

随机共振技术在探潜中的应用

王世闯, 王茂法

(杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310012)

摘要: 潜艇在低速航行时, 由于辅机的工作和螺旋桨转动, 导致了声频在甚低频段(0~100 Hz)内有较强的线谱。在声源较弱时, 由于信噪比太低, 传统的 Demon 谱分析方法无法辨别出线谱成分。这在一定程度上限制了声呐在低信噪比情况下的探潜性能。根据随机共振理论的非线性检测目标手段, 运用扫频式随机共振技术, 对低信噪比情况下的潜艇线谱噪声进行处理, 从而增强了线谱能量, 以提高检测信噪比。根据该理论, 运用扫频随机共振方法对潜艇甚低频段线谱进行了数据处理, 使得检测结果提高了 8 dB, 实际运用的目标检测距离提高 1 倍以上。充分体现了该理论的工程实用价值。

关键词: 随机共振; 扫频; 探潜; 线谱增强

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-02-0163-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.02.014

The application of stochastic resonance technique in detecting submarine

WANG Shi-chuang, WANG Mao-fa

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: When navigation of submarine in. For a low speed submarine, propeller running and assisting machine working produce linear spectrums between 0Hz and 100Hz. If the acoustic source is weak, the signal and noise ratio decomes very low, the traditional demon spectrum analysis method for analyzing signal can not find the linear spectrums. This restricts the capacity to find submarine. Stochastic resonance theory is a nonlinear way of detecting target. Based on stochastic resonance theory and using scan frequency technique for stochastic resonance, the power of linear spectrum can be increased and the signal and noise ratio advanced. According to the theory, the data of submarine were processed to incese the signal and noise ratio by 8 dB, and the practical detecting distance was double that of before.

Keyword: stochastic resonance(SR); scan frequency; detecting submarine; linear spectrum increase

0 引言

含有噪声的信号在经过非线性系统处理后, 会产生随机共振(Stochastic Resonance, SR)现象, 当产生随机共振^[1]时, 输出端的信号能量有所增加, 而噪声能量减少, 即噪声能量部分转化为信号能量。根据 SR 理论, 可达到从强噪声中检测信号的目的。

非线性随机系统与线性系统^[2]区别在于:

- (1) 当系统输入端噪声增加时, 非线性系统能产生更好的随机共振现象, 原因是有新能量的补充;
- (2) 当非线性系统产生 SR 时, 系统的输出信噪比大幅度提高。而线性系统随着噪声的增加, 会导

致系统输出信噪比变坏。

随着潜艇隐身技术和消声瓦技术^[3]的发展, 不论是常规潜艇还是核潜艇, 在中高频段都能很好地吸收声波, 导致在该频段区域内声呐探测能力下降。但在低频段, 由于潜艇的螺旋桨和辅机的机械运动产生的线谱能量仍较强, 并且消声瓦在该频段内的吸声能力会下降, 故低频段是未来探潜的重要研究方向。

针对现在声呐发展状况, 对于低频特别是甚低频(0~100 Hz)信号, 由于组成阵列所需的基阵孔径过大(如 100Hz 信号的阵元间距需要 7.5m), 导致难以形成大规模阵列进行波束形成等数据处理。目前针对低频信号, 常用的方法有二元阵或多阵元累加平均信号的处理。这就导致了无法检测在远距离的潜艇目标, 原因是由于阵元信号较弱, 噪声较强。针对该问题提出利用 SR 较高频率检测方法进行低噪声潜艇目标信号处理, 从而提高探潜能力。

收稿日期: 2012-11-28; 修回日期: 2013-01-28

作者简介: 王世闯(1987-), 男, 辽宁丹东人, 满族, 硕士, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 王世闯, E-mail: 11111yixiantian@sina.com

1 SR 模型及大参数信号检测理论

1.1 SR 理论

SR 所用的模型主要为非线性双稳态系统模型，通常用下列势函数^[4]表示：

$$U(x)=-\frac{1}{2}\cdot ax^2+\frac{1}{4\mu^2}\cdot bx^4-[s(t)+\tau(t)]\cdot x \quad (1)$$

式(1)中： μ 为势阱参数； a 和 b 为系统参数。在驱动力为单频正弦信号 $s(t)=A\sin(2\pi f_0 t)$ 和噪声强度为 D 的白噪声 $\tau(t)$ 共同作用下，双稳态系统的动力方程可表示为朗之万方程：

$$\frac{dx}{dt}=ax-\frac{b}{\mu^2}x^3+s(t)+\tau(t) \quad (2)$$

当输入端为零时，系统的两个阱底^[5]位于 $x=\pm\mu\cdot\sqrt{a/b}$ ，垒高为 $\Delta U(x)=(\mu a)^2/4b$ 。当系统仅加入信号后，系统是非对称双稳态的，当信号幅度 $|A|\geq\sqrt{4/27}\mu=0.38\mu$ 时，系统的双稳性质消失。当 $|A|<0.38\mu$ 时，没有噪声能量，信号不能引起双稳态系统在不同的稳态之间有确定性的转移。

当系统中加入噪声后^[6]，在噪声的作用下，质点在两个势阱间来回切换。当 $A=0$ 时，切换概率满足 Kramers 公式：

$$r_k=\frac{\sqrt{2}}{2\pi}e^{(-\frac{2\Delta U}{D})}=\frac{\sqrt{2}}{2\pi}e^{(-\frac{\mu^2}{2D})} \quad (3)$$

当噪声增大时，克莱默斯(Kramers)跃迁概率^[7]也逐渐增大，这就导致质点将从一个势阱跃迁至另一个势阱，致使系统发生随机共振。

该理论适用于当信号的频率较低(0~0.2 Hz)时的信号检测，对于高频率信号，由于两个势阱之间的转换频率低于信号高低电平变换频率，导致无法产生随机共振现象。

1.2 大参数信号检测

为了使 SR 方法能够在探测潜艇低频噪声中得到运用，在此对 SR 方法^[8]进行优化。

含噪声的待测周期信号为

$$x(t)=A\cos(2\pi ft+\varphi)+n(t) \quad (4)$$

式中： A 为信号幅度； f 为信号频率； $n(t)$ 为高斯白噪声。

设扫频载波信号为

$$y(t)=\cos[2\pi(f+f_0)t] \quad (5)$$

则调制信号亦即混频器输出的信号为

$$x_z(t)=x(t)y(t)=[A\cos(2\pi ft+\varphi)+n(t)]\cdot$$

$$\cos[2\pi(f+f_0)t]=\frac{1}{2}A\cos(2\pi f_0 t+\varphi)+\frac{1}{2}A\cos[2\pi(2f+f_0)t+\varphi]+n(t)\cos[2\pi(f+f_0)t] \quad (6)$$

式(6)分为两部分，一部分为信号部分：

$$x_1(t)=\frac{1}{2}A\cos(2\pi f_0 t+\varphi)+\frac{1}{2}A\cos[2\pi(2f+f_0)t+\varphi] \quad (7)$$

另一部分为：

$$x_2(t)=n(t)\cos[2\pi(f+f_0)t] \quad (8)$$

$x_2(t)$ 的自相关函数为

$$\begin{aligned} \langle x_2(t)x_2(t+\tau) \rangle &= \\ \frac{1}{2}\langle n(t)n(t+\tau) \rangle \cos[2\pi(f+f_0)t] &= \\ D\delta(\tau)\cos[2\pi(f+f_0)t] \end{aligned} \quad (9)$$

$x_2(t)$ 的功率谱为其自相关函数的傅里叶变换，即

$$S_2(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty} D\delta(\tau)\cos[2\pi(f+f_0)t]e^{-j\omega\tau}d\tau=D \quad (10)$$

由式(10)可知，调制后的噪声仍是高斯白噪声。

由式(7)可知，经过调制后的信号的频率成分变为一个为原始信号的频率与扫频载波信号的差值，另一个为其和值。如果扫频载波信号的频率与原始信号频率差值非常小，就可以得到小参数的输入信号，然后经过滤波器，将其高频率信号滤除，可以满足小参数条件。将该小参数信号通过非线性双稳态系统，输出便能产生随机共振。具体实现过程如图1所示。

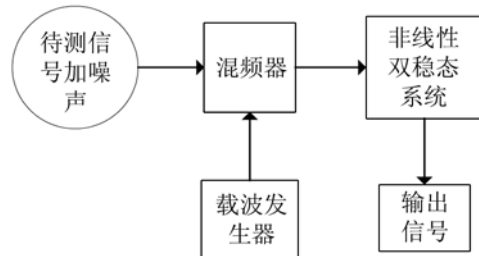


图1 扫频随机共振过程图
Fig.1 Diagram of sweeping SR process

2 潜艇低频噪声检测

2.1 潜艇低频噪声特性

潜艇的主要噪声，可分为推进系统噪声、螺旋桨噪声、辅机噪声和水动力噪声，这些噪声在潜艇的不同航行状态下，对辐射噪声有不同的影响。辐射噪声谱包含宽带连续谱分量和窄带线谱分量，各种谱分量，根据其噪声源，可以是航速、深度、或与舰船操作有关的其他因素的函数。

线谱部分与推进系统、螺旋桨及辅机有关。辅机产生的线谱分量一般相当稳定，与舰船航速无关，这种线谱的带宽一般与频率成正比，其带宽的范围是中心频率的 0.03%~0.3%。对于推进系统和螺旋桨产生的线谱，其幅度与频率随舰船的速度而

变化，这些线谱的带宽一般比辅机线谱要宽，而且是有周期变化的频率分量。螺旋桨未发生空泡时，舰船噪声的线谱能量较强，当舰船航速增加而产生空泡时，宽带噪声的强度会掩盖某些频率分量，与推进系统有关的线谱会向高频移动，幅度会增加，但辅机线谱保持不变。在低频段(0~100 Hz)内，潜艇的线谱成分包含了非常重要的潜艇特性信息，所以对该频段内的噪声线谱检测能力是一部声呐设备性能优劣的一个重要参数。

2.2 潜艇低频线谱 SR 检测

根据潜艇的噪声特性和第 1 节中所论述的 SR 理论，进行潜艇噪声低频线谱的检测。

首先根据采样率设定扫频信号的频率变化步长 Δf ，通常设为 $\Delta f=0.1\text{Hz}$ ，扫频范围 $20\text{Hz}\leq f\leq 100\text{Hz}$ 。

其次，将潜艇噪声的采样数据与扫频的单频信号进行调制，通过低通滤波器，将 100Hz 以上的信号能量滤除。

再次，将所得的结果代入双稳态系统，并解得结果。

最后，根据所得到的结果进行频谱分析，从而获得该频谱信息。

经过以上四步，可以得到 SR 检测结果。

2.3 系统计算

将经过滤波后的信号代入双稳态系统时，由于该系统为非线性常微分方程，没有确定的数学算式解。对此问题提出运用四阶龙格—库塔迭代法进行求解，具体过程如下：

设输出端的初值 $y=y_0$ ，系统方程式为

$$f(x, y)=ay-by^3+x \tag{11}$$

式(11)中： a 、 b 为系统参数； x 为水听器所接收到的潜艇低频噪声； y 为所求得得方程解。根据四阶龙格—库塔法，设定迭代步长 h ，然后通过式(12)~(16)进行迭代计算：

$$y_{n+1}=y_n+\frac{h}{6}(K_1+K_2+K_3+K_4) \tag{12}$$

$$K_1=f(x_n, y_n) \tag{13}$$

$$K_2=f(x_n+\frac{1}{2}h, y_n+\frac{1}{2}hK_1) \tag{14}$$

$$K_3=f(x_n+\frac{1}{2}h, y_n+\frac{1}{2}hK_2) \tag{15}$$

$$K_4=f(x_n+h, y_n+hK_3) \tag{16}$$

经过式(12)~(16)的迭代计算后，可得到经过 SR 之后的数据结果，然后通过频谱分析从而得到潜艇的稳定谱线信息。

3 仿真实验分析

根据前两节的理论，进行仿真实验分析。为了与实际情况相吻合，同时证明该理论的鲁棒性，这里设潜艇在 0~100Hz 内包含拖尾噪声和单频谱线，其中单频谱线的频率 $f=40\text{Hz}$ ；幅度 $A=0.3$ ；拖尾噪声的方差为 $D=10$ ，均值为 0，并且幅值 $|A_m|\geq 3$ 的概率密度 $F(A_m\geq 3\text{或}A_m\leq -3)=0.2$ ，扫频频率为 $f_z=39.9\text{Hz}$ ，扫频信号幅度 $A_z=2$ 。则经过调制后的信号如图 2 所示。

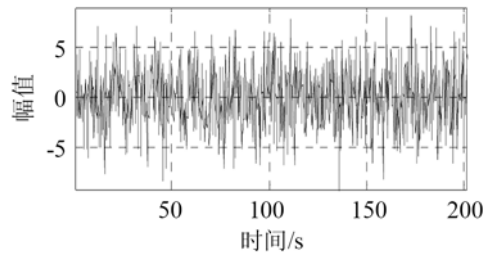


图 2 潜艇输入信号
Fig.2 Input signal of submarine

将输入潜艇噪声通过 SR 系统，该系统参数设定为 $a=1$ ， $b=1$ ， $\mu=1$ ，并且初值设为 $y_0=1$ 。则经过该非线性双稳态系统后的信号如图 3 所示。

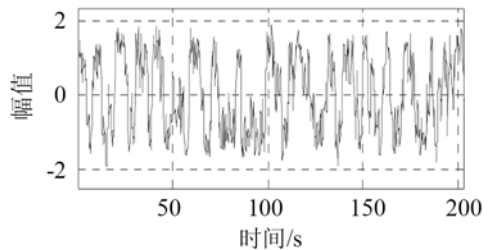


图 3 经过 SR 处理后的潜艇信号
Fig.3 Output signal of submarine after SR processing

由图 2 和图 3 可以看到，没经过 SR 的信号处于一种杂乱无章的随机状态，经过 SR 后的信号则表现在某个低频点有序的上下跃变。

对所得到的输入信号和输出信号进行频谱和功率谱分析，结果分别如图 4~7 所示。

由图 4、图 5 可以看出，经过调制后的输入端信号，频率由原来的 40 Hz 转移到 0.1 Hz。所以信号的能量主要集中在 0.1 Hz 处。图 4 中 0.1 Hz 的信号能量比周围噪声幅度高 2 dB 左右，而在图 5 中 0.1 Hz 的信号能量比周围噪声幅度高 10 dB。这表明，经过 SR 后潜艇噪声中的线谱幅度获得了明显增加，比没有 SR 的信号幅度高 8 dB。

由图 6、图 7 可以看出，在 0.1 Hz 处的信号能量明显不同，经过 SR 系统之后的信号能量要比没

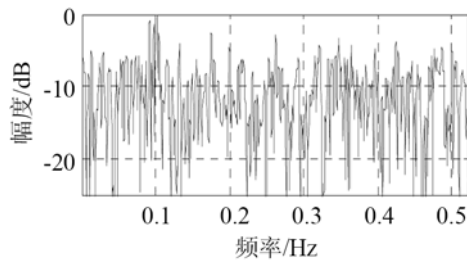


图 4 调制后潜艇输入信号频谱

Fig.4 Spectrum of input signal of submarine after modulation

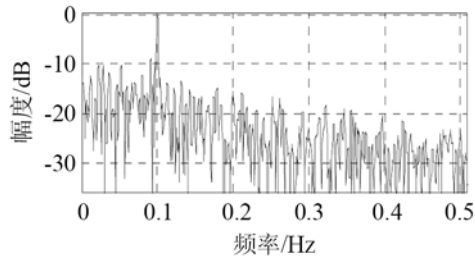


图 5 经过 SR 处理后的潜艇信号

Fig.5 Spectrum of output signal of submarine after SR processing

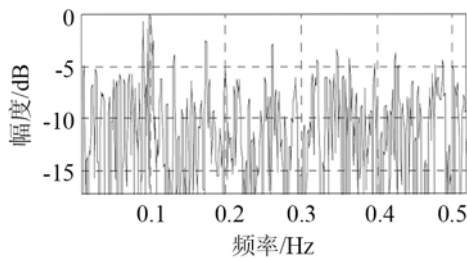


图 6 调制后潜艇输入信号功率谱

Fig.6 Power spectrum of input signal of submarine after modulation

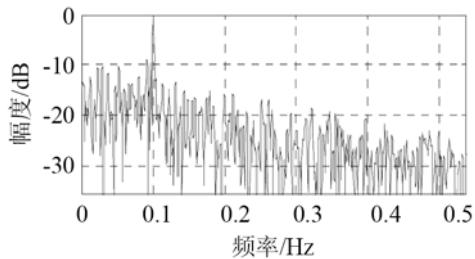


图 7 经过 SR 处理后的潜艇信号功率谱

Fig.7 Power spectrum of output signal of submarine after SR processing

经过系统增加 8 dB 左右,能够很充分的证明随机共振系统的有效性。

4 结 论

本文论述了随机共振处理大频率信号理论,并且根据该理论,论证了其在探潜中的重要性,根据潜艇低频段线谱噪声的特性,进行了理论分析与实验仿真,得出在潜艇低频线谱信息不明显的情况下,运用扫频随机共振方法,能够明显增强线谱能量,从而提高检测的效率,最后对该算法与未进行扫频随机共振的结果进行了对比,该算法能够将信号的能量增强 8 dB,具有非常重要的实际工程意义。

参 考 文 献

- [1] 卢志恒, 林建恒, 胡岗. 随机共振问题 Fokker-Planck 方程的数值研究[J]. 物理学报, 1993, 42(10): 1556-1566.
LU Zhiheng, LIN Jianheng, HU Gang. The Fokker-Planck equation's numerical research about stochastic resonance[J]. Chinese Journal of Physics, 1993, 42(10): 1556-1566.
- [2] 冷永刚. 基于 Kramers 逃逸速率的调参随机共振机理[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5196-5200.
LENG Yonggang. The theory of stochastic resonance based on Kramers's escape velocity[J]. Chinese Journal of Physics, 2009, 58(8): 5196-5200.
- [3] 杜选民, 蒋亚浩. 舰船辐射噪声模拟技术研究[J]. 声学技术, 1999, 18(1): 10-14.
DU Xuanmin, JIANG Yahao. The simulative technical research about radiative noise of vessel[J]. Technical acoustic, 1999, 18(1): 10-14.
- [4] McNamara, Wiesenfeld K, Roy R. Observation of stochastic resonance in a ring laser[J]. Phys. Rev. Lett, 1988, 1(2): 3-4.
- [5] Dykman M I, Mannella R, McClintock P V E, et al. Comment on stochastic resonance in bistable systems[J]. Phys. Rev. Lett, 1990, 65(3): 2606.
- [6] Dykman M I, Luchinsky D G. Stochastic resonance: linear response theory and nonlinearity[J]. J. Stat. Phys, 1993, 70(1): 463-479.
- [7] Jung P. Threshold devices: fractal noise and neural talk[J]. Phys. Rev. E, 1994, 50(6): 2513.
- [8] Wiesenfeld K, Pierson D, Pantazelou E, et al. Stochastic resonance on a circle[J]. Phys. Rev. Lett, 1994, 72(4): 2125.