

OFDM 通信の高性能化の検討

日大生産工 (院) ○江口 拓弥
日大生産工 田中 將義

1. はじめに

OFDM 変調はマルチパスフェージングやゴーストに強いという特徴のために地上波デジタル放送, 無線 LAN などの移動体通信や広帯域伝送における利用が広がっている通信方式である. これは周波数が異なり, 互いに直交する複数の搬送波 (サブキャリア) を用いる伝送方式であり, 高速の信号を低速の信号に変換して送信することから一部の周波数帯域にのみ影響を受ける周波数選択性フェージングに特に強い. また無線通信において特に重要である周波数利用効率が高いという長所がある. これはサブキャリアが互いに直交し, 干渉しないためサブキャリア同士を互いに重ね合わせることが可能であるためである. ゆえに搬送波は周波数の異なる複数の正弦波と余弦波を合成して得られるが, 直交性を保つために正確に周波数を生成する必要がある. 現実には多数の波を正確に生成することは困難であることやハードウェア規模が大きくなるため IFFT (高速逆フーリエ変換) を用いる. 近年 OFDM の普及が進んだ背景として計算機の演算処理能力の向上により高速演算が可能になったことや LSI 化が容易でハードウェアの小型化が可能になった点が上げられる.

短所として時間波形のピーク値と平均値の比である PAPR (peak to average power ratio) が非常に大きい. このため電力増幅器においては非線形歪みの影響を避けるため出力をバックワする必要がある. この結果,

電力増幅効率の良い非線形領域近傍での利用が出来ず, もっぱら線形領域での利用となり電力増幅率が非常に悪いという問題がある.

本研究では, IFFT 入力となる一次変調波の振幅と位相を制御し, PAPR 低減への効果を検討し, 高効率動作実現を目指して PAPR 低減法を明らかにする.

2. OFDM 変調の構成

OFDM 変調の構成を Fig.1 に示す. Fig.1 に示すようにデジタルデータを一次変調 (Mod) し, 直/並列変換 (S/P) 後, IFFT 処理後, 並/直列変換したベースバンド OFDM 信号を搬送波帯にシフトして送信する構成である.

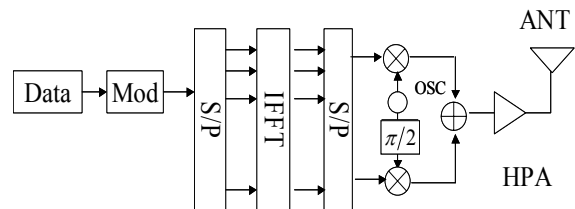


Fig.1 OFDM 変調の構成

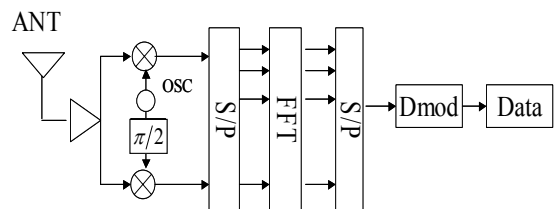


Fig.2 OFDM 復調の構成

一次変調には振幅変調の ASK, 位相変調の PSK や QPSK などがあり, デジタルデータを複素信号に変換するものである. 受信側においては搬送波帯からベースバンドにおい

てFFT（高速フーリエ変換）によりOFDM復調を行ったのち、2次復調(Dmod)を行う構成である。

3. OFDM 信号の生成

デジタルデータに一次変調を施した複素信号 X_n を $X_n = A_n + jB_n$ とすると、Fig.3 に示したように周波数の異なるそれぞれの波に X_n を掛け合わせ、合成したものが OFDM 変調波 Y であり、次式で表される。

$$Y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \{ (A_n + jB_n) \exp(j2\pi f_n t) \} \quad (1)$$

ただし、キャリア数を N とし、 $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ である。

また PAPR は以下の式で定義される。

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

4. 検討内容

(1) 式のように OFDM 変調波は周波数の異なる多数の波を足し合わせたものである。この合成を行う際、PAPR が最小となるよう、一次変調波 X_n ($n=1:256$) に対し、 W_n で重み付けを行う。これを次式で示す。なお本検討では一次変調波として QPSK 変調を用いた。

$$Y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [\{ X_n * \exp(j2\pi f_n t) \} * w_n] \quad (3)$$

4.1 振幅制御の検討

Fig.5 に示す重み W_n を 0 または 1 とすると、Fig.6 に示すように振幅が 0 では、IFFT への入力キャリアの中に情報を持たない空白のキャリアが含まれることになる。この重み W_n の 0 と 1 の割合を変化させ、一次変調波に重み付けしたときの PAPR への影響を検討した。

4.2 位相制御の検討

Fig.4 に示すように搬送波同士を周波数軸

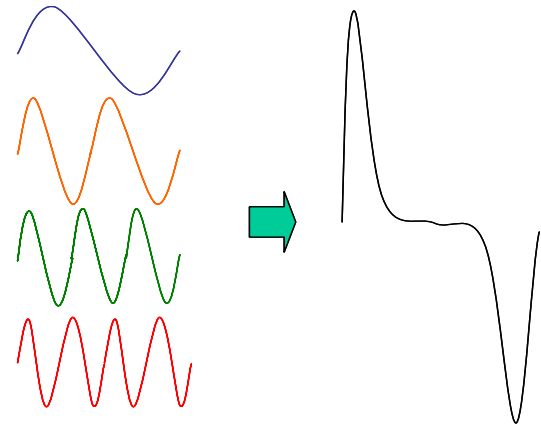


Fig.3 OFDM 波の概念

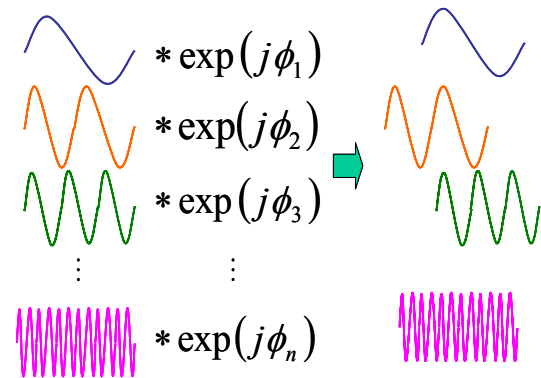


Fig.4 各キャリアの位相制御の概念図

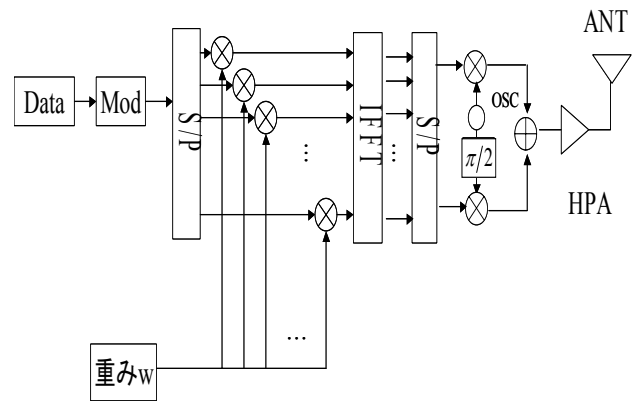


Fig.5 一次変調波に対して重み付けするシステム構成

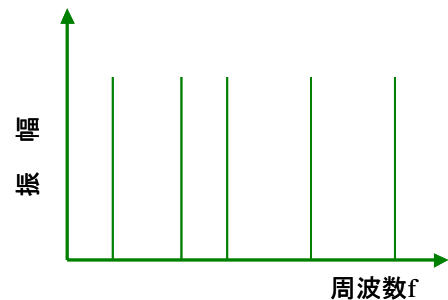


Fig.6 振幅制御の概念

上で合成する際、PAPR が最小となるような最適位相 ϕ の検討を行った。Fig.6 に示す重み W_n を $W_n = \exp(j\phi_n)$ とし、このときの OFDM 変調波 $Y(t)$ を次式に示す。

$$Y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [X_n * \exp(j2\pi f_n t)] * \exp(j\phi) \quad (4)$$

4.2.1 2 値で位相制御

位相を 0, π の 2 通りに変化させた場合について検討した。すなわち一次変調波に対し、1 または -1 で重み付けを行うことである。Fig.4.5 に示すように一次変調波 X_n ($n=1:256$) に対し、 X_1 から重み付けを行い、IFFT 処理を施し、PAPR が小さくなる位相を決定する。これを全てのキャリアについて繰り返し行う。

4.2.2 最適位相で制御

4.2.1 よりさらに細かく位相を制御した。ここでは位相を 0 から 2π まで 1 度ずつ設定した。

4.3 CCDF (累積分布補関数)

振幅、位相制御による PAPR の改善効果进行评估するために PAPR の CCDF (累積分布補関数) を算出した。CCDF はある値以上を取る確率を示したものである。次式で定義される。

$$CCDF = \Pr(PAPR > PAPR_0) \quad (5)$$

例えば Fig.11 において $PAPR=10[\text{dB}]$ のとき $CCDF=1.E-02$ となっている。これは $10[\text{dB}]$ 以上の PAPR を取る確率は 100 分の 1 以下であることを意味する。

5. 検討結果

5.1 振幅制御

Fig.8 は空白キャリアを設定した時の PAPR の CCDF である。データのあるキャリアの数を N とし、 $N=16, 32, 64, 128, 160, 192, 256$ とし、空白キャリアと合わせて 256 一定となるようにした。すなわち空白キャリアの数 d は $d = 256 - N$ で与え

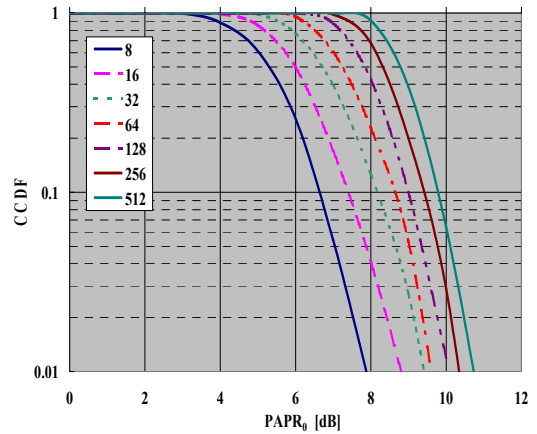


Fig.7 キャリア数と PAPR の関係

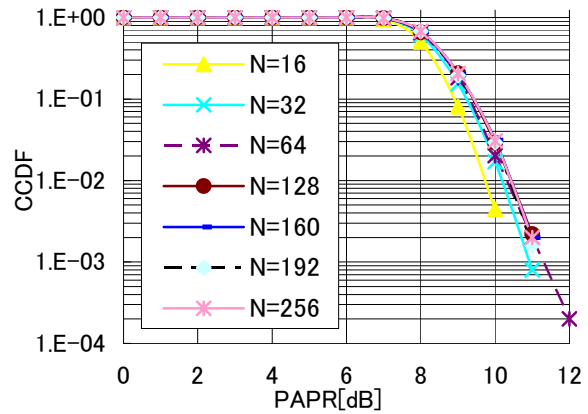


Fig.8 空白キャリア挿入による PAPR への影響

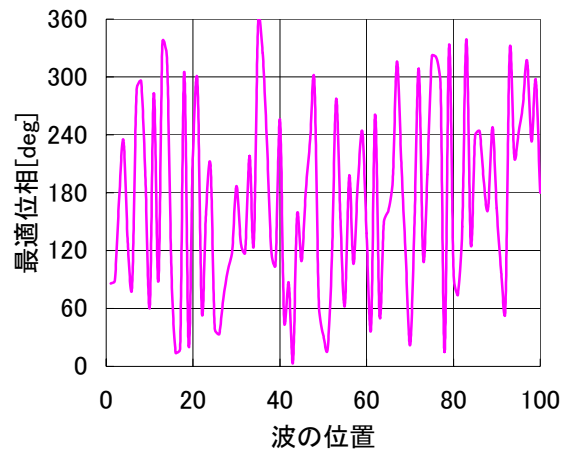


Fig.9 PAPR 低減に最適な位相分布

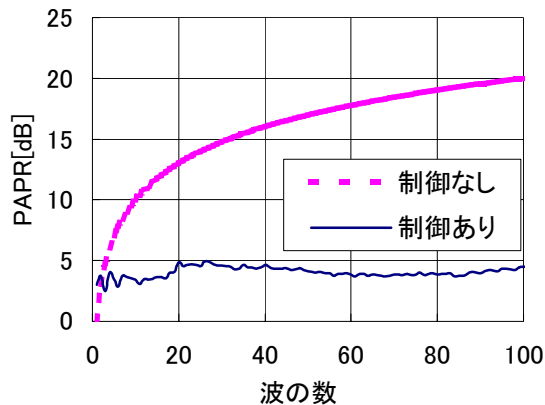


Fig.10 位相制御による PAPR 低減効果

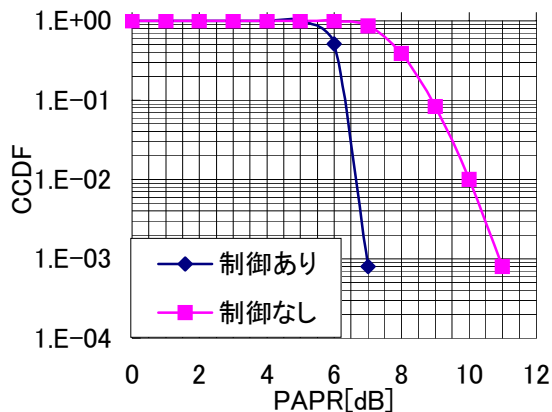


Fig.11 2値($0 \sim 2\pi$)位相制御時の PAPR の CCDF

られ、 $N=256$ では空白キャリアが無い状態となる。Fig.8 を見ると左から順に $N=16, 32 \dots$ となっており、 $N=64$ 以上では、ほぼ特性に差異は認められない。したがって、空白キャリアによる PAPR の改善は小さいと考えられる。

5.2 位相制御

Fig.9 は波の周波数に対する最適位相であり、重み W_n を示したものである。これを見ると規則性は見られないことが分かる。Fig.10 は波の数に対する PAPR を示したものである。位相制御なしの場合、波の数が増えるにつれ PAPR が増加していることが分かる。これに対し、位相制御ありの場合は波の数が増加しても約 5 dB で一定となっていることが分かる。Fig.11 は PAPR の CCDF を取ったものである。これを見て分かるように $CCDF=1.E-02$ において制御なしと比べ約 3 dB の改善が見られる。

6. 考察

空白キャリアによる PAPR 低減にはデータの入っているキャリアの数に対し、多数の空白キャリアが必要である。Fig.7 に示すデータ数と PAPR の関係より、データが少ないほど PAPR が低くなることから、情報を送信していないキャリアが多くなるという点で効果的な方法ではないと言える。

また 2 値で位相制御すると約 3 dB の改善が見られ、最小で 5 dB まで抑える事が出来た。さらに細かく $0 \sim 2\pi$ で位相制御した場合は、約 5 dB 一定となっていることから、同様の効果があると言える。したがって細かく制御しなくても改善効果が得られることが言える。

7. むすび

本研究では、空白キャリア挿入と 2 値および $0 \sim 2\pi$ の位相制御による PAPR の低減を検討した。この結果、空白キャリア挿入では改善効果がないことを明らかにした。また位相制御では 2 値および $0 \sim 2\pi$ の場合のいずれも改善効果があるが、受信側への制御情報の伝送を考慮すると、2 値で制御することにより、PAPR 低減に効果があることを明らかにした。

参考文献

- [1]江口拓弥, 田中将義, “直交周波数分割多重 (OFDM) 波ピーク値と入力信号波形の関係について”, 第 37 回日本大学生産工学部 学術講演会 2-23, 2004
- [2]土田宗利, 田中将義, 信学総全大, B-5-199, 2004
- [3]土田宗利, 田中将義, “直交周波数分割多重 (OFDM) 波の PAPR 低減の検討”, 第 37 回日本大学生産工学部 学術講演会 2-24, 2004
- [4]Richard van NEE, Ramie PRASAD, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 2000