

# 实虚部关联的量子噪声和泵噪声对 单模激光动力学性质的影响<sup>\*</sup>

程庆华<sup>1)2)</sup> 曹 力<sup>1)</sup> 吴大进<sup>1)</sup> 王 俊<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

<sup>2)</sup> 荆州师范学院物理系, 荆州 434100)

(2003 年 6 月 13 日收到, 2003 年 7 月 16 日收到修改稿)

采用具有实虚部关联的量子噪声和泵噪声驱动的单模激光损失模型, 用线性化近似方法研究了反映激光动力学性质的光强关联函数, 讨论了光强关联函数随时间的演化, 并对线性化近似方法的适用范围进行了详细分析, 分别讨论了量子噪声强度、泵噪声强度、量子噪声实虚部关联系数对光强相对涨落的影响, 得出在小噪声、远离阈值时, 线性化近似方法适用范围扩大; 小噪声、远离阈值且当量子噪声实虚部无关联时, 线性化近似方法适用范围最大的结论.

关键词: 单模激光, 光强关联函数, 光强相对涨落

PACC: 0520, 0540, 4260K

## 1. 引 言

激光器工作时总是伴随有涨落出现, 引起激光场涨落的噪声通常包括两种, 一种是自发辐射的量子噪声, 以加法噪声形式体现; 另一种为泵噪声, 以乘法噪声形式体现. 近年来研究噪声及其关联对非线性系统和激光系统统计性质的影响是人们关注的重要课题<sup>[1-10]</sup>. 自 1991 年 Fulinski 和 Telejko 提出噪声间存在关联后<sup>[6]</sup>, Cao 和 Wu<sup>[7]</sup>对关联噪声驱动的一维随机系统作了较详细的研究, Zhu<sup>[8]</sup>将关联噪声引入激光系统, 研究了量子噪声和泵噪声之间有互关联的激光系统的定态性质, 进一步考虑量子噪声实部和虚部之间的关联, Ke<sup>[9]</sup>和 Zhang<sup>[10]</sup>采用新的方法使激光的场幅方程和周相方程脱耦, 导出了单模激光的场幅新方程, 并发现由此研究系统的瞬态性质, 能更好地符合实验结果.

本文运用单模激光白损失模型, 在考虑量子噪声实部和虚部之间关联的情况下, 研究了反映激光动力学性质的光强关联函数  $\langle \alpha(t) \rangle$  和光强的相对涨落  $\langle \alpha(0) \rangle$ , 讨论了光强关联函数  $\langle \alpha(t) \rangle$  随时间的演化. 由于光场的朗之万方程中的非线性项使得计算上述

动力学量时数学处理困难, 只能采用近似计算. 本文采用线性化近似方法<sup>[11]</sup>, 导出了光强关联函数  $\langle \alpha(t) \rangle$  的解析表达式, 并对线性化近似方法的适用范围进行了详细分析, 分别讨论了量子噪声强度  $Q$ 、泵噪声强度  $P$ 、量子噪声实虚部关联系数  $\lambda_q$  对光强相对涨落  $\langle \alpha(0) \rangle$  的影响, 得出在小噪声、远离阈值时, 线性化近似方法适用范围扩大; 小噪声、远离阈值且量子噪声实虚部无关联时, 线性化近似方法适用范围最大的结论. 另外对光强关联函数的计算, 也为运用线性化近似方法研究具有实虚部关联的量子噪声和泵噪声驱动的单模激光损失模型的随机共振现象打下了基础.

## 2. 单模激光损失模型的光强关联函数及相对涨落

单模激光损失模型的光强朗之万方程为<sup>[9]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} = & 2a_0 I - 2AI^2 + P(1 - |\lambda_q|) \\ & + 2I p_R(t) + 2\sqrt{I} \tilde{\epsilon}_r(t), \end{aligned} \quad (1)$$

其噪声满足如下的统计性质

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10275025)资助的课题.

$$\begin{aligned}
 p_R(t) &= \tilde{\varepsilon}_r(t) = 0, \\
 p_R(t)p_R(s) &= Q\delta(t-s), \\
 \tilde{\varepsilon}_r(t)\tilde{\varepsilon}_r(s) &= P(1+|\lambda_q|)\delta(t-s), \\
 p_R(s)\tilde{\varepsilon}_r(t) &= 0.
 \end{aligned} \tag{2}$$

(1)和(2)式中,  $a_0, A$  分别表示净增益系数和自饱和系数;  $p_R(t)$ 为泵噪声实部;  $\tilde{\varepsilon}_r$  为位相锁定后的量子噪声;  $P, Q$  分别是量子噪声和泵噪声强度;  $\lambda_q$  是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, 将方程

(1)在稳定态  $I_0 = \frac{a_0}{A}$ 附近线性化得

$$\begin{aligned}
 \frac{d\delta(t)}{dt} &= -\gamma\delta(t) + 2I_0p_R(t) \\
 &\quad + 2\sqrt{I_0}\tilde{\varepsilon}_r(t) + P(1-|\lambda_q|), \tag{3}
 \end{aligned}$$

其中  $\gamma = 2a_0$ .

根据归一化光强关联函数的定义

$$\alpha(t) = \lim_{t' \rightarrow \infty} \frac{I(t')I(t'+t) - \langle I(t') \rangle^2}{\langle I(t') \rangle^2},$$

代入  $I_0 = \frac{a_0}{A}$ 和  $\gamma = 2a_0$ , 计算出单模激光损失模型的光强关联函数为

$$\begin{aligned}
 \alpha(t) &= \frac{A^2P^2(1-|\lambda_q|)^2}{4a_0^4} \\
 &\quad + \left( \frac{Q}{a_0} + \frac{AP(1+|\lambda_q|)}{a_0^2} \right) e^{-2a_0|t|}. \tag{4}
 \end{aligned}$$

光强的相对涨落为

$$\alpha(0) = \frac{A^2P^2(1-|\lambda_q|)^2}{4a_0^4} + \frac{Q}{a_0} + \frac{AP(1+|\lambda_q|)}{a_0^2}. \tag{5}$$

### 3. 光强关联函数 $C(t)$ 随时间 $t$ 的演化

由(4)式画出光强关联函数  $\alpha(t)$  随时间  $t$  的演化如图1所示, 以量子噪声实虚部间的关联系数  $\lambda_q$  为参数. 从图1可看出, 光强的关联函数  $\alpha(t)$  随时间  $t$  单调下降, 且随着量子噪声实虚部间关联系数  $\lambda_q$  的减小, 整条曲线下移; 当  $\lambda_q = 0$  即量子噪声实虚部无关联时,  $\alpha(t)$  随  $t$  的变化曲线降至最低. 从图1还可以看出, 当  $t > 2$  时, 对不同的  $\lambda_q$ ,  $\alpha(t)$  的值趋于一致.

### 4. 光强关联函数 $C(t)$ 随量子噪声实虚部的关联系数 $\lambda_q$ 的变化

在  $\alpha(t)$  随时间演化的过程中, 以不同的时刻  $t$

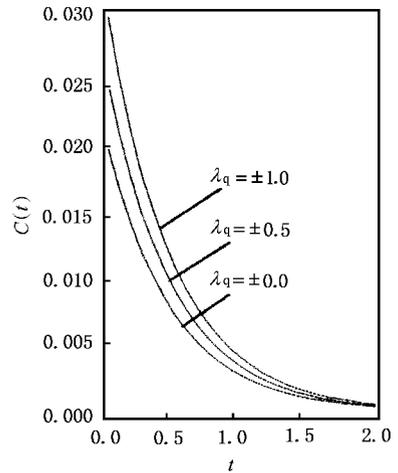


图1 光强关联函数  $C(t)$  随时间  $t$  的演化  $A = 1, a_0 = 1, Q = 0.01, P = 0.01$

为参数, 作光强的关联函数  $\alpha(t)$  随量子噪声实虚部的关联系数  $\lambda_q$  变化的关系曲线如图2所示. 分别讨论如下: 1) 在图2(a)中,  $\alpha(t)$  随  $\lambda_q$  的变化曲线在  $\lambda_q = 0$  处有极小值, 在  $\lambda_q \neq 0$  时  $\alpha(t)$  随  $|\lambda_q|$  的增加而单调增大. 2) 随着  $t$  的增加,  $\alpha(t)$  随  $\lambda_q$  的关系曲线由一个极值变成三个极值, 即在  $\lambda_q = 0$  处有极大值, 在  $\lambda_q = \pm \left( 1 - \frac{2a_0^2}{AP} e^{-2a_0|t|} \right)$  处有极小值, 且极小值的位置随  $t$  的增加向  $\lambda_q = \pm 1$  处移动. 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\alpha(t)$  在  $\lambda_q = 0$  处出现极大值; 在  $\lambda_q = \pm 1$  处出现两个极小值, 使  $\alpha(t)$  随  $\lambda_q$  的关系曲线尾部出现两个小平台, 如图2(b)(c)所示. 3) 由图2(c)可看出,  $t = 5$  和  $t = 100$  时,  $\alpha(t)$  随  $\lambda_q$  的关系曲线几乎重合, 表明  $t \geq 5$  时,  $\alpha(t)$  随  $\lambda_q$  的变化关系基本不受时间  $t$  的影响.

### 5. $C(t)$ 随 $\lambda_q$ 变化关系的极值分析

从图2可以发现, 在不同的时刻  $t$ , 光强的关联函数  $\alpha(t)$  和量子噪声实虚部间关联系数  $\lambda_q$  的函数曲线存在一个极值和三个极值两种情况, 下面分析出现一个极值或三个极值的条件. 仔细分析(4)式可以得出, 一个极值条件为

$$a_0 \neq 0, \tag{6}$$

$$t \leq \frac{1}{2a_0} \ln \frac{2a_0^2}{AP}. \tag{7}$$

三个极值条件为

$$a_0 \neq 0, \tag{6}$$

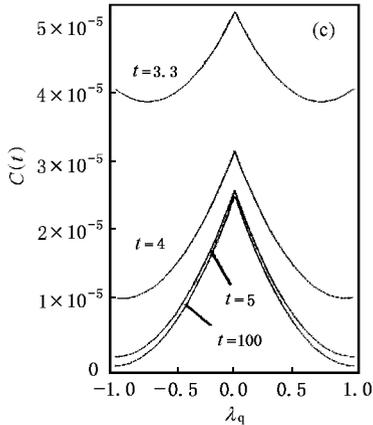
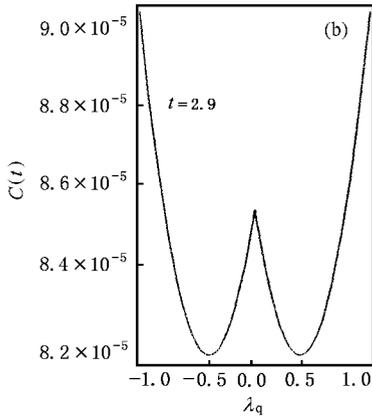
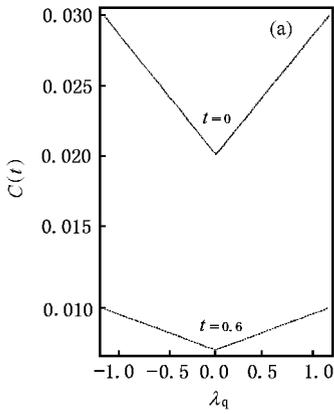


图2 不同时刻光强关联函数  $C(t)$  随量子噪声实虚部关联系数  $\lambda_q$  的变化  $A=1, a_0=1, Q=0.01, P=0.01$

$$t > \frac{1}{2a_0} \ln \frac{2a_0^2}{AP}. \quad (8)$$

图3是反映(7)和(8)两式参数范围的参数图,图3是由(7)式取等号画出的时间  $t$  与量子噪声强度  $P$  的关系曲线,曲线上方(包括曲线但  $a_0 \neq 0$ )是三个极值的区域,曲线下方是一个极值的区域.在一个极值的区域任意取一点  $a$ ,在三个极值的区域任意取一点  $b$ ,分别以  $a, b$  两点的参数  $t$  和  $P$  作光强

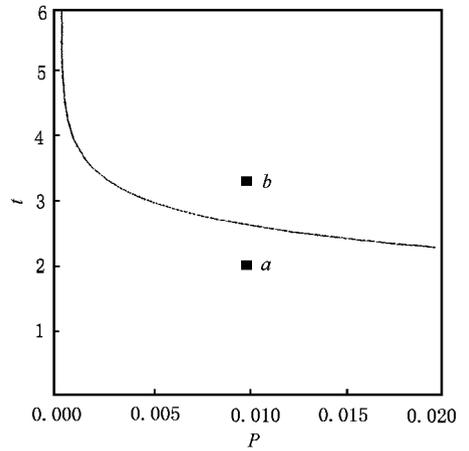


图3 时间  $t$  和量子噪声强度  $P$  的函数曲线  $A=1, a_0=1$

的关联函数  $C(t)$  随量子噪声实虚部的关联系数  $\lambda_q$  的函数曲线如图4.从图4(a)可以看出,  $a$  点对应的曲线有一个极小值,而  $b$  点对应的曲线存在三个极值,见图4(b).

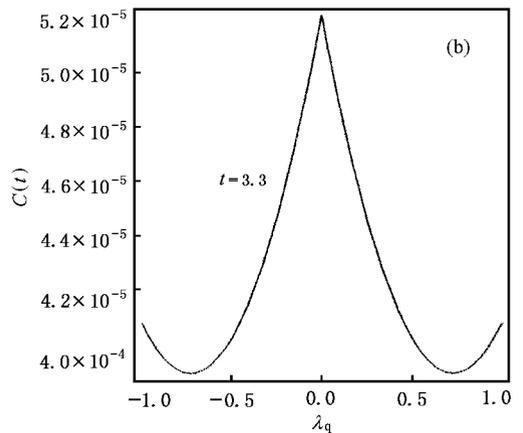
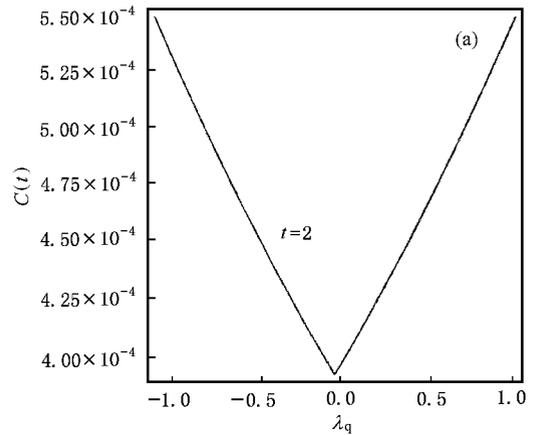


图4 图3中  $a, b$  两点对应的光强关联函数  $C(t)$  和量子噪声实虚部间关联系数  $\lambda_q$  的变化曲线  $A=1, Q=0.01, a$  点:  $t=2, P=0.01$ (a);  $b$  点:  $t=3.3, P=0.01$ (b)

### 6. 线性化近似方法适用范围的分析

一般来说,当光强的相对涨落满足条件  $\alpha(0) \leq 1$  时,线性化近似方法是正确的. 设

$$\alpha(0) = \frac{A^2 P^2 (1 - |\lambda_q|)^2}{4 a_0^4} + \frac{Q}{a_0} + \frac{AP(1 + |\lambda_q|)}{a_0^2} \leq k, \quad (9)$$

式中  $k$  为线性化近似方法适用需要满足的精确度,解上述不等式可得出在确定精确度  $k$  下满足条件(9)的参数取值范围. 方程(9)关于  $a_0/A$  的解一共有四个,在讨论阈值上( $a_0/A > 0$ )的情况时,仅取其中一个有意义的解,但由于方程(9)的解过于烦琐,引入函数  $\rho(P, Q, A, \lambda_q, k)$  来表示其解析式,将满足(9)式的参数取值范围表示为

$$\frac{a_0}{A} \geq \rho(P, Q, A, \lambda_q, k). \quad (10)$$

下面取不同的精确度  $k$  值进行讨论.

#### 6.1. 精确度为 $k = 10^{-2}$ 时线性化近似的适用范围

##### 6.1.1. 对 $a_0/A$ 和泵噪声强度 $Q$ 的参数图的分析

在  $k = 10^{-2}$  的条件下,图 5 是满足(10)式的参数图,图中以量子噪声实虚部间的关联系数  $\lambda_q$  为参数,由(10)式取等号绘出了  $a_0/A$  与泵噪声强度  $Q$  的关系曲线,曲线上的区域对应的光强相对涨落  $\alpha(0)$  满足(9)式的范围. 从图 5 可以看出,  $|\lambda_q|$  取值越小,  $C(0)$  满足(9)式的范围越大,当  $\lambda_q = 0$  时,  $\alpha(0)$  满足条件(9)的区域最大,故量子噪声实虚部之间无关联时线性化近似适用的范围最大.

在图 5 中对任一确定的泵噪声强度  $Q = 0.01$  取不同  $a_0/A > \alpha$  (阈值上)的两个点  $a, b$ ,从图中可以看出,  $a$  点对应的光强相对涨落  $\alpha(0)$  不满足条件(9)(对所有  $\lambda_q$  的取值),  $b$  点对应的  $\alpha(0)$  满足条件(9)(对所有  $\lambda_q$  的取值),用上述两个点对应的参数  $a_0/A$  由(5)式绘出光强的相对涨落  $\alpha(0)$  随量子噪声实虚部间的关联系数  $\lambda_q$  的函数曲线如图 6 所示. 分析图 6 可以发现, 1) 当泵噪声强度  $Q$  和量子噪声强度  $P$  均不变时,随着  $a_0/A$  的增大整条  $C(0)$  随  $\lambda_q$  的函数曲线下移,说明越远离阈值光强的相对涨落  $\alpha(0)$  越小. 例如对应  $a$  点的曲线,光强相对涨落  $\alpha(0)$  的取值范围小于  $1.4 \times 10^{-2}$ . 继续增大  $a_0/A$  至  $b$  点对应的曲线,  $C(0)$  的取值范围下降到小于  $10^{-2}$ .

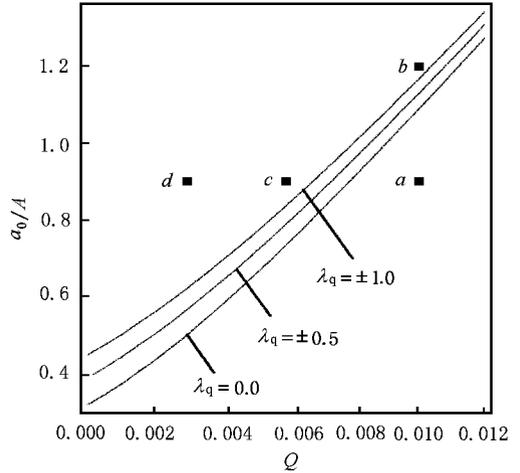


图 5  $k = 10^{-2}$  时  $a_0/A$  和泵噪声强度  $Q$  的函数曲线  $A = 1, P = 0.001$

2)  $a, b$  两点对应的  $\alpha(0)$  随  $\lambda_q$  的函数曲线在  $\lambda_q = 0$  处均有极小值,说明远离阈值且量子噪声实虚部无关联时光强的相对涨落最小,线性化方程在此条件下有较高的精度.

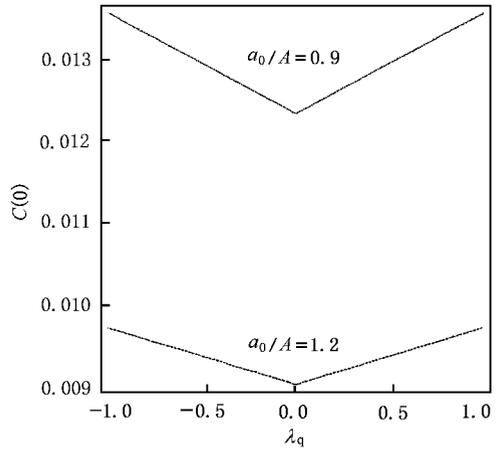


图 6 图 5 中的  $a, b$  两点对应的光强相对涨落  $\alpha(0)$  和量子噪声实虚部关联系数  $\lambda_q$  的函数曲线  $A = 1, P = 0.001$ ,  $a$  点:  $a_0/A = 0.9, Q = 0.01$ ;  $b$  点:  $a_0/A = 1.2, Q = 0.01$

在图 5 中对任一确定的  $a_0/A = 0.9$  取泵噪声强度  $Q$  不同的三个点  $a, c, d$ ,从图中可以看出,  $a$  点对应的光强相对涨落  $\alpha(0)$  不满足条件(9)(对所有  $\lambda_q$  的取值),  $c, d$  两点对应的  $\alpha(0)$  满足条件(9)(对所有  $\lambda_q$  的取值),用上述三个点对应的参数  $Q$  由(5)式绘出光强的相对涨落  $\alpha(0)$  随量子噪声实虚部间的关联系数  $\lambda_q$  的函数曲线如图 7 所示. 分析图 7 可以发现, 1) 当  $a_0/A$  不变时,随着泵噪声强度  $Q$  的

减小整条  $\alpha(0)$  随  $\lambda_q$  的函数曲线下移,说明  $Q$  越小光强的相对涨落  $\alpha(0)$  越小. 例如对应  $a$  点的曲线,光强相对涨落  $\alpha(0)$  的取值范围小于  $1.4 \times 10^{-2}$ ;减小  $Q$  至  $d$  点对应的曲线,  $\alpha(0)$  的取值范围下降到小于  $0.5 \times 10^{-2}$ .  $a, c, d$  三点对应的  $\alpha(0)$  随  $\lambda_q$  的函数关系曲线在  $\lambda_q = 0$  处有极小值,说明泵噪声强度  $Q$  小且量子噪声实虚部无关联时光强的相对涨落最小,线性化方程在此条件下有较高的精度.

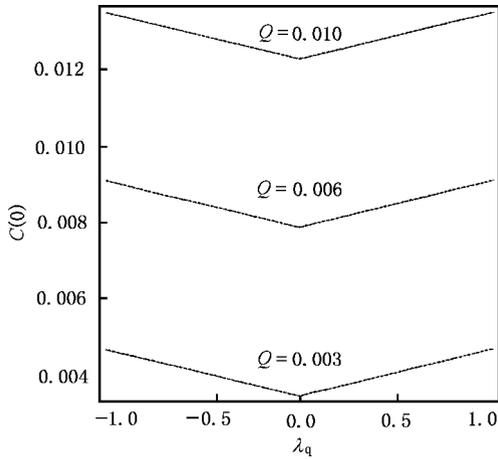


图 7 图 5 中的  $a, c, d$  三点对应的光强相对涨落  $\alpha(0)$  和量子噪声实虚部关联系数  $\lambda_q$  的函数曲线  $A = 1, P = 0.001$ ,  $a$  点:  $a_0/A = 0.9, Q = 0.01$ ;  $c$  点:  $a_0/A = 0.9, Q = 0.006$ ;  $d$  点:  $a_0/A = 0.9, Q = 0.003$

6.1.2. 对  $a_0/A$  和量子噪声强度  $P$  的参数图的分析

在  $k = 10^{-2}$  的条件下,图 8 是满足(10)式的参数图,图中以量子噪声实虚部间的关联系数  $\lambda_q$  为参数,由(10)式取等号绘出了  $a_0/A$  与量子噪声强度  $P$  的关系曲线,曲线上的区域对应的光强相对涨落  $\alpha(0)$  满足(9)式的范围.从图 8 同样可以看出,  $|\lambda_q|$  取值越小,  $\alpha(0)$  满足(9)式的范围越大,当  $\lambda_q = 0$  时,  $\alpha(0)$  满足条件(9)的区域最大,故量子噪声实虚部之间无关联时线性化近似适用的范围最大.

在图 8 中对任一确定的量子噪声强度  $P = 0.005$  取不同  $a_0/A > \alpha$  (阈值上)的两个点  $a, b$ ,从图中可以看出,若设  $a$  点的量子噪声实虚部间关联系数为  $\lambda_{qa}$ ,则  $a$  点对应的  $\alpha(0)$  在  $|\lambda_q| \leq \lambda_{qa}$  范围内满足条件(9),  $b$  点对应的  $\alpha(0)$  对所有  $\lambda_q$  的取值均满足条件(9),用上述两个点对应的参数  $a_0/A$  由(5)式绘出光强的相对涨落  $\alpha(0)$  随量子噪声实虚部间的关联系数  $\lambda_q$  的函数曲线如图 9 所示.分析图 9 可以发现,随着  $a_0/A$  的增大整条  $\alpha(0)$  随  $\lambda_q$  的函

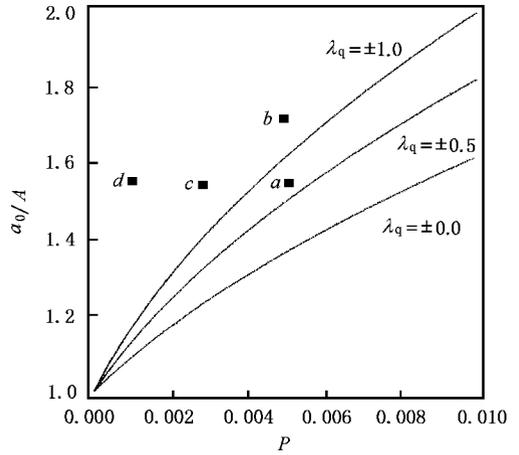


图 8  $k = 10^{-2}$  时的  $a_0/A$  和量子噪声强度  $P$  的函数曲线  $A = 1, Q = 0.01$

数曲线下移,说明越远离阈值光强的相对涨落  $\alpha(0)$  越小.例如对应  $a$  点的曲线,光强涨落  $\alpha(0)$  的取值范围小于  $1.07 \times 10^{-2}$ ,增大  $a_0/A$  至  $b$  点对应的曲线,  $\alpha(0)$  的取值范围下降为小于  $10^{-2}$ .  $a, b$  两点对应的  $\alpha(0)$  随  $\lambda_q$  的函数曲线在  $\lambda_q = 0$  处有极小值,说明远离阈值且量子噪声实虚部无关联时光强的相对涨落最小,线性化方程在此条件下有较高的精度.

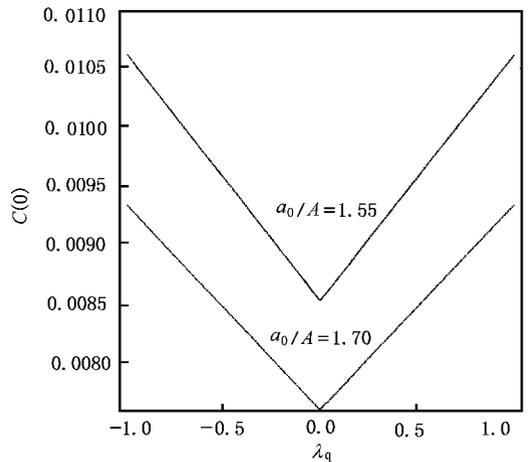


图 9 图 8 中的  $a, b$  点对应的光强相对涨落  $\alpha(0)$  和量子噪声实虚部的关联系数  $\lambda_q$  的函数曲线  $A = 1, Q = 0.01$ ,  $a$  点:  $a_0/A = 1.55, P = 0.005$ ;  $b$  点:  $a_0/A = 1.7, P = 0.005$

在图 8 中对任一确定的  $a_0/A = 1.5$  取量子噪声强度  $P$  不同的三个点  $a, c, d$ ,从图中可看出,若设  $a$  点量子噪声实虚部间的关联系数为  $\lambda_{qa}$ ,则  $a$  点对应的  $\alpha(0)$  在  $|\lambda_q| \leq \lambda_{qa}$  范围内满足条件(9),  $c, d$  两

点对应的  $\alpha(0)$  对所有的  $\lambda_q$  取值满足条件 (9), 用上述三个点对应的参数  $P$  由 (5) 式绘出光强的相对涨落  $\alpha(0)$  随量子噪声实虚部间的关联系数  $\lambda_q$  的函数曲线如图 10 所示. 分析图 10 可以发现 (1) 当  $a_0/A$  不变时, 随着量子噪声强度  $P$  的减小整条  $\alpha(0)$  随  $\lambda_q$  的函数曲线下移, 说明  $P$  越小光强的相对涨落  $\alpha(0)$  越小. 例如对应  $a$  点的曲线, 光强涨落  $\alpha(0)$  的取值范围小于  $1.07 \times 10^{-2}$ ; 减小  $P$  至  $d$  点对应的曲线,  $\alpha(0)$  的取值范围下降到小于  $0.75 \times 10^{-2}$ . (2)  $a, c, d$  三点对应的  $\alpha(0)$  随  $\lambda_q$  的关系曲线在  $\lambda_q = 0$  处均有极小值, 说明量子噪声强度  $P$  小且量子噪声实虚部无关联时光强的相对涨落最小, 线性化方程在此条件下有较高的精度.

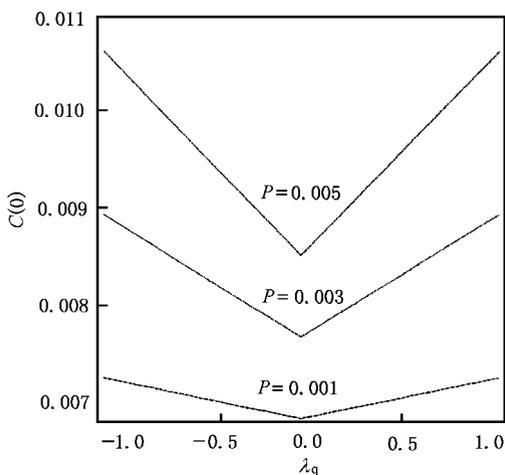


图 10 图 8 中的  $a, c, d$  三点对应的光强相对涨落  $\alpha(0)$  和量子噪声实虚部关联系数  $\lambda_q$  的函数曲线  $A = 1, Q = 0.01$ ,  $a$  点:  $a_0/A = 1.55, P = 0.005$ ;  $c$  点:  $a_0/A = 1.55, P = 0.003$ ;  $d$  点:  $a_0/A = 1.55, P = 0.001$

6.2. 取精度为  $k = 10^{-3}$  时线性化近似的适用范围

若减小  $k$  的取值(提高近似精确度), 取  $k = 10^{-3}$  时, 图 11 是满足 (10) 式的参数图, 图中以量子噪声实虚部间的关联系数  $\lambda_q$  为参数, 由 (10) 式取等号绘出了  $a_0/A$  与泵噪声强度  $Q$  的关系曲线, 曲线上方区域对应的光强相对涨落  $\alpha(0)$  满足 (9) 式的范围. 比较图 5 和图 11 可以看出, 在所有其他参数取值范围相同的情况下, 若  $k$  的取值减小(提高近似精确度), 则  $a_0/A$  与  $Q$  的关系曲线变化规律不变, 但整条曲线上移, 使  $\alpha(0)$  满足 (9) 式的范围减小, 表明在噪声强度不变的条件下, 近似精确度提高后更进一步远离阈值时线性化近似才是适用的; 图

11 中, 三条  $|\lambda_q|$  取值不同的曲线靠得很近, 随着  $Q$  的增加三条曲线趋于重合, 说明近似精确度提高以后, 当泵噪声强度  $Q$  增大时, 改变量子噪声实虚部间的关联系数  $\lambda_q$  对  $\alpha(0)$  满足 (9) 式的参数取值范围影响不大.

取  $k = 10^{-3}$  时, 图 12 是满足 (10) 式的参数图, 图中以量子噪声实虚部间的关联系数  $\lambda_q$  为参数, 由 (10) 式取等号绘出了  $a_0/A$  与量子噪声强度  $P$  的关系曲线, 曲线上方区域对应的光强相对涨落  $\alpha(0)$  满足 (9) 式的范围. 比较图 8 和图 12 可以看出, 在所有其他参数取值范围相同的情况下, 若  $k$  的取值减小, 同样  $a_0/A$  与  $P$  的关系曲线变化规律不变, 但整条曲线上移, 使  $\alpha(0)$  满足 (9) 式的范围减小, 表明在噪声强度不变的条件下, 近似精确度提高后更进一步远离阈值线性化近似才是正确的.

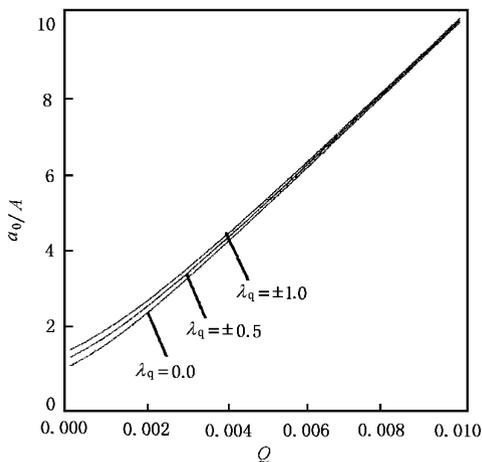


图 11  $k = 10^{-3}$  时  $a_0/A$  和泵噪声强度  $Q$  的函数曲线  $A = 1, P = 0.001$

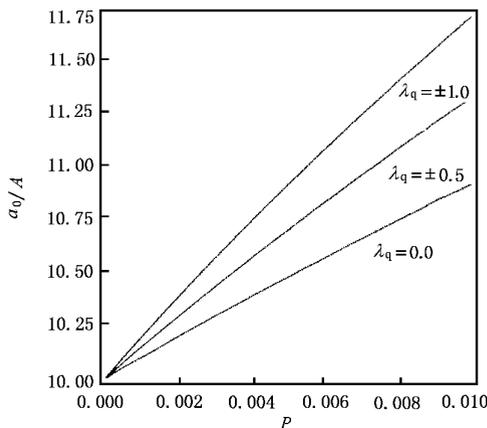


图 12  $k = 10^{-3}$  时的  $a_0/A$  和量子噪声强度  $P$  的函数曲线  $A = 1, Q = 0.01$

由 6.1 和 6.2 的讨论可知, 在小噪声、远离阈值时, 线性化近似的适用范围扩大, 在小噪声、远离阈值且  $\lambda_q = 0$  时光强的相对涨落最小, 即线性化近似的适用范围最大, 这和文献 [6] 对线性化近似方法可

靠性分析的结果是部分相似的. 如果在其他参数取值范围不变的条件下, 减小  $k$  欲使精确度提高时, 则要求更进一步远离阈值线性化近似才是正确的.

- [ 1 ] Luo X Q and Zhu S Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 977 ( in Chinese )  
[ 罗晓琴、朱士群 2002 物理学报 **51** 977 ]
- [ 2 ] Kang Y M, Xu J X and Xie Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2717 ( in Chinese ) [ 康艳梅、徐健学、谢 勇 2003 物理学报 **52** 2717 ]
- [ 3 ] Liang G Y 2003 *Chin. Phys.* **12** 377
- [ 4 ] Mei D C, Chen L E, Xie G Z, Cao L and Wu D J 1999 *Chin. Phys.* **8** 808
- [ 5 ] Luo X Q, Zhu S Q and Gao W J 2001 *Chin. Phys.* **10** 1011
- [ 6 ] Fulinski A and Telejko T 1991 *Phys. Lett. A* **152** 11
- [ 7 ] Cao L and Wu D J 1994 *Phys. Lett. A* **185** 59
- [ 8 ] Zhu S Q 1993 *Phys. Rev. A* **47** 2405
- [ 9 ] Ke S Z, Cao L and Wu D J 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 370
- [ 10 ] Zhang L, Cao L and Wu D J 2003 *Chin. Phys.* **12** 33
- [ 11 ] Hernandez-Garcia E, Toral R and San Minguel M 1990 *Phys. Rev. A* **42** 6823

## Effects of pump noise and quantum noise with real and imaginary parts correlated on the dynamic properties of a single-mode laser<sup>\*</sup>

Cheng Qing-Hua<sup>1,2)</sup> Cao Li<sup>1)</sup> Wu Da-Jin<sup>1)</sup> Wang Jun<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*

<sup>2)</sup> *Department of Physics, Jingzhou Normal University, Jingzhou 434100, China*

( Received 13 June 2003 ; revised manuscript received 16 July 2003 )

### Abstract

Adopting the linear approximation method, a loss model for a single-mode laser driven by pump noise and quantum noise whose real and imaginary parts are correlated is studied. We investigated the intensity correlation function, which describes the dynamic property of a laser and varies with time. Moreover, the valid range for the linear approximation method is obtained, and the effects of the intensities of the pump noise and quantum noise on the variance of the laser intensity, and the correlation coefficient between the real and imaginary parts of the quantum noise, are discussed in detail. We find that the valid range is extended in the case of small quantum noise and far from threshold, and it is the largest in the case of small quantum noise, far from threshold and no correlation between the real and imaginary parts of the quantum noise.

**Keywords:** single-mode laser, laser intensity correlation function, variance of the laser intensity

**PACC:** 0520, 0540, 4260K