

水声时变线谱建模与双稳态随机共振分析

张晓兵[†] 董华玉 玄兆林

(海军工程大学兵器工程系 武汉 430033)

摘要 建立了水声时变线谱的模型,将双稳态随机共振系统应用于水声时变线谱信号的检测,考查了随机共振系统对水声环境的适应能力,提出了设计水声线谱检测系统可以利用的外在参数。在信噪比变化、声压起伏、线谱漂移等情况下,仿真结果表明双稳态随机共振系统都能较好地工作。为水声领域新型线谱检测系统的设计提供了依据。

关键词 水声信号检测, 时变线谱, 随机共振

Bistable stochastic resonance analysis for time-varying underwater acoustic line-spectrum detection

ZHANG Xiao-Bing DONG Hua-Yu XUAN Zhao-Lin

(Weapon Engineering department, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

Abstract Time-varying line-spectrum model of the hydrophone end is designed. Bistable stochastic resonance method is proposed for the detection of time-varying underwater acoustic line-spectrum detection and the parameters which can be used in the detection system are presented. Based on the proposed method, the adaptive capability of the stochastic resonance detection system to underwater environment is examined. In circumstances like varying SNR, fluctuating acoustic pressure and excursive frequency, numerical simulation shows that the detection system works well. This study offers basis for the design of a new type line-spectrum detection instrument in the underwater acoustic domain.

Key words Underwater acoustic signal detection, Line-spectrum, Stochastic resonance

2006-12-11 收稿; 2007-04-03 定稿

作者简介: 张晓兵(1976-), 男, 获嘉市人, 讲师, 博士, 研究方向: 信号检测。

董华玉(1979-), 男, 博士研究生。

玄兆林(1935-), 男, 教授, 博士生导师。

[†] 通信联系人 E-mail: z_x_b@sohu.com

1 引言

现有的线谱检测方法都是基于抑制噪声的思路。如文献[1,2]采用的高阶谱和高阶累量方法、文献[3]采用的小波变换方法等。高阶谱和小波变换的计算需要庞大的运算量,在低信噪比、小数据量的情况下容易导致性能下降。对某些实时性要求极高且计算能力受限的小平台来说,寻找新的检测方法是一项有意义的工作。

长期以来,噪声通常被认为对信号处理有害,利用噪声进行信号的检测一直被人们所忽略。随机共振技术出现后,研究人员发现噪声也可以对信号处理起到建设性的作用^[4,5]。近年来,随机共振的研究成果已经体现在信息处理、电子、化学、通信、脑科学等诸多领域。作为一个具有广阔前景的课题,虽然大量的研究已经相继开展,但国内外鲜有将随机共振应用到水声领域的报道。

本文将随机共振应用到水声信号低频线谱的检测。在水听器端对线谱进行建模,考查了目标运动、信噪比变化、幅度起伏和频率漂移等情况下系统的工作情况。仿真发现,系统具备对环境的适应能力且性能良好。研究结论对于设计新型的线谱检测系统或对现有系统的改进都是有价值的。

2 双稳态随机共振

具有双势阱性质的 Langevin 方程是典型的双稳态非线性系统^[6]:

$$\dot{x} = -V'(x) + A_D \sin(2\pi f_D t + \varphi_0) + \sigma N(t) \quad (1)$$

$$V(x) = -\frac{1}{2}\alpha x^2 + \frac{1}{4}\beta x^4 \quad (2)$$

其中: $\alpha, \beta > 0$, $V(x)$ 为系统对应的势函数。 A_D 、 f_D 和 φ_0 分别为线谱信号(也即正弦信号)的振幅、频率和初始相位。 $N(t)$ 是均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声, σ 是噪声强度。在 $A_D = \sigma = 0$ 时,系统在 $\pm\sqrt{\alpha/\beta}$ 处具有两个稳态,也即势阱的阱底。势垒的高度为 $\Delta V = \alpha^2/4\beta$ 。在 $\sigma = 0$ 时,系统存在双稳态临界值 $A_c = \sqrt{4\alpha^3/27\beta}$ 。将系统的输出看作在势函数曲线上运动的质点。

信号输入系统后,势阱在信号的调制驱动下,按信号的频率发生周期性的倾斜变化,但只要 $A_D < A_c$,质点只能在 $x = +\sqrt{\alpha/\beta}$ 或 $x = -\sqrt{\alpha/\beta}$ 的势阱内周期性运动,不能跃迁到另一个势阱,只有 $A_D > A_c$ 时,质点才能在两个势阱间跃迁。然而再将噪声输入系统后,由于信号和噪声的协同作用,势阱倾斜程度逐渐变大,即使 $A_D < A_c$,质点也能从原来的势阱跃迁到另一个势阱。当噪声强度增大到一个最佳值时,质点在两个势阱间跃迁的频率和输入信号的频率相同,输出信噪比达到最大;继续增大噪声强度,质点的运动会失去规律性,输出信噪比也会显著降下来。这种类似于力学中共振的现象就是随机共振。

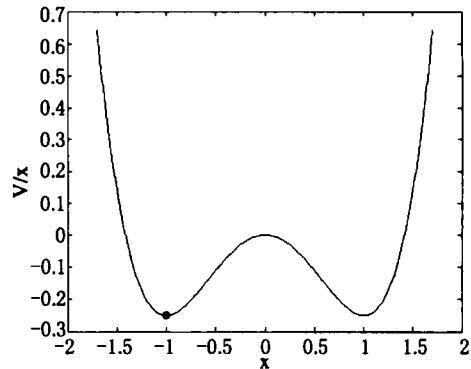


图1 随机共振系统的势阱和质点的示意图

图1为 $\alpha = \beta = 1$ 时式(2)所示的势函数曲线,它包括左右两个势阱,图中的圆点表示在 $A_D = \sigma = 0$ 时质点稳定在系统的稳态 -1 上,也即左边势阱的阱底。

利用统计物理学中的分析方法,可以将 Langevin 方程写成其对应的 Fokker-Planck 方程^[6]:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \{ [\alpha x - \beta x^3 + A_D \sin(2\pi f_D t + \varphi_0)] \rho(x,t) \} + \sigma \frac{\partial^2}{\partial x^2} \rho(x,t) \quad (3)$$

其中: $\rho(x,t)$ 是系综的分布函数。由于方程(3)中含有非自治项,方程不再存在稳定解,精确的求解是不可能的,目前已经有各种各样的近似求解的方法,如早期的研究者采用了微扰展开、线性响应理论和目前有研究者采用截断逼近的近似方法等,但都需要对信号幅度或

噪声强度做出各种各样的假设。近似方法虽然可以在理论上对随机共振现象做一定程度的分析,但对该非线性问题的许多方面一直不能给出合理的解释。仿真实验具有的灵活性和易操作性,使得随机共振的数值分析方法被大多数研究者采用^[7]。

在随机共振的典型应用中,文献[8]假设信号参数是确定的,通过调节系统参数或者噪声强度来达到共振状态。水声环境的易变性、海洋信道的传播和目标运动的影响,使得线谱检测变得更为复杂。以下给出时变线谱检测的双稳态随机共振的具体分析和验证。

3 时变线谱检测

3.1 水听器端的时变线谱模型

影响水声信号的因素众多,海流、内波、气象、潮汐等海洋学因素、声在海洋中传播的扩展和衰减效应、折射、反射和散射效应、波导效应、多途效应以及起伏效应、水中目标的工况、航行姿态、深度、声源的指向性等都会使水声

$$x = \alpha x - \beta x^3 + A_D \xi(t) (kt + m) \sin \{2\pi [f_D + \eta(t)] t + \varphi_0\} + \sigma N(t) \tag{5}$$

此时解析的精确解仍然不可能得到。采用欧拉法^[9]对式(5)进行分析,令迭代步长为 h ,系

$$x_n = x_0 + h \sum_{i=0}^{n-1} A_D \xi(t_i) (kt_i + m) \sin \{2\pi [f_D + \eta(t_i)] t_i + \varphi_0\} + h \sum_{i=0}^{n-1} \sigma N_i + h \sum_{i=0}^{n-1} (\alpha x_i - \beta x_i^3) \tag{6}$$

在式(5)中描述信号幅度随机起伏、频率漂移的 $\xi(t)$ 、 $\eta(t)$ 项,相当于给系统带来了乘性噪声。忽略 $\xi(t)$ 、 $\eta(t)$ 的影响,令

因此有:

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0, \sigma \rightarrow 0} h \sum_{i=0}^{n-1} A_D \xi(t_i) (kt_i + m) \sin \{2\pi [f_D + \eta(t_i)] t_i + \varphi_0\} &= \int_0^{(n-1)h} A_D (kt + m) \sin(2\pi f_D t + \varphi_0) dt \\ &= \frac{A_D k}{(2\pi f_D)^2} \sin(2\pi f_D t_{n-1} + \varphi_0) - \frac{A_D k}{(2\pi f_D)^2} \sin(\varphi_0) + b \frac{A_D}{(2\pi f_D)} \cos(\varphi_0) - b \frac{A_D}{2\pi f_D} \cos(2\pi f_D t_{n-1} + \varphi_0) \\ &= \frac{A_D \sqrt{k^2 + 4b^2 \pi^2 f_D^2}}{(2\pi f_D)^2} \sin(2\pi f_D t_{n-1} + \varphi_0 - \varphi_1) + C_0 \end{aligned} \tag{9}$$

将式(9)代入式(6),可得:

$$x_n = x_0 + \frac{A_D \sqrt{k^2 + 4b^2 \pi^2 f_D^2}}{(2\pi f_D)^2} \sin(2\pi f_D t_{n-1} + \varphi_0 - \varphi_1) + C_0 + h \sum_{i=0}^{n-1} \sigma N_i + h \sum_{i=0}^{n-1} (\alpha x_i - \beta x_i^3) \tag{10}$$

信号的线谱分量体现出时变特征。对水听器端接收信号的单根线谱进行分析,我们建立如下模型对线谱的幅度起伏、频率漂移以及信号长时间的信噪比变化趋势进行描述:

$$A_D \xi(t) (kt + m) \sin \{2\pi [f_D + \eta(t)] t + \varphi_0\} \tag{4}$$

其中: $\xi(t)$ 是均值为 1 的高斯分布,它描述声压的幅度起伏; $(kt + m)$ 则描述了线谱的信噪比的长时间变化,其中 k 表示了目标与水听器距离的变化导致的信号幅度的变化趋势,它与目标运动的速度、相对水听器的空间方位等因素对应;由于信号处理中不可避免的要对信号进行截断,因此 m 对应水听器某段接收信号的时间起点处线谱的相对幅度值; A_D 对应了水听器可接收的最小声压幅度值;均匀分布 $\eta(t)$ 描述了线谱的频率漂移。

3.2 随机共振检测的分析

将式(4)的线谱模型作为输入并假设海洋环境噪声为高斯白噪声,对于双稳态随机共振系统,可以建立在水声环境下检测时变线谱的非线性方程:

统输出的初始值为 x_0 ,由欧拉公式 $x_{n+1} = x_n + hf(x_n, t_n)$ 得到:

$$C_0 = b \frac{A_D}{2\pi f_D} \cos(\varphi_0) - \frac{A_D k}{(2\pi f_D)^2} \sin(\varphi_0) \tag{7}$$

$$(\varphi_1) = \arctan \frac{k}{2\pi f_D} \tag{8}$$

式(10)说明在乘性噪声不明显的情况下,系统的输出仍为线谱,信号趋势项的引入使输出信号与原信号有了一定的相移,但并没有改变输出信号的频率。为了全面考查幅度起伏、频率漂移、信噪比变化下随机共振系统的处理性能,下一小节通过仿真进行验证。

3.3 仿真结果

为考查随机共振系统在低信噪比下的优势,假设线谱幅值为 0.5mV ,海洋噪声强度为 80mV ;待检测的线谱频率为 10Hz 。先不考虑线谱的时变特征,可以通过实验的方法确定随机共振系统工作性能大致最优时对应的参数 ($\alpha = 1 \times 10^3, \beta = 9.8 \times 10^7$)。

图2分别是具有时变特征的线谱信号、水听器的接收信号(淹没在噪声中时变线谱信号)以及随机共振系统的输出信号。时变线谱信号由式(4)仿真,线谱的幅度起伏方差为 0.03mV ,线谱频率在 $[f_D - 0.25, f_D + 0.25]$ (单位:Hz)范围内漂移,目标速度对应线谱幅度在100秒内增大一倍,不失一般性,可以令 $\varphi_0 = 0, m = 1$ 。

图3分别是时变线谱信号在经过随机共振系统处理前后的频谱图对比。由图2和图3可以发现,在线谱漂移、幅值起伏、信道等因素的影响下,不经过随机共振系统的处理,水听器接收的信号在时域和频域均不能分辨出原线谱的存在。

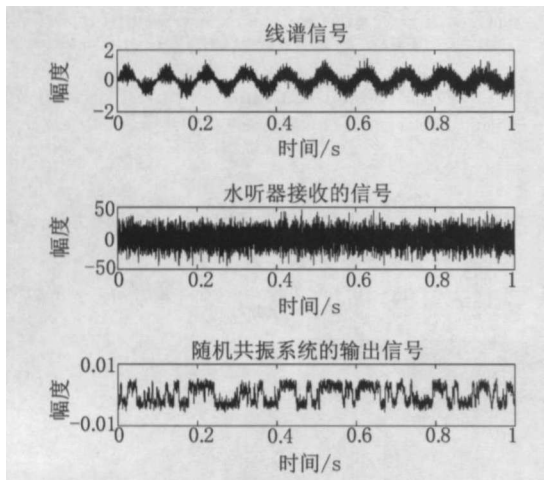


图2 水听器端建模的信号

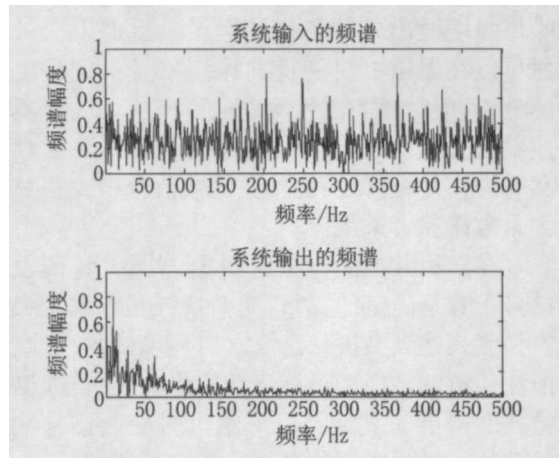


图3 系统处理前后的频谱

采用四阶 Runge-Kutta 算法对输入信号进行数值计算,由此得到随机共振系统的输出信号。如图3的下图所示,可以发现经过原随机共振系统处理后在频域可以容易地辨别出 10Hz 的线谱。仿真中频谱分析的 FFT 点数为 10^4 点,采样频率为 10kHz ,采样时间为 1s ,频谱已经进行了归一化。

图4和图5对应了不同情况下的检测概率变化曲线。在式(4)的模型中, m 值的大小表示了系统处理时线谱信号在起始时间点处的相对幅值, $m = 1$ 即对应信号幅度为 0.5 。图4为不同初始的相对幅值(即不同 m 值)时,系统处理前后的检测概率,显然随机共振系统的输出信号使检测概率得到大幅度提高。在目标靠近水听器的运动过程中, m 值由小变大,检测概率逐渐增大,大约在 $m = 1.5$ 后,随机共振系统均能可靠地发现目标,而这时未作处理的信号其检测概率只有 0.4 左右。以上的仿真实验表明,在系统设计好后,当目标由远及近时,系统检测到线谱的能力也随之提高。这是由于系统参数对应了一定的势垒高度,信号幅度的增大使系统输出在两势阱中的跃迁变得更加容易,检测概率也就更大。频率波动同样也是影响检测的因素之一,图5即描述了随着线谱频率波动范围的增大,信号的检测概率逐渐下降,但随机共振系统输出信号的检测概率仍远远高于输入信号。图4横轴的坐标对应了频率的漂移,1个单位代表的漂移范围为 $[f_D - 0.25, f_D + 0.25]$ (单位:Hz)。

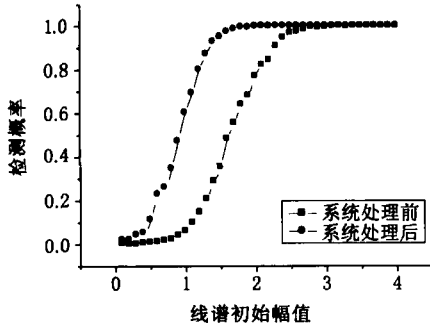


图 4 线谱初始幅值增大时系统处理前后检测概率的比较

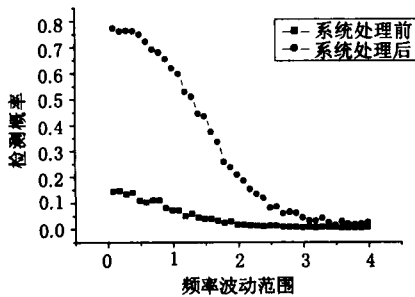


图 5 频率波动方差增大系统处理前后检测概率的比较

前文的随机共振系统是根据低频线谱建立的。如果目标辐射的线谱频率逐渐向高频移动,继续采用原系统参数,则会发现随机共振系统仍能很好地完成线谱检测的任务,不过其优势不再明显,图 6 与图 7 分别对应了 20Hz 与 40Hz 线谱经过原随机共振系统前后的频谱图。

通过多次仿真发现,不论是在水听器端还是在声源端建立线谱模型,结果都与上述结论吻合。

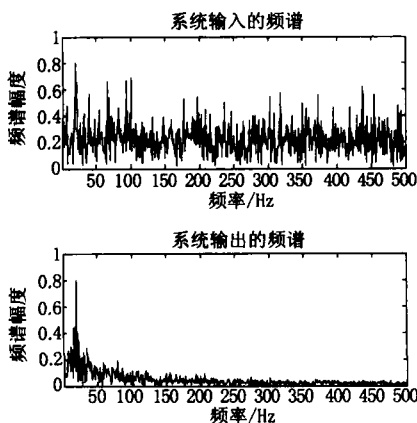


图 6 20Hz 线谱经过系统前后的频谱

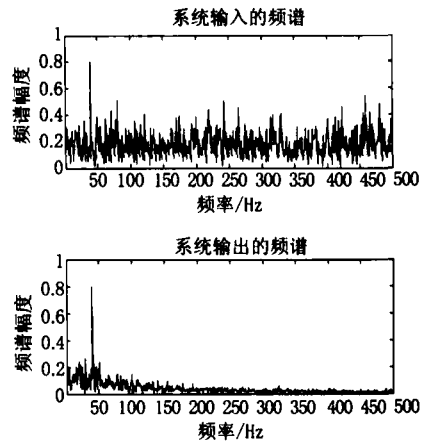


图 7 40Hz 线谱经过系统前后的频谱

4 结论

本文在水听器端对线谱进行了建模,考查了双稳态随机共振系统对环境的适应能力。仿真实验发现,系统在诸多复杂条件下都能较好地工作,可见利用随机共振系统检测时变的水声线谱信号是可行的。随机共振系统的易实现性使其很好的满足了小功率平台的要求,在现有系统的基础上进行不大的改进,就能使低频性能得到大幅度提高,因此是具有实用价值的。

参 考 文 献

- [1] 李亚安,冯西安,樊养余,等. 基于 $1/2$ 维谱的舰船辐射噪声低频线谱成分提取. 兵工学报. 2004, 25(2):238-241.
- [2] 郭业才,赵俊清,陈华伟. 水下航行器辐射噪声谱增强新方法. 数据采集与处理. 2002, 17(3):244-247.
- [3] 余秋星,李志舜. 基于小波变换的舰船辐射噪声检测. 西北工业大学学报. 2002, 20(4):651-653.
- [4] Steeve Z, Pierre-Olivier. A stochastic resonance in locally optimal detectors. IEEE Transactions on Signal Processing. 2003, 51(12):3177-3181.
- [5] Godivier X, Rojas-Varela J, Chapeau-Blondeau F. Noise-assisted signal transmission via stochastic resonance in a diode nonlinearity. ELECTRONICS LETTERS. 1997, 33(20):1666-1668.
- [6] Gammaitoni L, Haangi P, Jung P, et al. Stochastic Resonance. Review of Modern Physics, 1998, 70(1):223-287.
- [7] Roy D. A new numeric-analytical principle for nonlinear deterministic and stochastic dynamical systems. Proceedings of Royal Society A, 2001(457):539-566.
- [8] 胡鸞庆,温熙森,陈敏. 随机共振原理在强噪声背景信号检测中的应用. 国防科技大学学报. 2001, 23(4):40-44.
- [9] Breen B J. Computational nonlinear dynamics: Monostable stochastic resonance and a bursting neuron model. USA: School of Physics of Georgia Institute of Technology, 2003.