 的正负.

2.2 以噪声间互关联时间 τ 为参数的 $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线的分析

图 3 和图 4 是根据式(10)以噪声间互关联时间 τ 为参数分别画出的 $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线 ($I_0=1, A=1, \beta=1, \gamma=20, \Omega=3$, 图 3 中 $Q=1$, 图 4 中 $D=1$). 由图 3(a) 和图 4(a) 发现, 当 $\lambda > 0$ 时, 随着噪声间互关联时间 τ 值的增加, $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线的共振峰峰值增高, 位置左移. 由图 3(b) 和图 4(b) 看出, 当 $\lambda < 0$ 时, 随着 τ 值的增加, $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线的抑制谷变深. 再由图 3(c) 和图 4(c) 看出, 当 $\lambda = 0$ 时, 随着 τ 值的增加, $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线保持不变, 这是因为当 $\lambda = 0$ 时, 式(10)中的噪声间互关联时间 τ 项消失, 所以 τ 的取值不再对 $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线产生影响.

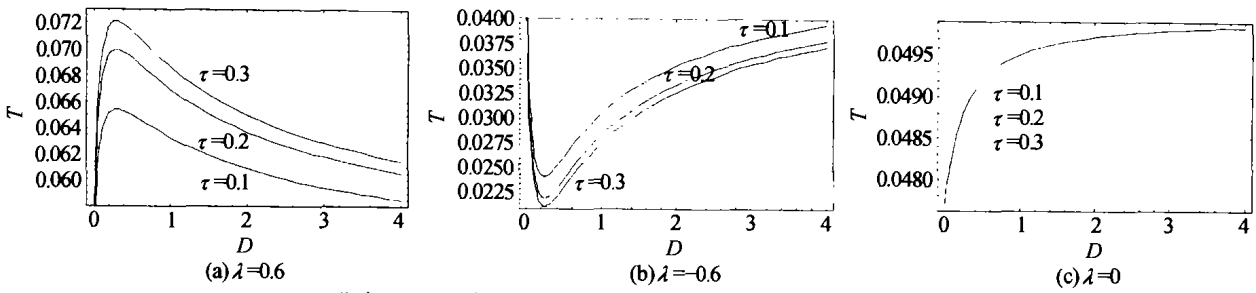


图 3 噪声间互关联时间 τ 为参数的 $T-D$ 曲线

Fig. 3 $T-D$ curve with the cross-correlation time τ as the parameter

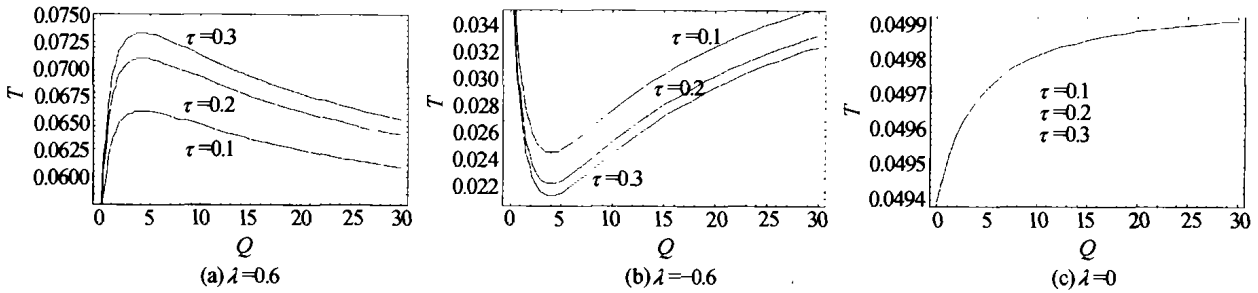


图 4 噪声间互关联时间 τ 为参数的 $T-Q$ 曲线

Fig. 4 $T-Q$ curve with the cross-correlation time τ as the parameter

2.3 以信号频率 Ω 为参数的 $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线的分析

图 5 是根据式(10), 在 $\lambda > 0$ 时, 以信号频率 Ω 为参数分别画出的 $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线 ($I_0=1, A=1, \beta=1, \gamma=20, \lambda=0.6, \tau=0.2$). 由图 5(a)和(b)可以清楚地看到, 在 $\lambda > 0$ 时, $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线仍有极大值, 但信号频率 Ω 的取值对曲线几乎没有影响. 研究还发现, 当 $\lambda < 0$ 时, $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线仍有极小值, 但随着 Ω 的增加, 曲线几乎重合; 当 $\lambda = 0$ 时, T 随 D 和 Q 的增加而单调增加, 但以 Ω 值为参数对应

的曲线几乎重合. 对于 $\lambda < 0$ 和 $\lambda = 0$ 的情况, 这里不再画图进行详细说明.

3 结论

由 2.1、2.2 和 2.3 的讨论可知, 当 $\lambda > 0$ 时, $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线中都出现极大值(出现共振现象), 且随着 λ 值和 τ 值的增加共振峰增高. 当 $\lambda < 0$ 时, $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线中都出现极小值(出现抑制现象), 且随着 λ 的绝对值和 τ 值的增加, 抑制谷变深. 当 $\lambda = 0$ 时, $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线中都不出现极值, T 随 D 和 Q 的增加而单调增加. 另外, 无论 $\lambda > 0, \lambda < 0$ 还是 $\lambda = 0$, 信号频率 Ω 的取值对 $T-D$ 和 $T-Q$ 曲线几乎没有影响.

参考文献

- 1 Hernandez-Goreia E, Toral R, San Minguel M. Intensity correlation function for the colored gain-noise model of dye lasers. *Phys Rev A*, 1990, **42**(11): 6823~6830
- 2 Zhu S Q, Yin J P. Saturation effect in a laser at steady state. *Phys Rev A*, 1992, **45**(7): 4969~4973
- 3 Zhu S Q. Steady-state analysis of a single-model laser of additive and multiplicative noise. *Phys Rev A*, 1993, **47**(3): 2405~2408
- 4 胡岗. 随机力与非线性系统. 上海: 上海科学技术教育出版社, 1994. 184~254
Hu G. Stochastic Forces and Nonlinear Systems. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 1994. 184~254
- 5 Zhang L, Cao L, Wu D J. Effect of the cross-correlation between the real and imaginary parts of quantum noise in the transient properties of single-mode laser. *Phys Lett A*, 2003, **309**(1): 29~38

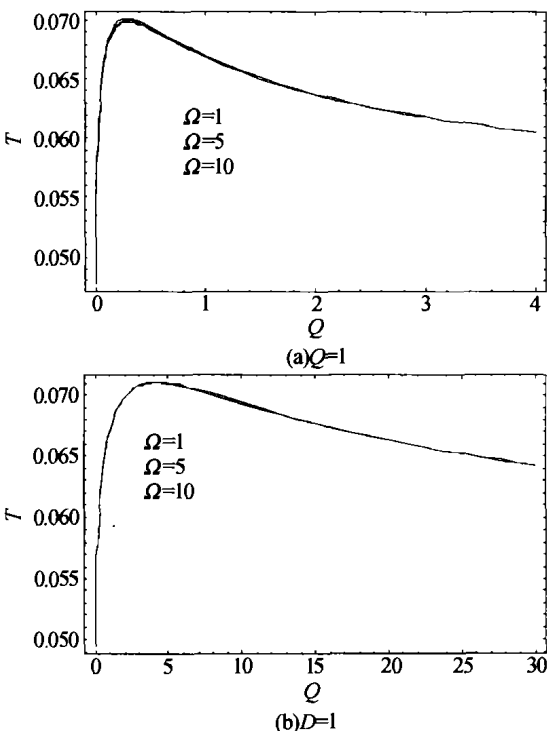


图 5 信号频率 Ω 为参数的 $T-D$ 曲线和 $T-Q$ 曲线

Fig. 5 $T-D$ curve and $T-Q$ curve with the signal frequency Ω as the parameter

- 6 罗晓琴,朱士群. 非线性系统中的关联色噪声. 物理学报, 2002, **51**(5): 977~981
Luo X Q, Zhu S Q. *Acta Phys Sin*, 2002, **51**(5): 977~981
- 7 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. 光学学报, 1999, **19**(1): 7~12
Zhou X J, Cao L, Wu D J. *Acta Opt Sin*, 1999, **19**(1): 7~12
- 8 Liang G Y, Cao L, Wu D J. Modulated stochastic multiresonance in single-mode laser system without input periodic signal. *Chin Phys*, 2003, **12**(10): 1105~1108
- 9 程庆华,曹力,吴大进,等. 单模激光系统线性化近似适用范围的分析. 光子学报, 2004, **33**(5): 517~520
Cheng Q H, Cao L, Wu D J, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 517~520
- 10 程庆华,曹力,吴大进,等. 单模激光系统中信噪比对净增益的随机共振. 光子学报, 2004, **33**(8): 901~904
Cheng Q H, Cao L, Wu D J, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 901~904
- 11 陈俊. 噪音关联时单模激光光强定态几率分布的影响. 光子学报, 2001, **30**(1): 58~61
Cheng J. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(1): 58~61

Intensity Correlation Time of a Single-Mode Laser Driven by Two White Noises with Colored Cross-Correlation with an Additive Signal Modulation

Chen Limei¹, Cao Li^{2,3}, Wu Dajin^{3,4}

¹ Department of Physics, Shenzhen University, Shenzhen 518060

² State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

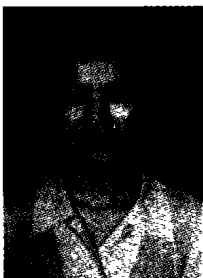
³ CCAST(World Laboratory), P.O. Box 8730, Beijing 100080

⁴ Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Received date: 2004-08-23

Abstract By using the linear approximation method, the intensity correlation time is studied for gain-noise model of a single-mode laser driven by white pump noise and white quantum noise with colored cross-correlation. It is detected that the noise correlation coefficient has a great effect on the curves of the intensity correlation time upon the noise intensities. When the noise correlation coefficient is positive, there exist maximum (i. e., resonance) in the curves of the intensity correlation time upon the noise intensities. When the noise correlation coefficient is negative, there exist minimum (i. e., suppression) in the curves of the intensity correlation time upon the noise intensities. And when the noise correlation coefficient is zero, there are neither maximum nor minimum in the curves, the intensity correlation time increases monotonously with the increasing of the noise intensities. Furthermore, the effect of the cross-correlation time, the attenuation coefficient and the signal frequency on the intensity correlation time is also discussed.

Keywords Intensity correlation time; Additive modulation signal; Colored cross-correlation noises; Linear approximation method



Chen Limei was born in Xi'an in 1970. She received her B. S. degree and M. S. degree from physics department of Huazhong University of Science and Technology (HUST), P. R. China, in 1991 and 1994 respectively. Then she received her Ph. D. degree from State Key Laboratory of Laser Technology of HUST in 1999. Now she is an associate professor in Shenzhen University. Her current interests are nonlinear optics and laser dynamics.