

基于级联随机共振的窄带信号宽带化接收

侯成郭^{1,2}, 罗柏文¹, 李地²

(1. 解放军信息工程大学 信息系统工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 解放军 69260 部队, 新疆 乌鲁木齐, 830017)

摘要: 为提高传统窄带接收机的解调增益, 提出了基于级联随机共振的窄带信号宽带化接收方法。该方法一方面对接收信号进行随机共振运算, 将信号中的噪声转化为信号能量; 另一方面通过级联方式将接收信号转化为方波信号, 并利用其先验信息构造本地序列进行宽带化相关运算, 最终提高了信号处理增益。理论分析与仿真结果表明, 该方法相比于传统的处理方式, 其信噪比增益提高大于 3 dB, 并且对于接收信噪比为 -7~1 dB 的 QPSK 信号, 其增益提高约为 20 dB。

关键词: 随机共振; 宽带化接收; 级联; 窄带信号; 本地序列

中图分类号: TN918

文献标识码: A

Broadband receiver of narrowband signal based on the cascaded stochastic resonance

HOU Cheng-guo^{1,2}, LUO Bo-wen¹, LI Di²

(1. Information System Engineering Institute, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;

2. Troops 69260 of PLA, Urumqi 830017, China)

Abstract: To improve the demodulation gain of traditional narrowband receiver, a narrowband signal receiving method of broadband based on cascaded stochastic resonance is proposed. On one hand, the noise in the signal is converted to the signal energy by the stochastic resonance operation on the received signal. On the other hand, by cascading stochastic resonance systems, the received signal is changed into square wave signal; and by constructing related sequences with prior information of received signal, the demodulation output has high gain. Theoretical analysis and simulation results show that compared with the traditional approach, this method improves detection performance in terms of SNR by more than 3 dB. And for receiving SNR of QPSK in -7~1 dB, the gain increased is about 20 dB.

Key words: stochastic resonance; broadband receiver; cascaded; narrowband signal; local sequence

1 引言

克服信道噪声是无线通信的重要问题, 传统的通信系统主要通过各种纠错编码和调制手段降低噪声、提高信噪比。随着非线性科学的发展, 随机共振这一物理现象逐步引起广泛的关注, 并已经开始用于降低信道噪声。其主要原理是当系统满足一定条件时会产生随机共振现象, 从而将输入信号中原本无用的噪声能量转化为信号能量, 在削弱噪声的同时大幅增强了信号。这对于“深陷”在信道噪

声中的无线信号无疑会有较好的改善效果。

本文主要讨论如何通过随机共振实现窄带信号的高增益接收。现有的文献研究主要集中于单随机共振系统的信号检测方面, 例如文献[1]讨论了通过随机共振增强频谱感知能力, 等同于增强信号检测能力; 由于随机共振的参数设置较为繁琐, 文献[2]提出一种自适应的双稳态随机共振方法用于频谱感知; 文献[3,4]则通过设计超阈值的随机共振提高频谱感知能力。多个随机共振系统的信号检测的研究, 则主要讨论利用并联、合作式的系统关联方

收稿日期: 2014-10-15; 修回日期: 2015-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60472064, 61201380)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60472064, 61201380)

式提高检测效率，例如文献[5]提出了基于随机共振的合作式频谱感知；文献[6]利用随机共振阵列实现弱信号的检测。对于多种通信信号接收，文献[7]通过超外差方式将随机共振使用于弱信号检测，提高检测精度；文献[8,9]通过基于随机共振的自相关运算检测线谱信号。

可以看出，随机共振理论通过结合其他手段可普遍适用于各类通信信号，但现有研究主要集中在利用随机共振实现信号检测。事实上，本地接收机可在信号检测的基础上，额外利用接收信号的先验信息实现高增益信号接收，同时通过将随机共振系统级联可成倍提高现有单随机共振系统的增益。本文依照该思路，采用级联双稳态的随机共振结合宽带化的本地序列实现高增益的无线信号接收。

2 算法设计

2.1 级联随机共振的宽带化接收算法

令发送端天线输出的信号为

$$x(t, f_c, \varphi_0) = g(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi_0]$$

其中， $g(t) \in \{-1, 1\}$ 为被调制的二进制信息； f_c 为载频； φ_0 为初始相位。经无线信道，接收端收到的信号经过第一混频后的中频信号为

$$y(t) = kx(t, f_0 + \Delta f, \varphi_0 + \Delta \varphi) + n(t) \quad (1)$$

其中， k 为信号幅度； f_0 为中频频率； Δf 为信道造成的频率偏移； $\Delta \varphi$ 为信道造成的相位偏移； $n(t)$ 为加性信道噪声。依照传统通信接收机的工作流程，接收端将信号下变频到中频后，再经过二次混频、低通滤波后得到基带信号。同时对基带信号进行频偏和相偏估计后，调整本地相关信号，对后续信号混频，从而得到更为准确的基带信号。令最终得到的基带信号为

$$y_{c0}(t) = k_c g(t) \cos(2\pi \Delta f_c t + \Delta \varphi_c) + n_c(t) \quad (2)$$

对于窄带信号，当把随机共振系统级联后，输入正弦信号将出现如图 1 所示的变化过程。带有噪声的正弦信号通过第 1 级随机共振系统后，输出波

形中噪声大量减少，并且已经接近方波；经过第 2 级随机共振系统后，输出波形中的噪声波动进一步减少；到第 4 级输出已经变为方波信号。因此在接收窄带信号时，如果预知信号频率等参数，则可在接收端设置方波本地信号，代替传统的正弦本地信号进行相关运算^[10]，从而实现窄带信号的宽带接收。

文中提出基于多级随机共振的下变频处理流程如图 2 所示。中频信号经过本地信号 1 的混频后，下变频到适合随机共振的低频段，经过窄带滤波后的信号为

$$y_{r0}(t) = k_r g(t) \cos[2\pi(f_r + \Delta f)t + \Delta \varphi] + n_r(t) \quad (3)$$

其中， k_r 为信号幅度； f_r 为输入随机共振系统所需要的低频频率； Δf 为信道造成的频偏； $\Delta \varphi$ 为信道造成的相偏； $n_r(t)$ 为加性信道噪声。依照传统理论，随机共振系统可记为

$$\dot{x}(t) = ax(t) - bx^3(t) + y(t) \quad (4)$$

其中， $y(t)$ 为混有随机噪声的正弦驱动信号，该信号在图 2 所示的系统中为 $y(t) = y_{r0}(t) + n_r(t)$ 。系统内部包含多次随机共振系统级联，第 i 次的级联输出信号为 $y_{r0,i}(t)$ 。 $y_{r0,i}(t)$ 也是第 $i+1$ 次级联的输入信号，级联过程的随机共振表示为^[11]

$$\dot{y}_{r0,i+1}(t) = ay_{r0,i+1}(t) - by_{r0,i+1}^3(t) + y_{r0,i}(t) \quad (5)$$

其中， $y_{r0,1}(t) = y_{r0}(t) + n_r(t)$ 。最终随机共振系统的输出信号为 $x_{r1}(t) = y_{r0,N}(t)$ ， N 为级联次数。利用周期为 $T_r = 1/f_r$ 、占空比为 1/2 的方波作为本地信号 2，其表示为 $x_{r2}(t) = \sum_i s_r(t - iT_r)$ 。因此，相关器输出

的本地信号 $x(t) = x_{r1}(t)x_{r2}(t)$ 。频/相偏估计模块根据基带信号的频率和幅度对 $x(t)$ 进行估计，并将估计结果送往窄带滤波器和本地信号 2 模块进行相应的参数调整。随机共振模块左侧的开关用来控制级联过程，当输出信号 $y_{r0,i}(t)$ 的结果与随机共振迭代结果 $y_{r0,i-1}(t)$ 差异小于门限时，即满足如式(6)所示的迭代停止条件时，开关断开，停止当前级联迭代过程。

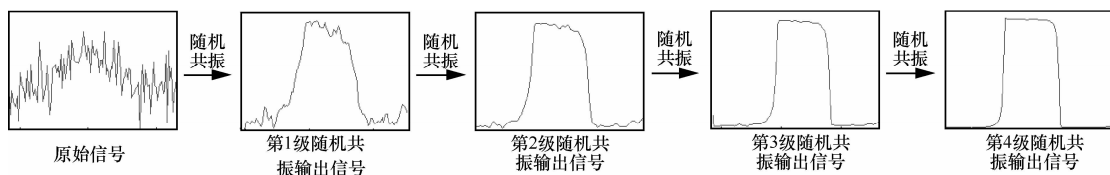


图 1 正弦输入的级联随机共振系统输出

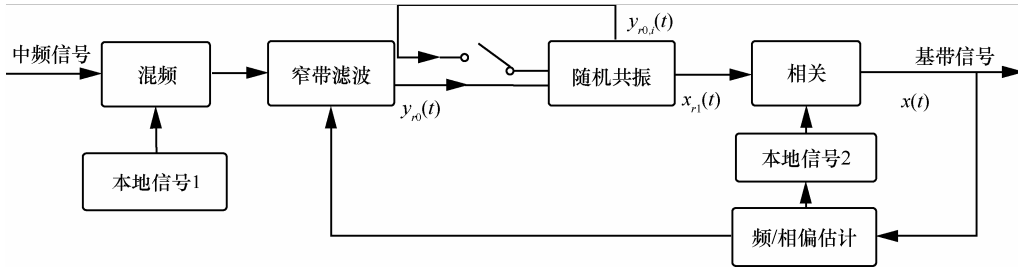


图 2 级联随机共振下变频过程

$$\int \left[\frac{y_{r0,i}(t)}{\bar{y}_{r0,i}(t)} - \frac{y_{r0,i-1}(t)}{\bar{y}_{r0,i-1}(t)} \right] dt \leq \eta,$$

$$\bar{y}_{r0,i}(t) = \int y_{r0,i}(t) dt, \quad \bar{y}_{r0,i-1}(t) = \int y_{r0,i-1}(t) dt \quad (6)$$

2.2 算法参数讨论

随机共振系统的参数设置较为烦琐，对于不同频率的信号，需要配置不同的参数才能触发随机共振过程。为简化随机共振的设计，依据下述定理所描述的随机共振性质，通过改变信号采样频率实现同一参数下的不同信号接收过程。

定理 1 当两信号满足 $Y_1(f) = Y_2(\lambda_F f)$ ，即信号具有相似的频率形式。当以采样频率 f_{s1} 和 f_{s2} 分别对 2 个信号进行采样，并且满足 $f_{s1} = f_{s2} / \lambda_F$ ，则以此采样信号作为输入的数字化随机共振系统输出相同。

证明 已知 $Y_1(f) = Y_2(\lambda_F f)$ ，则

$$|\lambda_F| y_1(t) = y_2(t / |\lambda_F|) \quad (7)$$

依照采样频率 f_{s1} 和 f_{s2} 分别进行采样后的信号分别为 $y_1(i) = y_1(iT_{s1})$ ， $y_2(i) = y_2(iT_{s2})$ 。根据已知条件有， $f_{s1} = f_{s2} / \lambda_F$ ，可得 $T_{s1} = T_{s2} \lambda_F$ 。则采样信号可写为 $y_1(i) = y_1(iT_{s1})$ ， $y_2(i) = y_2(iT_{s1} / \lambda_F)$ 。根据式 (7) 可知 $y_1(i) = y_1(iT_{s1}) = 1 / |\lambda_F| y_2(iT_{s1} / \lambda_F) = 1 / |\lambda_F| y_2(i)$ 。

随机共振的数字化处理过程中，现有实现方式大都采用四阶 Runge-Kutta 算法求解，具体迭代公式为

$$x_{r1}(t_{i+1}) = x_{r1}(t_i) + \frac{k_1}{6} + \frac{k_2}{3} + \frac{k_3}{3} + \frac{k_4}{6} \quad (8)$$

其中， $k_1 = \Delta h [ax_{r1}(t_i) - bx_{r1}^3(t_i) + y_{r0}(t_i)]$ ， $k_2 = \Delta h [a(x_{r1}(t_i) + k_1/2) - b(x_{r1}(t_i) + k_1/2)^3 + y_{r0}(t_{i+1})]$ ， $k_3 = \Delta h [a(x_{r1}(t_i) + k_2/2) - b(x_{r1}(t_i) + k_2/2)^3 + y_{r0}(t_{i+1})]$ ， $k_4 = \Delta h [a(x_{r1}(t_i) + k_3/2) - b(x_{r1}(t_i) + k_3/2)^3 + y_{r0}(t_{i+2})]$ 。

第 i 个系统输入为 $y_{r0}(t_i)$ ，将采样信号 $y_1(i)$ 和 $y_2(i)$ 分别代替 $y_{r0}(t_i)$ ，通过式 (8) 即可得到对应的随机

共振输出 $x_1(i)$ 和 $x_2(i)$ 。因为 $y_1(i) = K y_2(i)$ ，所以输出 $x_1(i) = K' x_2(i)$ 。即 2 个系统输出信号只有幅度上的差异，经调整信号幅度可得到相同的信号输出。定理得证。

因此，在算法实现过程中，首先根据单一频率的窄带信号设置随机共振的参数 a 、 b ，当接收信号的频率升高（或降低）时，依照定理中描述的比例提高（或降低）采样频率，就可在同一随机共振系统下接收不同频率的信号。

3 算法理论分析

3.1 随机共振增益

随机共振增益 $G_1(t)$ 是指在图 1 的处理过程中，单独依靠级联随机共振系统获得的增益。计算时等价于采用传统处理过程的正弦信号 $x_c(t) = \cos[2\pi f_c t + \phi_0]$ 代替本地信号 2 得到的 $x_m(t)$ 的增益。 $x_m(t) = x_{r1}(t)x_c(t)$ 对应的随机共振系统输出为 $x_{r1}(t)$ 、中频信号为 $y(t)$ ， $x_{r1}(t)$ 的计算过程参见式 (5)。根据前述信号表示， $G_1(t)$ 的计算式为

$$G_1(t) = 10 \lg \int_T |x_{r1}(t)x_c(t)| dt = 10 \lg \int_T |y_{r0,1}(t)x_c(t)| dt \quad (9)$$

其中， $\int_T \cdot |dt$ 表示对信号取模后在一个载波信号周期内进行积分。式(9)所描述 $G_1(t)$ 可表示图 2 中随机共振系统将信道噪声转化为信号能量后所获得的增益情况。

3.2 低频展宽的相关接收增益

由于级联的随机共振过程会造成信号的频谱向低频段部分展宽，展宽后的信号与图 2 中所示的本地信号 $x_{r2}(t)$ 进行相关会带来额外的增益，这部分增益定义为低频展宽的相关接收增益，记为 $G_2(t)$ ，计算表示式为

$$G_2(t) = 10 \lg \frac{\int_T |x_{r1}(t)x_{r2}(t)| dt}{\int_T |y_{r0,1}(t)x_c(t)| dt} \quad (10)$$

式(10)的分子表示级联随机共振系统在低频展宽后相关运算的总增益，分母表示级联随机共振的增益，式(10)表示总增益去掉级联随机共振增益后，剩余部分为低频展宽的相关接收增益。根据仿真实验，当随机共振不断级联迭代时，低频段逐步展宽。此时的时域信号从窄带正弦波逐渐向方波转化。因此，级联多次后信号 $x_{r_1}(t)$ 变为方波，而信号 $y_{r_{0,1}}(t)$ 是一次随机共振后的输出，波形基本不发生变化仍为正弦波。在这种情况下，式(9)中若令 $K_1 = \int_T |x_{r_1}(t)x_{r_2}(t)| dt$ 为方波相关计算后的模，则 2 个等幅正弦信号相关计算后的模值 $\int_T |y_{r_{0,1}}(t)x_c(t)| dt = K_1/2$ 。所以根据式(10)， $G_2(t) = 3 \text{ dB}$ ，总增益 $G(t) = G_1(t) + G_2(t) = G_1(t) + 3 \text{ dB}$ 。可以得到结论相对于传统本地正弦波相关解调方式，随机采样带来的增益至少为 3dB。

4 算法仿真分析

为对算法性能进一步分析，采用载频为 500 MHz 的正弦信号，式(5)的随机共振参数设置为 $a=0.1$ ， $b=0.004$ ，分别经过传统的相关接收和级联随机共振接收系统进行处理。当信噪比为 -3 dB 时，级联随机共振系统的处理结果如图所示。图 3(a)是加有 -3 dB 噪声的正弦信号，上部分为时域波形，下部分为频域波形。从时域信号看，较难找到完整的正弦波信号。图 3(b)是经过 7 级随机共振系统级联处理后的信号波形。从其时域波形可以看出，由于级联的随机共振处理会带来频谱展宽，

因此，其时域信号变形为周期方波，周期同接收到的正弦信号。同时由于随机共振的处理会带来较高的增益，其频谱幅度远大于接收到的信号。

图 4 是当输入信号为正弦信号时，在宽带化处理系统中分别采用不同的级联层数，以及在不同的接收信号信噪比 (-7 dB、-5 dB、-3 dB、-1 dB、1 dB) 条件下，对接收信号进行仿真处理所得到的性能曲线。从图中可以看出，对于某一信噪比条件下，不同的级联层次所获得的系统输出信号信噪比不同。当级联次数少于 3 次时，系统的性能随级联次数大幅提升；当级联次数大于 3 次时，系统性能略有下降并逐步趋于稳定。因此可以初步得到结论随机共振系统的级联数量选取 3 级最优，不但可以获得性能上的最佳，并且节省处理环节、降低处理开销。另外对比不同信噪比下的曲线可知，当信噪比较低的情况下，信道条件改善（例如信噪比从 -7 dB 提升至 -5 dB）宽带化接收系统的输出信号可获得较好的性能提升。当信道条件较好时，继续改善信道对系统输出性能的影响不大。这是因为当信道条件较好时，噪声能量低，导致随机化共振只能将很少的噪声转化为信号能量。

根据图 4 中的结论，三级宽带化接收系统的性能较好。因此图 5 中的宽带化处理系统采用三级接收，将不同级的输出信号能量与传统相关接收方法的输出信号能量做对比。从图中可知，宽带化接收系统的一、二、三级输出信号能量均远高于传统相关接收的能量值。当文中的算法采用一级随机共振系统时，等价于现有的典型随机共振算法。因此级联后的性能也高于现有随机共振方法。与图 4 的分

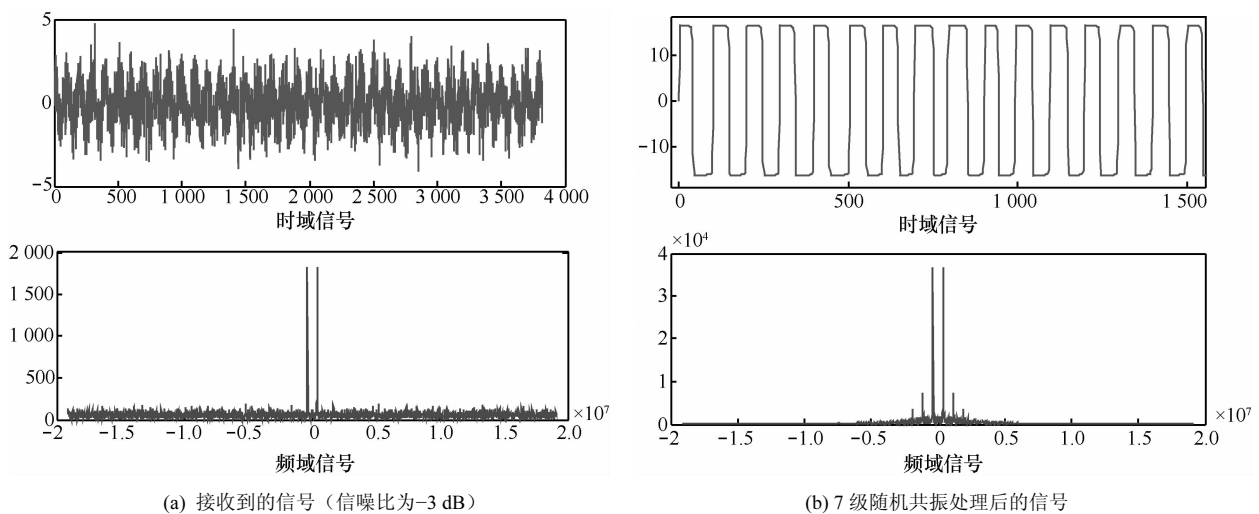


图 3 随机共振处理信号的频谱展宽过程

析类似，当接收信号的信噪比不断提高，系统输出的信号能量增幅减缓。

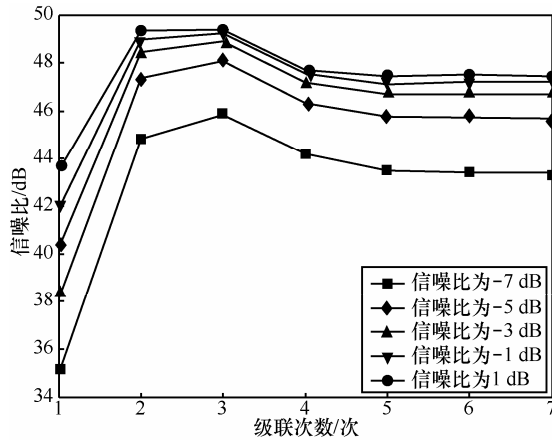


图 4 正弦信号的宽带化处理方法性能

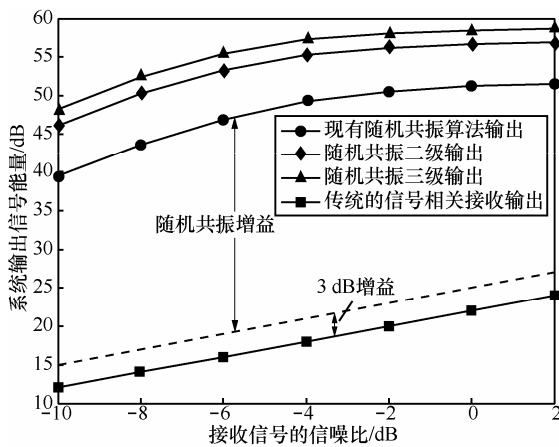


图 5 正弦信号的宽带化处理方法系统增益分布

图 4 和图 5 是在接收信号为单频正弦信号时的处理性能。为进一步分析级联随机共振宽带化系统的性能。设置接收信号为 QPSK 信号，仿真结果如图 6 所示，仿真采用与图 4 相同的信道环境和系统级联次数。图 6 中的曲线走势与图 4 相同，当级联次数为 3 时，系统在几种信噪比条件下的性能均最好。另外与图 4 相比，图 6 输出信号的信噪比整体降低，这是由于调制后的信号降低了随机共振幅度，并进一步影响了频谱拓展，带来了额外的噪声。另外，由于信号调制后会降低随机共振效果，当输入信号质量较好且信噪比提高后（例如从-1 dB 提高到 1 dB 时），系统输出的信号会相对低信噪比时获得更多性能提升。

图 7 是输入信号采用 QPSK 信号时，宽带化处理系统的一、二、三级输出与传统信号相关方式输出信号能量对比。此时系统的一级输出同样等价

于现有典型的随机共振处理方法。明显地，宽带化的处理过程比现有方法具有更高的输出信噪比，但图 6 中的输出信噪比明显低于图 7 中的输出信号能量。这是因为随机共振的过程中不但信号被成倍放大，噪声也同时被放大。图 7 所示的输出信号能量低于图 5 所示的输出信号能量，这是由于经过 QPSK 调制后的信号对随机共振效果造成了一定的影响。

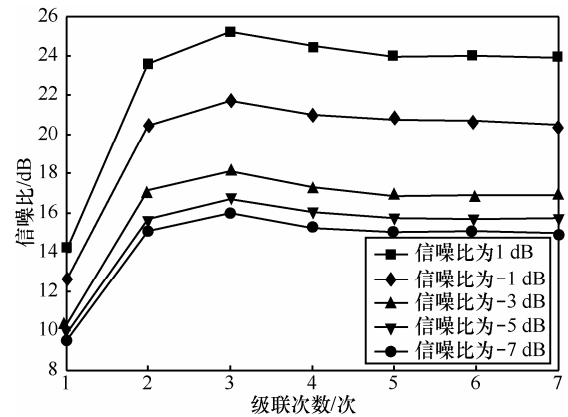


图 6 QPSK 信号的宽带化处理方法性能曲线

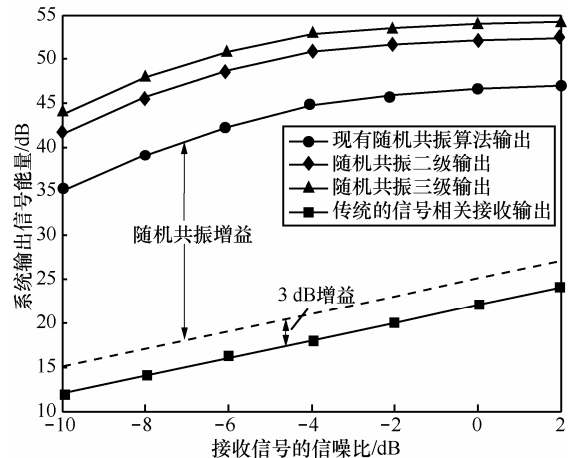


图 7 QPSK 信号的宽带化处理方法系统增益分布

文献[11]研究了随机共振应用于非高斯噪声情况下的信号处理过程。采用图 7 的仿真条件，同时将信道噪声换为非高斯噪声时的算法性能，如图 8 所示。图 8 中“现有随机共振算法”即为文献[11]的算法；最下端的曲线为传统的信号相关算法。从图中可以看出，经过级联、宽带化处理的输出信号能量高于其他 2 种方法。并且图中显示随机共振增益远大于宽带化的 3 dB 增益。对比图 7 和图 8 可知，非高斯噪声会进一步降低信号处理增益。

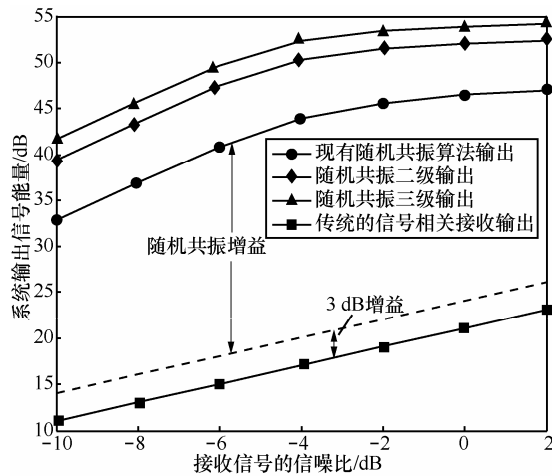


图8 QPSK信号在非高斯噪声下算法的系统增益分布

5 结束语

本文通过设计级联随机共振的宽带化接收机，实现窄带信号的宽带化接收。这种接收方式的增益来源于2个方面。一是级联的随机共振可以将信道中的噪声转化为信号噪声，接收过程中的信号得到放大；而是本地采用方波序列进行相关接收，相对于本地采用载波接收额外获得3 dB的增益。通过理论分析和仿真表明，相对于传统接收机，级联随机共振的宽带化接收机能够获得较高的增益。信号接收过程中往往伴随着衰落、串扰等多种干扰因素，需要在后续的研究中深入分析。

参考文献：

- [1] CHEN W, WANG J, LI H, *et al.* Stochastic resonance noise enhanced spectrum sensing in cognitive radio networks[A]. Proceeding of 2010 IEEE Global Telecommunications Conference[C]. San Diego, CA, USA, 2010.1-6.
- [2] WANG J, REN X, ZHANG S, *et al.* Adaptive bistable stochastic resonance aided spectrum sensing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(7): 4014-4024.
- [3] LI Q, LI Z, SHEN J, *et al.* A novel spectrum sensing method in cognitive radio based on suprathreshold stochastic resonance[A]. Proceeding of 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. London, UK, 2012.4426-4430.
- [4] LI Q, LI Z. A novel sequential spectrum sensing method in cognitive radio using suprathreshold stochastic resonance [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014,63(4):1717-1725.
- [5] LIN Y, HE C, JIANG L, *et al.* Cooperative spectrum sensing based on

stochastic resonance in cognitive radio [J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(2):1-10.

- [6] JIANG Y, ZHAO H. A new weak signal detection method based on stochastic resonance and array sensors [A]. Proceeding of 2013 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS) [C]. Chengdu, China, 2013.287-289.
- [7] SHI S, YIN W, YANG M, *et al.* A high-resolution weak signal detection method based on stochastic resonance and superhettechnology[A]. Proceeding of 2012 7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)[C]. Kunming, China, 2012. 329-333.
- [8] FU Z, XING J, ZHU R, *et al.* A new method of detecting line-spectrum based on auto-correlation with stochastic resonance theory [A]. Proceeding of 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC) [C]. Guiyang, China, 2013.1104-1107.
- [9] ZOU H, ZHENG L, LIU C. Detecting parameters of high frequency signals with frequency modulation [A]. Proceeding of 2013 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP) [C]. Hangzhou, China, 2013.1090-1095.
- [10] DENG H, ZHAO J, LENG Y. Research on the nonlinear square wave filter based on concatenation stochastic resonance[A]. Proceeding of 2011 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)[C]. Wuhan, China, 2011.
- [11] MENG Y, PEI C. Stochastic resonance in a bistable system driven by non-gaussian noise and gaussian noise[A]. Proceeding of 2014 IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications[C]. Ottawa, ON, Canada, 2014.358-361.

作者简介：



侯成郭（1981-），男，山西陵川人，解放军信息工程大学博士生，主要研究方向为通信信号处理、通信物理层技术。



罗柏文（1980-），男，福建福州人，解放军信息工程大学博士生，主要研究方向为天线组阵技术、通信信号处理。



李地（1969-），男，陕西西安人，博士，解放军69260部队总工程师，主要研究方向为通信信号处理。