

直交周波数分割多重 (OFDM) 波の PAPR 低減の検討

日大生産工 (院) ○土田 宗利

日大生産工 田中 將義

1. まえがき

周波数利用効率が高く、マルチパス干渉（ゴースト障害）に強い特徴を有する OFDM 通信は、高速通信を実現する方式として注目されており、ディジタルオーディオ放送（DAB）、地上ディジタル放送、高速無線 LAN あるいは ADSL 等で実用化されている。しかし、お互いに直交関係にある多数キャリアを含むため、包絡線はレイリー分布となり、平均値に対するピーク値の比（PAPR）が大きくなる⁽¹⁾。このため増幅器には、混変調歪みによる特性劣化を避けるため、広いダイナミックレンジにわたり高い線形性が要求される。一方、電力増幅器において広いダイナミックレンジで線形性を確保するために、動作点をバックオフすることが行われるが、電力効率が低下する問題がある。したがって、OFDM 通信における電力増幅器の高効率動作実現が重要課題となっており、種々の検討がおこなわれている⁽²⁻⁶⁾。そこで、本研究では、OFDM 変調前の一次変調信号の位相を制御することにより OFDM 信号波の PAPR を低減する新しい方法を提案し、従来報告されている PTS 法⁽²⁾との改善効果を比較し、優位性を明らかにするとともに、伝送特性をもとに、PAPR 低減による BER 特性改善効果を明らかにする。

2. OFDM 通信の概要

OFDM 通信は、情報シンボルを多数のキャリアに分割して伝送するマルチキャリア伝送方式の一つであり、情報シンボルを QPSK や QAM 等により複数の直交するキャリアで変調し、周波数軸上にシンボル長の逆数となる間隔で配列したものである。各々のキャリアは直交しているために、隣接チャンネル間の周波数間隔を縮小することが可能となる。この変調操作を DSP を用いて逆ディジタルフーリエ変換（IFFT）処理することにより複数の波を周波数軸上に一括配列することができる。

OFDM 変調波ならびにピーク電力と平均電力の比である PAPR (Peak to Average Power Ratio)、ならびに補累積分布関数 CCDF は次式で与えられる。

キャリア数: N , シンボル周期: T_s

サンプリング間隔: $\Delta T = T_s / N$

各サンプル点 $t = n \Delta T$

$$x(t) = x(n\Delta T) = \sum_{k=0}^{N-1} \{d_k e^{\frac{j2\pi k t}{N}}\} \quad (1)$$

$$PAPR = \frac{\max(|x(t)|^2)}{\text{mean}(|x(t)|^2)} \quad (2)$$

$$CCDF = \Pr(PAPR > PAPR_0) \quad (3)$$

3. Partial Transmit Sequences (PTS)方式と提案方式のシステム

3. 1 構成

図 1 に PTS 方式のシステム構成を示す。図 1 のように、情報源を直並列変換し M 個のクラス分けする。それぞれのクラスごとに IFFT を行い、その後位相を制御することにより、PAPR を低減する方法である。この方法では、M 個の N サイズ IFFT の演算処理が必要となる。

図 2 に提案方式のシステム構成を示す。これは、情報源を直並列変換しクラス分けし、IFFT 処理を行う前の入力信号の位相を制御することにより、PAPR の低減を行うものである。IFFT 処理は 1 回のみであり、PTS 法に比べて格段に少ない演算量で実現できる。

最も PAPR が低減できる最適の位相を決定しようとする計算量が膨大になる。したがってここでは、少ない計算量で位相を決定できる逐次決定法 flipping⁽²⁾を用いた。本アルゴリズムを次に示す。

$x(t)$ の位相を制御した入力信号 $y(t)$ は、式 (1) を用いて以下の式で表される。

$$y(n\Delta T) = \sum_{k=0}^{N-1} \{b_k d_k e^{\frac{j2\pi mk}{N}}\} \quad (4)$$

ただし、 b_k は重み関数であり、位相変化なしは 1、180 度位相変化は -1 となる。

- 1) $b_k = 1$ とし、 $PAPR_1$ を計算
- 2) $b_0 = -1$ とし、 $PAPR_2$ を計算
- 3) $PAPR_2 > PAPR_1$ ならば $b_0 = -1$ を保持
 $PAPR_1 > PAPR_2$ ならば $b_0 = 1$ とする

この操作を $k=0$ から $k=N-1$ まで繰り返し行い、最小の PAPR となる $\{b_k\}$ を求め、PAPR を低減させる。

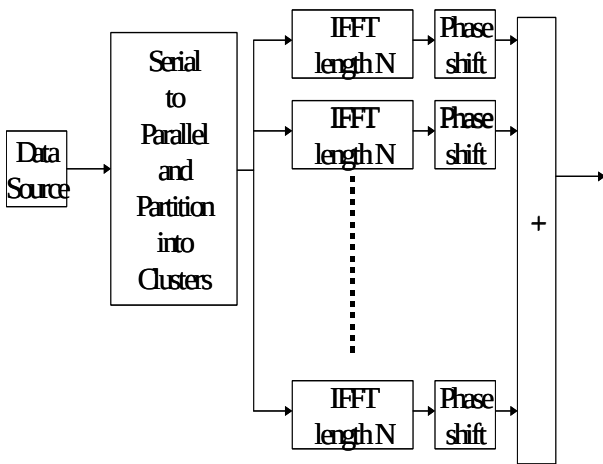


図 1 PTS 方式

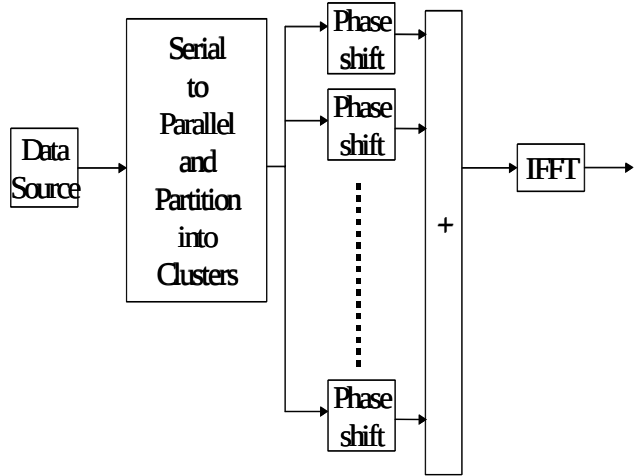


図 2 提案方式

4. PAPR 改善効果

本研究では，一次変調方式に QPSK を採用した．キャリア数が 64, 128, 256 について，PAPR の改善効果を検討した．図 3, 4, 5 にそれぞれのキャリア数での OFDM 信号波の発生確率の補累積分布関数(CCDFF)の比較を示す．PTS 法の特性和合わせて示している．それぞれ PTS 方式と提案方式は，ほぼ同様の特性を示した．特性キャリア数 64, 128 で約 3dB, キャリア数 256 で約 2.5dB の改善が確認できた．

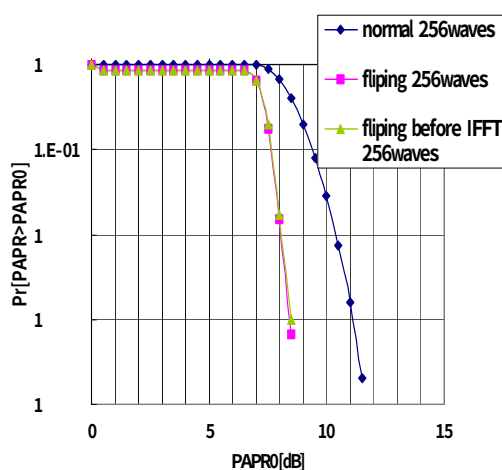


図 3 PAPR の改善特性
(キャリア数:64)

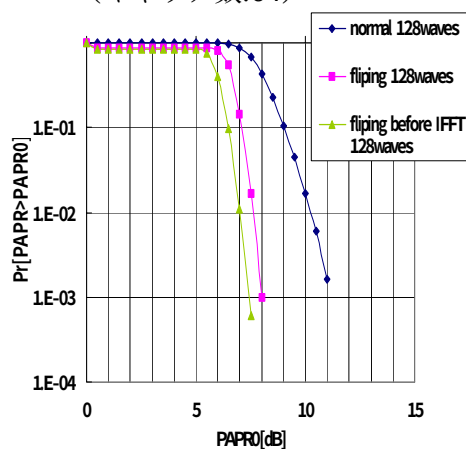


図 4 PAPR の改善特性
(キャリア数:128)

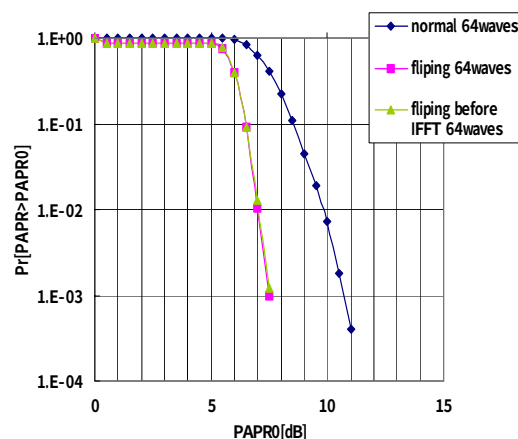


図 5 PAPR の改善特性
(キャリア数:256)

5. クラス数依存性

図 6 に OFDM 信号波のキャリア数 64 の時，種々のクラス数について特性を検討した．図 6 のようにクラス数を増加させるに従い，大きい PAPR を持つ信号の発生確率が小さくなることわかる．しかし，PAPR=6 dB の信号の発生確率は依然として大きいこともわかる．

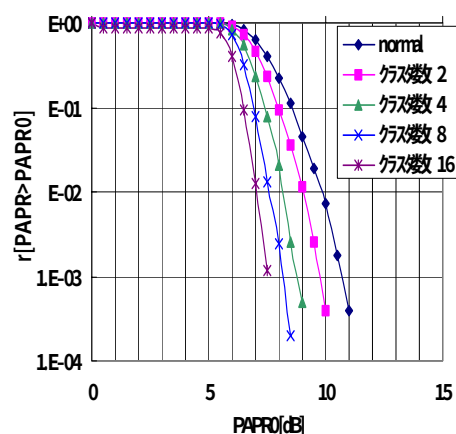


図 6 クラス数による特性
の変化

6. PAPR 低減による伝送特性改善効果

図7にキャリア数 256 の OFDM 変調に本方式の PAPR 低減法を適用した場合の非線形増幅時の BER 特性を示す。ビット誤り率 10^{-3} で比較した場合 0.5dB 程度の改善であるが、高 C/N になり非線形の影響が顕著になる C/N においては、本方法を用いた場合エラーフロアが消滅し、改善効果が確認できる。

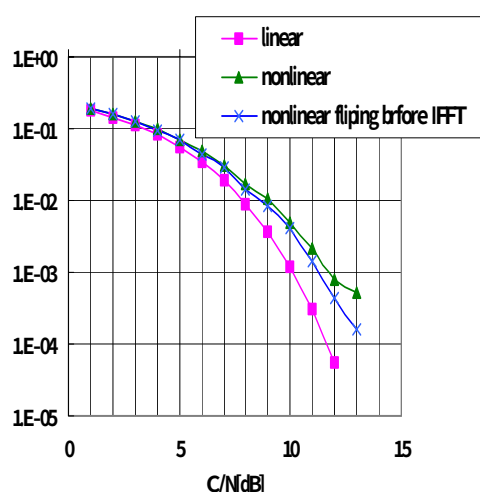


図7 非線形伝送路における特性
(キャリア数:256)

7. むすび

増幅器の非線形特性により発生する混変調歪を軽減する目的で PAPR を低減する方法を検討した。この結果 IFFT 処理を行う前の一次変調波をクラスに分け flipping を用いて PAPR が小さくなるように位相を制御することにより、従来の PTS 方式に比較して、少ない演算量でほぼ同程度に PAPR を低減することが可能となった。ま

た、非線形伝送路において BER 特性も改善できることを確認した。今後は、一層 PAPR を効率よく低減できる方法を検討していく予定である。

参考文献

- (1) Richard van NEE, Ramjee PRASAD, "OFDM for Wireless Multimedia Communications", Artech House Publishers, 2000
- (2) L. J. Cimini and N. R. Sollenberger, *IEEE Commun. Lett.* Mar. 2000
- (3) 田中洋行, 田中將義, "OFDM 通信に及ぼす非線形歪の影響", 日本大学生産工学部 34 回学術講演会, 2-55, 2001
- (4) 土田宗利, 田中將義, "OFDM 変調信号の包絡線振幅変動抑圧法の検討", 日本大学生産工学部 35 回学術講演会, 2-35, 2002
- (5) 土田宗利, 田中將義, "スペクトラム整形 OFDM 信号の伝送特性", 日本大学生産工学部 36 回学術講演会, 2-35, 2003
- (6) 土田宗利, 田中將義, "OFDM 信号の非線形歪によるビット誤り発生分布の検討", 信学会 B-5-199, 2004 春