

# BPSK と OOK における確率共鳴受信機の誤り率特性評価

Performance Evaluation of Stochastic Resonance Receiver in BPSK and OOK Modulations

田中裕也<sup>1</sup> 千賀敬太<sup>1</sup> 山里敬也<sup>1</sup> 田所幸浩<sup>2</sup> 荒井伸太郎<sup>3</sup>  
 Hiroya TANAKA Keita CHIGA Takaya YAMAZATO Yukihiro TADOKORO Shintaro ARAI

名古屋大学<sup>1</sup> 株式会社 豊田中央研究所<sup>2</sup> 香川高等専門学校<sup>3</sup>  
 Nagoya University TOYOTA Central R&D Labs., Inc. National Institute of Technology, Kagawa College

## 1 背景と目的

確率共鳴 (SR) 系は雑音に対して系の応答が改善される特性を持つ。確率共鳴系を受信機に適用することにより、従来の受信機では検出すらできない受信感度以下の信号を受信できる可能性がある [1]。

これまでに、変調方式が確率共鳴受信機の通信品質に与える影響について十分な議論はされてこなかった。そこで本稿では、確率共鳴との親和性の高い BPSK と OOK における確率共鳴受信機の誤り率特性を評価する。

## 2 システムモデル

システムモデルを図 1 に示す。送信信号は BPSK 信号  $s^{\text{BPSK}}(t)$  または OOK 信号  $s^{\text{OOK}}(t)$  のいずれかを想定する。BPSK 信号のデータ系列  $d_i^{\text{BPSK}} \in \{-1, +1\}$ 、OOK 信号のデータ系列  $d_i^{\text{OOK}} \in \{0, 1\}$  として、各信号を以下に示す。

$$s^{\text{BPSK}}(t) = \sum_i d_i^{\text{BPSK}} \psi(t - iT_b). \quad (1)$$

$$s^{\text{OOK}}(t) = \sum_i d_i^{\text{OOK}} \psi(t - iT_b). \quad (2)$$

ここで、 $i$  は時刻を表すインデックス、 $T_b$  はシンボル継続時間、 $\psi(t)$  は  $0 \leq t < T_b$  では  $\psi(t) = 1$ 、それ以外では  $\psi(t) = 0$  の矩形波を示している。

通信路では平均 0、分散  $\sigma_c^2$  のガウス雑音  $n_c(t)$  が加わる。このとき、受信信号は  $A$  を受信信号レベルとして

$$r(t) = As(t) + n_c(t), \quad (3)$$

となる。受信信号レベルは受信感度以下とし、従来の受信機では復元できない。確率共鳴系では、受信信号にさらに雑音を加え受信感度下の信号の復元する。故意に加える雑音を平均 0、分散  $\sigma_{SR}^2$  のガウス雑音  $n_{SR}(t)$  とする。

確率共鳴を発現するデバイスとして Comparator を用いる。このときの素子の閾値  $\eta$  を受信感度と等価なものとして扱う。すなわち、 $A < \eta$  の関係が成り立つと仮定する。また、デバイス入力を  $r_{SR}(t)$  とすると、 $r_{SR}(t) > \eta$  のとき、 $+V$  を出力し、それ以外のときは  $-V$  を出力する。

次に、Comparator 出力をシンボルあたり  $N$  回サンプルしてサンプル和  $y_i$  を得る。このとき、信号を正しく復号するためには  $N$  を大きくとる必要がある。判定では、判定閾値を設定して各変調信号に対しデータを復元する。このとき、誤り率は以下のように求められる。

$$\text{BER}^{\text{BPSK}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\eta - A}{\sqrt{2(\sigma_c^2 + \sigma_{SR}^2)}} \right) \right\}^N + \frac{1}{2} \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\eta + A}{\sqrt{2(\sigma_c^2 + \sigma_{SR}^2)}} \right) \right\}^N \right] \quad (4)$$

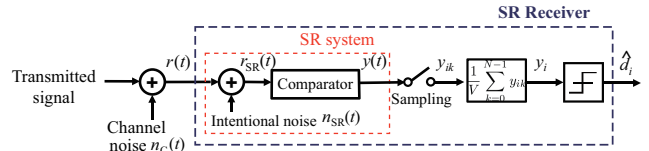


図 1 システムモデル。

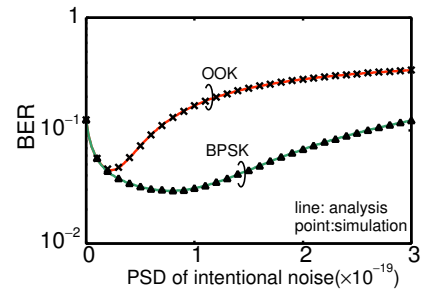


図 2 確率共鳴受信機の誤り率特性。

$$\text{BER}^{\text{OOK}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\eta - A}{\sqrt{2(\sigma_c^2 + \sigma_{SR}^2)}} \right) \right\}^N + \frac{1}{2} \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\eta}{\sqrt{2(\sigma_c^2 + \sigma_{SR}^2)}} \right) \right\}^N \right] \quad (5)$$

## 3 数値例

図 2 に、OOK 信号または BPSK 信号を受信したときの Comparator を用いた確率共鳴受信機の誤り率特性を示す。このとき、通信路雑音の電力密度スペクトル  $\text{PSD}_c = 4.1 \times 10^{-21}$  W/Hz、シンボル継続時間  $T_b = 1.0$   $\mu\text{V}$ 、受信信号レベル  $A = 1.0$   $\mu\text{V}$ 、受信感度  $\eta = 1.1$   $\mu\text{V}$ 、シンボルあたりのサンプル数  $N = 5$  とした。図において、横軸は故意に加えた雑音の PSD、縦軸は誤り率 (BER) であり、プロットがシミュレーション結果、実線が解析結果をそれぞれ示している。

図において、シミュレーション結果と解析結果は OOK 信号と BPSK 信号のどちらを受信した場合においても完全に一致している。また、両者の誤り率特性の違いは、信号電力が OOK の方が小さいためである。さらに解析結果として、両者の違いは各式の二項目における  $\eta + A$  (BPSK) と  $\eta$  (OOK) の違いに依ることが分かる。

## 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科教授片山正昭先生、准教授岡田啓先生、助教小林健太郎先生に深く感謝する。本研究の一部は、科研費 26630174 の助成を受けて行われたものである。

## 参考文献

[1] 田中裕也, 千賀敬太, 山里敬也, 田所幸浩, 荒井伸太郎, “受信感度以下の双極パルスを想定した確率共鳴受信機の受信感度向上率限界の導出” 電子情報通信学会 総合大会, A-2-15, p. 40, Mar. 2014