

LDPC 誤り訂正符号による多値変調波非線形歪劣化の改善効果について

日大生産工(学部) ○城山 裕希
日大生産工 田中 将義

1 はじめに

通信路上での雑音、干渉や増幅器での非線形歪等の影響によりデータ伝送時に誤りが発生する。そこで、送信側で元のデータに冗長符号を加えて受信側で誤りを検出・訂正する必要がある。この符号化方式を前方誤り訂正

(FEC: Forward Error Correction)という。

近年では、高速移動体通信、衛星デジタル・TV放送の標準規格 DVB-S2⁽¹⁾、無線 LAN (IEEE802.11n)等に LDPC(Low Density Parity Check)符号が使用されている。

本研究では、まず初めに付加的白色ガウス雑音(AWGN)下で線形動作時において、低密度パリティ検査誤り訂正(LDPC)符号と他の FEC のビット誤り率特性(BER: Bit Error Rate characteristic)を評価し、LDPC 符号の誤り訂正能力を評価した。

次いで、16QAM 多値変調波を電力増幅器(HPA)の高効率動作が期待できる非線形領域において、出力バックオフ(OBO)量と BER 特性の関係を評価し、非線形動作時の最適な動作点を明らかにした。この結果、LDPC 符号の適用により非線形歪による伝送特性の劣化が改善し、多値変調波の高効率増幅が可能である見通しを得たので報告する。

2 多値変調通信システムの概要

2.1 ワイヤレス通信システム

ワイヤレス通信システムの構成を Fig.1 に示す。

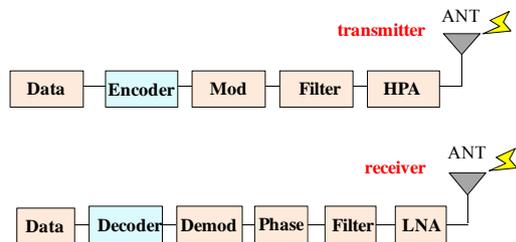


Fig.1 Configuration of wireless communications system.

送信側では、デジタル信号を符号化(Encoder)し、変調(Mod)を行う。その後、フィルタ(Filter)で送信波形を整形し、HPA で電力増幅し送信する。

受信側では、低雑音増幅器(LNA)で受信信号を増幅し、フィルタで再度フィルタリングを行い、信号点の位相回転を位相器(Phase)で補償する。その後、復調(Demod)・復号(Decoder)し、デジタル信号を取得する。

2.2 電力増幅器の入出力特性と効率

HPA の消費電力は、送信機の全消費電力に占める割合が大きいため、HPA の低消費電力化が重要である。

Fig.2 に HPA の入出力特性と電力効率を示す。効率は線形領域では低く、非線形領域にいくにつれて高くなる。HPA に高い線形性が要求される場合、出力バックオフ(OBO)をする結果、電力効率が低下する。

したがって、非線形歪による伝送特性の劣化を補償することが可能であれば、高効率動作を実現できる。⁽²⁻⁷⁾

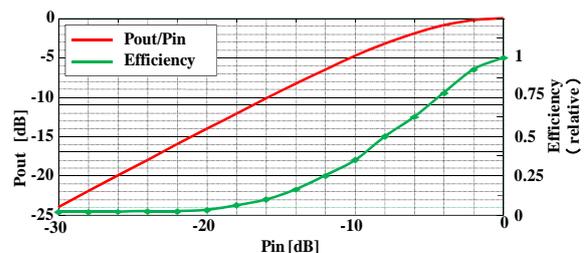


Fig.2 HPA characteristics and power efficiency.

2.3 非線形歪の影響

Fig.3(a)に送信側の16QAM 多値変調の信号点配置を示し、Fig.3(b),(c)に受信側の線形動作(OBO=9.0dB)と非線形動作時(OBO=0.9dB)の信号点配置を示す。

Fig.4 は線形・非線形動作時のビット誤り率(BER) 特性を示したものである。

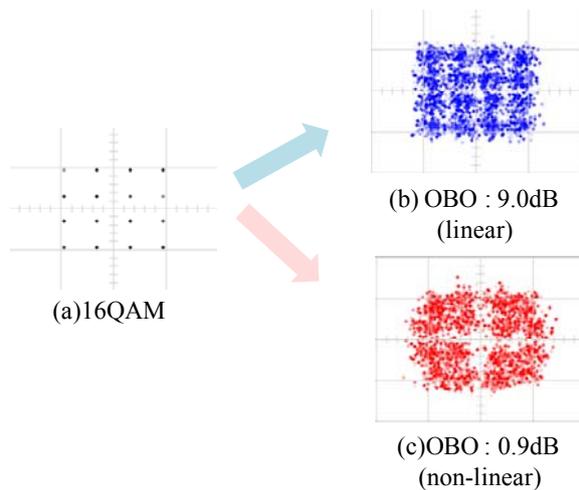


Fig.3 Influence of non-linear effect on signal constellation

非線形動作時には、各信号点が大きく変動するため、伝送特性が劣化し、BERが増加する。線形動作時に比べて、遥かに誤り率が悪く、このままでは使用に適さない。そこで、LDPC符号を適用し、誤り率を改善する検討を行った。

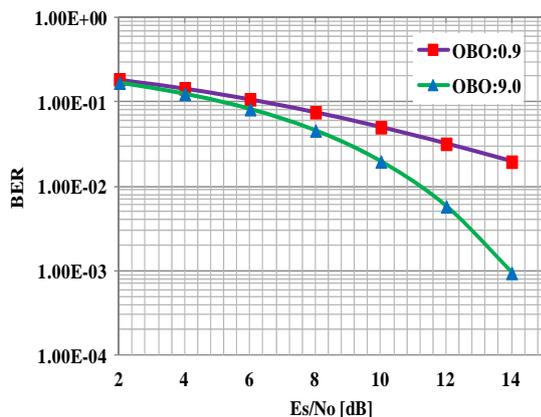


Fig.4 Comparison of BER performance between linear and non-linear (uncoded).

3 低密度パリティ検査誤り訂正(LDPC)符号

3.1 概要

LDPC符号は、高い誤り訂正能力(高い符号化利得)を持ち、Fig.5ように多くの0とわずかな1から成る疎なパリティ検査行列 H で定義される線形ブロック符号である。今回は、標準規格 DVB-S2⁽¹⁾に基づき、Table 1,2のような32400行64800列のパリティ検査行列 H を用いた。列32401~64800は下三角の行列を作成し、主対角要素とその直下の副対角要素のみが1である。また、復号には Sum-Product 復号法を用いた。⁽⁸⁻⁹⁾

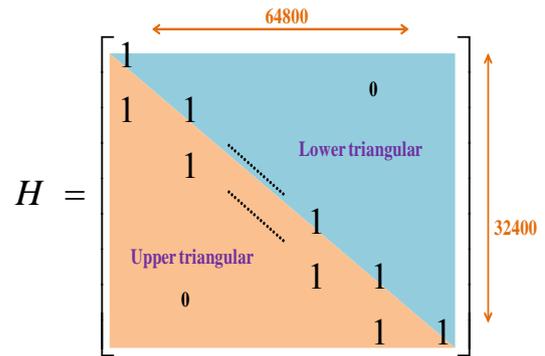


Fig.5 Parity check matrix.

Table1 Number of one per row in parity check matrix

Row	Number of one per row
1	6
2~32400	7

Table2 Number of one per column in parity check matrix

Column	Number of one per column
1~12960	8
12961~32400	3

3.2 原理

3.2.1 二部グラフ表現

Fig.6はパリティ検査行列 H を二部グラフ(タナグラフ)で表したものである。

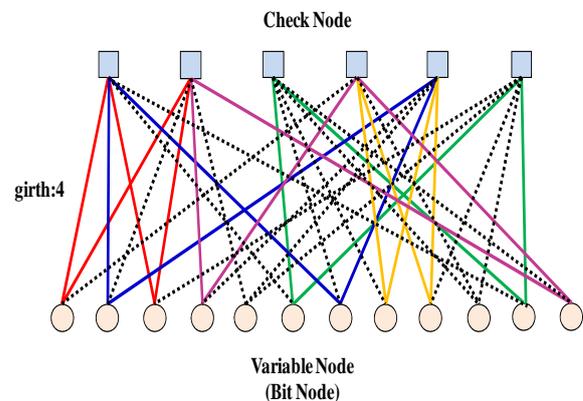


Fig.6 Tanner graph:(12,6).
column weight :3,row weight :6

四角のチェックノードがパリティ検査行列 H の行、丸の変数ノードがパリティ検査行列 H の列に対応している。

また、Fig.6 の例は、ループ (始点のノードへ同じエッジを1度も通過せずに戻ってくるパスの最小値)を実線で表し、列重み3、行重み6、内径4とした。

3.2.2 Sum-Product 復号法

Sum-Product 復号法のアルゴリズムを Fig.7 に示す。

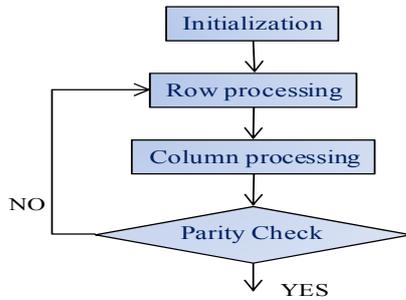


Fig.7 Sum-product algorithm.

まず、初期化し、(1)式より対数尤度比 λ_i (LLR)を求める。ここで、 y_i は受信シンボル、 x_i は送信符号シンボルである。

$$\lambda_i = \log \frac{P(y_i | x_i = 0)}{P(y_i | x_i = 1)} \quad (1)$$

その後、行処理・列処理を行い、パリティ検査条件「 $\mathbf{H} \cdot (\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_n)^T = 0$ 」(\mathbf{H} : パリティ検査行列、 $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_n$: 符号化された信号)が成り立つならば、推定語として出力し、満足しない場合には、行処理に戻り繰り返し上記処理を行う。

そのため、高い訂正能力を持つ反面、復号処理に時間がかかるという欠点がある。

4 多値変調波の BER 特性評価

LDPC 符号の他に、Turbo product code(TPC)と畳み込み符号(Convolution)の3種類の符号を用い、誤り訂正能力を比較した。LDPC 符号において、誤り訂正の繰り返し回数を変化させ、誤り訂正能力を比較した。

更に、16QAM 多値変調において、HPA を高効率で動作させるために非線形領域の種々の OBO 点において FEC 適用時の BER 特性を評価し、最適な OBO を決定し、LDPC 符号の効果を検討した。

4.1 線形動作時の特性

4.1.1 LDPC 符号と他の FEC の性能比較

Fig.8 に誤り訂正符号として「LDPC 符号」、

「TPC」、 「畳み込み符号」を用いた時の線形動作時の BER 特性の比較を示す。誤り訂正符号なしも示している。

その結果、LDPC 符号が最も改善効果が高く、Shannon limit(ex.符号化率 1/2 のとき 0.19dB)に近い特性があり、他の誤り訂正符号よりも非常に高い誤り訂正能力があることを示している。

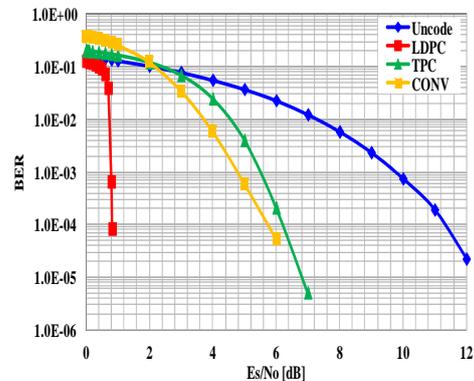


Fig.8 BER performance with error-correcting codes.

(Mod:QPSK,code rate:1/2,linear)

4.1.2 繰り返し回数による BER 特性比較

Fig.9 は誤り訂正の繰り返し回数を 1, 10, 30, 50 と変化させた場合について、BER 特性の評価を示したものである。

その結果、繰り返し回数の増加につれて誤りは改善され、繰り返し回数が 30 回で飽和に近づいている。

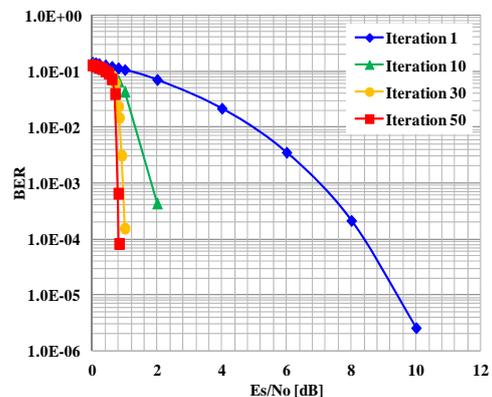


Fig.9 BER performance as a function of number of iterations.

(Mod:QPSK,code rate:1/2,linear)

4.2 非線形動作時の特性

4.2.1 OBO の変化による BER 特性

HPA の高効率領域での動作時において、OBO を変化させた時の BER 特性を Fig.10 に示し、OBO=4.0 [dB]の時の信号点配置図を Fig.11 示す。

高効率動作させるために出力バックオフ(OBO)を小さくするにつれて、誤り率は劣化するが、LDPC符号の誤り訂正能力により劣化の程度が小さく、特性が改善している。また、Fig.11に示すように非線形動作時で信号点が大きく変動しても、LDPC符号の誤り訂正能力により、線形動作時と同程度の誤り率特性を得ることができ、LDPC符号は、非線形歪の補償に有効であることが分かった。

以上の検討結果から、線形特性からの劣化量を0.5 dB程度に抑え、かつ高効率動作させるためには、OBO=2.0~4.0 [dB]が適当な動作点あることが分かった。

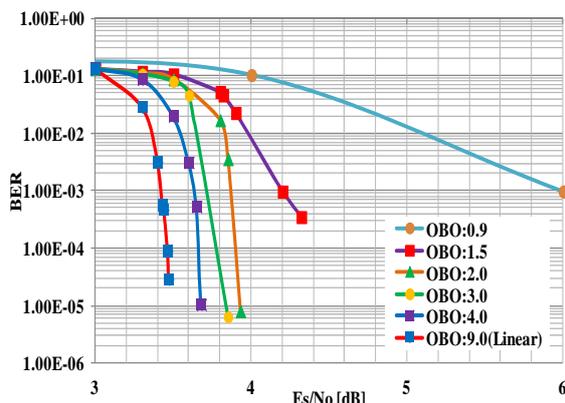


Fig.10 16QAM BER characteristics as a function of HPA OBO (code rate=1/2).

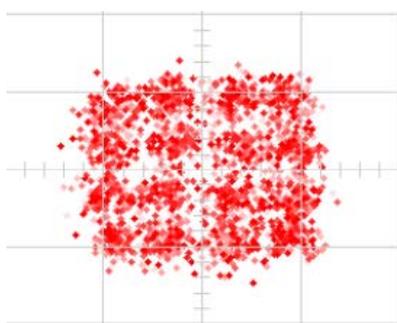


Fig.11 Signal constellation at 4.0-dB OBO of HPA.

4.2.2 HPA 消費電力比較

上記の検討で、非線形動作時でも、線形動作時と同程度の誤り率を得ることができ、HPAの非線形領域での高効率動作が可能であることを明らかにした。

低消費電力化の効果を定量的に評価するために、次式に示すHPAの消費電力 P_{dc} を検討した。

$$P_{dc} = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (2)$$

ここで、 η は電力効率、 P_{out} は出力である。

Table3に線形・非線形動作時における消費電力の比較を示す。Fig.10で高効率動作が可能であると示したOBO=2.0~4.0 [dB]の値を使用し、線形動作時(OBO=9 [dB])の消費電力を1とすると、非線形動作時(OBO=2.0~4.0 [dB])の消費電力は0.23~0.33となり、消費電力を1/4~1/3に低減可能である見通しを得た。

Table3 Comparison of power consumption

OBO[dB]	Power consumption (relative)
2.0	0.23
3.0	0.27
4.0	0.33
9.0	1

5 まとめ

多値変調波をHPAで電力増幅する際の消費電力を低減するために、多値変調波の非線形歪劣化をFECで補償する検討を行った。

そこで、線形領域において、QPSK変調時のLDPC符号と他のFECのBER特性を比較し、訂正能力を評価した。更に、16QAM多値変調波に対して、HPAを高効率で動作させるために、非線形動作時の最適なOBOを検討した。

その結果、TPCや畳み込み符号を用いるよりもLDPC符号を用いた方が遥かに高い訂正能力が得られた。また、LDPC符号の高い誤り訂正能力が得られ、かつ高効率動作させるためには、OBO=2.0~4.0 [dB]まで適用可能であり、消費電力を1/4~1/3に低減可能であることを明らかにした。

今後は、空間重畳型16QAM(2波のQPSK)や空間重畳型32APSK(2波のQPSK+BPSK)多値変調⁽³⁻⁶⁾に最適な符号化率のLDPC符号を適用し、1波の多値変調時よりも誤り訂正能力を高めかつ高効率動作を可能にしていきたい。

参考文献

- (1) ETSI EN 302 307 v1.2.1(2009-08)
- (2) M.Tanaka, H.Madate, AIAA, ICSSC-2010-8681, 2010, August.
- (3) 間館, 田中, 信学技報, SAT2010-85, 2011-2.
- (4) M.Tanaka, H.Madate, AIAA, ICSSC2011, AIAA-2011-8026, 2011, Nov.
- (5) 渡辺, 田中, 信学会サテライト大, B-3-19, 2011
- (6) 渡辺, 田中, 信学総全大, B-3-17, 2012
- (7) M.Tanaka, T.Watanabe, & M.Tobinai, AIAA ICSSC2012, 6-1, pp1-10, Sept.
- (8) M.Franceschini, G.Ferrari, R.Raheli, 'LDPC Coded Modulations', Springer
- (9) 和田山 “誤り訂正技術の基礎” 森北出版, 2010