

一种基于经典遗传算法的自适应随机共振系统

吴利平 李 赞 李建东 陈 晨

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

摘 要 针对实际工程中微弱信号的检测要求,根据双稳态随机共振系统原理和信号、噪声和非线性系统之间的关系,设计了一种基于经典遗传算法的自适应随机共振系统。该系统利用以输出信噪比为目标函数和对系统参数进行联合编码的遗传算法获取双稳态随机共振系统的最佳参数,再根据所得系统参数对接收信号进行最优随机共振处理。仿真结果表明,在低信噪比情况下,系统能始终保持最佳随机共振状态,快速地实现输出信噪比最大化和处理增益达到 15~20dB,从而保证低信噪比条件下微弱信号的有效检测和处理。

关键词 自适应随机共振,经典遗传算法,微弱信号检测

中图分类号 TP273 **文献标识码** A

Adaptive Stochastic Resonance System Based on Standard Genetic Algorithm

WU Li-ping LI Zan LI Jian-dong CHEN Chen

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract According to the demand of weak signal detection in actual engineering, an adaptive stochastic resonance system was designed utilizing standard genetic algorithm(SGA) based on the principle of bistable resonance systems and relationships among signal, noise and the nonlinear system. Through genetic algorithm using output signal-to-noise-ratio (SNR) as objective function and binary joint coding of system parameters, the optimal parameters of bistable stochastic resonance were identified. Then, received signal was proceeded by making use of optimal stochastic resonance parameters. Simulation results show that the adaptive system designed can always maintain in an optimal state of stochastic resonance to achieve the maximum output SNR and processing gain to 15~20dB quickly. Therefore it ensures effective detection and processing of weak signal in low SNR.

Keywords Adaptive stochastic resonance, Standard genetic algorithm, Weak signal detection

1 引言

随机共振(Stochastic Resonance)最初是在 1981 年由 R. Benzi 等人研究古气象冰川问题时提出的^[1],它描述的是当系统的非线性与输入的信号和噪声之间存在某种匹配时,输出信号的信噪比不仅不会降低,反而会大幅度地增加,从而出现了随机力和信号之间的协作效应。微弱信号检测技术是运用电子学、信息论和物理学方法,研究被测信号和噪声的统计特性及其差别,采用一系列信号处理方法,检测被噪声淹没的微弱有用信号。近年来,随机共振开始应用于微弱信号检测与处理领域^[2,3]。通过调节作用于双稳态随机共振系统的噪声强度或系统参数,都可使系统达到最佳随机共振状态,即输出信噪比达到极大值。针对实际工程中信号和噪声都未知的情况,调节系统参数的方法显然是最为合适的,这就是自适应随机共振设计的基本思想。基本的自适应算法^[4]有最小均方法(LMS)、序贯回归法(SER)、递推最小二乘法(RLS)、随机搜

索法、直接矩阵求逆法(DMI)。其中随机搜索法能够有效解决实际信号和噪声未知的问题,而随机搜索法主要包括线性随机搜索法(LRS)和遗传优化算法(GA)两类。线性随机搜索(LRS)算法^[5]是在权空间内随机地选择游动方向,从而观察性能的变化,确定权值的迭代算法,其存在漏检现象、估计精度低和计算复杂度高的缺陷。

遗传算法(Genetic Algorithm)是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程,通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法^[6]。它是一种群体型操作,该操作以群体中的所有个体为对象,包括选择、交叉、变异等主要操作算子^[7]。遗传算法是一类可用于复杂系统优化的具有鲁棒性的搜索算法,与传统的优化算法相比,它的主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息交换,搜索不依赖于梯度信息。

本文针对实际工程中信号和噪声未知情况,根据双稳态随机共振系统和遗传算法原理,分析系统性能与系统参数的关系,为保证随机共振系统中对接收信号的最优随机共振处

到稿日期:2010-12-23 返修日期:2011-03-24 本文受国家“新一代宽带无线移动通信网”科技重大专项(2010ZX03006-002-04),国家自然科学基金(61072070),新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0653),高等学校学科创新引智计划(B08038),长江学者和创新团队发展计划(IRT0852)资助。

吴利平(1984—),男,博士生,主要研究方向为微弱信号检测、随机共振,E-mail:wuliping1@163.com;李 赞(1975—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无线通信、数字信号处理、流星余迹通信。

理,将设计出一种基于经典遗传算法的自适应随机共振系统。

2 基于经典遗传算法的自适应随机共振系统

本文所设计的基于经典遗传算法的自适应随机共振系统的结构框图如图1所示(虚线框表示的是非线性双稳态随机共振系统的处理流程)。所设计系统首先通过以系统输出信噪比为目标函数和对参数二进制联合编码的遗传算法确定最佳系统参数 a 和 b ,然后利用 a 、 b 对接收信号进行随机共振处理,最后进行滤波和信号恢复。

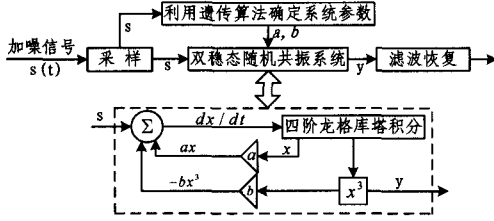


图1 基于经典遗传算法的自适应随机共振系统框图

衡量随机共振系统处理性能有信噪比、频谱功率放大系数、互相关系数、互信息量、信道容量和Fisher信息量等。在本文中选取输出信噪比作为遗传算法的适应度函数,即当系统处于最佳随机共振状态时,输出信噪比会达到最大值,这就是设计自适应随机共振系统的理论依据。

为便于性能分析,本文选取单频信号作为信号源,其表达式为 $A \cos(2\pi f_0 t + \phi)$,其中, f_0 为信号频率, A 为信号幅度, ϕ 为信号相位。经过高斯白噪声信道后,接收到的加噪信号为:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \phi) + n(t) \quad (1)$$

式中, $n(t)$ 是噪声强度 D 为高斯白噪声,且满足 $n(t)n(t') = 2D\delta(t-t')$,则加噪信号 $s(t)$ 的功率谱表达式为:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

式中, $R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t-\tau)dt$ 为加噪信号的自相关函数。根据文献[3]的研究,随机共振系统的状态可以通过输出信噪比来衡量。信噪比表达式为:

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{S}{N} = 10 \lg \frac{P(f_0)}{N(f_0)} \quad (3)$$

式中, $P(f_0) = |S(f_0)|^2$ 为系统在输入信号频率 f_0 处的输出功率谱 $S(f_0)$ 的幅值,背景噪声谱 $N(f_0)$ 是 $|S(f)|^2$ 在频率 f_0 附近频段内的平均值。

2.1 双稳态随机共振系统模型及求解算法

非线性双稳态系统是典型的随机共振系统,其实质是一个过阻尼布朗粒子在双稳态势阱中运动(如图2所示),同时伴有周期的驱动力和噪声。描述系统的朗之万方程如下[8]:

$$dx/dt = ax - bx^3 + A \cos(2\pi f_0 t + \phi) + n(t) \quad (4)$$

式中, $a > 0, b > 0$ 为势阱参数, $n(t)$ 是高斯白噪声。该系统势函数 $V(x) = ax^2/2 - bx^4/4$ 分别有两个势阱点 $x_m = \pm \sqrt{a/b}$ 和一个势垒点 $x_n = 0$ 。当没有信号仅加入噪声时,系统势函数呈现对称性,粒子在噪声驱动下在两个稳态间以迁移速率转换,且这一速率满足Kramers公式:

$$r_k = \frac{a}{\pi \sqrt{2}} \exp\left(-\frac{\nabla U}{2D}\right) \quad (5)$$

式中,势垒 $\nabla U = a^2/4b$ 。当同时加入信号和噪声时,即使是 $|A| < A_c$,在一定噪声协助下,也能促使粒子在两个势阱间随着输入信号变化来回切换,使信号、噪声和系统之间产生协同效应,达到放大信号和抑制噪声的效果,从而产生随机共振

现象。

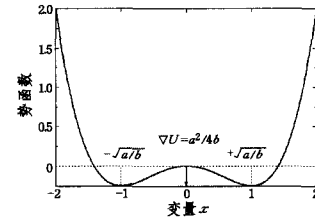


图2 非线性双稳态系统势函数($a=b=1$)

如前所述,通过调节作用于双稳态系统的噪声强度或者调节双稳态系统的系统参数 a 和 b ,都可改变Kramers迁移速率,从而使系统达到最佳随机共振状态。但由于实际工程中信号和噪声往往都是未知的,因此,调节系统参数则最为合适。在对加噪信号进行随机共振处理前,首先对加噪信号 $s(t)$ 进行采样,得到离散信号 s (采样频率通常取 $f_s = 100f_0$),然后对式(4)Langevin方程求解,才能得到系统输出信号。本文采用四阶龙格库塔算法[9]对方程进行数值求解,其具体计算过程是:

$$\begin{cases} k_1 = ay(n) - by(n)^3 + s(n) \\ k_2 = a(y(n) + k_1/2) - b(y(n) + k_1/2)^3 + s(n+1) \\ k_3 = a(y(n) + k_2/2) - b(y(n) + k_2/2)^3 + s(n+1) \\ k_4 = a(y(n) + k_3/2) - b(y(n) + k_3/2)^3 + s(n+2) \\ y(n+1) = y(n) + h/6(k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \end{cases} \quad (6)$$

式中, h 为四阶龙格库塔算法的积分步长(取 $h = 1/f_s$), s 为系统输入信号, y 为系统输出信号且初始值 $y(0) = 0$ 。

2.2 随机共振系统的最佳参数确定

在前面所述的非线性双稳态随机共振系统中,非线性系统、信号和噪声共同产生协同效应时,非线性系统呈现的方式是系统势垒 $\nabla U = a^2/4b$ 。势垒越高,意味着产生协同效应时要求信号和噪声的能量越大;反之,要求信号和噪声的能量就越小。因此变化系统参数 a 和 b ,能够控制系统势垒值,从而达到控制系统随机共振状态的目的。本文利用遗传算法确定最佳系统参数,从而使系统的输出信噪比达到最大值,其基本流程如图3所示。

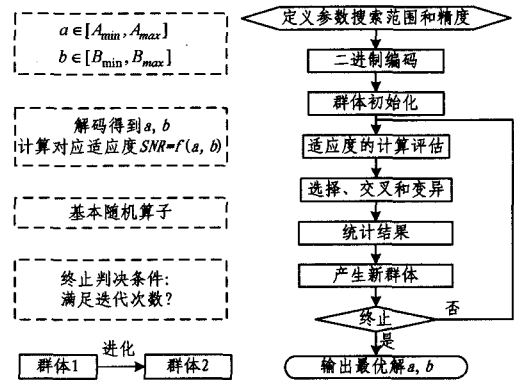


图3 基于经典遗传算法确定系统参数的流程图

具体步骤为:

步骤1(编码) 设定系统参数搜索范围和精度后对其进行二进制联合编码,如 $a \in [A_{\min}, A_{\max}]$, $b \in [B_{\min}, B_{\max}]$,精度为 δ ,则可以根据下式确定参数对应的编码长度 l 和 k :

$$\begin{cases} 2^l - 1 = (A_{\max} - A_{\min})/\delta \\ 2^k - 1 = (B_{\max} - B_{\min})/\delta \end{cases} \quad (7)$$

并进行二进制编码,得到个体对应的码字 $c_1 c_2 \dots c_{l-1} c_l \dots c_{k-1} c_k \dots c_{l+k-1} c_{l+k}$;

步骤 2(初始化) 设定种群规模,随机选取个体,组成初始群体;

步骤 3(解码) 对群体中的个体进行解码,设某个体的编码为: $c_1 c_{l-1} c_{l-2} \cdots c_l d_k d_{k-1} d_{k-2} \cdots d_1$, 根据解码公式得到其对应的系统参数为:

$$\begin{cases} a = A_{\min} + (\sum_{i=1}^l c_i 2^{i-1}) \frac{A_{\max} - A_{\min}}{2^l - 1} \\ b = B_{\min} + (\sum_{j=1}^k d_j 2^{j-1}) \frac{B_{\max} - B_{\min}}{2^k - 1} \end{cases} \quad (8)$$

步骤 4(适应度评估) 在此将系统输出信噪比作为遗传算法的适应度函数,即 $SNR=f(a,b)$ 。因此将步骤 4 中的个体对应参数带入随机共振系统,用四阶龙格库塔算法求解出系统输出信号并计算其功率谱,根据信号频率和功率谱可求得个体的适应度值;

步骤 5(选择、交叉和变异) 根据得到的各个体适应度值按赌盘规则选择优良个体,并以一定概率进行交叉、变异和倒位产生新个体,从而组成新一代群体;

步骤 6(终止) 重复步骤 3 至步骤 5,直至满足设定的迭代次数时终止循环,输出当前最优解,即得到最佳系统参数。

综上所述,基于遗传算法的自适应随机共振系统是利用具有鲁棒性的遗传算法自适应调整系统参数,使系统输出信噪比最大化,在实际工程应用中能使随机共振系统始终处于最佳共振状态,从而实现信号的有效检测和处理。

3 系统仿真与性能分析

根据式(4)可得到双稳态随机共振系统模型,利用四阶龙格库塔法对方程求解。在仿真中选取信号源 $A \cos(2\pi f_0 t + \phi)$ 参数分别为:信号幅度 $A=0.37$,频率 $f_0=0.1\text{Hz}$,初始相位 $\phi=0\text{rad}$ 。

3.1 恒参随机共振系统性能仿真

当随机共振系统参数 $a=b=1$ 、噪声强度 $D=8$ 时,恒参双稳态随机共振系统输入、输出信号的时域波形和频谱如图 4(a)、4(b)所示。

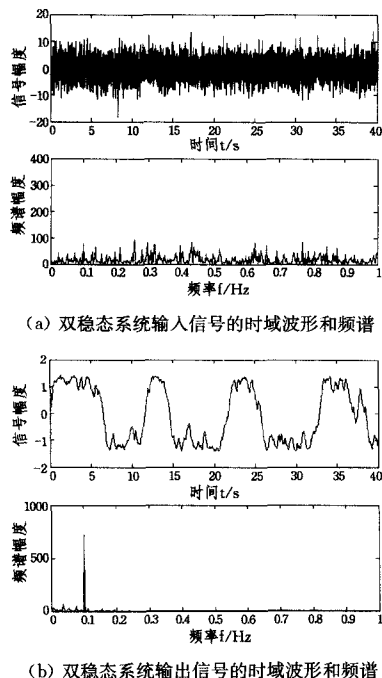


图 4

由图可见,在时域波形和频谱都难以辨识出信号的情况下,经过随机共振处理后,从系统输出信号的时域波形和频谱能清晰辨别出周期信号的存在。通过信噪比估计式(3)计算,可得 $SNR_{in}=-21.33\text{dB}$, $SNR_{out}=-7.1\text{dB}$,处理增益 $G=14.23\text{dB}$ 。另外,在输出信号频谱中出现大量的低频信号,验证了经过随机共振处理噪声能量向低频转移的结论。

针对实际工程中噪声强度不断改变的情况,对不同噪声强度情况下恒参系统性能进行了仿真。恒参双稳态随机共振系统输入、输出信噪比性能曲线如图 5 所示。

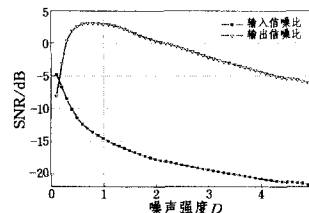


图 5 双稳态随机共振系统输入输出信噪比性能曲线

如图 5 所示,双稳态随机共振系统输入信噪比随着噪声强度 D 的增大而降低,而输出信噪比则随着 D 的增大先是逐渐增大, $D=1$ 附近时,达到最大值,然后逐渐下降。这就是非线性系统、信号和噪声共同产生协同效应时出现的随机共振现象。特别是在低信噪比条件下,恒参随机共振系统的处理增益达到 $10\sim 15\text{dB}$,因此将随机共振用于微弱信号的检测与处理有重要意义。

3.2 遗传算法系统参数仿真

基于经典遗传算法的自适应随机共振系统是根据输出信噪比自适应调节双稳态系统参数(a 和 b),以达到最佳随机共振状态。参数调节方式有 3 种:一是固定 a 调节 b ;二是固定 b 调节 a ;三是同时调节 a 和 b 。下面利用 Matlab 遗传算法工具箱(Gaot)对这 3 种自适应方式进行仿真。仿真实验中,遗传算法的参数设置如表 1 所列。

表 1 遗传算法参数表

参数	种群规模	迭代次数	交叉概率	变异概率
数值	100	50	0.8	0.1
参数	倒位概率	编码类型	求解精度	取值范围
数值	0.2	二进制	10^{-4}	$0 < a < 10, 0 < b < 4$

前两种参数调节方式分别选取系统参数 $a=1$ 或 $b=1$,利用遗传算法自适应调节另一参数,以得到最佳输出信噪比。在不同噪声强度下,采用前两种参数调节方式确定的最佳参数随噪声强度的变化曲线如图 6(a)所示,本文所设计系统的最佳参数曲线如图 6(b)所示。

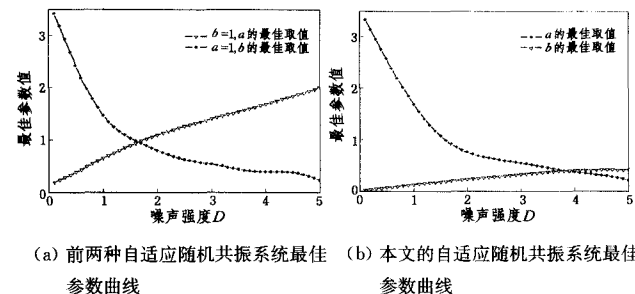


图 6

由图 6(a)、6(b)可知,当 $a=1$ 时,为使系统输出信噪比达到最大, b 的最佳取值随着噪声强度 D 的增加而逐渐非线

性减小;而在 $b=1$ 时, a 的最佳取值随着噪声强度 D 的增加而逐渐线性增大。这与系统势垒 $\nabla U=a^2/4b$ 和变量 a 、 b 变化情况相符。在本文所设计的系统中,最佳参数变化情况与采取前两种方式的系统基本保持一致,但参数 a 的变化幅度很小。由此可见,在本文所设计的自适应随机共振系统中,当噪声变化时,是通过大幅度调节 b 和微调 a 的方式来保持系统的最佳随机共振状态。

3.3 自适应随机共振系统性能仿真

将3种自适应随机共振系统的输出信噪比性能与前面的恒参系统进行比较,如图7所示。

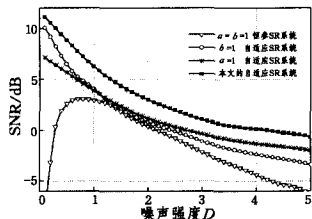


图7 自适应随机共振系统和恒参随机共振系统的性能比较

由图7和前面所述可得:

1)无论是固定 a 还是 b ,自适应随机共振系统的输出信噪比都优于恒参随机共振系统。另外,在 $D=1.2$ 处,3条曲线有一个交汇点,此时系统参数 a 和 b 最佳取值都为1,因此系统输出信噪比相等。

2)将固定 a 、调节 b 的自适应系统与固定 b 、调整 a 系统进行比较,在噪声强度度较小的情况下($D \leq 1$),固定 b 系统性能略优于固定 a 系统;但在噪声强度较大的情况下($D > 1.2$),后者性能优于前者。因此,若能采用两者结合的方式将能够使系统性能更佳。

3)本文所设计的自适应随机共振系统采用的是第3种参数自适应调节方式,即根据输出信噪比同时调整系统参数 a 和 b ,以达到最佳随机共振状态,采用对系统参数 a 和 b 联合编码并进行遗传算子操作。与前两种自适应系统(固定)相比,在不增加计算复杂度条件下,系统系统性能明显优于前两种自适应系统,抗噪声性能提高了3~5dB;而与恒参随机共

振系统相比,系统抗噪声性能提高了5~10dB。

4)比较本文所设计的自适应随机共振系统的输出信噪比和系统输入信噪比性能可见,所设计系统的处理增益达到15~20dB。

结束语 本文针对微弱信号的检测要求,研究了随机共振系统性能与系统参数之间的关系,并在此基础上设计了一种在噪声未知情况下基于经典遗传算法的自适应随机共振系统。该系统根据所得参数完成接收信号的最佳随机共振处理,实现输出信噪比和处理增益的最大化。仿真结果表明,本文所设计的随机共振系统与现有的恒参随机共振系统相比,抗噪声性能提高了5~10dB。特别是在低信噪比情况下,系统的处理增益达到15~20dB,从而实现信号的有效接收,对实际工程中微弱信号的检测和处理具有一定的应用价值和指导意义。

参考文献

- [1] Benzi R, Sutera S, Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance[J]. Phys. A, 1981, 14: L453-L457
- [2] 叶青华, 黄海宁, 张春华. 用于微弱信号检测的随机共振系统设计[J]. 电子学报, 2009, 37(1): 216-220
- [3] 沈福民. 自适应信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001
- [4] 钟良, 钟守楠, 章晓燕. 基于数论的总体优化随机搜索算法[J]. 数学杂志, 2006(1): 75-82
- [5] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems[M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975
- [6] 章晋龙, 何昭水, 谢胜利. 基于遗传算法的有序盲信号提取[J]. 电子学报, 2004(4): 616-619
- [7] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- [8] Fauve S, H  ls  t F. Stochastic resonance in a bistable system [J]. Phys. Lett. A, 1983
- [9] Hairer E, Lubich C, Wanner G. Geometric Numerical Integration [M]. Benlin: Springer, 2002
- [10] actions on Computers, 2010, 59(3): 317-331
- [8] 郑倩冰, 彭伟, 卢锡城. ERSN: 一种高效鲁棒的超节点对等网络[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(4): 607-612
- [9] Li J-S, Chao C-H. An Efficient Superpeer Overlay Construction and Broadcasting Scheme Based on Perfect Difference Graph [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(5): 594-606
- [10] Lin T-H, Ho T-H, Chan Yu-wei, et al. M-Ring: A Distributed, Self-organized, Load-balanced Communication Method on Super Peer Network [C] // Proc. of the International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks. CA: IEEE Computer Society Press, 2008: 59-64
- [11] 方木云, 赵保华. 新的无向双环网络 $G(N; \pm 1, \pm s)$ 直径求解方法[J]. 通信学报, 2007, 28(2): 124-129
- [12] Calvert K, Eagan J, Merugu S, et al. Extending and Enhancing GT-ITM [C] // Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Models, Methods and Tools for Reproducible Network Research. Karlsruhe, Germany, August 2003
- [3] Liang J, Kumar R, Ross K. The KaZaA Overlay: A Measurement Study [C] // Proc. of the Fifth New York Metro Area Networking Workshop. Sep. 2005
- [4] Liu W, Yu J, Song J, et al. ERASP: An Efficient and Robust Adaptive Superpeer Overlay Network [C] // Lecture notes in computer science, 2008, 4976: 468-474
- [5] Liu M, Zhou J, Koskela T. A Robust Algorithm for the Membership Management of Super-Peer Overlay [C] // Proc. of the 12th IFIP/IEEE International Conference on Management of Multimedia and Mobile Networks and Services; Wired-Wireless Multimedia Networks and Services Management. Venice, Italy, Oct. 2009
- [6] Lin J-W, Yang Ming-feng. Robust Super-Peer-based P2P File-sharing Systems [J]. The Computer Journal, 2010, 53(7): 951-968
- [7] Garbacki P, Epema D H J, van Steen M. The Design and Evaluation of a Self-Organizing Superpeer Network [J]. IEEE Trans-

(上接第78页)