

信号调制色泵噪声和实虚部间关联量子噪声驱动下 单模激光的随机共振现象^{*}

程庆华¹⁾²⁾ 曹 力¹⁾³⁾ 吴大进¹⁾³⁾

¹⁾ (华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

²⁾ (湖北长江大学物理科学与技术学院, 荆州 434100)

³⁾ (华中科技大学物理系, 武汉 430074)

(2003 年 11 月 13 日收到, 2004 年 4 月 9 日收到修改稿)

计算了受信号调制的色泵噪声和实虚部间关联的量子噪声驱动的单模激光损失模型的输出光强信噪比. 发现信噪比 R 随泵噪声自关联时间 τ 、调制信号频率 Ω 和量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 的变化均存在随机共振, 这种现象扩展了“信噪比 R 对噪声强度的变化曲线具有极大值”的典型随机共振. 若以 Ω 为参数, 当 Ω 增加时, R 随 τ 的关系曲线经历了从同时出现共振和抑制到单峰共振, 最后到单调上升的变化, 呈现多种形式的随机共振. 若以 τ 为参数, 当 τ 增加时, R 随 Ω 的关系曲线经历了从单调上升到同时出现共振和抑制, 最后又到单调下降的变化过程. R 随 λ_q 的关系曲线出现尖锐的单峰.

关键词: 噪声, 信噪比, 随机共振

PACC: 4250, 0540, 4260K

1. 引 言

噪声和非线性动力学的相互作用出现了随机共振这一有趣的物理现象^[1], 随机共振现象已在多门学科中被实验所观察到, 因而对随机共振现象的研究已成为人们关注的重要课题^[2-8]. 随着研究的深入, 人们对随机共振现象的认识已有了很大发展. Fulinski, Rosario 等^[9,10]发现, 系统出现随机共振并不一定要求满足非线性、噪声、周期信号三个条件. Vilar, Zarkin 等^[11,12]发现了多重随机共振现象. Barzykin 等^[13]提出, 随机共振不仅可以由信噪比与噪声强度的函数来描述, 也可以扩展到用信噪比与噪声自关联时间的函数来描述, 使随机共振包含了更为广泛的内容. 我们曾在具有泵噪声和实虚部间关联的量子噪声驱动的单模激光线性系统中把随机共振扩展到用信噪比与量子噪声实虚部间关联系数的函数来反映.

驱动系统的噪声对随机共振起着本质的、决定性的作用, 朱士群等^[14-19]的研究表明, 噪声的色和

噪声之间的互关联形式对激光系统的统计性质和随机共振有很大的影响. 另外, Dykman 等^[20]引入了调制噪声, 发现调制信号频率对共振特性会产生影响. 在激光系统中, 调制噪声比普通噪声能更好地对系统进行描述, 因为激光被信号调制, 同时激光中的噪声也会受到信号的调制, 所形成的调制噪声会极大地影响激光系统的统计行为. 研究这类调制噪声驱动的单模激光系统, 有着重要的理论意义和实际应用价值.

我们研究了受信号调制的色泵噪声和实虚部间关联的量子噪声驱动的单模激光系统, 发现信噪比 R 随泵噪声自关联时间 τ 、调制信号频率 Ω 和量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 的变化均存在随机共振. 我们还发现了一些新颖的现象: 当改变 Ω 时, R 随 τ 的关系曲线经历了从同时出现共振和抑制到单峰共振, 最后到单调上升的变化, 呈现多种形式的随机共振. 当改变 τ 时, R 随 Ω 的关系曲线经历了从单调上升到同时出现共振和抑制, 最后到单调下降的变化过程. R 随 λ_q 的关系曲线出现尖锐的单峰. 本文的研究不但扩展了“信噪比 R 对噪声强度的变化曲

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10275025)和湖北省教育厅重点科研项目(批准号: 03A001)资助的课题.

线具有极大值'的典型随机共振包含的范围,还发现随着某些参数的变化,单模激光系统中会出现多种随机共振的演化过程.

2. 输出信噪比

单模激光损失模型受信号调制后的光强方程为^[21]

$$\frac{dI}{dt} = 2a_0 I - 2AI^2 + Q(1 - |\lambda_q|) + 2I p_R(t) B \cos \Omega t + 2\sqrt{I} \varepsilon_r(t). \quad (1)$$

其量子噪声为零平均的白噪声,泵噪声为色噪声,满足如下的统计性质:

$$\begin{aligned} \langle p_R(t) \rangle &= \langle \varepsilon_r(t) \rangle = 0, \\ \langle p_R(t) p_R(s) \rangle &= \frac{P}{2\tau} e^{-\frac{|t-s|}{\tau}}, \\ \langle \varepsilon_r(t) \varepsilon_r(s) \rangle &= Q(1 + |\lambda_q|) \delta(t-s), \\ \langle p_R(t) \varepsilon_r(s) \rangle &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

在(1)(2)式中, a_0 , A 分别为净增益系数和自饱和系数; I , B 和 Ω 分别为光强、调制信号振幅和频率; $p_R(t)$ 为泵噪声实部; ε_r 为相位锁定后的量子噪声; Q , P 是量子噪声和泵噪声强度; τ 为泵噪声自关联时间; $-1 \leq \lambda_q \leq 1$ 为量子噪声实虚部间关联系数.

设 $I = I_0 + \delta(t)$, 其中 $\delta(t)$ 为微小扰动项, 在确定论定态光强 $I_0 = \frac{a_0}{A}$ 附近对方程(1)线性化得

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = -\gamma \delta(t) + 2I_0 p_R(t) B \cos \Omega t + 2\sqrt{I_0} \varepsilon_r(t) + Q(1 - |\lambda_q|), \quad (3)$$

式中 $\gamma = 2a_0$.

根据稳态时的平均光强关联函数的定义

$$\begin{aligned} D(t) &= \lim_{t' \rightarrow \infty} \frac{\langle I(t') I(t'+t) \rangle}{I_0^2} \\ &= \lim_{t' \rightarrow \infty} \left(\frac{\Omega}{2\pi} \int_{t'}^{t'+2\pi} \langle I(t') I(t'+t) \rangle dt' \right), \end{aligned}$$

计算得稳态平均光强关联函数为

$$\begin{aligned} D(t) &= \left(I_0^2 + \frac{2I_0 Q(1 - |\lambda_q|)}{\gamma} + \frac{Q^2(1 - |\lambda_q|)^2}{\gamma^2} \right) \\ &+ \left(\frac{2I_0 Q(1 + |\lambda_q|)}{\gamma} + \frac{\pi \gamma k_2 I_0^2 B^2 P}{\tau \Omega k_3 (k_2^2 + \Omega^2)} \right) \\ &+ \frac{k_2 \Omega^2 I_0^2 B^2 P}{2\tau \gamma k_3 (k_2^2 + \Omega^2)} - \frac{\pi \gamma k_1 I_0^2 B^2 P}{\tau \Omega k_3 (k_1^2 + \Omega^2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &- \frac{k_1 \Omega^2 I_0^2 B^2 P}{2\tau \gamma k_3 (k_1^2 + \Omega^2)} \Big) e^{-\gamma |t|} \\ &+ \frac{I_0^2 B^2 P (k_3 - \tau^{-2})}{\tau (k_1^2 + \Omega^2) (k_2^2 + \Omega^2)} e^{-\frac{|t|}{\tau} \cos \Omega t} \\ &+ \frac{2\Omega I_0^2 B^2 P}{\tau^2 (k_1^2 + \Omega^2) (k_2^2 + \Omega^2)} e^{-\frac{|t|}{\tau} \sin \Omega |t|}, \quad (4) \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} k_1 &= \gamma - \tau^{-1}, \\ k_2 &= \gamma + \tau^{-1}, \\ k_3 &= \gamma^2 + \Omega^2. \end{aligned}$$

对(4)式做傅里叶变换,得到输出光强的功率谱

$$S(\omega) = S_1(\omega) + S_2(\omega), \quad (5)$$

式中 $S_1(\omega)$ 为输出信号功率谱, $S_2(\omega)$ 为输出噪声功率谱.

信噪比定义为输出总信号功率与 $\omega = \Omega$ 处的单位噪声谱的平均功率之比(仅取 $\omega > 0$ 的谱),

$$R = \frac{P_s}{S_2(\omega = \Omega)}. \quad (6)$$

将 $P_s = \int_0^\infty S_1(\omega) d\omega$, $S_2(\omega = \Omega)$ 代入(6)式得输出信噪比

$$\begin{aligned} R &= \frac{\pi I_0 B^2 P k_3 (k_3 - \Omega^2)}{4\tau Q(1 + |\lambda_q|) (k_1^2 + \Omega^2) (k_2^2 + \Omega^2)} \\ &+ \frac{\Omega k_3^2 (k_3 - \tau^{-2})}{4\gamma^2 k_2 (k_1^2 + \Omega^2)} + \frac{\pi k_3^2 (k_3 - \tau^{-2})}{\Omega^2 k_2 (k_1^2 + \Omega^2)} \\ &- \frac{\Omega k_3^2 (k_3 - \tau^{-2})}{4\gamma^2 k_1 (k_2^2 + \Omega^2)} - \frac{\pi k_3^2 (k_3 - \tau^{-2})}{\Omega^2 k_1 (k_2^2 + \Omega^2)} \quad (7) \end{aligned}$$

式中 $\tau \neq 1/2a_0$, $\Omega \neq 0$, $a_0 \neq 0$.

3. 信噪比 R 与泵噪声自关联时间 τ 的关系曲线

由于导出方程(1)应用了统一色噪声近似,因此下面采用的泵噪声自关联时间 $\tau \ll 1$.

3.1. 调制信号频率 Ω 和振幅 B 对 R - τ 曲线的影响

以调制信号频率 Ω 为参数,由(7)式画出信噪比 R 与泵噪声自关联时间 τ 的关系曲线如图1所示.当改变调制信号频率 Ω 时, R - τ 曲线经历了如下的变化过程(1)在图1(a)中, R - τ 曲线出现了一个极大和一个极小两个极值,说明信噪比 R 在随 τ 变化的过程中,可以同时出现共振和抑制现象.当 Ω 增加时, R - τ 曲线的极小值位置和大小不变,但极

大值减小且位置向 τ 增加的方向移动,共振峰变得越来越平,抑制谷越来越浅.(2)在图 1(b)中,信号频率增大到 $\Omega = 17.2$ 时, $R-\tau$ 曲线突变成一个极大值,即出现单峰共振;继续增加 Ω ,共振峰值减小,使共振峰越来越平.(3)当 $\Omega = 58.5$ 时,共振峰消

失, $R-\tau$ 曲线变为单调上升,如图 1(c)所示.我们发现, Ω 在确定的范围内增加时, R 与 τ 的关系经历了从同时出现共振和抑制到单峰共振,最后到单调上升的变化,呈现不同形式的随机共振.这表明,调制信号频率的变化对随机共振有极大的影响.

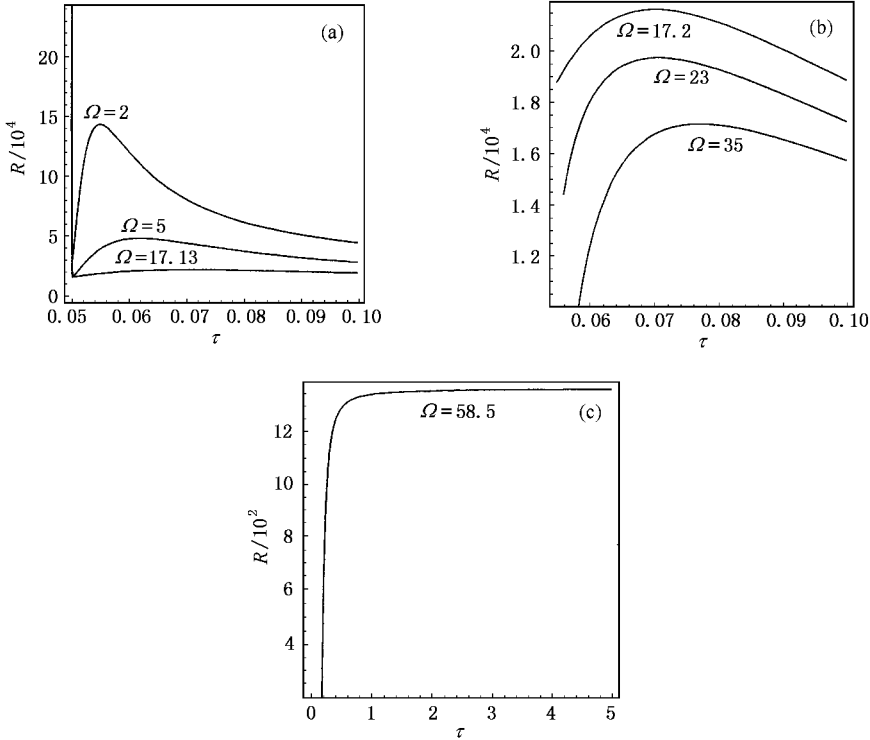


图 1 信噪比 R 与泵噪声自关联时间 τ 的关系曲线(以 Ω 为参数) (a) $\Omega = 2, 5, 17.13$ (b) $\Omega = 17.2, 23, 35$; (c) $\Omega = 58.5$.
 $A = 1, B = 20, \lambda_q = 0.5, P = 0.001, Q = 0.001, a_0 = 10$

以调制信号振幅 B 为参数时,由(7)式可以画出 $R-\tau$ 曲线.为避免图形过多,下面仅就 B 对 $R-\tau$ 曲线的影响进行描述.我们发现, $R-\tau$ 曲线也出现了共振和抑制同时存在的随机共振,改变 B 的大小, $R-\tau$ 曲线的共振和抑制一直同时存在.随着 B 的增加,共振峰位置不变但峰值增高,极小值位置不变、值变小,抑制谷变深.

3.2. 量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 对 $R-\tau$ 曲线的影响

以量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 为参数,由(7)式画出 $R-\tau$ 曲线如图 2 所示.从图 2 可以发现,在 $-1 \leq \lambda_q \leq 1$ 的变化范围内, $R-\tau$ 曲线一直同时出现共振和抑制现象.当 $|\lambda_q|$ 减小时,共振峰值增高,抑制谷变深,但共振峰和抑制谷位置均不变.表明量子噪声实虚部间关联越弱,共振和抑制越强.

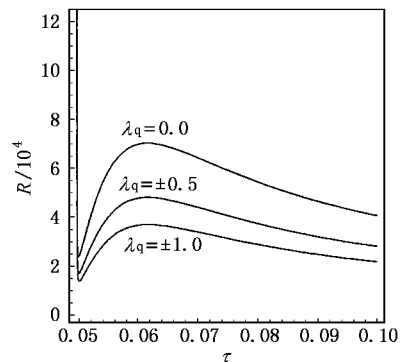


图 2 信噪比 R 与泵噪声自关联时间 τ 的关系曲线(以 λ_q 为参数) $A = 1, B = 20, P = 0.001, Q = 0.001, a_0 = 10, \Omega = 5$

4. 信噪比 R 与调制信号频率 Ω 的关系曲线

我们首次在单模激光系统的 $R-\Omega$ 关系曲线中

发现了随机共振.下面分别讨论调制信号振幅 B 、量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 、泵噪声自关联时间 τ 对 $R-\Omega$ 曲线的影响.

4.1. 调制信号振幅 B 对 $R-\Omega$ 曲线的影响

以调制信号振幅 B 为参数,由(7)式画出信噪比 R 随信号频率 Ω 的关系曲线如图3所示.在图3中, $R-\Omega$ 曲线同时出现共振和抑制现象.当 B 减小时, $R-\Omega$ 曲线极大值和极小值的位置均向 Ω 减小的方向移动,共振峰变得越来越平,抑制谷变得越来越浅;当信号振幅增大到 $B = 27$ 时,抑制和共振同时消失, $R-\Omega$ 曲线变为单调下降.由此可见,调制信号的强度变化对是否出现随机共振有较大的影响.

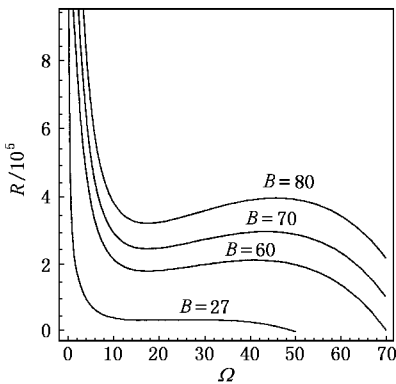


图3 信噪比 R 与调制信号频率 Ω 的关系曲线(以 B 为参数) $A = 1, \lambda_q = 0.5, P = 0.001, Q = 0.001, \mu_0 = 10, \tau = 0.06$

4.2. 量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 对 $R-\Omega$ 曲线的影响

以量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 为参数,由(7)式画出 $R-\Omega$ 曲线如图4所示.从图4可以发现,在 $-1 \leq \lambda_q \leq 1$ 的变化范围内, $R-\Omega$ 曲线一直同时出现共振和抑制现象.与3.2节中结论有所不同的是,当 $|\lambda_q|$ 减小时,共振峰值增高,极小值变大,抑制谷变深,但共振峰和抑制谷位置均向 Ω 增加的方向移动.

4.3. 泵噪声自关联时间 τ 对 $R-\Omega$ 曲线的影响

以泵噪声自关联时间 τ 为参数,由(7)式画出 $R-\Omega$ 曲线如图5所示.下面详细分析 $R-\Omega$ 曲线的变化过程.(1)从图5(a)可以发现,当 $\tau < 0.05$ 时, $R-\Omega$ 曲线是单调上升的,没有出现随机共振.当 τ 趋

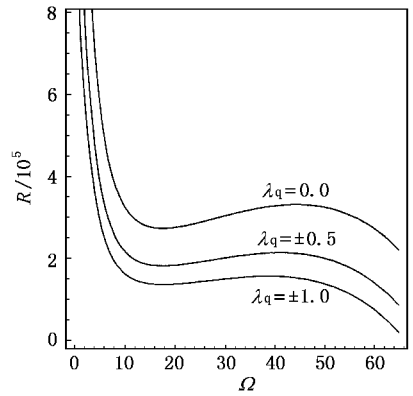


图4 信噪比 R 与信号频率 Ω 的关系曲线(以 λ_q 为参数) $A = 1, B = 60, P = 0.001, Q = 0.001, \mu_0 = 10, \tau = 0.06$

近于0.05时,随着 Ω 的增加,信噪比 R 迅速增大.(2)当 $\tau > 0.05$ 后,在 $\Omega = 0$ 附近,信噪比 R 随 Ω 的增大迅速减小,随着 Ω 的继续增大, $R-\Omega$ 曲线同时出现共振和抑制.当参数 τ 增加时,共振峰值减小,极小值也变小,共振峰和极小值位置均向 Ω 增加的方向移动.

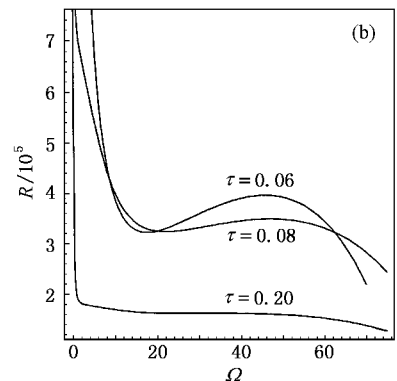
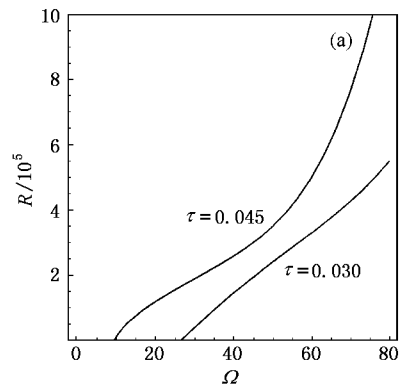


图5 信噪比 R 与信号频率 Ω 的关系曲线(以 τ 为参数) (a) $\tau < 0.05$ (b) $\tau > 0.05$. $A = 1, \lambda_q = 0.5, B = 80, P = 0.001, Q = 0.001, \mu_0 = 10$

方向移动,使共振峰变平,抑制谷变浅;当色泵噪声自关联时间增加到 $\tau = 0.2$ 时,共振和抑制消失, $R-\Omega$ 曲线单调下降,如图 5(b) 所示. 总之,从图 5 可以看出,随着 τ 的增大, $R-\Omega$ 曲线经历了从单调上升 \rightarrow 共振和抑制 \rightarrow 单调下降的重复演化过程.

5. 信噪比 R 与量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 的关系曲线

5.1. 信号振幅 B 和频率 Ω 对 $R-\lambda_q$ 曲线的影响

以信号振幅 B 为参数,由(7)式画出信噪比 R 随量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 的关系曲线如图 6 所示. 在图 6 中,信噪比 R 在 $\lambda_q = 0$ 处出现极大值,当信号振幅 B 下降时, R 的极大值位置不变,峰值增高且峰变得尖锐. 以 Ω 为参数, $R-\lambda_q$ 曲线也出现单峰共振. 下面没有绘出以 Ω 为参数的 $R-\lambda_q$ 曲线图,而仅就 Ω 对 $R-\lambda_q$ 曲线的影响进行描述:当 Ω 下降时,同样 R 的极大值位置不变,峰值增高且峰变得尖锐. 值得注意的是,这里是信噪比 R 随量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 的变化存在随机共振,而且出现了输入信号强度越弱(振幅减小),变化越慢(频率降低),共振峰越高越尖锐的现象.

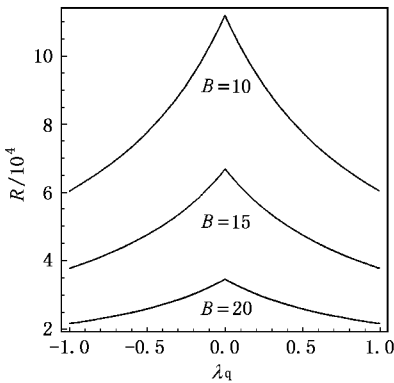


图 6 信噪比 R 与量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 的关系曲线(以 B 为参数) $A = 1, P = 0.001, Q = 0.001, a_0 = 10, \Omega = 3, \tau = 0.06$

5.2. 泵噪声自关联时间 τ 对 $R-\lambda_q$ 曲线的影响

以泵噪声自关联时间 τ 为参数,由(7)式画出 $R-\lambda_q$ 曲线如图 7 所示. 在图 7 中,信噪比 R 在 $\lambda_q = 0$ 处出现极大值,且随着 τ 的减小共振峰增高变尖

锐,表明泵噪声自关联时间 τ 越短,随机共振越强.

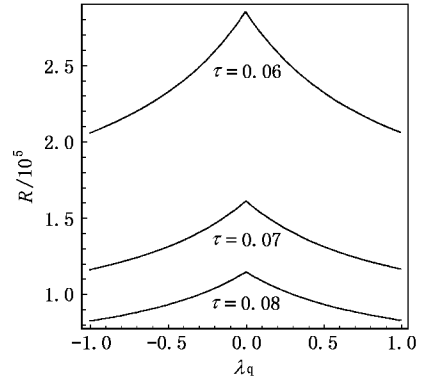


图 7 信噪比 R 与量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 的关系曲线(以 τ 为参数) $A = 1, B = 20, P = 0.001, Q = 0.001, a_0 = 10, \Omega = 3$

5.3. 量子噪声强度 Q 和泵噪声强度 P 对 $R-\lambda_q$ 曲线的影响

以量子噪声强度 Q 为参数,由(7)式画出 $R-\lambda_q$ 曲线如图 8 所示. 在图 8 中,信噪比 R 在 $\lambda_q = 0$ 处出现极大值,当 Q 减小时共振峰增高变尖锐,表明量子噪声强度 Q 越弱,随机共振越强.

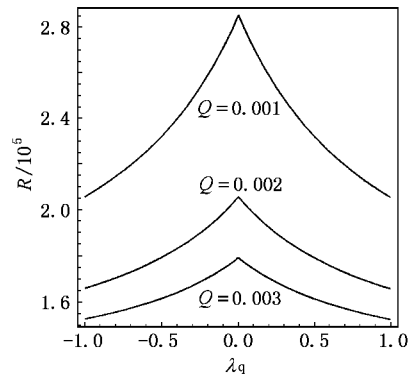


图 8 信噪比 R 与量子噪声实虚部间关联系数 λ_q 的关系曲线(以 Q 为参数) $A = 1, B = 20, P = 0.001, a_0 = 10, \Omega = 1, \tau = 0.06$

以泵噪声强度 P 为参数,由(7)式可以画出 $R-\lambda_q$ 曲线,下面略去图形,仅就 P 对 $R-\lambda_q$ 曲线的影响进行描述: $R-\lambda_q$ 曲线出现单峰共振,信噪比 R 在 $\lambda_q = 0$ 处出现极大值,当 P 增大时共振峰增高变尖锐. 我们发现与量子噪声强度 Q 对随机共振影响不同的是:泵噪声强度 P 越强,随机共振越强.

6. 结 语

综上所述,在考虑了受信号调制的色泵噪声和实虚部间关联的量子噪声驱动的单模激光损失模型中,发现信噪比 R 随量子噪声强度 Q 和泵噪声强度 P 的变化关系没有随机共振,但信噪比 R 随量子噪声实虚部间的关联系数 λ_q 、泵噪声自关联时间 τ 、甚至调制信号频率 Ω 的变化关系均出现了随机共振,扩展了随机共振的范围. 以 Ω 为参数,当 Ω 增加时, R - τ 曲线经历了从同时出现共振和抑制到单峰共振的多种随机共振情况. 噪声强度、泵噪声自关联时间、量子噪声实虚部间关联系数、调制信号振幅和频率均对随机共振的特性有很大的影响. 值得指

出的是,本文所研究的是量子噪声实虚部之间的自关联,信号是乘性输入(信号调制泵噪声),其随机共振表现在 R - τ 、 R - Ω 和 R - λ_q 曲线出现极大值,而 R - P 和 R - Q 曲线无共振现象. 文献 [22] 研究的是泵噪声和量子噪声之间的有色关联,信号是加性输入,其 R - τ 、 R - Ω 和 R - λ_q 曲线无共振现象,而随机共振表现在 R - P 和 R - Q 曲线出现极大值. 可见由于噪声之间的关联形式和信号的输入方式不同,出现的随机共振现象大不相同.

另外,在计算输出光强信噪比时,我们采用了线性化近似方法. 在光强的相对涨落 $\alpha(0) \ll 1$ 的条件下,线性化近似是可靠的^[23]. 因此我们对光强的相对涨落进行了计算,保证了本文的参数取值满足 $\alpha(0) \leq 1 \times 10^{-2}$ 的条件.

-
- [1] Benzi R ,Sutera A ,Vulpiani A 1981 *J. Phys. A* **14** 453
- [2] Liang Q Y ,Cao L , Wu D J 2003 *Chin. Phys.* **12** 1105
- [3] Hu G ,Nicolis G ,Nicolis C 1990 *Phys. Rev. A* **42** 2030
- [4] Tessone C J ,Wio H S ,Hanggi P 2000 *Phys. Rev. E* **62** 4623
- [5] Zhang L Y ,Cao L , Wu D J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1174 (in Chinese)[张良英、曹力、吴大进 2003 物理学报 **52** 1174]
- [6] Hu G ,Ditzinger T ,Ning C Z *et al* 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 807
- [7] Osipov V V ,Ponizovskaya E V 2000 *Phys. Lett. A* **271** 191
- [8] Dhara A K ,Mukhopadhyay T 1999 *Phys. Rev. E* **60** 2727
- [9] Fulinski A ,Gora P F 1999 *J. Stat. Phys.* **101** 483
- [10] Rosario N ,Mantegna N ,Spagnolo B *et al* 2001 *Phys. Rev. E* **63** 11101
- [11] Vilar J M G ,Rubi J M 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2882
- [12] Zarkin A A ,Kurths J ,Schimansky-Geier L 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 227
- [13] Barzykin A V ,Seki K 1998 *Phys. Rev. E* **57** 6555
- [14] Luo X Q ,Zhu S Q 2003 *Phys. Rev. E* **67** 21104
- [15] Wang J ,Zhu S Q 1995 *Phys. Lett. A* **207** 47
- [16] Zhou X P ,Gao W J ,Zhu S Q 1996 *Phys. Lett. A* **214** 131
- [17] Luo X Q ,Zhu S Q ,Chen X F 2001 *Phys. Lett. A* **287** 111
- [18] Luo X Q ,Zhu S Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 977 (in Chinese)[罗晓琴、朱士群 2002 物理学报 **51** 977]
- [19] Luo X Q ,Zhu S Q ,Gao W J 2001 *Chin. Phys.* **10** 1011
- [20] Dykman M I ,Luchinsky D G ,McClintock P V *et al* 1992 *Phys. Rev. E* **46** 1713
- [21] Ke S Z ,Cao L ,Wu D J 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 370
- [22] Zhang L Y ,Cao L ,Wu D J 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 25
- [23] Hernandez-Garcia E ,Toral R ,San Minguel M 1990 *Phys. Rev. A* **42** 6823

Stochastic resonance in a single-mode laser driven by the colored pump noise with signal modulation and the quantum noise with cross-correlation between the real and imaginary parts^{*}

Cheng Qing-Hua^{1,2)} Cao Li^{1,3)} Wu Da-Jin^{1,3)}

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

²⁾ *School of Physics Science and Technology, Yangtze University, Jinzhou 434100, China*

³⁾ *Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*

(Received 13 November 2003 ; revised manuscript received 9 April 2004)

Abstract

We present an analytic investigation of the signal-to-noise ratio of output intensity in a loss-noise model of a single-mode laser system driven by the colored pump noise with signal modulation and the quantum noise with cross-correlation between the real and imaginary parts. Stochastic resonance (SR) in the curve of signal-to-noise ratio R versus the pump noise self-correlation time τ , signal frequency Ω and cross-correlation coefficient between the real and imaginary parts of the quantum noise λ_q are found. It extends the conclusion of the typical SR, that is, "there is a maximum in the curve of R vs noise intensity". Moreover, we detect that, when the parameter Ω increases, the shape of the R - τ curve will exhibit a change process of multiform SR: the curve experienced from simultaneous existence of resonances and suppressions to single-peak SR and finally to the monotonous rise. And when the parameter τ increases, the shape of the R - Ω curve also exhibit a change process of multiform SR: the curve experienced from the monotonous rise to the simultaneous existence of resonances and suppressions and finally to the monotonous descending. For the R - λ_q curve, it appears an acute single-peak form.

Keywords : noise, signal-to-noise ratio, stochastic resonance

PACC : 4250, 0540, 4260K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10275025) and the Emphases Item of Education Office of Hubei Province, China (Grant No. 03A001).