

Schmitt Trigger 確率共鳴受信機における微弱信号検出の性能評価

千賀 敬太[†] 田中 裕也[†] 山里 敬也[†] 田所 幸浩^{††} 荒井伸太郎^{†††}[†] 名古屋大学 〒464-8603 名古屋市千種区不老町^{††} 株式会社豊田中央研究所 〒480-1192 愛知県長久手市横道 41-1^{†††} 香川高等専門学校 〒769-1192 香川県三豊市詫間町香田 551

E-mail: †chiga@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし 確率共鳴 (Stochastic Resonance:SR) は雑音の増加により信号対雑音比 (SNR) が向上する非線形現象である。確率共鳴を利用することにより、従来の受信機では検出できないような微弱信号を検出できる可能性がある。本稿では確率共鳴を通信システムに応用することを考え、確率共鳴系として Schmitt Trigger を用いた確率共鳴受信機を実装し、その性能評価を行う。実験および数値シミュレーションにより確率共鳴受信機の微弱信号に対する応答を評価し、確率共鳴を用いて検出可能な微弱信号について検討する。

キーワード 確率共鳴, Schmitt Trigger, 微弱信号検出

Performance evaluation of the weak signal detection of the Stochastic Resonance Receiver using Schmitt Trigger

Keita CHIGA[†], Hiroya TANAKA[†], Takaya YAMAZATO[†], Yukihiro TADOKORO^{††}, and Shintaro ARAI^{†††}[†] Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, JAPAN^{††} TOYOTA Central R&D Labs., Inc., 41-1 Yokomichi, Nagakute, Aichi, 480-1192, JAPAN^{†††} Kagawa National College of Technology, 551 Kohda, Takuma-cho, Mitoyo, Kagawa, 769-1192 JAPAN

E-mail: †chiga@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

Abstract Stochastic Resonance(SR) is a nonlinear phenomena in which the Signal-to-Noise Ratio(SNR) is enhanced by an increase of the noise. By using SR, we can detect the weak signal which cannot detect by the conventional receiver. In this paper, we consider the application of SR to the communication systems. we implement the Stochastic Resonance Receiver using Schmitt Trigger as the Stochastic Resonance system. We evaluate the performance of the weak signal response and we discuss about the weak signal detection.

Key words Stochastic Resonance, Schmitt Trigger, Weak Signal Detection

1. はじめに

無線通信においては通信路や送信電力の制約から受信機が検出できないほど受信信号が小さくなる場合がある。このように受信機の感度以下となった場合には情報を伝送することができない。しかし、確率共鳴を利用することにより、このような微弱信号を受信できる可能性がある [1]。

確率共鳴は系が応答できないような微弱な信号に対して適切な雑音を加えた場合にその応答が高まる現象である [2]。確率共鳴が生じる系 (確率共鳴系) および線形系の雑音強度対出力 SNR 特性を図 1 に示す。線形系では雑音強度が増加するとその出力 SNR は減少するが、確率共鳴系では適切な雑音を与える

ことにより出力 SNR が高まることが知られている。確率共鳴は Benzi らにより地球の気候変動の説明に用いられて以来 [3]、ザリガニの触覚 [4] などの生体系、Schmitt Trigger 回路をはじめとした電子回路 [5] など、さまざまな分野でみられることが分かっている。

確率共鳴を通信システムに応用することは以前から検討されており、コグニティブ無線におけるスペクトルセンシングに確率共鳴を用いる手法が提案されている [6]。また、代表的な確率共鳴系である双安定ポテンシャル系について双極パルス受信機および BFSK 受信機に応用した場合の特性評価がなされている [7][8]。また、BFSK 受信機においては、複数ユーザにおいても同様に確率共鳴が適用可能であることがシミュレーション

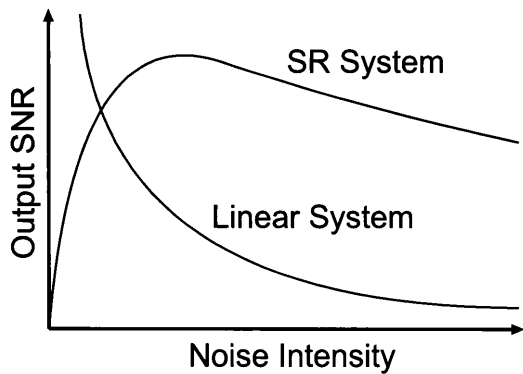


図1 確率共鳴特性.

により示されている [9]. さらに, BFSK 信号に対しては, 双安定系を電子回路に置き換え, 回路シミュレータを用いることによってもその有効性が示されている [10]. これらの受信機の特徴としてしきい値下の微弱信号を検出可能であるという点が挙げられる. しかし, 具体的にどれだけ微弱な信号を検出可能であるかについては未だ検討されていない.

本稿では確率共鳴を利用した受信機 (確率共鳴受信機) への適用を考慮し, 確率共鳴系の微弱信号検出性能の評価を行う. Schmitt Trigger を用いた場合について, そのしきい値と入力信号振幅の関係に着目する. Schmitt Trigger のしきい値を一定とした場合についてシミュレーションおよび実機実験によりその検出性能を評価し, Schmitt Trigger のしきい値に対して検出可能な信号振幅を検討する. また, 信号振幅の減少に対応して Schmitt Trigger のしきい値を小さくした場合に検出可能な信号振幅を検討する.

2. 提案受信機の構成

本稿では受信信号は従来の受信機の感度以下の微弱なものを想定する. 従来の受信機では図 2 のように感度 η_{RX} 以下の信号を検出することができないとする. 受信機の出力 $y(t)$ はその入力 $r(t)$, 感度 η_{RX} として

$$y(t) = \begin{cases} r(t) & (|r(t)| \geq \eta_{RX}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

とモデル化することができる. これに対し提案システムではこのような受信感度以下の微弱な信号を用いた通信の実現を考える.

確率共鳴を適用した受信機 (確率共鳴受信機) の構成を図 3 に示す. 確率共鳴受信機では従来の受信機の前段に確率共鳴系を挿入し, 微弱信号を検出する. 送信信号 $s(t)$ に通信路雑音 $n_c(t)$ が加えられた受信信号 $r(t)$ に確率共鳴系の応答が最適となるように故意に内部雑音 $n_{SR}(t)$ を加える. 通信路雑音 $n_c(t)$ は AWGN, 内部雑音 $n_{SR}(t)$ は平均 0 のガウス雑音とし, $n_{SR}(t)$ は送信信号 $s(t)$ に加えられる雑音の電力のみを調整するものとする. よって, 確率共鳴系には送信信号 $s(t)$ に通信路雑音 $n_c(t)$ および内部雑音 $n_{SR}(t)$ が加えられた $r'(t)$ が入力される.

$$r'(t) = s(t) + n_c(t) + n_{SR}(t) \quad (2)$$

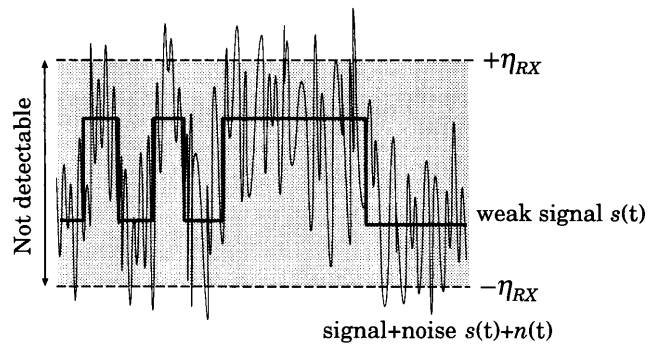


図2 受信機の感度と微弱信号.

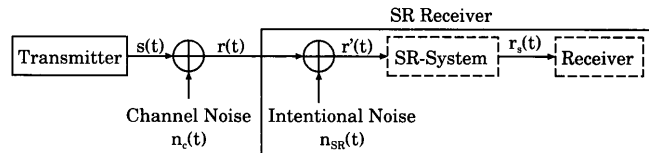


図3 確率共鳴受信機の構成.

本システムモデルではこのように雑音を利用して感度以下の微弱信号による通信の実現を目指す.

本稿ではこの確率共鳴受信機を実装し実験を行うが, そのためには確率共鳴系を実装する必要がある. 確率共鳴はこれまで様々な系でみられることが分かっているが, その代表的なものとしてしきい値系 [11] や双安定系 [5] がある. しきい値系, 双安定系を実現する回路としてはそれぞれコンパレータ回路, Schmitt Trigger 回路が挙げられる. コンパレータ回路と Schmitt Trigger 回路とで確率共鳴特性を比較した場合, Schmitt Trigger 回路の方が高い出力 SNR が得られることが実験的に示されている [12]. このことから, 本稿では Schmitt Trigger 回路を確率共鳴系として用いる.

Schmitt Trigger は確率共鳴を実現する回路の一つとして知られている [12]. Schmitt Trigger の入出力特性とオペアンプを用いた構成例をそれぞれ図 4, 図 5 に示す. Schmitt Trigger はヒステリシスをもつコンパレータであり, 二値の出力 $\pm V_m$ と 2 つのしきい値 $\pm \eta_{SR}$ をもつ. 図 5 の回路において, しきい値 η_{SR} は以下の式で求められる.

$$\eta_{SR} = \frac{R_1}{R_2} V_m \quad (3)$$

ここで, V_m は Schmitt Trigger の出力電圧の最大値である.

本稿で提案する確率共鳴受信機において, Schmitt Trigger のしきい値 η_{SR} は従来の受信機の感度 η_{RX} より小さいとする ($\eta_{SR} \leq \eta_{RX}$). 理想的な Schmitt Trigger の場合, 信号 $r(t)$ を入力した場合の Schmitt Trigger の出力 $r_s(t)$ は以下の式で表される.

$$r_s(t) = V_m \text{sgn}(r'(t) - \eta_{SR}) \quad (4)$$

ここで, V_m は出力電圧の最大値, である. また, r_s は信号 $r(s)$ が入力されたときの出力の値である.

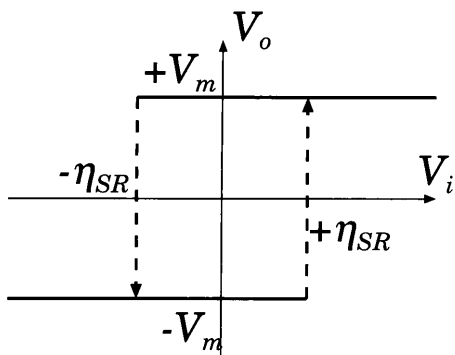


図4 Schmitt Triggerの入出力特性.

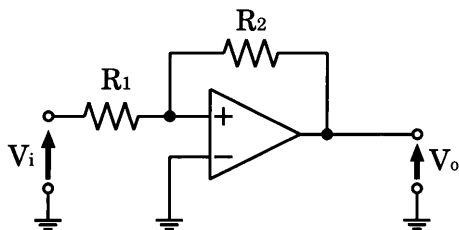


図5 Schmitt Triggerの構成例.

3. 数値シミュレーションおよび実験

確率共鳴受信機では微弱信号を用いて通信できる可能性があるが、その微弱信号の検出限界を評価する必要がある。本稿では Schmitt Trigger のしきい値を一定として入力信号振幅を減少させた場合、および信号振幅-しきい値比 α を一定として入力信号振幅を減少させた場合について、出力 SNR により評価する。確率共鳴受信機の検出限界を評価するために、数値シミュレーションおよび実験を行う。

確率共鳴における微弱信号検出性能を信号対雑音比 (Signal-to-Noise Ratio:SNR) により評価する。SNR は下記の式により定義する。

$$SNR = \frac{S(\omega_s)}{S_N} \quad (5)$$

ただし、 $S(\omega_s)$ は信号周波数における電力スペクトル、 S_N は信号周波数まわりにおける平均雑音電力スペクトルである。

数値シミュレーションにおいて、Schmitt Trigger は式 (4) で示される理想的な Schmitt Trigger の特性とした。

実験に用いた測定系を図 6 に示す。実験において Schmitt Trigger は Texas Instrument 社のオペアンプ LM7171 を用いて構成した。信号発生器 (Agilent Technologies 社製 33250A) により生成した周波数 1200Hz の正弦波信号を信号 $s(t)$ とする。通信路雑音 $n_c(t)$ および内部雑音 $n_{SR}(t)$ は同一とみなし、信号発生器 (Agilent Technologies 社製 33250A) により生成し、Schmitt Trigger に入力する。生成した雑音 $n(t)$ は平均 0 のガウス雑音であり、低域通過フィルタ (Low Pass Filter:LPF) により 10.7MHz に帯域制限する。Schmitt Trigger からの出力 $r_s(t)$ を AD 変換器 (Thinknet 製 DF-4000) によりサンプリング周波数 25MHz でサンプリングする。サンプリングは一回の試行ごとに 500 周期分行う。サンプリングされたデータの信号

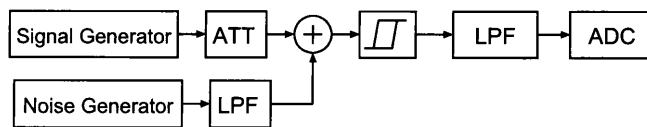


図6 測定系.

表1 しきい値を一定とした場合の諸元.

雑音平均	0
雑音帯域 [MHz]	10.7
信号振幅 A [mV]	10,1,0.1,0.01
信号周波数 [Hz]	1200
しきい値 η_{SR} [mV]	80
サンプリング周波数 f_s [MHz]	25
FFT サンプル数	2^{22}
試行回数	5

周波数成分の電力および雑音電力より出力 SNR を求め、5 回の試行の平均をとる。

まず、Schmitt Trigger のしきい値に対して確率共鳴が利用できる信号振幅がどの程度であるのかをシミュレーションおよび実機実験により評価する。次に信号振幅を減少させると同時にしきい値を下げていった場合に検出可能な信号振幅について、シミュレーションおよび実機実験により評価する。

3.1 しきい値を一定とした場合

Schmitt Trigger のしきい値を一定とした場合に確率共鳴系が検出可能な信号振幅を検討するために実験および数値シミュレーションを行う。Schmitt Trigger のしきい値を一定として入力信号振幅を変化させた場合の SNR 特性を評価する。数値シミュレーションおよび実験の諸元を表 2 に示す。

Schmitt Trigger のしきい値 $\eta_{SR} = 80\text{mV}$ とし、信号振幅を 10mV, 1mV, 0.1mV, 0.01mV と減少させて評価を行った。Schmitt Trigger のしきい値と信号振幅との比はそれぞれ 18dB, -38dB, -58dB, -78dB である。

数値シミュレーション結果を図 7 に示す。図より、すべての結果において確率共鳴による SNR のピークがみられる。また、そのピークにおける SNR の値は信号振幅が減少するにつれ減少することがわかる。この結果から、信号振幅 0.01mV 程度まで確率共鳴がみられることがわかる。よって、理想的な Schmitt Trigger を用いた場合は、

$$20 \log \frac{0.01\text{mV}}{80\text{mV}} \approx -78\text{dB} \quad (6)$$

であるので、Schmitt Trigger のしきい値 $\eta_{SR} = 80\text{mV}$ に対しておよそ 78dB 小さい信号においても確率共鳴がみられることがわかる。

実験結果を図 8 に示す。図より、振幅 $A = 0.01\text{mV}$ の場合を除き、確率共鳴による SNR のピークがみられる。また、そのピークにおける SNR の値は信号振幅が減少するにつれ減少することがわかる。よって、今回構成した Schmitt Trigger を用いた場合は

$$20 \log \frac{0.1\text{mV}}{80\text{mV}} \approx -58\text{dB} \quad (7)$$

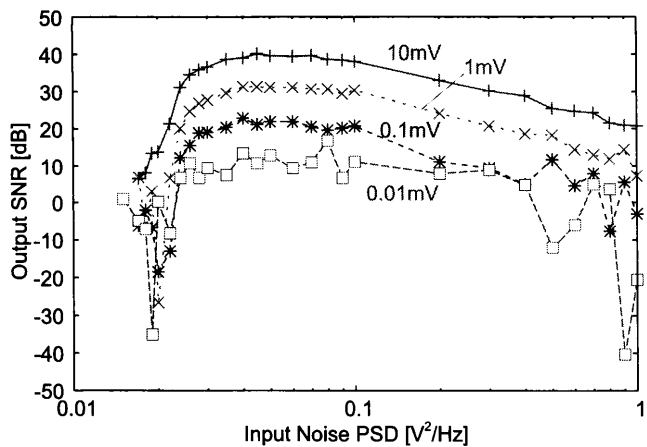


図7 しきい値を固定とした場合のシミュレーション結果

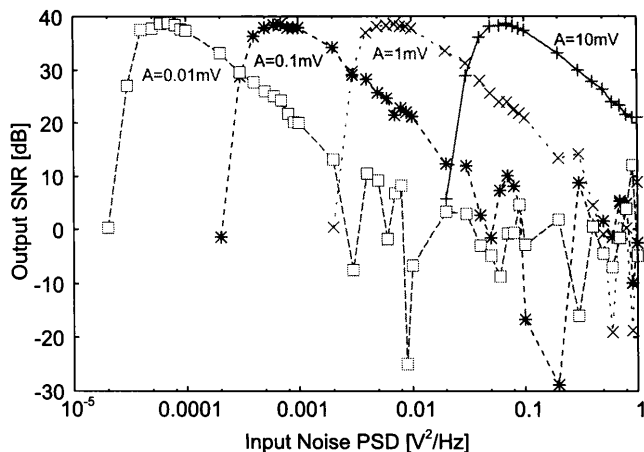


図9 α を一定とした場合の数値シミュレーション結果.

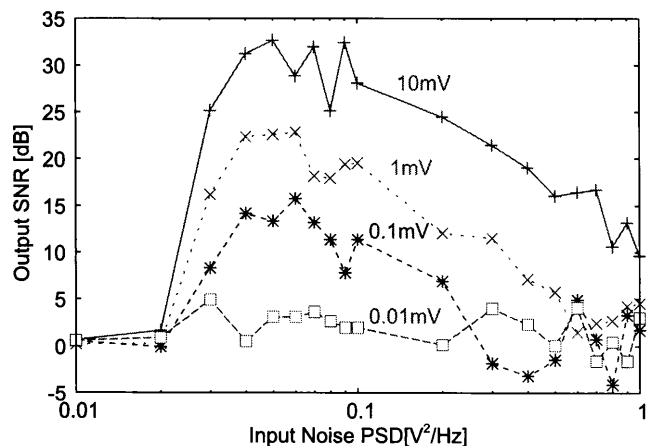


図8 しきい値を固定とした場合の実験結果.

表2 α を一定とした場合の実験諸元.

雑音平均	0
雑音帯域 [MHz]	10.7
信号振幅 A[mV]	10, 1
信号周波数 [Hz]	1200
信号振幅-しきい値比 α	1/10
サンプリング周波数 f_s [MHz]	25
FFT サンプル数	2 ²²
試行回数	5

および 1mV の場合について評価を行った。実機実験による SNR 特性および数値シミュレーションによる SNR 特性を図 10 に示す。図中の実線が実験結果、点線が数値シミュレーションによる結果である。実験結果において、入力雑音 PSD は雑音を生成するために用いた信号発生器からの雑音電力を示す。図 10 より、信号振幅 A=10mV の場合には実験および数値シミュレーションにおいて確率共鳴によるピークが見られる。また、SNR がピークをとる入力雑音 PSD の値はシミュレーションよりも実機実験の方が小さい。信号振幅 A=1mV の場合にはシミュレーションにおいて確率共鳴のピークが見られるが、実験においてはピークが見られず、入力雑音 PSD が小さい場合でも高い SNR となっている。

図 11 に入力雑音 PSD を 0.001V²/Hz の場合の Schmitt Trigger の出力波形を示す。この図より、信号発生器から与えた入力雑音 PSD が小さいにも関わらず入力信号が取り出せていることがわかる。これは Schmitt Trigger の内部雑音や測定機器からの雑音によるものだと考えられる。これらの雑音の PSD を測定するために、信号発生器から信号および雑音を与えない場合の雑音 PSD を測定した結果、およそ 0.002V²/Hz であった。これは図 10 での振幅 A=10mV におけるシミュレーションと実機実験の SNR のピークのずれとほぼ一致している。

4. むすび

確率共鳴受信機の検出限界を検討した。理想的な Schmitt Trigger を用いた場合にはそのしきい値に対しておよそ-78dB 程度小さい信号であっても確率共鳴がみられることが分かっ

であるので、Schmitt Trigger のしきい値に対しておよそ 58dB 小さい信号においても確率共鳴がみられることがわかる。

3.2 信号対しきい値比 α を一定とした場合

しきい値を一定とした場合、信号振幅が減少するにしたがって確率共鳴が生じるために必要な雑音電力が大きくなるために特性が劣化する。これに対して、信号振幅を減少させると同時に Schmitt Trigger のしきい値も同様に減少させることを考える。このため、信号振幅-しきい値比 α を以下のように定義する。

$$\alpha = \frac{A}{\eta_{SR}} \quad (8)$$

信号はしきい値以下とし、 $\alpha < 1$ であるとする。この信号-しきい値比 α を一定として信号振幅を減少させた場合の検出限界を評価する。

α を一定とした場合の数値シミュレーション結果を図 9 に示す。数値シミュレーションにおいては信号振幅を減少させても確率共鳴によるピークが現れ、その最大 SNR は変化しなかった。また、SNR が最大となる入力雑音 PSD は信号振幅が小さくなるにつれて小さくなった。このことから、理想的な Schmitt Trigger を用いた場合には α を一定とすることで、振幅に関わらず微弱信号を検出することが可能であることが分かる。

実験の諸元を表 2 に示す。実機実験において信号振幅は 10mV

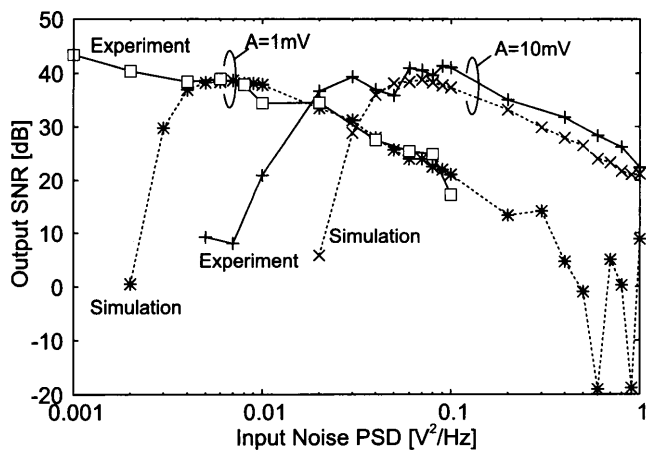


図 10 α を一定とした場合の SNR 特性.

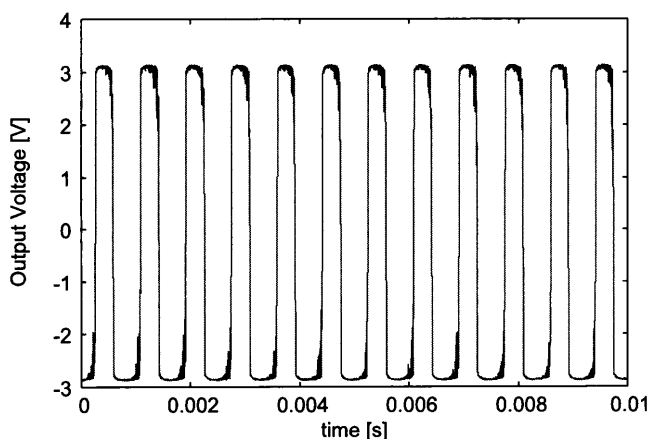


図 11 入力雑音 PSD0.001V²/Hz の場合の出力電圧波形.

た。また、実機を用いた場合においても、そのしきい値に対して-58dB 程度小さい信号であっても確率共鳴がみられることを示した。

さらに、より小さい信号を検出するために信号振幅-しきい値比 α を一定とした場合の特性を評価した。信号振幅-しきい値比 α を一定とした場合においては従来の受信機では検出できないような感度以下の微弱信号を検出できる可能性がある。

謝辞 日頃熱心にご指導頂く、名古屋大学エコトピア科学研究所教授片山正昭先生、准教授岡田啓先生、助教授小林健太郎先生に深く感謝する。

文 献

- [1] L.Gammaitoni, P.Hanggi, P.Jung, and F.Marchesoni, "Stochastic resonance," *Reviews of Modern Physics*, Vol.70, No.1, pp.223-287, Jan.1998.
- [2] B.McNamara, K.Wiesenfeld, "Theory of stochastic resonance," *Phys.Rev.A*, vol.39, No.9, pp.4854-4869, Oct.1988.
- [3] R.Benzi, A.Sutera, and A.Vulpiani, "The mechanism of stochastic resonance," *Phys.A:Math, Gen*.1981.
- [4] J.K.Douglass, L.Wilkens, E.Pantazelou, and F.Moss, "Noise enhancement of information transfer in crayfish mechanoreceptors by stochastic resonance," *Nature*, vol.365, No.6444, pp.337-441, 1993.
- [5] S.Fauve, F.Heslot, "Stochastic resonance in a bistable system," *Phys.lett.*, vol 97, pp5-7, 1983.
- [6] D.He, C.He, "A Novel Spectrum-Sensing Technique in Cognitive Radio Based on Stochastic Resonance," *IEEE*

Trans.Vehicular Technology, vol.59, No.4, May.2010.

- [7] 田中裕也, 山里敬也, 荒井伸太郎, " 確率共鳴を用いたバイポーラパルス受信機についての基礎検討," 電子情報通信学会 総合大会, A-2-35, p.79, 2012 年 3 月
- [8] H.Tanaka, T.Yamazato, and S.Arai, "Preliminary Study on BPSK Receiver using Stochastic Resonance," *Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing*, pp.64-67, Hawaii, USA, Mar.1012.
- [9] 田中裕也, 山里敬也, 荒井伸太郎, " 確率共鳴を用いた 2 ユーザー BPSK 受信機 の特性評価," 電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ大会, A-2-2, p.25, 2012 年 9 月.
- [10] 千賀敬太, 田中裕也, 山里敬也, 荒井伸太郎, "Schmitt Trigger 回路を利用した確率共鳴 BPSK 受信機," 電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ大会, A-2-1, p.24, 2012 年 9 月.
- [11] N.G.Stocks, "Suprathreshold Stochastic Resonance in Multilevel Threshold Systems," *Phys.Rev.Lett.*, Vol.84, No.11, pp.2310-2323, Mar.2000.
- [12] G.P.Harmer, B.R.Davis, "A Review of Stochastic Resonance:Circuits and Measurement," *IEEE Trans. Instrumentations and measurement*, vol.51, No.2, pp.299-309, Apr.2002.