

# 雑音による非線形性の緩和の OFDM 受信機への応用

小松 和暉\*

## Application of Noise-assisted Nonlinearity Relaxation to OFDM Receiver

Kazuki KOMATSU\*

現代のデジタル無線通信において、アナログ・デジタル変換器の量子化ビット数は大きくなればなるほど通信速度の向上につながるが、一方で消費電力の増加が大きな問題になる。我々は、この問題に対する解決策として確率共鳴現象に注目している。特に、本研究では直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) 信号に対して1ビットのアナログ・デジタル変換器を用いる1ビット OFDM 受信機を研究の対象として、理論解析及び実機実験の両面から研究を行ったので、その結果を報告する。

### 1. はじめに

アナログ・デジタル変換器 (Analog to Digital Converter: ADC) の消費電力は、量子化ビット数を上げるごとに指数関数的に増加し、無線通信システムの消費電力の増加という問題になっている。そのため、多数のアンテナを用いる MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) において、低分解能な ADC が注目を集めているが、量子化誤差が増大するという欠点が存在する。低分解能の ADC のような非線形システムのビット誤り率 (Bit Error Rate: BER) の改善手法として、図1のように入力に雑音を付与することによって非線形性を緩和させ、システムの応答を向上させる確率共鳴現象が研究されている。本研究では、周波数にかかわらず電力スペクトル密度が一定である白色雑音を用いた1ビット直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) 受信機における BER の改善効果を理論解析し、またソフトウェア無線機により実証したため、その報告をする。

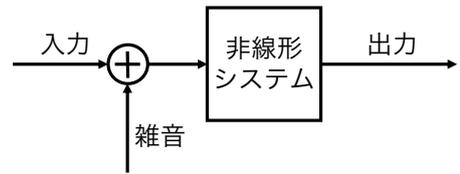


図1 確率共鳴系1ビット OFDM 受信機。

### 2. 確率共鳴現象と1ビット OFDM 受信機

図2に、確率共鳴現象を利用して1ビットの ADC を用いて OFDM 信号を受信するシステムを示す。ここで、 $x[n]$ を受信する OFDM 信号とし、 $z[n]$ を受信雑音とすると、二つの1ビット ADC からの出力の和である  $y[n]$  は以下のように記述できる。

$$y[n] = Q(\text{Re}\{x[n] + z[n]\}) + jQ(\text{Im}\{x[n] + z[n]\})$$

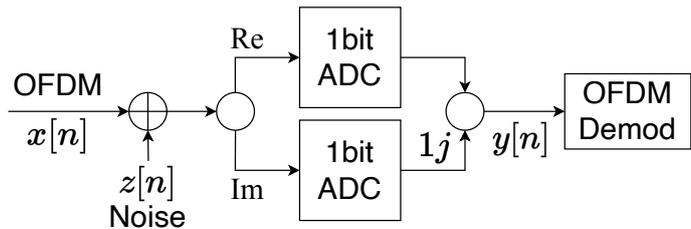


図2 確率共鳴系1ビット OFDM 受信機。

ここで、 $Q(x)$ は1ビット ADC の伝達関数であり、 $x \geq 0$ において $Q(x) = +1$ であり、 $x < 0$ においては $Q(x) = -1$ である。図2に示す通り、このシステムでは1ビット ADC の入力に雑音 $z[n]$ を付与することで確率共鳴現象を発生させ、1ビット ADC からの非線形ひずみの影響を減少させる。ここで、雑音の電力が小さいときには確率共鳴現象は発生しないためこのシステムの性能は悪くなってしまふ。一方で、雑音の電力が大きすぎる場合には、その雑音により多数のビット誤り率が発生する。したがって、雑音の電力の大きさにはある最適値が存在することがわかる。

### 3. 確率共鳴系1ビット OFDM 受信機におけるビット誤り率の理論解析 (1)

我々は、前節に示した図2の OFDM 受信機におけるビット誤り率を理論的に解析する手法を考案した。この理論は、2次元正規直交ラゲール多項式による一般フーリエ級数展開の性質を用いたものである。この理論を用いると、図2の OFDM 受信機におけるビット誤り率は、以下の式で記述できることがわかる。

$$BER = \int_{-0.5}^{0.5} P_b \left( \frac{S_L(f)}{S_D(f) + S_N(f)} \right) df$$

ここで、 $\lambda$ を受信信号と雑音の全電力の和に対する受信信号の電力比、 $S_u(f)$ を受信信号の電力スペクトル密度、 $W_z$ を雑音の帯域幅、 $B(\cdot; \cdot)$ をベータ関数とすると、 $S_L(f)$ と $S_D(f)$ と $S_N(f)$ の定義は以下の通りである。また、 $P_b(\cdot)$ はシングルキャリアシステムにおけるビット誤り率特性である。

$$S_L(f) = \frac{2}{\pi} \lambda S_u(f)$$

$$S_D(f) = \sum_{p=3,5,\dots}^{\infty} \frac{2^p}{\pi^{2p}} B\left(\frac{p}{2}, \frac{p}{2}\right) \lambda^p S_u^{*p}(f)$$

$$S_N(f) = \frac{1}{W_z} \sum_{p=1,3,\dots}^{\infty} \frac{2^p}{\pi^{2p}} B\left(\frac{p}{2}, \frac{p}{2}\right) (1 - \lambda^p) + \frac{1}{W_z} \left( 1 - \sum_{p=1,3,\dots}^{\infty} \frac{2^p}{\pi^{2p}} B\left(\frac{p}{2}, \frac{p}{2}\right) \right)$$

#### 4. ソフトウェア無線機 USRP における実機実験 (2) (3)

ソフトウェア無線機である USRP X310 を用いて送受信した OFDM 信号に対し、ソフトウェア上で雑音の付与と 1 ビット量子化を施す。オーバーサンプリング率 (Oversampling Ratio: OSR) が 2 倍, 4 倍, 8 倍, 16 倍, 32 倍の場合において、ビットあたりのエネルギー対雑音密度比 ( $E_b/N_0$ ) を -2 dB から 22 dB まで変化させながら所望信号の BER を測定した。OFDM 信号の有効サブキャリア数は 256, 搬送波周波数は 2.45 GHz, サンプリングレートは 10 MHz で一定とした。

一次変調方式が QPSK の場合の BER の測定結果を図 3 に示す。右側の矢印は、雑音を付与しない場合の BER を示す。また、実験結果をプロットで、前節で記述した理論解析による結果を線で示している。OSR を 32 倍にしたとき、入力に雑音を付与することで、雑音を付与しないときと比較して BER を最大で 34 分の 1 に改善できた。OSR が 8 倍, 16 倍, 32 倍の場合で確率共鳴が発現し、 $E_b/N_0$  が 14 dB 以上では雑音の増加に伴って BER が単調に改善し、OSR が大きいほどより改善した。 $E_b/N_0$  が 14 dB で OSR が 32 倍のときに BER が  $6 \times 10^{-4}$  となり、試行したパラメータの中では最も改善した。さらに、実機実験により得られた BER と理論解析結果がよく一致した。

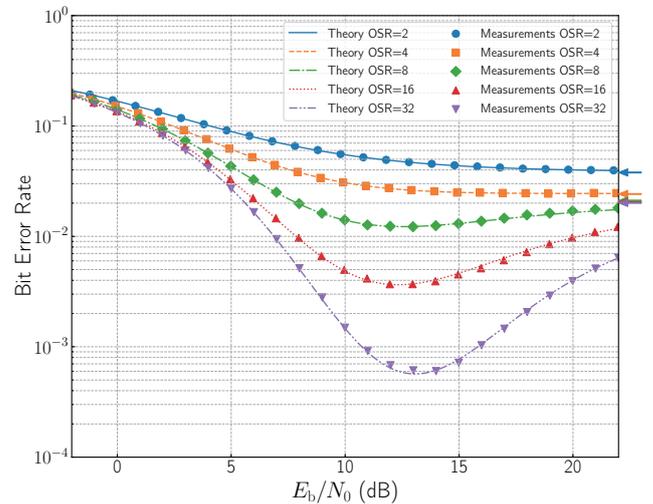


図3 1ビットOFDM受信機におけるビット誤り率特性。

#### 5. おわりに

本研究では、1 ビット量子化器を用いる OFDM 受信機において、雑音を付与することで確率共鳴現象を発生させ、ビット誤り率を改善するシステムについて、理論解析と実機実験による研究を行った。研究の結果、理論解析結果と実機実験で得られた結果はよく一致することが示された。今後は、確率共鳴に利用する受信雑音の周波数特性などの最適化によって、さらなるビット誤り率の改善が可能かどうかを理論と実機実験の両面から研究を進める予定である。

#### REFERENCES

- 1) K. Komatsu, Y. Miyaji and H. Uehara, *TechRxiv*, 2024.
- 2) 市川涼太, 柄澤幸太郎, 山本魁世, 小松和暉, 上原秀幸, *信学総体* (2024) B-5B-51.
- 3) R. Ichikawa, K. Komatsu and H. Uehara, *will be submitted to IEICE Transactions on Communications*, 2025.