

色关联噪声驱动下双模激光随机共振*

汪志云† 陈培杰 张良英

(湖北文理学院物理与电子工程学院, 襄阳 441053)

(2014年3月6日收到; 2014年5月6日收到修改稿)

运用线性近似方法, 计算得到了关联色噪声和输入周期信号作用下双模激光增益模型输出信号光强的功率密度谱和信噪比, 讨论了信噪比随系统参数的变化关系. 研究发现: 在系统的参数和输入信号的频率满足一定条件时, 信噪比不仅随噪声强度变化出现了传统的随机共振现象, 还发现其随自饱和系数 c_2 、输入信号频率 Ω 及交叉耦合参数 b 的变化都出现了随机共振.

关键词: 色噪声, 双模激光, 信噪比, 随机共振

PACS: 42.60.Mi, 05.40.-a

DOI: 10.7498/aps.63.194204

1 引言

近30年来, 随机共振现象在物理、化学、生物及其交叉学科的多种非线性系统中被发现, 其理论也被人们广泛而深入地研究, 并取得了较大进展, 已成为非线性问题的前沿课题之一^[1-10]. 随机共振可以简单地描述为适当的噪声引起系统响应最优的一种非线性现象. 因此, 传统的随机共振是用系统输出信号(信噪比、功率谱等)随噪声强度的变化加以刻画. 大量的研究已经证明: 在单模激光系统中, 由于噪声和输入信号之间的协作效应, 其噪声能够增强信号的传输, 即出现了随机共振现象, 可以通过改变系统参数提高激光的输出能量和稳定性^[6-9]. 实际应用中激光系统是由多个模所构成, 模与模之间的关联对于激光系统输出信号的统计性质有很大的影响. 然而由于系统本身的复杂性, 对存在噪声作用下多模激光系统的随机共振理论研究比较少.

近几年来, 对于双模激光系统的研究取得了一定的进展. 如陈黎梅等对双模之间的竞争及关联函数的演化进行了研究^[11,12]; Zhu等讨论噪声关联程度和强度对双模激光强度自关联函数和有效本

征值的影响^[13-15]; Ye等2010年首次研究发现了双模激光系统输出信号的信噪比随系统参数变化出现了广义的随机共振^[16]. 在以前的研究工作中, 为了计算简便, 认为抽运噪声和量子噪声都是白噪声, 且没有关联^[17]. 通过对单模激光系统输出信号信噪比的研究可知: 色噪声之间的色关联对于系统的统计性质和随机共振现象影响较大^[18-22]. 而存在色关联噪声驱动下双模激光系统的统计性质研究很少. 本文主要通过一些近似化处理, 研究存在色关联的色噪声作用下双模线性激光系统输出光强的功率谱和信噪比, 并讨论信噪比随系统参数及外部周期信号的变化, 研究系统的随机共振现象.

2 关联色噪声驱动下双模激光信噪比

双模激光线性增益模型在关联色噪声和周期信号驱动下的光强方程为^[16,17]

$$\begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= 2I_1(a_1 - c_1I_1 - b_1I_2) + 2I_1\xi(t) \\ &\quad + 2\sqrt{I_1}\eta(t) + B\cos(\Omega t), \\ \frac{dI_2}{dt} &= 2I_2(a_2 - c_2I_2 - b_2I_1) \\ &\quad + 2I_2\xi(t) + 2\sqrt{I_2}\eta(t), \end{aligned} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 11045004)和湖北省教育厅科研基金重点项目(批准号: D20132603)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wzy425@126.com

式中, I_1 和 I_2 分别表示双模的激光强度; a_1, a_2 为系统两模的净增益系数; b_1 和 b_2 表示激光系统两模的交叉耦合系数; c_1 和 c_2 为两模的自饱和系数; $B \cos(\Omega t)$ 是外部输入信号; $\xi(t)$ 和 $\eta(t)$ 分别为抽运噪声和量子噪声, 两噪声满足以下统计性质:

$$\begin{aligned} \langle \xi(t) \rangle &= \langle \eta(t) \rangle = 0; \\ \langle \xi(t)\xi(t') \rangle &= \frac{D}{2\tau_1} e^{-\frac{|t-t'|}{\tau_1}}; \\ \langle \eta(t)\eta(t') \rangle &= \frac{Q}{2\tau_2} e^{-\frac{|t-t'|}{\tau_2}}; \\ \langle \xi(t)\eta(t') \rangle &= \langle \xi(t')\eta(t) \rangle = \frac{\lambda\sqrt{QD}}{2\tau_3} e^{-\frac{|t-t'|}{\tau_3}}; \\ (-1 < \lambda < 1). \end{aligned} \quad (2)$$

D 和 Q 分别为抽运噪声和量子噪声的强度; λ 为两噪声的关联系数; τ_1 和 τ_2 分别是抽运噪声和量子噪声的自关联时间; τ_3 是两噪声互关联时间.

假定激光两个模的交叉耦合系数相同, 即 $b_1 = b_2 = b$, 且当第二模的净增益系数满足条件: $a_2 = \frac{a_1(b+c_2)}{(b+c_1)}$, 将两模光强在确定论定态光强 $I_0 = \frac{a_1}{c_1+b}$ 附近分别线性化, 即

$$I_1(t) = I_0 + \varepsilon_1(t), \quad I_2(t) = I_0 + \varepsilon_2(t), \quad (3)$$

式中 $\varepsilon_1(t)$ 和 $\varepsilon_2(t)$ 是两模光强的微扰项. 将 (3) 式代入 (1) 式, 可得到线性化方程

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_1(t)}{dt} &= -2c_1 I_0 \varepsilon_1(t) - 2b I_0 \varepsilon_2(t) + 2I_0 \xi(t) \\ &\quad + 2\sqrt{I_0} \eta(t) + B \cos(\Omega t), \\ \frac{d\varepsilon_2(t)}{dt} &= -2b I_0 \varepsilon_1(t) - 2c_2 I_0 \varepsilon_2(t) + 2I_0 \xi(t) \\ &\quad + 2\sqrt{I_0} \eta(t). \end{aligned} \quad (4)$$

根据平均光强相关函数的定义, 可计算得到第一个模的光强相关函数为

$$\begin{aligned} C(t') &= \lim_{t \rightarrow \infty} \overline{\langle I_1(t) I_1(t+t') \rangle} \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{\Omega}{2\pi} \int_t^{t+\frac{2\pi}{\Omega}} \left(\frac{1}{4} \int_t^{t+t'} \int_0^t \langle \alpha_1 \alpha_1' \beta_1 \beta_1' \right. \right. \\ &\quad + \alpha_2 \alpha_1' \beta_2 \beta_1' + \alpha_1 \alpha_2' \beta_1 \beta_2' \\ &\quad \left. \left. + \alpha_2 \alpha_2' \beta_2 \beta_2' \rangle ds ds' \right) dt \right), \end{aligned} \quad (5)$$

式中,

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= e^{-m(t-s)} + e^{-n(t-s)}, \\ \alpha_1' &= e^{-m(t+t'-s')} + e^{-n(t+t'-s')}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= e^{-m(t-s)} - e^{-n(t-s)}, \\ \alpha_2' &= e^{-m(t+t'-s')} - e^{-n(t+t'-s')}; \\ \beta_1 &= 2I_0 \xi(s) + 2\sqrt{I_0} \eta(s) + B \cos(\Omega s); \\ \beta_1' &= 2I_0 \xi(s') + 2\sqrt{I_0} \eta(s') + B \cos(\Omega s'); \\ \beta_2 &= 2I_0 \xi(s) + 2\sqrt{I_0} \eta(s); \\ \beta_2' &= 2I_0 \xi(s') + 2\sqrt{I_0} \eta(s'); \\ m &= (c_1 + c_2 + \sqrt{(c_1 - c_2)^2 + 4b^2}) I_0, \\ n &= (c_1 + c_2 - \sqrt{(c_1 - c_2)^2 + 4b^2}) I_0. \end{aligned} \quad (6)$$

当 c_1, c_2 和 b 满足 $c_1 c_2 > b^2$ 条件, 对 (5) 式进行计算可以得到

$$\begin{aligned} C(t') &= \frac{2I_0^2 D \tau_1}{(m^2 \tau_1^2 - 1)} e^{-\frac{t'}{\tau_1}} + \frac{4\lambda\sqrt{QD} I_0^{3/2} \tau_3}{(m^2 \tau_3^2 - 1)} e^{-\frac{t'}{\tau_3}} \\ &\quad + \frac{2I_0 Q \tau_2}{(m^2 \tau_2^2 - 1)} e^{-\frac{t'}{\tau_2}} - \left(\frac{2I_0^2 D}{m(m^2 \tau_1^2 - 1)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{4\lambda\sqrt{QD} I_0^{3/2}}{m(m^2 \tau_3^2 - 1)} + \frac{2I_0 Q}{m(m^2 \tau_2^2 - 1)} \right) e^{-mt'} \\ &\quad + \frac{B^2(m^2 + n^2 + 2mn + 4\Omega^2)}{8(n^2 + \Omega^2)(m^2 + \Omega^2)} \\ &\quad \times \cos(\Omega t'). \end{aligned} \quad (7)$$

对 (7) 式进行傅里叶变换, 得到输出光强功率谱为

$$S(\omega) = S_1(\omega) + S_2(\omega), \quad (8)$$

式中 $S_1(\omega)$ 为输出信号功率谱, $S_2(\omega)$ 为输出噪声功率谱, 具体表达式为

$$\begin{aligned} S_1(\omega) &= \frac{B^2(m^2 + n^2 + 2mn + 4\Omega^2)}{8(n^2 + \Omega^2)(m^2 + \Omega^2)} \\ &\quad \times [\delta(\omega - \Omega) + \delta(\omega + \Omega)], \\ S_2(\omega) &= \frac{4}{\omega^2 + m^2} \left[\frac{I_0^2 D}{(\tau_1^2 \omega^2 + 1)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2\lambda\sqrt{QD} I_0^{3/2}}{(\tau_3^2 \omega^2 + 1)} + \frac{I_0 Q}{(\tau_2^2 \omega^2 + 1)} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

$S_1(\omega)$ 中包含两个 δ 函数, 若只取正 ω 的谱表示输出功率信号谱, 输出信号的总功率为

$$\begin{aligned} P_s &= \int_0^\infty S_1(\omega) d\omega \\ &= \frac{B^2(m^2 + n^2 + 2mn + 4\Omega^2)}{8(n^2 + \Omega^2)(m^2 + \Omega^2)}. \end{aligned} \quad (11)$$

将输出信号总功率与信号频率处 ($\omega = \Omega$) 单位噪声谱的平均功率的比值定义为信噪比, 由 (9), (10) 和 (11) 式, 可以得到双模激光系统第一模输出信号的信噪比 (SNR) 为

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{S_2(\omega = \Omega)}$$

$$= \frac{B^2[(m+n)^2 + 4\Omega^2]}{32(n^2 + \Omega^2)} \times \left[\frac{I_0^2 D}{(\tau_1^2 \Omega^2 + 1)} + \frac{2\lambda\sqrt{QD}I_0^{3/2}}{(\tau_3^2 \Omega^2 + 1)} + \frac{I_0 Q}{(\tau_2^2 \Omega^2 + 1)} \right]^{-1}. \quad (12)$$

3 输出信号光强的随机共振

由(12)式可知, 双模激光系统第一模的输出信号光强 SNR 是两模的特征参数 (a_1, b, c_1, c_2) 、外部输入周期信号频率 Ω 及关联噪声强度 (Q, D) 的函数, 而且与它们成非线性关系. 下面讨论信噪比随参数变化所出现的共振现象, 所有参量都是无量纲量.

3.1 信噪比随抽运噪声强度 D 的变化

单模激光系统中所发现的传统随机共振现象是信噪比随抽运噪声强度 D 和量子噪声强度 Q 的

变化曲线中出现峰值^[20]. 通过对(12)式研究可知, 在系统参数满足一定条件下, 双模激光系统的信噪比随噪声强度 Q 和 D 也都会出现共振现象. 由(2)式可知, 两噪声之间的互关联程度是由关联系数 λ 和关联时间 τ_3 决定. 当 $\lambda < 0$, 且绝对值不断增大, τ_3 取值变小时, 两噪声负关联程度增大, 信噪比的峰值位置从噪声强度 $D = 0$ 的地方向 D 增大的方向移动, 峰值增大, 共振现象更加明显(如图 1(a) 和 (b) 所示); 而两噪声为正关联, 无论关联强度多大, 信噪比随噪声强度都是单调减小, 无共振现象.

而噪声的自关联时间对信噪比的影响与互关联时间 τ_3 差别较大, 从图 1(c) 可发现: 无论 τ_1 取多大值, SNR- D 曲线上都会出现共振现象, 其共振峰的值随 τ_1 增大而升高, 位置向右移动, 共振更明显. 而双模系统第一模的净增益系数 a_1 对 SNR- D 曲线的影响与 τ_1 相反(如图 1(d) 所示), a_1 越大, 信噪比越小, 峰值越低, 位置向 D 减小的方向移动.

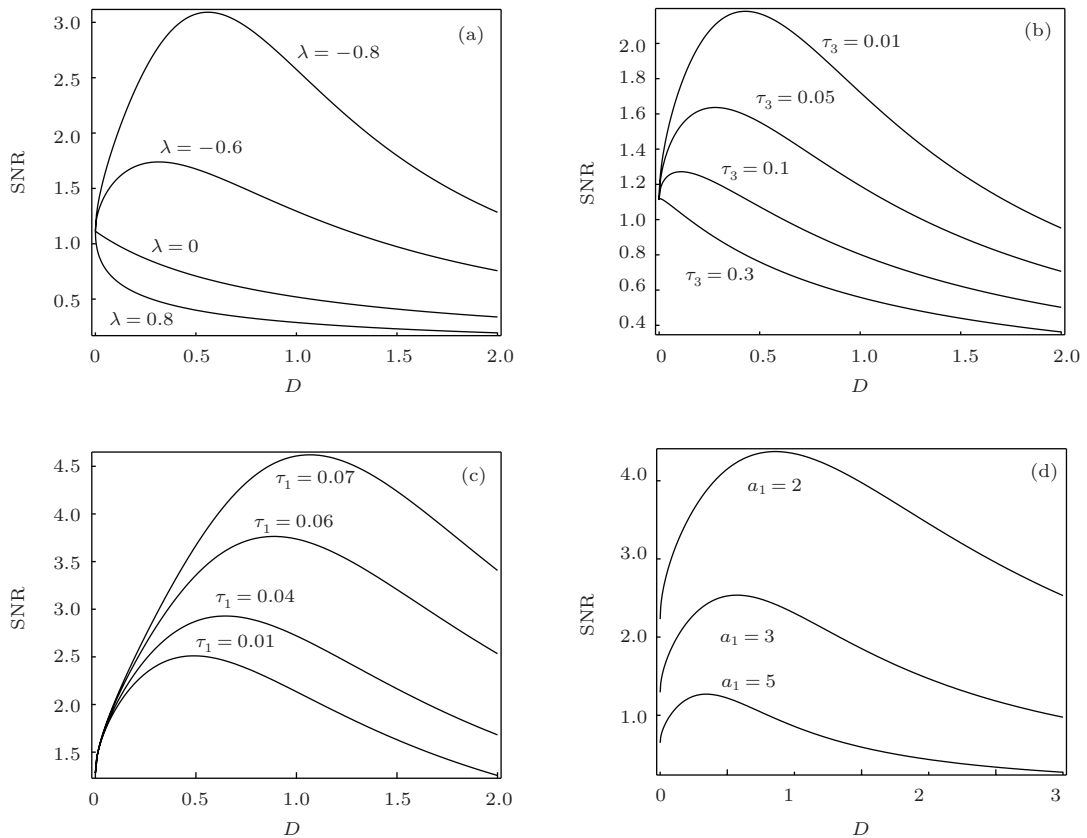


图1 信噪比 SNR 随抽运噪声强度 D 的变化 ($\Omega = 10, B = 1, b = 2, c_2 = 3, \tau_2 = 0.03, Q = 0.5$) (a) $a_1 = 4, \tau_1 = 0.01, \tau_3 = 0.01$; (b) $a_1 = 4, \tau_1 = 0.01, \lambda = -0.7$; (c) $a_1 = 4, \tau_3 = 0.01, \lambda = -0.7$; (d) $\tau_1 = 0.01, \tau_3 = 0.01, \lambda = -0.7$

以上讨论说明了由噪声驱动的双模激光线性耦合系统要产生随机共振关键在于两噪声间关联的程度. 只有当噪声负关联程度较大, 输入噪声的

强度达到某一值时, 输出信噪比最大, 降低了输出噪声, 到达低谷, 形成能量由噪声部分向信号部分转移. 而两噪声互关联的有色性和模的净增益对由

噪声引起的随机共振都会起到抑制作用.

3.2 信噪比随自饱和系数的变化

图 2 所示的是信噪比随两模自饱和系数 c_1, c_2 变化曲线, 可以发现: 当输入信号频率 Ω 比较小时, SNR 随 c_2 变化也会出现随机共振 (如图 2(a) 所示), 即 SNR- c_2 曲线出现了一个共振峰. 且随着 Ω 的减小, 共振峰降低, 但曲线变得更加尖锐, 其位置也向 c_2 增大的方向移动; Ω 值越大, 共振现象减弱, 并最终消失, 直至 SNR 随 c_2 单调减小. 第一模自饱和系数 c_1 和噪声关联时间 τ_3 对 SNR- c_2 曲线的影响如

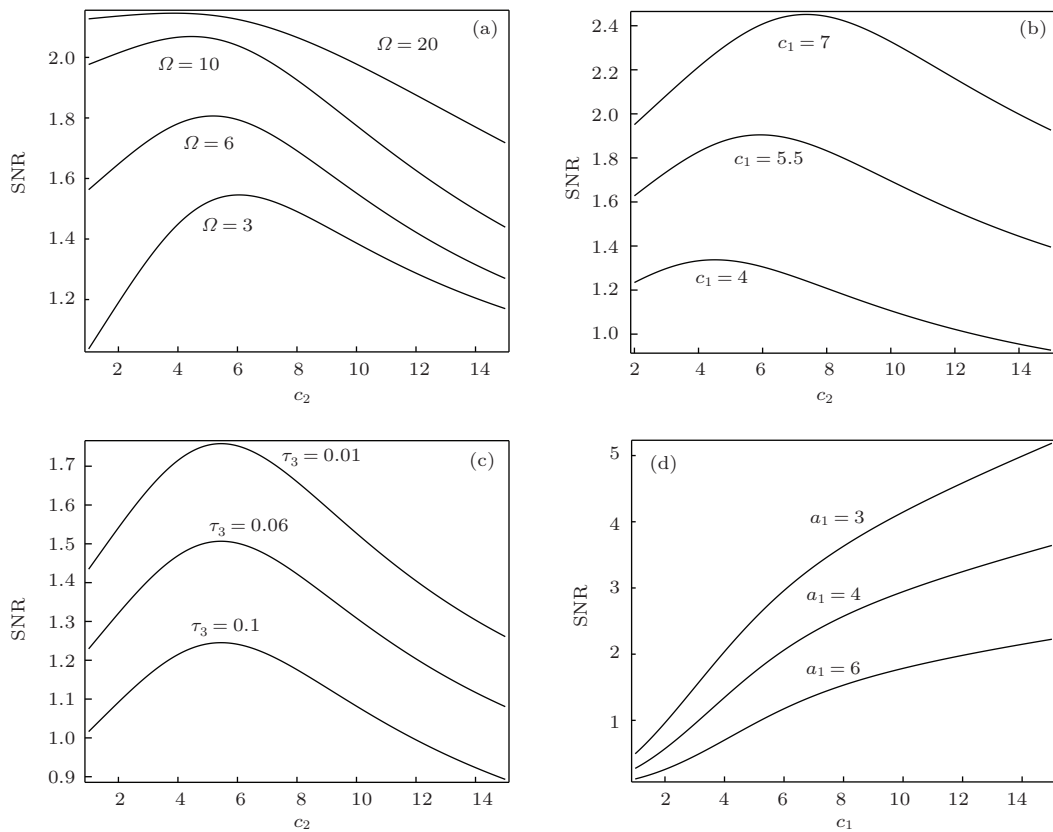


图 2 信噪比 SNR 随自饱和系数的变化 ($B = 1, b = 2, \lambda = -0.7, \tau_1 = 0.01, \tau_2 = 0.01, Q = 0.5, D = 0.5$) (a) $a_1 = 4, c_1 = 5, \tau_3 = 0.02$; (b) $\Omega = 5, a_1 = 4, \tau_3 = 0.02$; (c) $a_1 = 4, \Omega = 5, c_1 = 5$; (d) $c_2 = 5, \Omega = 5, \tau_3 = 0.02$

3.3 信噪比随交叉耦合系数 b 的变化

当选取不同的系统参数和输入信号频率时, 信噪比随交叉耦合系数 b 的变化如图 3 所示, 可以看出, SNR- b 变化曲线上能否出现共振峰与系统参数有关. 只有当外部输入信号频率 Ω 较小、系统净增益系数 a_1 取值较大、而自饱和系数满足一定条件时, 才会出现随机共振.

从图 3(a) 可以看到: Ω 越大, 信噪比的值越大,

图 2(b) 和 (c) 表示. 随 c_1 的增大, SNR 也增大, 共振峰值越高, 其位置向各移动; 随着 τ_3 的增大, 曲线的峰值却降低, 但其位置不变.

当净增益系数分别取 $a_1 = 3, 4, 6$ 时, SNR 随第一模自饱和系数 c_1 变化曲线如图 2(d) 所示. 可以看出: 信噪比随 c_1 的变化是单调增大的, 并没有出现随机共振现象, 且 a_1 越大, 系统的信噪比越小.

以上说明了第二模的激光传输能增强第一模的输出信号能量, 从而激励输出信号产生随机共振现象. 该激励作用使低频信号更容易产生共振, 而第一模的自饱和及两噪声互关联的有色性都会抑制由 c_2 引起的随机共振.

共振峰值高, 峰的位置向右移动, 曲线更加平缓, 共振现象不断减弱, 而当 Ω 增大到某一值时, SNR 随 b 单调增大, 共振现象消失; a_1 对 SNR- b 曲线的影响则与之相反, 只有当 a_1 大于某一值时, 才会出现随机共振现象, 且随着 a_1 的增大, 曲线更加尖锐, 共振更明显, 共振峰变低, 但其位置也不随 a_1 变化 (如图 3(b) 所示).

第一模自饱和系数 c_1 对 SNR- b 曲线的影响如

图3(c)所示,当 $c_1 > c_2$ 时,SNR随 b 的变化才出现共振峰,且随着 c_1 的增大,共振峰更高,峰的位置向 b 增大的方向移动;当 $c_1 = c_2$ 时,信噪比随 b 线性减小;当 $c_1 < c_2$ 时,信噪比随 b 单调增大.

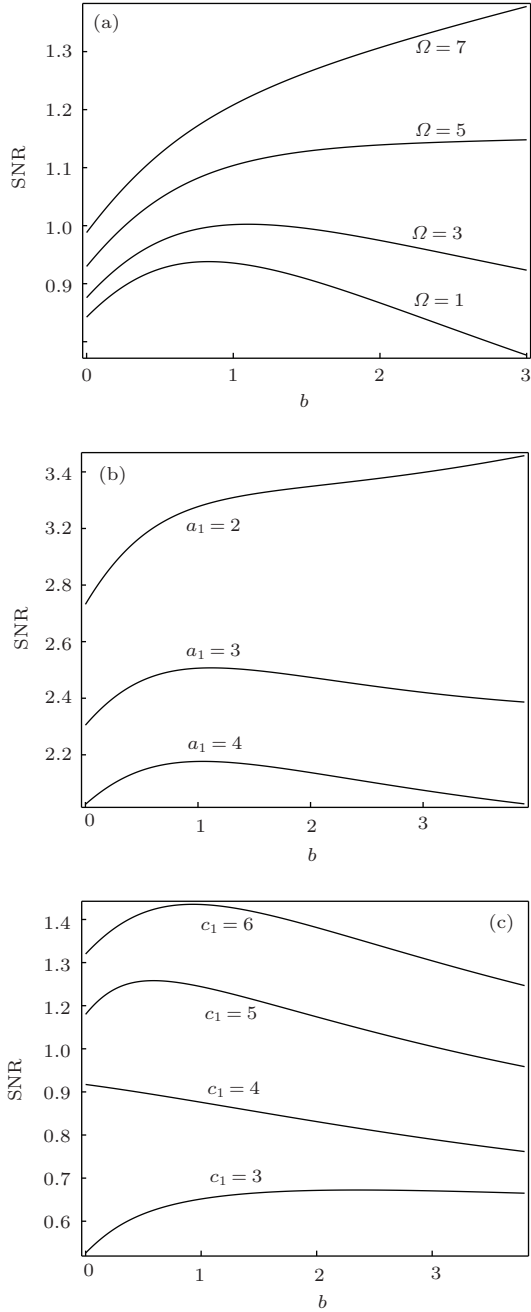


图3 信噪比SNR随交叉耦合系数 b 的变化($B = 1, c_2 = 4, \lambda = -0.7, \tau_1 = 0.02, \tau_2 = 0.01, \tau_3 = 0.02, Q = 0.5, D = 0.5$) (a) $a_1 = 4, c_1 = 5$; (b) $\Omega = 3, c_1 = 5$; (c) $\Omega = 3, a_1 = 4$

在以上讨论中,参数 a_1, c_1 和 b 决定了两模的定态光强,这意味着由两模交叉耦合程度激发产生的随机共振由输入信号频率和两模的激光光强协

同实现的.当输入频率一定时,两模的定态光强能使自饱和参数较大的模的输出信号能量达到最大值,信噪比最大.

3.4 信噪比随输入信号频率 Ω 的变化

从前面的分析可以发现:当输入信号频率越低,系统输出更容易产生随机共振现象.因此,我们作出了信噪比随信号频率 Ω 的变化曲线(如图4所示).可以看出:当噪声关联时间 τ_3 和噪声强度 D 都较大时,SNR- Ω 曲线会出现共振.且随着 τ_3 的增大,信噪比降低,其位置向 $\Omega = 0$ 的方向移动,曲线变得更加尖锐,共振更明显.而 τ_3 取值较小时,信噪比随 Ω 单调增加.而抽运噪声强度 D 对SNR- Ω 曲线的影响主要表现在:噪声强度越大,信噪比越低,并出现共振峰,位置不随 D 的变化而变化.

由以上讨论可知:由外部输入信号频率激发产生的随机共振主要是由两噪声关联的色性和噪声强度所决定的.只有当两噪声互关联色性较强、强度足够大时,外部输入信号才能使部分噪声能量转移至信号能量,减小噪声输出,增大信噪比,形成随机共振.

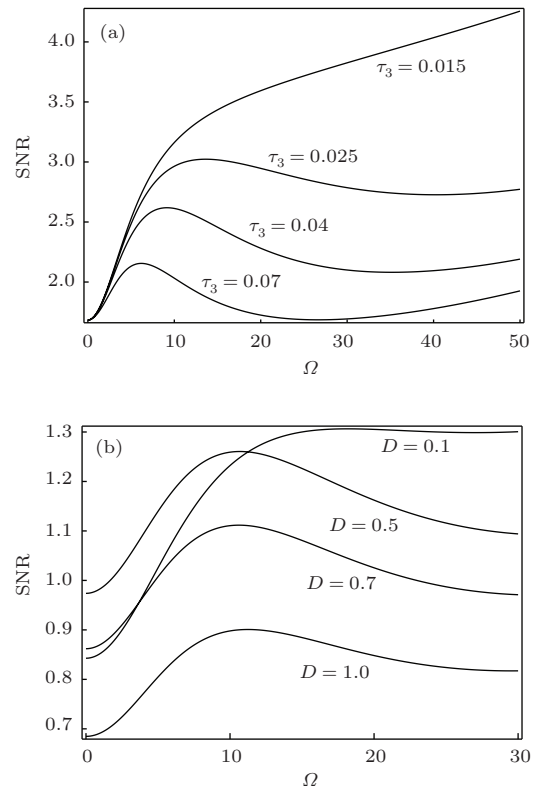


图4 信噪比SNR随输入信号频率 Ω 的变化($B = 1, c_2 = 4, \lambda = -0.7, \tau_1 = 0.02, \tau_2 = 0.01, c_1 = 5, b = 2, Q = 0.5, a_1 = 3$) (a) $D = 0.5$; (b) $\tau_3 = 0.02$

4 结 论

通过以上对关联色噪声作用下双模激光系统增益模型第一模输出光强的信噪比 SNR 随参数变化的讨论, 结果发现了一些新的随机共振现象:

1) 在噪声关联程度 $\lambda < 0$ 、且关联时间 τ_3 较小时, 信噪比随噪声强度的变化出现了传统的随机共振现象, 噪声关联时间、净增益系数对随机共振现象都有明显的影响;

2) 在外部输入信号频率 Ω 较小时, 第二模的自饱和系数 c_2 也能激发产生随机共振现象, 但当 Ω 较大时, SNR 随 c_2 单调减小, 随机共振消失;

3) 当信号频率 Ω 和 a_1 都取值较小, 两模的交叉耦合程度也能激发自饱和系数较大的模的输出信号信噪比产生随机共振;

4) 在抽运噪声强度 D 较大、两噪声互关联时间比较长时, 信噪比随信号频率 Ω 的变化也出现随机共振现象.

总之, 双模激光系统的两模激光传输、相互耦合程度、输入周期信号和色关联噪声等多方协同作用, 能使系统的输出形成随机共振现象. 如适当地调整系统和输入信号的参数, 可以增强输出信号信噪比的值, 以减小噪声对信号的影响, 增大系统输出的稳定性.

参考文献

- [1] Gammaitoni L, Hanggi P, Jung P, Marchesoni F 1998 *Rev. Mod. Phys.* **70** 223
- [2] Wellens T, Shatokhin V, Buchleitner A 2004 *Rep. Prog. Phys.* **67** 45
- [3] Zhang L Y, Cao L, Wu D J, Wang J 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 25
- [4] Wang Z Y, Chen P J, Wang D X, Zhang L Y 2013 *J. Astrophys. Astr.* **34** 33
- [5] Wei T, Zhang L, Luo M K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 120504 (in Chinese) [蔚涛, 张路, 罗懋康 2013 物理学报 **62** 120504]
- [6] Cao L, Wu D J 2003 *Europhys. Lett.* **61** 593
- [7] Zhang L Y, Jin G X, Cao L, Wang Z Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 120502
- [8] Zhang L Y, Cao L, Zhu F H 2006 *Chin. Opt. Lett.* **4** 30
- [9] Wang Z Y, Chen P J, Zhang LY 2011 *Z. Naturforsch. A* **66a** 411
- [10] Wang Z Y, Chen P J, Zhang LY 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 099801
- [11] Chen L M, Cao L, Fu H X, Qiu J L 1999 *Chin. J. Lasers* **26** 351 (in Chinese) [陈黎梅, 曹力, 傅海翔, 丘军林 1999 中国激光 **26** 351]
- [12] Chen L M, Cao L, Qiu J L 1998 *Acta. Opt. Sin.* **18** 391 (in Chinese) [陈黎梅, 曹力, 丘军林 1998 光学学报 **18** 391]
- [13] Zhu S Q 1992 *Phys. Re. A* **45** 8148
- [14] Zhu S Q 1994 *Phys. Re. A* **50** 1710
- [15] Luo X Q, Zhu S Q, Gao W J 2001 *Chin. Phys.* **10** 1011
- [16] Ye Q, Li J X, Yang M, Cao L 2010 *Commun. Theort. Phys.* **54** 875
- [17] Zhang L Y, Jin G X, Wang Z Y, Cao L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 024203 (in Chinese) [张良英, 金国祥, 汪志云, 曹力 2014 物理学报 **63** 024203]
- [18] Cao L, Wu D J 1994 *Phys. Lett. A* **185** 59
- [19] Zhang L Y, Cao L, Wu D J 2009 *Commun. Theort. Phys.* **52** 143
- [20] Zhou X J, Cao L, Wu D J 1999 *Acta Opt. Sin.* **19** 7 (in Chinese) [周小计, 曹力, 吴大进 1999 光学学报 **19** 7]
- [21] Chen D Y, Wang Z L 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 119 (in Chinese) [陈德彝, 王忠龙 2009 中国激光 **36** 119]
- [22] Lin M, Zhang M L, Huang Y M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 080509 (in Chinese) [林敏, 张美丽, 黄咏梅 2011 物理学报 **60** 080509]

Stochastic resonance in a two-mode laser system driven by colored cross-correlation noises*

Wang Zhi-Yun[†] Chen Pei-Jie Zhang Liang-Ying

(School of Physics and Electronic Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China)

(Received 6 March 2014; revised manuscript received 6 May 2014)

Abstract

Considering a gain-noise model for two-mode laser system driven by a periodic signal and two-color cross-correlation noises, we calculate the power spectrum and signal-to-noise ratio (SNR) of an output signal by means of linear approximation method, and discuss the influence of the system coefficients on SNR. Results show that under a certain condition satisfied by the coefficients of the system and input signals, the stochastic resonance phenomenon may be detected in the evolution of SNR, and also at certain intensities of noise, saturation coefficient c_2 , cross coupling coefficient b , and input signal frequency Ω .

Keywords: color noise, two-mode laser, signal-to-noise rate, stochastic resonance

PACS: 42.60.Mi, 05.40.-a

DOI: [10.7498/aps.63.194204](https://doi.org/10.7498/aps.63.194204)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11045004), and the Key Project of the Educational Office of Hubei Province, China (Grant No. D20132603).

[†] Corresponding author. E-mail: wzy425@126.com