

文章编号: 0253-2239(2004)07-912-4

单模激光系统输入信号后的稳态平均光强相对涨落*

程庆华^{1,2} 曹力¹ 吴大进³ 王俊¹

(1 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)
(2 荆州师范学院物理系, 荆州 434100)
(3 华中科技大学物理系, 武汉 430074)

摘要: 研究了具有实虚部间关联的量子噪声和抽运噪声驱动的单模激光系统输入信号后的统计性质, 采用线性化近似方法计算了系统的稳态平均光强相对涨落, 分析了量子噪声实虚部间关联系数、量子噪声强度、抽运噪声强度、输入信号振幅和频率、净增益等对稳态平均光强相对涨落的影响, 发现在量子噪声实虚部间弱关联、小噪声、远离阈值、信号振幅不大和频率较高的条件下激光场的统计涨落较小。

关键词: 激光物理; 稳态平均光强相对涨落; 量子噪声; 抽运噪声; 线性化近似方法

中图分类号: O414 文献标识码: A

The Steady-State Mean Normalized Intensity Fluctuation in a Single-Mode Laser

Cheng Qinghua^{1,2} Cao Li¹ Wu Dajin³ Wang Jun¹

(1 State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070)
(2 Department of Physics, Jingzhou Normal University, Jingzhou 434100)
(3 Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 15 July 2003; revised 26 February 2004)

Abstract: Using the linear approximation method, the steady-state mean normalized intensity fluctuation is calculated after input signal in a single-mode laser system driven by pump noise and quantum noise with cross-correlation between the real and imaginary parts. The influences on the steady-state mean normalized intensity fluctuation are analyzed by quantum noise with cross-correlation coefficient between the real and imaginary parts, the intensities of the quantum and pump noise, the amplitude and frequency of input signal and the net gain. It is found that the statistic fluctuation of laser field is smaller in the case of the weaker quantum noise cross-correlation between the real and imaginary parts, smaller noises, far from threshold, smaller amplitude and higher frequency of the signal.

Key words: laser physics; steady-state mean normalized intensity fluctuation; quantum noise; pump noise; linear approximation method

1 引 言

引起激光场涨落的噪声大致可分为两种:一种是源于原子自发辐射的量子噪声,一种是由外界环境的扰动引起的抽运噪声。1991年, Fulinski 等^[1]提出两种噪声之间存在关联后,人们研究了量子噪声和抽运噪声之间不同关联形式下激光系统的瞬态

* 国家自然科学基金(10275025)、湖北省教育厅重点科研项目(自然科学类)(2003A001)资助课题。

E-mail: qhcheng@jznu.net

收稿日期:2003-07-15;收到修改稿日期:2004-02-26

和定态性质^[2~7],发现不同关联形式对激光系统输出光强的涨落有较大影响,考虑到在激光系统中同一个噪声的实部和虚部同源,可能存在关联,因而研究者引入具有实虚部之间关联的量子噪声^[8],并研究了在这种关联机制下激光系统的统计性质^[9,10]。

本文设在量子噪声和抽运噪声均为白噪声情况下,运用线性化近似方法^[11]计算了具有实虚部关联的量子噪声和抽运噪声驱动的单模激光系统输入信号后的稳态平均光强相对涨落,分析了稳态平均光强相对涨落随噪声强度、噪声间的关联系数、信号振幅和频率、激光系统的净增益等的变化关系,发现在量子噪声实虚部间弱关联、小噪声、远离阈值、信号振幅不大和频率较高的条件下稳态平均光强相对涨落较小。

2 稳态平均光强关联函数和稳态平均光强相对涨落

单模激光损失模型的场幅朗之万方程为^[10]

$$\frac{dr}{dt'} = a_0 r - Ar^3 + \frac{P}{2r}(1 - |\lambda_q|) + rp_R(t') + \epsilon_r(t'), \quad (1)$$

如果考虑周期性信号 $B\cos \Omega t'$ 对单模激光系统的影响,

则输入信号后的光强朗之万方程可以表示为

$$\frac{dI}{dt'} = 2a_0 I - 2AI^2 + P(1 - |\lambda_q|) + 2Ip_R(t') + 2\sqrt{I}\epsilon_r(t') + B\cos \Omega t', \quad (2)$$

其噪声满足如下的统计性质:

$$\begin{cases} \langle p_R(t') \rangle = \langle \epsilon_r(t') \rangle = 0, \\ \langle p_R(t') p_R(s) \rangle = Q\delta(t' - s), \\ \langle \epsilon_r(t') \epsilon_r(s) \rangle = P(1 + |\lambda_q|)\delta(t' - s), \\ \langle p_R(t') \epsilon_r(s) \rangle = 0, \end{cases} \quad (3)$$

在(1)式、(2)式和(3)式中, a_0 、 A 分别为净增益和自饱和系数; I 、 B 、 Ω 分别为光强、输入信号振幅和频率; $p_R(t)$ 为抽运噪声实部; ϵ_r 为相位锁定后的量子噪声; P 、 Q 是量子噪声和抽运噪声强度; λ_q 为量子噪声实虚部之间的关联系数,其取值范围为 $-1 \leq \lambda_q \leq 1$ 。

设 $I = I_0 + \delta(t')$, 其中 $\delta(t')$ 为微扰项,在确定论定态光强 $I_0 = a_0/A$ 附近对方程(2)线性化得

$$\frac{d\delta(t')}{dt} = -\gamma\delta(t') + 2I_0 p_R(t') + 2\sqrt{I_0}\epsilon_r(t') + P(1 - |\lambda_q|) + B\cos \Omega t', \quad (4)$$

方程(4)中 $\gamma = 2a_0$ 。根据归一化稳态平均光强关联函数的定义

$$C(t) = \lim_{t' \rightarrow \infty} \frac{\overline{\langle I(t')I(t'+t) \rangle} - \overline{\langle I(t') \rangle}^2}{\overline{\langle I(t') \rangle}^2} = \lim_{t' \rightarrow \infty} \left[\frac{\frac{\Omega}{2\pi} \int_{t'}^{t'+2\pi/\Omega} \langle I(t')I(t'+t) \rangle dt' - \frac{\Omega}{2\pi} \int_{t'}^{t'+2\pi/\Omega} \langle I(t') \rangle^2 dt'}{\frac{\Omega}{2\pi} \int_{t'}^{t'+2\pi/\Omega} \langle I(t') \rangle^2 dt'} \right]$$

代入 $I_0 = a_0/A$ 和 $\gamma = 2a_0$, 计算得归一化稳态平均光强关联函数为

$$C(t) = \frac{A^2 P^2 (1 - |\lambda_q|)^2}{4a_0^4} + \left[\frac{Q}{a_0} + \frac{AP(1 + |\lambda_q|)}{a_0^2} \right] \exp(-2a_0 |t|) + \frac{A^2 B^2 \cos \Omega t}{2a_0^2 (4a_0^2 + \Omega^2)}, \quad (5)$$

令 $t = 0$, 得稳态平均光强相对涨落

$$C(0) = \frac{A^2 P^2 (1 - |\lambda_q|)^2}{4a_0^4} + \frac{Q}{a_0} + \frac{AP(1 + |\lambda_q|)}{a_0^2} + \frac{A^2 B^2}{2a_0^2 (4a_0^2 + \Omega^2)}. \quad (6)$$

这里仅在阈值上 ($a_0/A > 0$) 讨论不同参量对稳态平均光强相对涨落的影响。

3 净增益及噪声对稳态平均光强相对涨落的影响

3.1 稳态平均光强相对涨落 $C(0)$ 随 a_0/A 的变化
以量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 为参量,根据

(6)式画出的 $C(0) - a_0/A$ 关系曲线如图1。

从图1可以发现, $C(0)$ 随 a_0/A 单调减小,在阈值附近稳态平均光强相对涨落 $C(0)$ 很大,随着 a_0/A 的增加, $C(0)$ 很快减小,表明越远离阈值,稳态平均光强相对涨落越小; $|\lambda_q|$ 减小时整条 $C(0) - a_0/A$ 曲线下移,说明量子噪声实虚部间的关联越弱,稳态平均光强相对涨落越小。

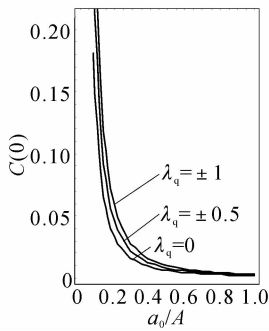


Fig. 1 The $C(0)$ vs. a_0/A curve with different λ_q , and other parameters are $A=1, Q=0.001, P=0.001, B=0.1, \Omega=8$

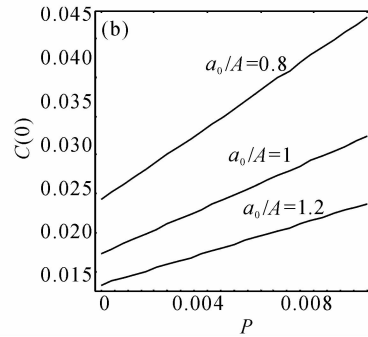
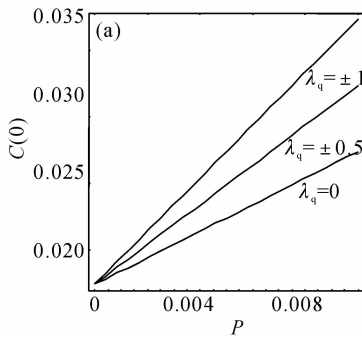


Fig. 2 The $C(0)$ vs. P curve with (a) $a_0/A=1$ and (b) $\lambda_q=0.5$, and other parameters are $A=1, Q=0.01, B=1, \Omega=8$

3.3 稳态平均光强相对涨落随抽运噪声强度的变化

用与 3.2 相同的方法在 $C(0)-Q$ 曲线下进行分析[为了避免重复,我们省略了画出 $C(0)-Q$ 曲线的具体讨论]可以发现:当抽运噪声强度 Q 减弱时, $C(0)$ 减小,表明抽运噪声和量子噪声对稳态平均光强相对涨落的影响是相似的。

3.4 稳态平均光强相对涨落 $C(0)$ 随量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 的变化

图 3 是根据(6)式画出的 $C(0)-\lambda_q$ 关系曲线,以 a_0/A 为参量。

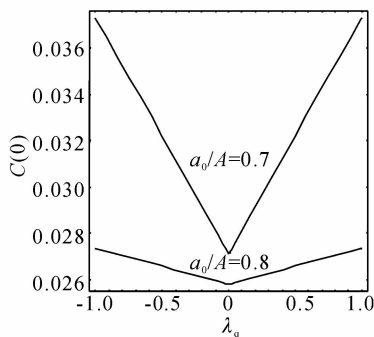


Fig. 3 The $C(0)$ vs. λ_q curve with different a_0/A , and other parameters are $A=1, Q=0.01, P=0.001, B=0.1, \Omega=8$

3.2 稳态平均光强相对涨落 $C(0)$ 随量子噪声强度 P 的变化

根据(6)式绘出 $C(0)-P$ 变化曲线如图 2,图 2(a)以量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 为参量,图 2(b)以 a_0/A 为参量。

从图 2 可以发现: i) $C(0)$ 随 P 单调增加,表明量子噪声强度越小,稳态平均光强相对涨落越小。 ii) 当 $|\lambda_q|$ 减小时整条 $C(0)-P$ 曲线下移,说明量子噪声实虚部间的关联越弱,稳态平均光强相对涨落越小,见图 2(a)。 iii) 当 a_0/A 增加时 $C(0)-P$ 曲线整体下移,表明越远离阈值,稳态平均光强相对涨落越小,如图 2(b)所示。

从图 3 可以看出: i) 当 $\lambda_q \neq 0$ 时 $C(0)$ 随 λ_q 直线变化,当 $\lambda_q = 0$ 时 $C(0)$ 取极小值,表明量子噪声实虚部无关联时稳态平均光强的相对涨落取极小值; ii) 当 a_0/A 增大时,整条 $C(0)-\lambda_q$ 曲线下移,说明越远离阈值稳态平均光强相对涨落 $C(0)$ 越小,例如与 $a_0/A=0.7$ 对应的曲线, $C(0)$ 的取值范围小于 3.8×10^{-2} ; 增大 a_0/A 到 $a_0/A=0.8$ 时, $C(0)$ 的取值范围下降到小于 2.8×10^{-2} 。

4 输入信号对稳态平均光强相对涨落的影响

4.1 稳态平均光强相对涨落随输入信号振幅的变化

以量子噪声实虚部间的关联系数 λ_q 为参量,根据(6)式绘出了 $C(0)-B$ 关系曲线如图 4。

从图 4 可以发现, $C(0)$ 随 B 单调增加,说明输入信号振幅 B 上升时稳态平均光强相对涨落 $C(0)$ 随之增加;但 $|\lambda_q|$ 减小时 $C(0)-B$ 曲线整体下移,表明当量子噪声实虚部间的关联减弱时稳态平均光强相对涨落减小。

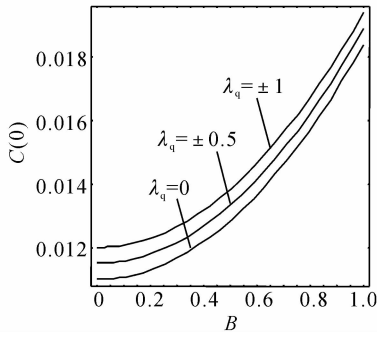


Fig. 4 The $C(0)$ vs. B curve with different λ_q , and other parameters are $A=1, a_0=1, Q=0.01, P=0.001, \Omega=8$

4.2 稳态平均光强相对涨落随输入信号频率的变化

以量子噪声实虚部间的关联系数 λ_q 为参量, 根据(6)式绘出了 $C(0)-\Omega$ 关系曲线如图 5。

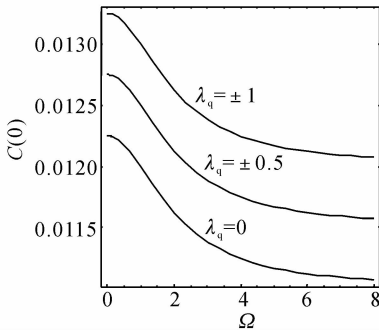


Fig. 5 The $C(0)$ vs. Ω curve with different λ_q , and other parameters are $A=1, a_0=1, Q=0.01, P=0.001, B=0.1$

从图 5 可以看出, $C(0)$ 随 Ω 单调下降, 说明输入信号频率 Ω 上升时 $C(0)$ 随之减小; $C(0)-B$ 曲线在 $\Omega=0$ 处取极大值, 即有一初始平台; 当 $|\lambda_q|$ 减小时 $C(0)-B$ 曲线整体下移, 表明当量子噪声实虚部间的关联减弱时稳态平均光强相对涨落减小。

综上所述, 量子噪声实虚部间的关联系数 λ_q 、量子噪声强度 P 和抽运噪声强度 Q 、输入信号振幅

B 和频率 Ω 、净增益 a_0 等对稳态平均光强相对涨落均有较大的影响, 在量子噪声实虚部间弱关联、小噪声、远离阈值、信号振幅不大和频率较高的条件下激光系统的统计涨落较小。

参 考 文 献

- 1 Fulinski A, Telejko T. On the effect of interference of additive and multiplicative noise. *Phys. Lett. (A)*, 1991, **152**(1~2):11~14
- 2 Cao Li, Wu Dajin. Stochastic dynamics for systems driven by correlated noise. *Phys. Lett. (A)*, 1994, **185**(1):59~64
- 3 Zhu Shiqun. Steady-state analysis of a single-mode laser with correlation between additive and multiplicative noises. *Phys. Rev. (A)*, 1993, **47**(3): 2405~2408
- 4 Zhang Li, Cao Li, Wu Dajin. New amplitude equation of single-mode laser. *Chin. Phys. (中国物理)*, 2003, **12**(1):33~38 (in Chinese)
- 5 Zhou Xiaoji, Chen Xuzong, WangYiqiu. Effects of correlation between noises on the spectral density of atom laser. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2003, **23**(7): 782~786 (in Chinese)
- 6 Hu Jing, Zhu Shiqun. Effects of additive noise on first-order-like phase transition in a laser system. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2001, **21**(3):257~161 (in Chinese)
- 7 He Ying, Ling Yinsheng, Zhu Shiqun. Approximate calculation of two-dimensional colored noise in a laser field. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2002, **22**(9): 1025~1031 (in Chinese)
- 8 Zhou Xiaopei, Gao Weijian, Zhu Shiqun. Fluctuation in a nonlinear laser field with coupling of additive noise terms. *Phys. Lett. (A)*, 1996, **214**(3~4): 131~138
- 9 Zhang Li, Cao Li, Wu Dajin. 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**(1~2): 29~38
- 10 Ke Shengzhi, Cao Li, Wu Dajin. General laser intensity langevin equation in a single-mode laser model. *Chin. Phys. Lett. (中国物理快报)*, 2001, **18**(3):370~372
- 11 Hernandez-Garcia E, Toral R, San Minguel M. Intensity correlation functions for the colored gain-noise model of dye lasers. *Phys. Rev. (A)*, 1990, **42**(11):6823~6830