

# 一种随机共振联合小波变换的 符号速率估计方法

张 政<sup>1</sup>, 马金全<sup>1,2</sup>

(1. 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学, 河南郑州 450002;  
2. 信号分析与处理国家级实验教学示范中心, 河南郑州 450002)

**摘 要:** 在非合作通信中, 很多情况下由于信道恶化, 使得接收信号的信噪比偏低, 导致无法对符号速率这一重要参数进行准确估计. 随机共振能够在一定程度上利用噪声能量, 使其转移并增强微弱信号, 小波变换则可以有效检测相位和幅度的瞬变, 利用二者各自优势, 提出了一种将随机共振与小波变换联合进行 MPSK (Multiple Phase Shift Keying, 多进制数字相位调制) 和 MQAM (Multiple Quadrature Amplitude Modulation, 多进制正交幅度调制) 信号符号速率的估计方法. 先利用自适应参数调节随机共振为带噪信号匹配最佳系统参数, 之后利用 Haar 小波变换进一步提取突变信息, 不仅弥补了单独使用随机共振效果不佳及其作为非线性系统易发散的缺点, 还降低了小波最佳尺度难以确定的影响. 仿真实验表明, 该方法能够在一定程度上提高输出峰值, 降低信噪比门限, 适合于低信噪比下的符号速率估计.

**关键词:** 微弱信号处理; 符号速率; 参数调节随机共振; 小波变换

**中图分类号:** TN911.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2019)12-2647-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.12.026

## A Symbol Rate Estimation Algorithm Based on Stochastic Resonance Combined with Wavelet Transform

ZHANG Zheng<sup>1</sup>, MA Jin-quan<sup>1,2</sup>

(1. PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China;

2. National Signal Analysis & Processing Experiment Education Demonstration Center, Zhengzhou, Henan 450002, China)

**Abstract:** In non-cooperative communications, due to the deterioration of the channel, the Signal-Noise Ratio (SNR) of the receiving signal is very low in many cases, resulting in the inability to accurately estimate the symbol rate. Stochastic resonance can use noise energy to transfer and amplify the weak signals to some extent, and wavelet transform can effectively detect the instantaneous variation of phase and amplitude of the signals. By using the advantages of both methods, a combination algorithm for estimating the symbol rate of MPSK and MQAM is proposed. First, the adaptive parameter-tuning stochastic resonance is used to match the optimal system parameters for noisy signals, and then the transient information is further extracted by Haar wavelet transform, which not only compensates for the shortcomings of the poor effect of using stochastic resonance alone and its easy divergence as a non-linear system, but also reduce the influence of the optimal scale of the wavelet. The simulation result shows that this method can improve the output peak and reduce the SNR threshold, which is suitable for the symbol rate estimation under low SNR.

**Key words:** weak signal processing; symbol rate; parameter-tuning stochastic resonance; wavelet transform

## 1 引言

在数字通信中, 待传递的信息先转换为比特流, 然后映射为符号序列, 在进行一定方式的调制后发送, 其

中, 符号序列的变化速度称为符号速率. 在非合作通信中, 往往需要对符号速率进行盲估计, 该问题一直是通信信号处理研究领域的“常青树”. B. S. Koh<sup>[1]</sup> 提出了基于模方谱的估计方法, Y. T. Chan<sup>[2]</sup> 提出了小波变换的

方法,之后,各种符号速率估计的新方法不断涌现:<sup>[3-5]</sup>.在信号的信噪比极低情况下,不同算法都会出现一定的性能下降,导致无法准确估计该参数,使信号后续的解调、基带序列恢复等处理步骤无法开展,最终可能致使重要信息丢失.因此,在对微弱信号检测要求不断提高的电子对抗等领域,面对淹没在噪声背景中的目标信号,研究低信噪比下的符号速率估计问题具有重要价值.

随机共振是一种由信号和随机干扰共同作用而导致的非线性系统增强输出的现象,最初对随机共振的研究仅局限于输入为周期信号,之后, JJ Collins<sup>[6]</sup>提出的非周期随机共振(Aperiodic Stochastic Resonance, ASR)和 Xu B<sup>[7]</sup>提出的参数调节随机共振(Parameter-tuning Stochastic Resonance, PSR)被广泛应用<sup>[8-10]</sup>.自适应参数调节随机共振需要利用评价函数来为输入的带噪信号选择最优的系统参数从而完成最佳匹配,但如果采用传统随机共振现象研究中的测度函数<sup>[11]</sup>,则无法应用到没有较多先验信息的复杂未知调制信号中.同时,若只使用随机共振进行预处理,则由于系统具有非线性,容易造成不理想的结果<sup>[12]</sup>.小波变换在对符号速率进行估计时,可以有效检测和提取出信号相位等信息的突变,但最优尺度难以把握,且抗噪声性能有限.随机共振与小波变换的结合为上述问题提供了一定的解决思路,但使用场合多为单频信号或多频信号<sup>[13]</sup>,对于复杂的通信信号研究很少.

MPSK 和 MQAM 是卫星、短波通信等常用的调制样式.在研究了这两类中频数字信号的特点并结合仿真实验后,本文提出了一种随机共振与小波变换联合的方法对符号速率进行估计,首先对接收信号进行自适应参数调节随机共振,将频带外噪声能量最大化转移至带内的目标信号,之后进行 Haar 小波变换,检测能量增强后的信号中的瞬变信息,最后利用 FT (Fourier Transformation) 计算输出的模方谱,确定符号速率.方法采用三个模块连接完成整体架构.该方法可以将随机共振和小波变换这二者的优点进行结合与强化,在噪声被大幅度削减和信号能量增强后,能及时捕捉和提取瞬变特征.

## 2 相关理论背景

### 2.1 基于模方谱的符号速率估计

对于高斯白噪声信道中接收到的 MPSK 和 MQAM, 可表示为:

$$s(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_n C_n g(t - nT_b - t_0) \exp[j(2\pi f_c t + \varphi_c)] \right\} + \Gamma(t), 0 \leq t \leq nT \quad (1)$$

其中,  $\operatorname{Re}$  表示实部,  $C_n = A_n + jB_n$  为符号映射, 相位  $\varphi_n =$

$\tan^{-1}(B_n/A_n) \bmod(2\pi)$ . 对于 MPSK 而言,  $A_n^2 + B_n^2 = S$ , 幅值不携带信息, 对于 MQAM,  $A_n, B_n \in \{2m-1 - \sqrt{M} | m=1, 2, \dots, M\}$ ,  $A_n^2 + B_n^2 = S_n$ , 幅值和相位同时携带信息.  $g(t)$  表示基带脉冲成型,  $T_b$  为符号持续时间, 符号速率  $R_b = 1/T_b$ ,  $t_0$  为信道时延,  $f_c$  和  $\varphi_c$  分别为载波的频率和初始相位.  $\Gamma(t)$  为高斯白噪声.

为简化推导, 令  $t_0$  和  $\varphi_c$  均为 0, 在无噪声条件下进行推导, 则信号包络的平方  $s_e(t)$  可以用下式表示<sup>[1]</sup>:

$$s_e(t) = |s(t)|^2 = s^2(t) + \hat{s}^2(t) = s_1^2(t) + s_0^2(t) \quad (2)$$

其中,  $\hat{s}(t)$  为  $s(t)$  的 Hilbert 变换:

为了提取符号速率参量, 将  $s_e(t)$  进行分解为:

$$s_e(t) = u(t) + n_s(t) \quad (3)$$

$u(t)$  的傅里叶变换为:

$$U(f) = \frac{A+B}{T_b} \sum_l [G(f) * G(f)] \delta(f - \frac{l}{T_b}) \quad (4)$$

其中,  $G(f)$  表示  $g(t)$  的傅里叶变换, 由于  $G(f)$  带限, 因此, 离散谱分量只出现在  $l=0, \pm 1$  时, 相对应于直流分量与符号速率. 而  $n_s(t)$  为自噪声项, 形成的是连续谱. 由此, 对  $s_e(t)$  进行傅里叶变换, 检测单线谱便可以获取符号速率. 则符号速率估计表达式为:

$$\hat{R}_b = \arg \max_f |FT[|s(t)|^2]| \quad (5)$$

由于该算法并没有对信号进行任何预处理, 导致无法对微弱信号进行有效检测.

### 2.2 小波变换

小波变换是一种具有局部优良特性的信号处理工具, 信号的连续小波变换定义为:

$$\begin{aligned} \text{CWT}(k, \tau) &= \int s(t) \psi_k^*(t) dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{k}} \int s(t) \psi_k^*\left(\frac{t-\tau}{k}\right) dt \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $k$  为尺度因子,  $\tau$  为平移因子

Haar 小波由于形式简单, 作用突出, 被广泛使用. 具体推导<sup>[2]</sup>不再赘述, 结论如下: 对于 MPSK 信号, 当小波变换在一个符号周期内时, 其值固定不变, 当相位瞬变时, 小波变换值则会产生一个相应的突变. 同样的, 对于 MQAM 信号, 在相位瞬变时小波变换结果中会出现尖峰, 在幅度瞬变处会发生阶梯跳变. 该降噪提取方法也具有一定的噪声门限.

### 2.3 自适应参数调节随机共振

双稳态系统是一类典型的非线性系统, 可由 Langevin 方程<sup>[14]</sup>表示:

$$\frac{dx}{dt} = ax - bx^3 + s(t) + \Gamma(t) \quad (7)$$

式中  $a$  和  $b$  为双稳态系统的参数,  $s(t)$  为输入信号,  $\Gamma(t)$  是均值为 0、噪声强度为  $D$  的高斯白噪声,  $\langle \Gamma(t) \rangle = 0$ ,  $\langle \Gamma(t)\Gamma(0) \rangle = 2D\delta(t)$ , 其中  $\langle \cdot \rangle$  为时间平均.

在实际无线通信系统中,信号调制样式众多,波形复杂,因此,需要针对不同种类的微弱通信信号研究最佳随机共振方法.本节将利用奇异值分解<sup>[15]</sup>对随机共振的输出进行度量.

假设信号  $s(t)$  通过加性高斯白噪声信道,以采样率  $f_s$  将其采样成离散序列,表达式为:  $y(n) = s(n) + w(n)$ ,其中,  $w(n)$  是均值为零、方差为  $\sigma_w^2$  的高斯白噪声.信号和噪声独立分布.信号的自相关矩阵为

$$\mathbf{R}_{yy} = \mathbf{R}_{ss} + \mathbf{R}_{ww} = \mathbf{V}\mathbf{A}_y\mathbf{V}^H = \mathbf{V}(\mathbf{A}_s + \mathbf{A}_w)\mathbf{V}^H \quad (8)$$

其中,矩阵的阶数为  $m$ ,  $\mathbf{V}$  为正交阵,且

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_s &= \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_p, 0, \dots, 0)_{m \times m} \\ \mathbf{A}_w &= \text{diag}(\sigma_w^2, \sigma_w^2, \dots, \sigma_w^2)_{m \times m} (\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_p) \\ \mathbf{A}_y &= \text{diag}(\lambda_1 + \sigma_w^2, \lambda_2 + \sigma_w^2, \dots, \lambda_p + \sigma_w^2, \sigma_w^2, \dots, \sigma_w^2)_{m \times m} \end{aligned} \quad (9)$$

由此,定义测度函数  $Y$  作为寻优过程中的评价函数:

$$Y = 10 \times \log \frac{\sum_{k=1}^p (\lambda_k - \sigma_w^2)}{m \times \sigma_w^2} \quad (10)$$

### 3 随机共振联合小波变换方法

#### 3.1 系统框架

首先,设计出估计 MPSK 和 MQAM 符号速率的整体系统构成,如图 1 所示.

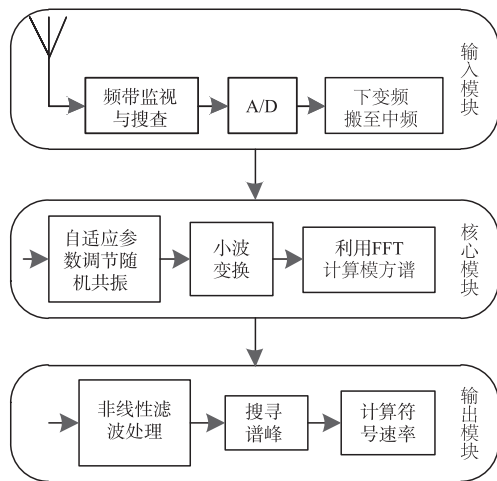


图1 系统框架

整体框架实现了模块化处理,下面进行详细阐述.

#### 3.2 具体方法模块

##### (1) 输入模块

接收机对一定频带范围内的信号进行监视与搜索,将目标射频信号进行 A/D 转换成为数字信号,并进行下变频处理,搬至合适的中频位置,此时,可以在频谱仪中粗略获得载频大小.

##### (2) 核心模块

首先,设计自适应参数调节随机共振模块如图 2 所示:

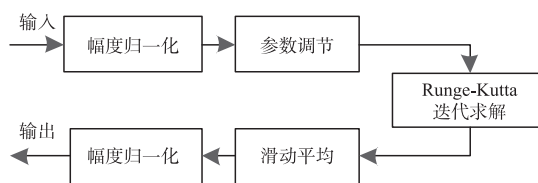


图2 自适应参数调节随机共振框图

该模块分为 5 个处理步骤:

步骤 1:对信号先进行幅度归一化处理;

步骤 2:利用人工鱼群优化算法为输入信号调节最佳系统参数.该算法为本项目的另一个研究方向,此处不做赘述,只阐述其基本流程.具体如下:第一,初始化人工鱼群参数.若信号中频数量级为  $1 \times 10^m$  Hz,则  $a$  的初始寻优范围设定为  $[1 \times 10^{m-1}, 1 \times 10^{m+1}]$ , Visual 设置为  $1 \times 10^{m-1}$ , Step 设置为  $0.5 \times 10^{m-1}$ , Try\_number、 $\delta$ 、GEN、 $M$  等适当选取;第二,利用  $Y$  指标进行评价,筛选当前最优参数;第三,人工鱼依次执行行为函数,不断迭代,更新并记录全局最优参数;第四,当迭代次数达到预设值时,输出当前最优参数.取  $b = a$ .

步骤 3:利用四阶 Runge-Kutta<sup>[14]</sup>方法进行迭代,计算输出;

步骤 4:在实验探索中,发现直接输出的信号会出现幅度漂移的现象,即幅度较小的符号其幅度很不稳定,如图 3 所示,为了克服这个问题,本文提出对信号进行滑动平均,使信号局部中心化,这一过程可用式(11)表示;

$$S(k) = s(k) - \frac{1}{2K+1} \sum_{i=-K}^k s(k+i) \quad (11)$$

其中,  $K$  为滑动长度参数,  $s$  和  $S$  分别代表滑动平均处理前后的信号.

步骤 5:对信号进行幅度归一化,得到最终的输出信号.

其次,利用式(6)对随机共振输出的信号进行 Haar 小波变换,满足  $k < f_s/R_B$  即可,小波尺度最低取 2,但由于随机共振所需的高采样率,可以将尺度适度扩大.此步骤中连续的积分变换采用离散求和实现.

最后,利用式(5),计算信号模平方的傅里叶变换结果,实际中,利用快速傅里叶变换 FFT (Fast Fourier Transformation) 完成.

##### (3) 输出模块

首先,对上一步结果进行非线性滤波处理<sup>[16]</sup>,如式(12),目的是便于程序自动寻找峰值.

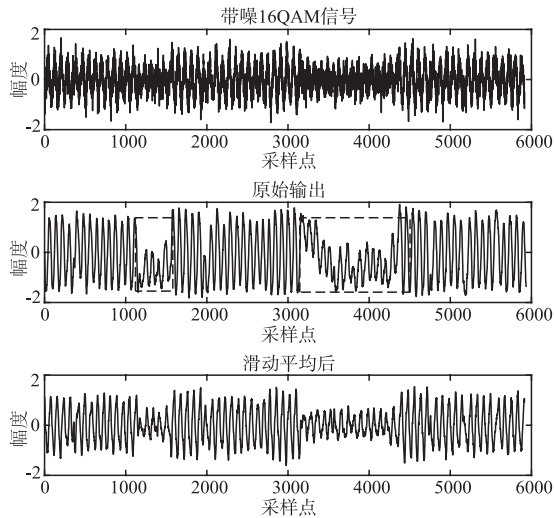


图3 16QAM滑动平均前后对比图

$$Y(k) = \frac{|y(k)|}{\sum_{n=1}^L c(n) |y(k+n)|} \quad (12)$$

其中,  $L$  为均值滤波器长度, 且

$$c(n) = \begin{cases} 1/L, & 1 \leq n \leq L \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

最后, 查找峰值对应的横坐标索引, 计算得到符号速率。

## 4 仿真实验与性能分析

### 4.1 实验 1: 有效性验证

设置信号仿真参数: 码元符号个数  $N$  为 10000, 调制方式 QPSK, 采用升余弦滤波成型, 滚降系数设置为 0.6, 载频  $f_c$  为 1000Hz, 符号速率  $R_b$  为 800Hz, 采样率  $f_s$  为  $2 \times 10^5$  Hz, 将模方谱、小波变换、随机共振、随机共振联合小波变换这四种方法进行对比, 令符号信噪比  $E_s/n_0$  为 6dB, 结果如图 4 所示:

图 4 为四种方法处理后的输出原始图, 图 5 则为采用了抑制背景色噪声的非线性滤波处理得到的输出。可以看到, 利用小波变换或随机共振均可以对模方谱方法进行一定的改善, 但同时噪底也比较强烈, 而采用随机共振联合小波变换的方法则可以较大程度地对谱线进行提升, 同时能够进一步降低背景噪声, 效果显著。

### 4.2 实验 2: 三种预处理方法在低信噪比下的对比

将符号信噪比降低至 4dB, 其余参数不变, 三种采用预处理的估计结果如图 6 所示:

可以看到, 当信噪比进一步降低, 随机共振、小波变换方法的输出谱图中存在较多噪声, 无法准确得到符号速率, 即代表失效, 而采用对应的相同参数的随机共振联合小波变换方法仍然可以准确估计结果, 且谱峰位置明晰。

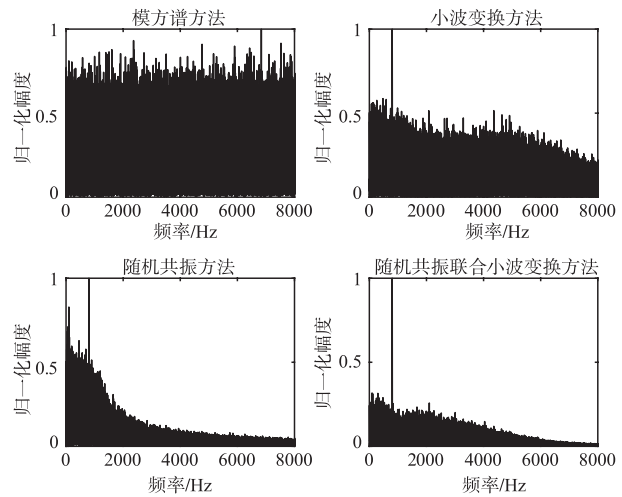


图4 四种方法的输出对比图

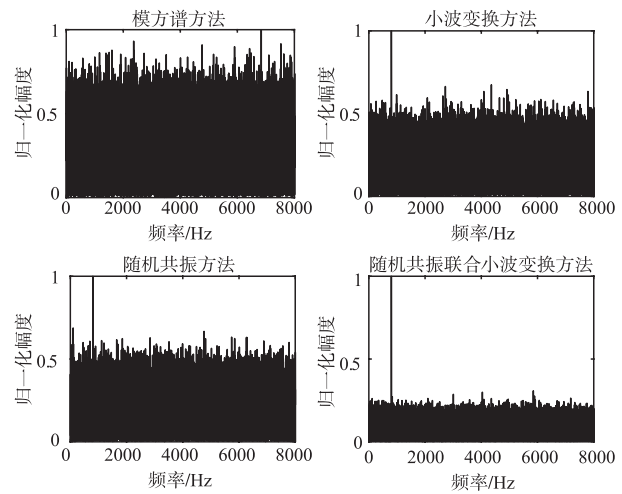


图5 抑制色噪声后的输出对比图

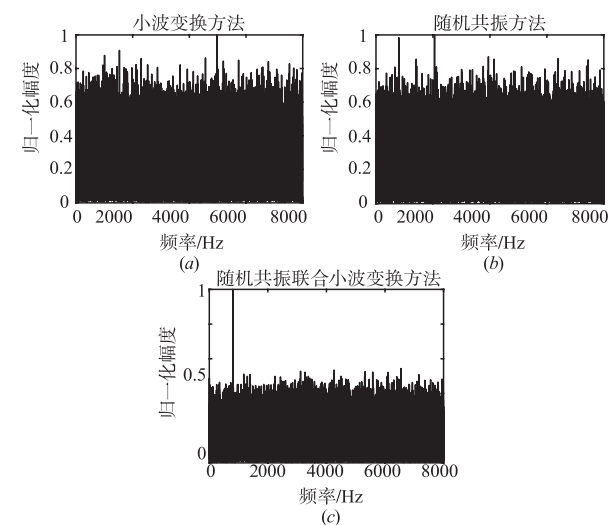


图6 三种预处理方法的输出对比图

### 4.3 实验 3: 误差分析

令  $E_s/n_0$  从  $-5$  dB 递增至  $10$  dB, 其余参数不变, 蒙

特卡洛仿真次数为 100 次,由于可以根据带宽对符号速率进行粗估计,因此在  $[0.5R_B, 1.5R_B]$  范围内寻找峰值.

定义相对误差为  $\frac{|\hat{R}_B - R_B|}{M \times R_B}$ ,  $M$  为仿真次数,绘出符号速率估计的相对误差随信噪比的变化曲线图,如图 7.

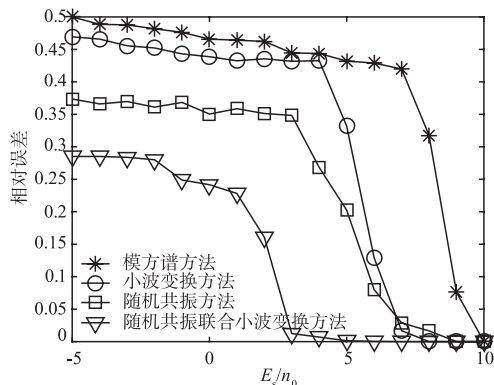


图7 QPSK相对误差随  $E_s/n_0$  的变化曲线图

将信号调制类型设置为 16QAM,其余参数保持不变,结果如图 8 所示.

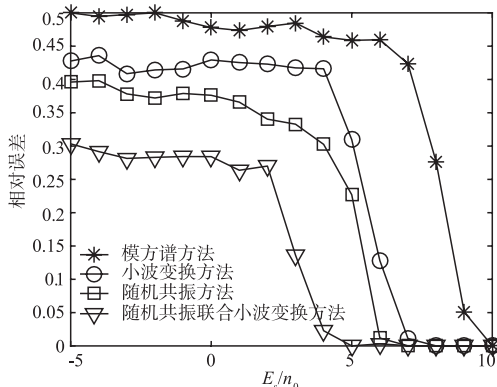


图8 16QAM相对误差随  $E_s/n_0$  的变化曲线图

可以看出,四种方法的相对误差均随着信噪比的提高而不断降低,且均存在一个明显的陡降过程,而随机共振联合小波变换方法最先出现陡降,更重要的是,其相对误差均低于同等噪声条件下的其他方法.

#### 4.4 实验小结

经过仿真验证,对于 MPSK ( $M=2,4,8$ ) 信号,相比于模方谱方法,随机共振联合小波变换方法可将噪声阈值下降最低约 6dB,对于 MQAM ( $M=16,64$ ) 信号,则可以下降最低约 5dB. 联合方法相比于小波变换、随机共振方法而言,抗噪性能也均有较程度的提升. 表 1 列出了四种方法的噪声门限(相对误差小于 0.05 时的最小  $E_s/n_0$ ).

需要说明的是,由于式(14) ( $l$  为过采样率)可知,本实验条件下,当  $E_s/n_0=5$  时,SNR 约为  $-7$ dB,这是由

于仿真中过采样率较高的缘故,因此我们主要关注的是同样噪声条件下门限的下降程度.

表 1 四种方法的噪声门限 ( $E_s/n_0$ )

	BPSK	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM
模方谱	9	10	10	10	11
小波变换	6	7	7	7	7
随机共振	6	7	7	7	7
联合方法	3	3	4	4	6

$$E_s/n_0(\text{dB}) = 10 \log_{10}(l) + \text{SNR}(\text{dB}) \quad (14)$$

此外,在实验过程中,当信噪比略低时,随机共振会存在共振失败的情况,即能量由高频向低频汇聚时大部分转移到零频附近,这是由于系统的非线性导致的,这也是随机共振在应用时无法避免的一个问题,如果单纯用随机共振方法则无法估计符号速率(在统计随机共振方法的噪声门限时已将这奇异值剔除),但在经过小波变换提取跳变信息后,便可以在同样的共振条件下准确估计得到符号速率,表明小波变换能够从不理想的随机共振输出中提取瞬变信息.

## 5 结论

本文结合小波变换和随机共振的各自特点,提出随机共振联合小波变换进行符号速率估计的方法,经过仿真实验验证,在单独使用两种方法都失效的情况下,联合方法在一定的信噪比范围内依然有效,即小波变换能够改善随机共振结果的不理想,随机共振也为小波变换做了有效的增强预处理. 总之,该方法是对符号速率估计的一种新的尝试与拓展,其较模方谱、小波变换、随机共振三种方法均有不同程度的性能提升,为微弱信号处理拓展了思路.

## 参考文献

- [1] Koh B S, Lee H S. Detection of symbol rate of unknown digital communication signals[J]. IEE Electronics Letters, 1993, 29(3): 278 - 279.
- [2] Chan Y T, Plews J W, Ho K C. Symbol rate estimation by the wavelet transform [A]. Proceedings of IEEE ISCAS'97 [C]. Hong Kong: IEEE, 1997. 177 - 180.
- [3] Güner A, Kaya I. Periodic variation method for blind symbol rate estimation [J]. International Journal of Communication Systems, 2015, 27(12): 4199 - 4209.
- [4] 金艳, 田田, 姬红兵. 基于稀疏贝叶斯学习的码元速率估计[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(7): 1598 - 1603. Jin Yan, Tian Tian, Ji Hong-bin. Symbol rate estimation based on sparse bayesian learning [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(7): 1598 - 1603. (in Chinese)

- [5] Liu M, Zhang J, Li B. Symbol rates estimation of time-frequency overlapped MPSK signals for underlay cognitive radio network [J]. IEEE Access, 2018, 6 (99): 16216 – 16223.
- [6] Collins J J, Chow C C, Capela A C, et al. Aperiodic stochastic resonance [J]. Physical Review E, 1996, 54 (5): 5575 – 5584.
- [7] Xu B, Duan F, Bao R, et al. Stochastic resonance with tuning system parameters; the application of bistable systems in signal processing [J]. Chaos Solitons & Fractals, 2002, 13 (4): 633 – 644.
- [8] Kihara R, Yamanashi Y, Yoshikawa N. Power reduction of josephson random access memory using stochastic resonance [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (8): 1 – 4.
- [9] 贺利芳, 曹莉, 张刚. 基于幂函数型随机共振的微弱信号恢复 [J]. 电子学报, 2018, 46 (8): 1906 – 1914.  
He Li-fang, Cao Li, Zhang Gang. Weak signal recovery based on power function stochastic resonance [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46 (8): 1906 – 1914. (in Chinese)
- [10] Liu J et al. A Novel parameter-tuned stochastic resonator for binary PAM signal processing at Low SNR [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18 (3): 427 – 430.
- [11] 孔德阳, 彭华, 马金全. 基于人工鱼群算法的自适应随机共振方法研究 [J]. 电子学报, 2017, 45 (8): 1864 – 1872.  
Kong De-yang, Peng Hua, Ma Jin-quan. Adaptive stochastic resonance method based on artificial-fish swarm optimization [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45 (8): 1864 – 1872. (in Chinese)
- [12] 孔德阳, 彭华, 马金全. 随机共振应用于窄带 PSK 信号处理的研究 [J]. 信号处理, 2017, 33 (5): 721 – 731.  
Kong De-yang, Peng Hua, Ma Jin-quan. Application of stochastic resonance in narrow-band PSK signal processing [J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33 (5): 721 – 731. (in Chinese)
- [13] Han D, Li P, An S, et al. Multi-frequency weak signal detection based on wavelet transform and parameter compensation band-pass multi-stable stochastic resonance [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2016, 70-71: 995 – 1010.
- [14] 杨定新, 胡政, 杨拥民. 大参数周期信号随机共振解析 [J]. 物理学报, 2012, 61 (8): 080501.  
Yang Ding-xin, Hu Zheng, Yang Yong-min. The analysis of stochastic resonance of periodic signal with large parameters [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61 (8): 080501-1 – 080501-10. (in Chinese)
- [15] Ijaz A, Awoseyila A B, Evans B G. Signal-to-noise ratio estimation algorithm for advanced DVB-RCS systems [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2012, 58 (4): 603 – 608.
- [16] 刘双平, 闻翔, 金梁. 一种抑制符号速率估计背景色噪声的非线性滤波算法 [J]. 电子学报, 2007, 35 (1): 95.  
Liu Shuang-ping, Wen Xiang, Jin Liang. A new nonlinear filtering algorithm for colored background self-noise suppressing of symbol rate estimation [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35 (1): 95. (in Chinese)

### 作者简介



**张政** 男, 1995 年生, 陕西宝鸡人. 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学硕士生, 主要研究方向为微弱信号处理等.  
E-mail: zz2018zheng@gmail.com



**马金全** 男, 1975 年生, 甘肃张掖人. 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学与信号分析与处理国家级实验教学示范中心副教授, 主要研究方向为软件无线电、信号分析和处理等.