

·光电系统·

单模激光系统中的时间延迟反馈控制

顾晓辉

(苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215006)

摘要:提出了利用时间延迟反馈控制的方法来抑制单模激光系统的涨落。通过小时间延迟近似,导出了单模激光场的定态几率分布函数的解析表达式,计算了激光强度的平均值、归一化方差和偏度系数。结果发现,时间延迟反馈控制能很好的抑制激光系统的涨落。同时利用 Matlab 进行了相应的数值计算模拟。结果显示,数值模拟的结论与解析解符合得很好。

关键词:时间延迟反馈;单模激光;稳态概率密度分布函数

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-06-0005-04

Time-delayed Feedback Control in Single-mode Laser System

GU Xiao-hui

(School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: A control mechanism of time-delayed feedback is designed to suppress the fluctuation of a single-mode laser. Using the small time delay approximation, the analytic expression of the stationary probability distribution function of the single-mode laser field is obtained. The mean, normalized variance and skewness of the steady-state laser intensity are calculated. It is found that the time-delayed feedback control can suppress the intensity fluctuation of the laser system. Matlab is used to perform numerical simulation and the results accord with the approximate analytic results.

Key words: time-delayed feedback; single-mode laser; stationary probability distribution function

近些年来,无论是理论分析还是实验测量,单模激光系统的统计特性都呈现出较大的随机涨落波动。一般来说,由于系统内部和外界环境的影响,系统在运行过程中都存在着一定的涨落,因此,系统的宏观变量在演化的过程中都伴随着微观作用的影响。激光系统的涨落一般认为是由于系统的自发辐射和外部随机力的干扰引起的。由于激光系统的随机波动限制了激光在众多领域实际应用能力,因此,如何抑制激光系统的涨落成为了迫在眉睫的重要研究方向。近来,时间延迟反馈机制在混沌和噪声系统等随机动态系统中得到了较为深入的研究。如何利用延时系统的特点来抑制激光系统的涨落成为了研究的重点。文中提出了

延迟反馈控制法,将单模激光系统的输出信号经光电探测器接收,经 A/D 转换器进入缓冲器,选择合适的缓冲器得到延时反馈信号,经 D/A 转换器后加载在非线性介质上,这样使原来较为不稳定的激光系统变得稳定,有效提高了单模激光系统的实际应用能力。

1 理论分析

单模激光三阶理论满足朗之万方程如下

$$\frac{dE}{dt} = a_0 E - A|E|^2 E + E\tilde{\Gamma}(t) + \tilde{\eta}(t) \quad (1)$$

式中, E 表示复电场; a_0 和 A 分别表示增益和自饱和系数。随机复变量 $\tilde{\Gamma}(t)$ 和 $\tilde{\eta}(t)$ 分别代表泵浦和量

子噪声,且满足下式

$$\begin{aligned}\langle \tilde{\Gamma}_i(t) \rangle &= \langle \tilde{\eta}_i(t) \rangle = 0 \\ \langle \tilde{\Gamma}_i(t) \tilde{\Gamma}_j(t') \rangle &= \delta_{ij} 2P' \delta(t-t') \\ \langle \tilde{\eta}_i(t) \tilde{\eta}_j(t') \rangle &= \delta_{ij} 2P \delta(t-t')\end{aligned}\quad (2)$$

其中,下标表示复变量的实部和虚部($i, j=1, 2$); P' 和 P 分别为乘性和加性噪声强度。

如果只考虑激光场的强度涨落,则激光场的振幅 $x = |E|$ 满足下式

$$\frac{dx(t)}{dt} = a_0 x(t) - Ax^3(t) + \frac{P}{x(t)} + x(t)\Gamma(t) + \eta(t) \quad (3)$$

式中, $\Gamma(t)$ 和 $\eta(t)$ 为复变量的实部; P 为方程(2)中的加性噪声的强度。方程(3)所表示的激光系统存在一定的强度涨落,为了抑制这种涨落,提出了时间延迟控制方法,人为地把单模激光系统输出信号的一部分先经过延迟回路,再反馈到系统中去,选择合适的缓冲器,可以将系统方程(3)变为

$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= a_0 x(t) - Ax^3(t) + \frac{P}{x(t)} + \\ &Kx(t-\tau) + x(t)\Gamma(t) + \eta(t)\end{aligned}\quad (4)$$

方程(4)中, $K > 0$ 代表控制强度, $\tau > 0$ 表示延迟控制时间,其他的量和方程(1)~方程(3)中的一样。为了运算方便,方程(4)可以等价的转化成只含有一个噪声项的随机运动方程为

$$\frac{dx(t)}{dt} = a_0 x(t) - Ax^3(t) + \frac{P}{x(t)} + Kx(t-\tau) +$$

$$\sqrt{P'x^2(t) + P} \varepsilon(t)$$

式中, $\varepsilon(t)$ 是高斯白噪声;满足 $\langle \varepsilon(t) \rangle = 0$ 和 $\langle \varepsilon(t)\varepsilon(t') \rangle = 2\delta(t-t')$ 。方程(5)是随机延迟微分方程,在无限维相空间中演化,因此精确的解析结果很难得到,需要采用一些近似方法。

利用小时间延迟近似,方程(5)变为

$$\frac{dx}{dt} = f_a(x) + g_a(x)\varepsilon(t) \quad (6)$$

其中,

$$f_a(x) = (1 - K\tau)[(a_0 + K)x - Ax^3 + \frac{P}{x}] \quad (7)$$

$$g_a(x) = (1 - K\tau)\sqrt{P'x^2 + P}$$

相应的福克-普朗克方程为

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}[B(x)Q(x,t)] + \frac{\partial^2}{\partial x^2}[D(x)Q(x,t)] \quad (8)$$

其中,

$$B(x) = (1 - K\tau)[(a_0 + K)x - Ax^3 + \frac{P}{x}] + (1 - K\tau)^2 P'x$$

$$D(x) = (1 - K\tau)^2 (P'x^2 + P) \quad (9)$$

稳态概率密度分布函数 $Q_s(x)$ 可以从方程(8)得到

$$Q_s(x) = \frac{N}{(K\tau - 1)^2} x^\alpha (P'x^2 + P)^\beta \times \exp\left[-\frac{Ax^2}{2P'(K\tau - 1)}\right] \quad (10)$$

式中, $\alpha = \frac{1}{1 - K\tau}$

$$\beta = \frac{P'(a_0 + K - 2P' + KP'\tau) + AP}{2P'^2(1 - K\tau)} \quad (11)$$

N 是归一化常数,使 $\int_0^\infty Q_s(x)dx = 1$ 满足。

激光强度 I 的 n 阶矩可以通过方程(10)和方程(11)得到

$$\langle I^n \rangle = \int_0^\infty x^{2n} Q_s(x)dx \quad (12)$$

因此,可以得到激光强度的平均值为

$$\langle I \rangle = \int_0^\infty x^2 Q_s(x)dx \quad (13)$$

归一化方差为

$$\lambda_2(0) = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (14)$$

归一化偏斜度为

$$\lambda_3(0) = \frac{\langle I^3 \rangle}{\langle I \rangle^3} - 3\lambda_2(0) - 1 \quad (15)$$

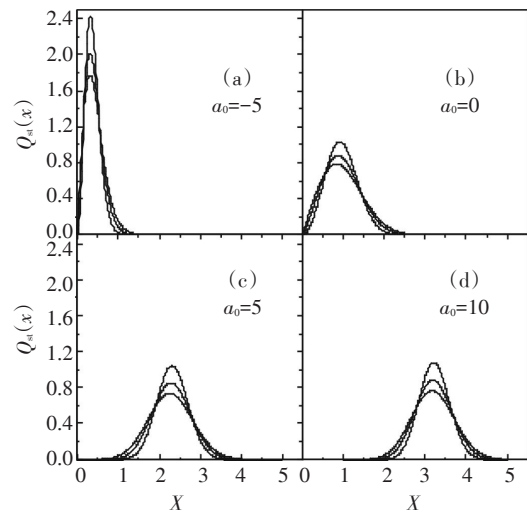


图1 当增益系数 a_0 取不同值时,稳态概率密度分布函数 $Q_s(x)$ 随时间延迟 τ 的变化
参量选取: $A = 1.0, K = 0.5, P' = P = 0.5, \tau = 0.0, 0.5, 1.0$
(从图底到图顶)

接下来将讨论时间延迟控制对激光系统强度稳态涨落的影响。

当增益系数 a_0 取不同值时,稳态概率密度分布函数 $Q_s(x)$ 随时间延迟 τ 变化的曲线图如图1所示。

由图1可以看出,当激光器运行在阈值以下,曲线有一个很窄的单峰,当激光器运行在阈值附近及以上,单峰值降低,曲线变宽。随着 τ 值的增大, $Q_s(x)$ 的曲线变得狭窄,峰值的位置向较大的 x 值方向稍微移动。

图2a和图2b分别为归一化方差 $\lambda_2(0)$ 和偏斜度 $\lambda_3(0)$ 随 a_0 变化的曲线图。可以看出, $\lambda_2(0)$ 和 $\lambda_3(0)$ 在 a_0 为某一负值时出现单峰,当延迟时间增大,方差和偏斜度明显降低。在阈值以下,曲线降低的很快,在阈值附近及以上,变化得较为缓慢。很明显,在时间延迟控制下,激光系统的强度涨落得到了抑制。

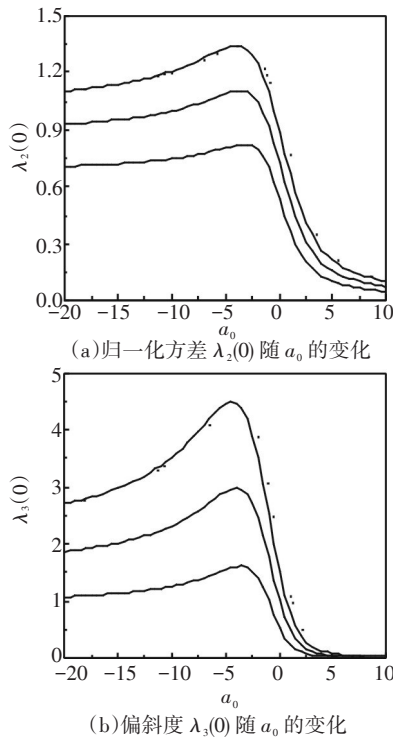


图2 归一化方差 $\lambda_2(0)$ 和偏斜度 $\lambda_3(0)$ 随 a_0 的变化
参量选取: $A=1.0, P'=P=0.5$ 。...
 $K=0, \tau=0, -K=0.5, \tau=0, 0.5, 1.0$ (从图顶到图底)

2 数值计算模拟

为了检验理论推导过程中所采用的近似方法的适用范围,有必要进行计算机的数值计算模拟。

数值模拟利用 Matlab 通过随机的延迟微分方程(4)来实现的。利用 Box-Muller 算法产生高斯白噪声,通过欧拉法可以得到时间序列的数值解。为了减少误差,进行了 1 000 次的系综平均。这样,就得到系统的稳态概率密度分布,归一化方差和偏斜度的数值解。画出了稳态概率密度分布函数 $Q_s(x)$ 的数值模拟结果,如图3所示。可以看出,在 τ 比较小时,如 $\tau < 0.5$,近似的解析结果与数值模拟吻合得很好。当 τ 较大时,如 $\tau = 1.0$,两者之间有一定的误差。因此,当 τ 不是很大时,上述的近似方法是适用的。

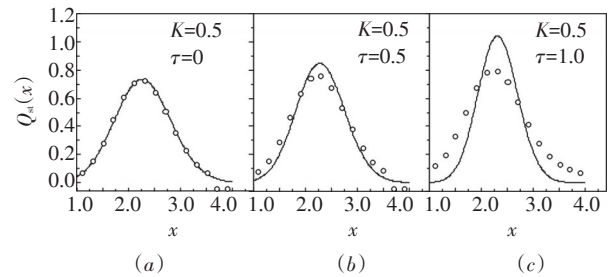


图3 稳态概率密度分布函数 $Q_s(x)$ 的数值模拟结果
参量选取: $a_0=5.0, A=1.0, K=0.5, P'=P=0.5$

3 结论

提出了利用时间延迟反馈控制的方法来抑制单模激光系统的涨落,讨论了单模激光系统在时间延迟控制下的稳态行为。利用小时间延迟近似,得到了系统近似的稳态概率密度分布函数,归一化方差和偏斜度的解析结果。同时发现,在时间延迟控制下,当激光器运行在阈值以下,其强度涨落降低的很快,当在阈值附近及以上,降低的较为缓慢但仍然明显。进行了计算机数值模拟,发现当延迟时间不是很大时,近似的理论方法与数值模拟的结果吻合的很好。因此,利用时间延迟反馈控制的方法能够有效的抑制单模激光系统的强度涨落,从而可以较大的拓宽激光系统的实际应用范围和能力。

参考文献

[1] Zhu S. Effects of multiplicative white and colored noise in dye-laser theory[J]. Phys. Rev. A, 1990, 41:1689-1694.
[2] Guillouzic S, L'Heureux I, Longtin A. Rate processes in a delayed, stochastically driven, and overdamped system[J]. Phys. Rev. E, 2000, 61: 4906-4914.

- [3] Jia Y, Zheng X, Hu X, et al. Effects of colored noise on stochastic resonance in a bistable system subject to multiplicative and additive noise[J]. Phys. Rev. E, 2001,63:031107.
- [4] LUO Xiao-qin, ZHU Shi-qun. Stochastic resonance driven by two different kinds of colored noise in a bistable system [J]. Phys. Rev. E, 2003,67:021104.
- [5] Jirsa V K, Ding M. Will a large complex system with time delays be stable?[J]. Phys. Rev. Lett., 2004,93:070602.
- [6] Hasegawa H. Augmented moment method for stochastic ensembles with delayed couplings I Langevin model[J]. Phys. Rev. E, 2004, 70:021911.
- [7] Frank T D. Analytical results for fundamental time-delayed feedback systems subjected to multiplicative noise[J]. Phys. Rev. E, 2004, 69:061104.
- [8] Won-Ho Kye, Muhan Choi, Chil-Min Kim, et al. Encryption with synchronized time- delayed systems[J]. Phys. Rev. E, 2005,71:045202.
- [9] Lindner Benjamin, Doiron Brent, Longtin A. Theory of oscillatory firing induced by spatially correlated noise and delayed inhibitory feedback[J]. Phys. Rev. E, 2005,72: 061919.
- [10] Gerardo J Escalera Santos, Escalona J, Parmananda P. Regulating noise-induced spiking using feedback[J]. Phys. Rev. E, 2006, 73:042102.
- [11] 王忠龙,石亚非. 单模激光的噪声关联时间效应[J]. 中国激光, 2000(11):1019-1024.
- [12] 张莉,元秀华. 量子噪声和非线性色抽运噪声共同驱动下单模激光的锁相[J]. 中国激光, 2012(7):0702005(1-4).

(上接第4页)

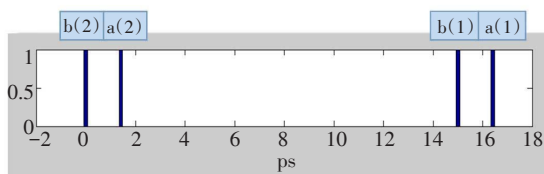


图9 图像出来的先后在坐标上的表示

3 结论

文中对线性啁啾技术与偏振技术相结合方案原理进行了分析,并且搭建了实际的平台,实现了四分幅方案,验证了波分分幅和偏振分幅的可能性,达到了空间分辨率为 60 lp/mm,波长分幅的时间分辨率低于 1.5 ps,偏振分幅的时间分辨为 15 ps。由于分幅数由滤波系统的数量决定,本次实验使用两个滤波系统,实现了四分幅,因此可以通过增加滤波系统来实现更多分幅,达到更高的时间分辨率。

参考文献

- [1] 黄翼翔,江少恩,李文洪,等. X光条纹相机时间性能标定[J]. 强激光与粒子束, 2006(5).
- [2] 袁永腾,郝轶聃,赵宗清,等. 空间电荷效应对X射线条纹相机动态范围影响的研究[J]. 物理学报, 2010(10).
- [3] 潘京生,亓鲁,肖洪亮,等. 微通道板的饱和效应对条纹相机动态范围的影响分析[J]. 物理学报, 2012(19).
- [4] Walden R H. Analog-to-digital converter survey and analysis[J]. IEEE J Sel Areas Comm, 1999, 17:539-550.
- [5] Kane DJ, Trebino R. Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency resolved optical grating[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1993, 29:571-579.
- [6] Iaconis C, Walmsley IA. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. Opt. Lett, 1998, 23: 792-794.
- [7] Itatani J, Quéré F, Yudin G L. Attosecond streak camera [J]. Appl Phys Lett, 2002(88).
- [8] 林金谷,刘承惠,朱振和,等. 用非共线二次谐波法实现对锁模激光器超短脉冲宽度的测定[J]. 物理学报, 1980(3).
- [9] Kane D J, Trebino R. Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency resolved optical grating[J]. IEEE J Quant Electron, 1993, 29:571-579.
- [10] Iaconis C, Walmsley I A. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. Opt Lett, 1998, 23:792-794.
- [11] 王超,田进寿,康轶凡,等. 时间分辨条纹相机技术的发展及相关研究展望[J]. 真空科学与技术学报, 2012(7).
- [12] Baker K L, Stewart R E. Solid-state framing camera with multiple time frames[J]. Appl Phys Lett, 2013, 103.
- [13] 梁玲亮,田进寿,汪韬,等. 全光固体条纹相机的理论及其静态实验研究[J]. 物理学报, 2014(63).