海洋噪声背景下基于随机共振方法的波束形成

安 良，陈励军，陆佶人

(东南大学无线电工程系，南京 210096)

摘要：为了改善低信噪比下波束形成的性能，从双稳态随机共振模型出发，提出了利用频率尺度变换，将随机共振和波束形成结合起来的算法。给出了双稳态模型参数的估计方法、数值仿真和应用于海洋噪声背景下波束形成的实验结果。由实验结果可见，随机共振确实改善了波束形成器输入数据的质量，从而提高了波束形成的性能以及信噪比。

关键词：随机共振；双稳态模型；波束形成；频率尺度变换

中图分类号：O324；TN 911 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2006)-02-0098-05

Beamforming based on stochastic resonance with sea noise background

AN Liang, CHEN Li-jun, LU Ji-ren

(Radio Engineering Department, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To improve beamforming under low signal-to-noise ratio, a method based on stochastic resonance (SR) in a bistable model is investigated by using a frequency scale transformation method. Simulation results and a trial test with sea noise background are given, together a method of estimating parameters of the bistable model. The results show that SR can improve the input data and enhance SNR.

Key words: stochastic resonance; bistable model; beamforming; frequency scale transformation

1 引 言

近年来，应用随机共振(SR)现象进行微弱信号检测已经成为一种新兴的信号处理方法。特别是基于双稳态系统的随机共振系统，由于其数学模型相对简单，并且在施密特触发器的研究中得到了证实，已经成为研究的热点。总而言之，应用随机共振原理进行信号处理，目标就是获得尽可能大的输出信噪比(SNR)。

但是，以往学者的研究多数是针对低频信号(f<1Hz)的模型，弱信号和强噪声共同作用于双稳态系统时，会发生噪声能量向信号能量的转移，从而使输出信噪比得到提高。从数学的角度来看，也只有在信号模型满足绝热近似条件[1]的情况下，模型的数值解才能和解析解近似。在高频率信号模型的情况下，由于不满足绝热近似条件，所以情况不能令人满意。本文在仿真和实际海试数据的处理中都使用了频率尺度变换的方法，使得输入信号符合绝热近似的条件，达到提高输出信噪比的目的。

波束形成算法是水声信号处理中提高信噪比的一种重要手段。常规的波束形成算法是根据传感器阵列的各个阵元上的信号存在固定的相位差，用延时的方法将阵元上的信号补偿到同一个波阵面上，然后再将各个阵元上的信号相加，就可以在特定的方向上形成需要的波束，同时输出信号的信噪比也得到了显著的提高。为了改善低信噪比下波束形成的性能，本文中尝试将随机共振算法和波束形成算法相结合，在波束形成算法之前先将接收信号通过随机共振系统，再用随机共振系统的输出信号做波束形成，相当于提高了阵列的输入信噪比，从而改善

收稿日期：2005-01-31；修回日期：2005-04-15

作者简介：安良(1979-)，男，江苏常州人，博士研究生，主要从事水声微弱信号检测研究。Email: an_liang@seu.edu.cn。

了波束形成的性能。

2　双稳态随机共振系统模型及频率尺度变换方法

双稳态随机共振系统的 Langevin 方程[1]如下:

$$x'(t)=ax(t)-x^3(t)+U(t)+\Gamma(t) \quad (1)$$

其中: $U(t)=A\sin(2\pi f_0 t+\theta)$, 为周期信号, $\Gamma(t)$ 为加性的高斯白噪声, 其强度为 D, $\Gamma(t)$ 和 $U(t)$ 共同构成系统的输入, $x(t)$ 为系统的输出, 系统的势函数为:

$$V(x)=-\frac{a}{2}x^2+\frac{1}{4}x^4+U(t),\quad a>0 \quad (2)$$

势垒高度为 $a^2/4$。这一方程也可以看作粒子在以式(2)为势函数的势场中运动的运动方程, $x(t)$ 为粒子在势场中的位置。

这一双稳态系统发生随机共振的条件是: 双稳系统两势阱之间 Kramers 逃逸速率和信号频率相匹配[2,5,6,7], 即:

$$R(t)=2f_0 \quad (3)$$

在一定噪声和信号能量的驱动下, 粒子越过势垒在双稳系统的两势井之间以信号频率作切换的跃迁运动, 形成随机共振现象。其中 $R_{\pm}(t)=a/\sqrt{2}\pi\exp[(a^2/4\pm A\sqrt{a}\sin 2\pi f_0 t)/D]$。不难看出: 在噪声强度 D 比较大的时候, $R_{\pm}(t)$ 趋向于 $a/\sqrt{2}\pi$。另外, 白噪声通过双稳态系统后, 其功率普呈现 Lorentz 分布形式[1,3], 即噪声能量主要集中在低频区域。根据这两点, 当 a 值不大时, 所形成的随机共振频率就不可能很高, 也即能够产生随机共振谱峰的频带, 将局限在双稳系统输出功率谱的低频段[3]。而当 a 值比较大时, 相应的势垒高度也会比较高, 那么由信号和噪声构成的混合信号的能量就有可能不足以使粒子越过势垒在两个势阱中跃迁, 形成随机共振。因此, 靠提高 a 值是不保证高频信号和噪声激励的双稳态系统发生随机共振的。这就制约了随机共振理论在水声信号处理中的应用。

为了解决检测微弱高频信号的问题, 有学者提出了两次采样[3]的方法。实际上这是一种频率尺度变换的方法。在用数值方法求解式(1)的微分方程时, 通常使用 Euler 方法或者 4 阶的 Runge-Kutta 算法, 其算法的步长一般取为采样频率的倒数 $1/f_s$。而频率尺度变换方法是把算法步长取为 $1/f_s'$, f_s' 为尺度变换因子, f_s' 一般比 f_s 小的多, 这样相当于把数据看作以 f_s' 为采样频率采集到的数据, 这样信号的频率也相应地降低到了原来的 f_s'/f_s, 于是一个高频的信号就经过尺度的变换变成了一个低频的信号。

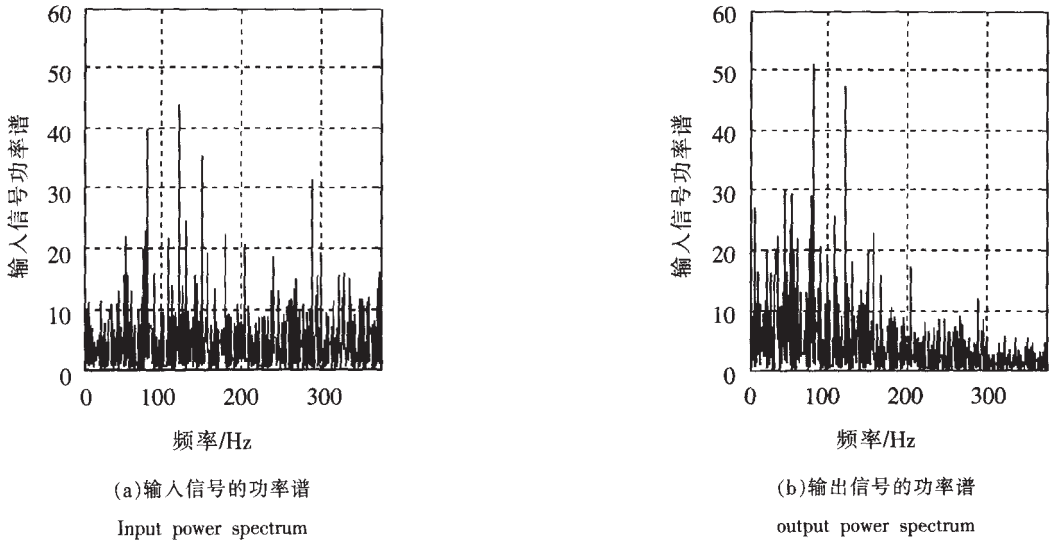
3　信噪比定义

本文中输入信噪比定义为单频信号的功率与宽带噪声的功率之比(单位: dB):

$$SNR=10\lg\left(\frac{\frac{1}{2}A^2}{2D}\right)$$

上式中 A 为周期信号的幅度。

输出信噪比定义为信号所在频率处的功率与宽带噪声的功率之比, 采用文献[2]中的方法计算。



(a)输入信号的功率谱　Input power spectrum

(b)输出信号的功率谱　output power spectrum

图 1　输入和输出信号的功率谱

Fig.1　Input and output power spectrum

4 数值仿真和海试数据分析

4.1 数值仿真

以 $U(t)=A\sin(2\pi f_1 t)+A\sin(2\pi f_2 t)+\sqrt{2D}\,w(t)$ 为输入信号模型进行计算机仿真，其中 A=0.1, a=0.5, D=20, f_1=80Hz, f_2=120Hz, w(t) 为单位方差的高斯白噪声，采样频率 f_s=6000Hz，尺度变换因子 f_s ≒4Hz, 采用 4 阶 Runge-Kutta 算法。

图 1(a) 和图 1(b) 分别为输入和输出信号的功率谱，可以看到：混合信号经过随机共振系统处理后的功率谱在 80Hz 和 120Hz 处都形成了峰值，功率也有所增加，而高频的噪声功率得到了抑制。可以计算在 80Hz 和 120Hz 处的输入信噪比均为 -39dB，输出信噪比分别为 -18.3dB 和 -18.6dB。

这里需要指出的是参数 a 和 f_s 的选择问题。a 可以根据式(3)的匹配关系来估计，如在上面的例子中 $a\approx 2\sqrt{2}\,f_1 f_s'/f_s\pi=2\sqrt{2}\times 80\times 4/6000\times\pi=0.4738$。而 f_s 则要根据不同的信噪比和信号频率来选择，以把信号原始频率变换到 1Hz 以内为宜。在信噪比较高时，f_s 可以选择的小一些；信噪比较低时，f_s 要适当大一些，才能使数值算法不溢出，观察到明显的随机共振现象，可以参考文献[3]。

4.2 海试数据分析

4.2.1 海洋噪声的特性

在上面的仿真中，我们使用的噪声模型是高斯白噪声，但是海洋噪声却不一定是白噪声。有文献[4]将海洋噪声用 Lorentz 谱型噪声来近似。本文中使用的海试数据要先通过一个高通滤波器，所以海洋噪声也变成了带限的噪声。在通带内，其自相关函数如图 2 所示，由图可见：噪声的相关时间近似为零，可以将海洋噪声用白噪声来近似[1]。

4.2.2 信号通过随机共振系统后相位的变化情况

阵列信号处理之所以能够提高信噪比，就是因为阵列的每个阵元所接收到的信号之间存在固定的相位差，通过延时可以将各个阵元的信号补偿到同一个波阵面上，然后再将各路经过补偿的信号相加，即可得到信噪比的改善。在低频率小信号的情况下，输出信号与输入信号之间的相移可以近似表示为[5,7]：

$$\phi=\arctan\left(\frac{\pi f}{R_{\pm}}\right) \tag{4}$$

由此可见，信号通过随机共振系统后原来的相位关系并没有被破坏，这保证了信号经过随机共振处理以后再做波束形成的可行性。

4.2.3 实际海试数据波束形成结果

本文使用的海试数据由 32 基元的线阵采集得到，在 90 附近和 135 附近各有一个辐射噪声源。分析过程中，首先把 32 路信号分别通过随机共振系统，得到 32 路新数据，然后再对新的数据做常规波束形成，参数 a 的选择方法同前，图 3 是系统框图。图 4、5、6、7 是 f_s 取不同值时最后输出的空间谱图，实线为不使用随机共振方法直接做波束形成（以下称为常规方法）的结果，虚线是经过随机共振后再做波束形成（以下称为 SR 方法）的结果；表 1 和表 2 是 f_s 取不同值时，在两个噪声源方位上形成波束的输出信噪比对比情况。结果表明，常规方法和 SR 方法在两个目标方向上都形成了波束，但是使用随机共振方法后，输出空间谱的谱峰更加尖锐。

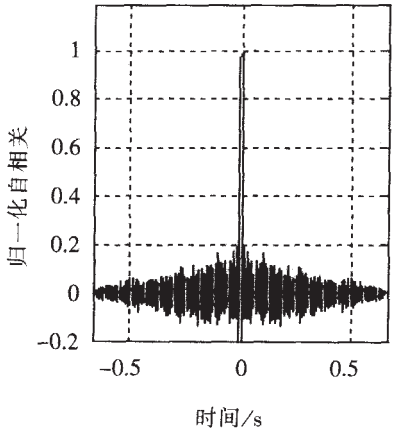


图 2 海洋噪声的自相关函数

Fig.2 Autocorrelation of sea noise

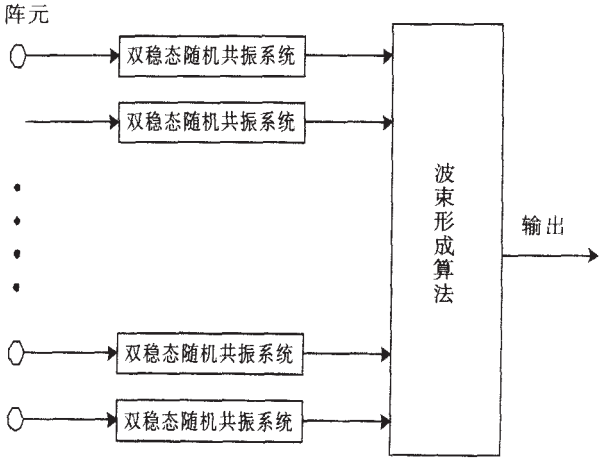


图 3 系统框图

Fig.3 System Diagram

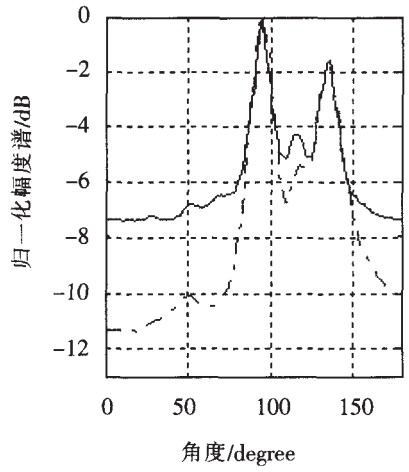


图 4　f_s'=200 时,输出信号的空间谱

Fig.4　Output space spectrum f_s'=200

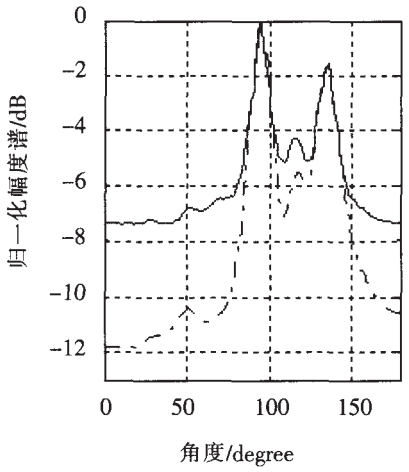


图 5　f_s'=120 时,输出信号的空间谱

Fig.5　Output space spectrum f_s'=120

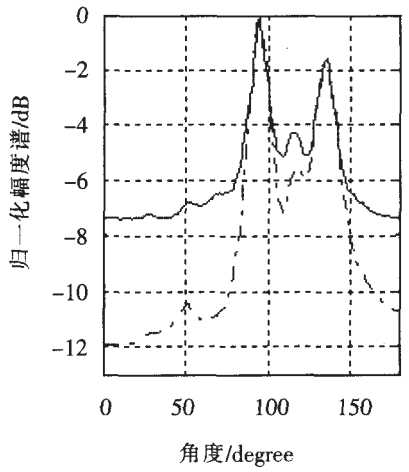


图 6　f_s'=95 时,输出信号的空间谱

Fig.6　Output space spectrum f_s'=95

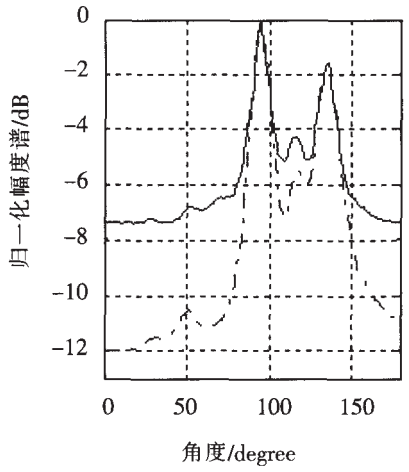


图 7　f_s'=85 时,输出信号的空间谱

Fig.7　Output space spectrum f_s'=85

表 1　95°方向形成波束时,常规方法与 SR 方法输出信噪比对比

Table 1　The comparison of output SNR between classic method and SR method (95° beam)

f_s'	常规方法输出信噪比/dB	SR方法输出信噪比/dB
85	-12.5882	-10.4487
90	-12.5882	-10.4461
95	-12.5882	-10.4394
110	-12.5882	-10.4409
120	-12.5882	-10.4630
150	-12.5882	-10.5828
200	-12.5882	-10.7827

表 2 135°方向形成波束时,常规方法与 SR 方法输出信噪比对比

Table 2 The comparison of output SNR between classic method and SR method (135° beam)

f_s'	常规方法输出信噪比/dB	SR方法输出信噪比/dB
85	-15.4689	-14.9755
90	-15.4689	-15.0130
95	-15.4689	-15.0446
110	-15.4689	-15.0750
120	-15.4689	-15.1066
150	-15.4689	-15.3386
200	-15.4689	-15.5679

由表 1 可以看出,f_s 的取值有一定范围,最小值为使算法不溢出的 f_s 值,这里为 f_{smin}≈85,当 f_s<85 时数值算法已经溢出;f_s 的最大值为能使双稳态系统产生随机共振的最大的 f_s 值,这里 f_{smax}≈150。当 f_s>150,在 135°方向波束形成时,SR 方法的输出信噪比已经低于常规方法的输出信噪比,表明系统没有发生随机共振。

5 结 论

本文使用了频率尺度变换使随机共振方法可以应用于高频信号的情况,并且应用随机共振方法使得多目标波束形成算法的性能得到提高,为低信噪比情况下方位估计问题提供新思路。但是,在参数 a 和 f_s 的选择问题上尚需进一步深入研究,如参数 a 的自适应算法 [6],f_s 与信号频率及信噪比的具体关系等等。

参 考 文 献

[1] 胡岗. 随机力与非线性系统 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1994. 33-227.
HU Gang. Stochastic Force and Nonlinear System[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 1994. 33-227.

[2] 段江海, 宋爱国, 王一清. 随机共振理论在微弱信号检测中的应用研究[J]. 信号处理, 2003, 19(6): 569-572
DUAN Jianghai, SONG Aiguo, WANG Yiqing. Study on application of stochastic resonance theory In weak signal detection[J]. Signal Processing, 2003, 19(6): 569-572.

[3] 冷永刚, 王太勇. 二次采样用于随机共振从强噪声中提取弱信号的数值研究 [J]. 物理学报, 2003, 52(10): 2432-2437.
LENG Yonggang, WANG Taiyong. Numerical research of twice sampling stochastic resonance for the detection of a weak signal submerged in a heavy Noise [J]. ACTA PHYSICA SINICA, 2003, 52(10): 2432-2437.

[4] 李华峰, 鲍荣浩, 徐博候. 应用随机共振进行海洋噪声背景下的信号检测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(5): 640-643.
LI Huafeng, BAO Ronghao, XU Bohou. Signal detection via stochastic resonance under backgroun of sea noise [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2004, 38(5): 640-643.

[5] 叶青华, 黄海宁, 何心怡, 张春华. 利用随机共振技术的微弱信号方位估计 [J]. 声学学报, 2004, 29(4): 369-372.
YE Qinghua, HUANG Haining, HE Xinyi, ZHANG Chunhua. Direction of arrival estimation of weak signals via stochastic resonance[J]. ACTA ACUSTICA, 2004, 29(4): 369-372.

[6] Asdi A S, Tewfik A H. Detection of weak signals using adaptive stochastic resonance [A]. Proceeding of the 1995 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. May 1995: 1332-1335.

[7] Gammaitoni L. Stochastic resonance[J]. Reviews of Modern Physics, 1998, 70(1): 223-287.