

NAIST-IS-MT0751087

修士論文

OFDM方式におけるピーク電力削減手法の評価
に関する研究

野口 知宏

2009年2月5日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

野口 知宏

審査委員：

岡田 実 教授 (主指導教員)

関 浩之 教授 (副指導教員)

原 孝雄 准教授 (副指導教員)

OFDM方式におけるピーク電力削減手法の評価 に関する研究*

野口 知宏

内容梗概

OFDM(直交周波数分割多重:Orthogonal Frequency Division Multiplexing)方式は複数の信号を多重し並列伝送を行う方式であり周波数利用効率に優れている特長をもつ反面、高いピーク電力をもつ問題が挙げられる。評価指標としてPAPR(ピーク対平均電力比:Peak to Average Power Ratio)が用いられており、それを低く抑える研究が広く検討されている。しかしながら、PAPRを低く抑えることだけが実際の通信システムに適用する場合において全ての問題解決になるかどうかの考慮がなされていない。

そこで本研究では、OFDM方式を実際の通信システムに適用する場合に生じる、非線形歪みの影響や帯域外輻射を考慮に入れた評価指標である Efficient PAPR を提案する。その評価指標の有効性を示すためにピーク電力を削減する技術である CI(Carrier Interferometry) 符号と、繰り返し処理によるクリッピングを用いて OFDM 方式における計算機シミュレーションを行うことにする。その中で非線形増幅器のバックオフを無線 LAN の環境下で最適化を行った場合と PAPR を同じ値に設定した場合において、全体の劣化量が最も小さくなる時の PAPR を求める。その結果、従来より用いられている単純に PAPR を削減する評価法と比べて、今回提案する評価法である Efficient PAPR を用いることでより最適な PAPR を発見できることが分かった。

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0751087, 2009年2月5日.

キーワード

OFDM, PAPR, キャリアインターフェロメトリ, クリッピング&フィルタリング,
繰り返し処理, Efficient PAPR

A Study on Evaluation of Peak Power Reduction Method for OFDM Systems*

Tomohiro Noguchi

Abstract

OFDM system has a superior feature of high frequency efficiency by multiplexing multi-carrier signals over frequency band and sending the information in parallel mode. On the other hand, in this system, there substantially exists a problem of high peak power. PAPR (Peak to Average Power Ratio) has ever been used as a criterion for evaluating this issue and many studies trying to reduce the PAPR have been reported. However the question is whether the problem can be solved or not, that means whether the channel can be properly designed only by reducing the PAPR when the OFDM is applied to the actual nonlinear radio transmission systems. Answer is “no”.

Then, an alternative method called “Efficient PAPR” is proposed in this thesis to consider this problem under the circumstances of actual systems in which the effects of nonlinear channel and out of band emission are taken into account. In this thesis, the transmission performances of CI/OFDM with iterative clipping processing have been evaluated by computer simulation. The evaluation has been done by comparing the case of searching the optimum PAPR which shows minimum BER in the nonlinear amplifier taking proper back-off (method of Efficient PAPR) and the case of just minimizing PAPR. The results show that the “Efficient PAPR” is more effective criterion to find the optimum PAPR than the conventional method of just reducing PAPR.

* Master’s Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0751087, February 5, 2009.

Keywords:

OFDM, PAPR, Carrier Interferometry, Clipping and filtering, Iterations, Efficient PAPR

目次

第1章 序論	1
第2章 OFDM方式	3
2.1. OFDM方式	3
2.2. PAPR特性	5
第3章 ピーク電力削減手法	6
3.1. CI/OFDM方式	6
3.1.1 CI符号	6
3.1.2 OFDMシステムとCI/OFDMシステムとの比較	8
3.2. クリッピング&フィルタリング	12
3.2.1 原理	12
3.2.2 クリッピング&フィルタリングによるOFDMシステムへの影響	13
3.3. 繰り返しクリッピング&フィルタリング	16
3.3.1 原理	16
3.3.2 CAFを用いたCRとPAPRの関係	17
第4章 非線形特性を考慮にいたった 評価手法の提案	19
4.1. 非線形伝送路におけるOFDM方式	19
4.2. PAPR指標における問題点	21
4.3. Efficient PAPR指標	22
4.3.1 Efficient PAPR指標の概要	22
4.3.2 提案手法のEfficient PAPR指標	23

第5章 性能評価	26
5.1. シミュレーション条件	26
5.2. OFDM・CI/OFDM送受信機モデル	27
5.3. 非線形増幅器のIBOの変化に伴うPSD特性	28
5.3.1 OFDMシステムモデルにおけるIBOの最適値	31
5.3.2 CI/OFDMシステムモデルにおけるIBOの最適値	31
5.3.3 最適値のIBOを用いたTD特性	35
5.4. 現行システムとEfficient PAPR評価法を用いたシステムとの無線LAN環境における性能比較	37
5.5. IBOをPAPRと同じ値に設定した場合のTD特性	40
5.6. 本章のまとめ	43
第6章 結論	45
謝辞	47
参考文献	48
研究業績	51

目次

2.1	OFDM シンボルの波形	4
3.1	CI/OFDM シンボルの波形	8
3.2	OFDM 方式と CI/OFDM 方式の PAPR 特性	9
3.3	OFDM 方式と CI/OFDM 方式の BER 特性	10
3.4	OFDM 方式と CI/OFDM 方式の PSD 特性	11
3.5	クリッピング&フィルタリング	12
3.6	OFDM システムにおけるクリッピング前後の PAPR 特性	14
3.7	OFDM システムにおけるクリッピング前後の BER 特性	15
3.8	OFDM システムにおけるクリッピング前後の PSD 特性	16
3.9	繰り返しクリッピング&フィルタリングモデル	17
3.10	CR と PAPR の関係 (OFDM, 繰り返し処理回数:1~4)	18
3.11	CR と PAPR の関係 (CI/OFDM, 繰り返し処理回数:1~4)	18
4.1	SSPA 増幅器の入出力特性	20
4.2	非線形伝送路における送信機モデル	23
4.3	Efficient PAPR 評価法の概要図	25
5.1	OFDM・CI/OFDM 送信機モデル	27
5.2	OFDM・CI/OFDM 受信機モデル	28
5.3	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=6dB,CR=0.75,OFDM)	29
5.4	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=6.5dB,CR=0.97,OFDM)	29
5.5	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=7dB,CR=1.18,OFDM)	29
5.6	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=7.5dB,CR=1.4,OFDM)	29
5.7	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=8dB,CR=1.55,OFDM)	30

5.8	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=8.5dB,CR=1.7,OFDM)	30
5.9	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=9dB,CR=1.91,OFDM)	30
5.10	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=9.5dB,CR=2.11,OFDM)	30
5.11	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=10dB,CR=2.29,OFDM)	31
5.12	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=4.4dB,CR=0.6,CI/OFDM)	32
5.13	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=4.5dB,CR=0.8,CI/OFDM)	32
5.14	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=5dB,CR=1.04,CI/OFDM)	33
5.15	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=5.5dB,CR=1.21,CI/OFDM)	33
5.16	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=6dB,CR=1.37,CI/OFDM)	33
5.17	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=6.5dB,CR=1.6,CI/OFDM)	33
5.18	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=7dB,CR=1.9,CI/OFDM)	34
5.19	バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=7.5dB,CR=2.33,CI/OFDM)	34
5.20	TD 特性 (OFDM,Iteration:1-4,IBO=Optimization)	36
5.21	TD 特性 (CI/OFDM,Iteration:1-4,IBO=Optimization)	36
5.22	TD 特性 (OFDM,Iteration:1-4,IBO=PAPR)	42
5.23	TD 特性 (CI/OFDM,Iteration:1-4,IBO=PAPR)	42

表 目 次

5.1	シミュレーション諸元	27
5.2	OFDM システムモデルの各 PAPR に対する最適な IBO 値	32
5.3	CI/OFDM システムモデルの各 PAPR に対する最適な IBO 値	34
5.4	OFDM システムモデルにおける Efficient PAPR と TD (IBO=Optimization)	37
5.5	CI/OFDM システムモデルにおける Efficient PAPR と TD (IBO=Optimization)	37
5.6	無線 LAN 環境における現行システムと提案システムとの比較 (OFDM システムモデル)	39
5.7	無線 LAN 環境における現行システムと提案システムとの比較 (CI/OFDM システムモデル)	39
5.8	OFDM システムモデルにおける Efficient PAPR と TD (IBO=PAPR)	43
5.9	CI/OFDM システムモデルにおける Efficient PAPR と TD (IBO=PAPR)	43

第1章 序論

近年、通信技術が急速に進歩し、無線通信技術を用いたマルチメディアサービスの需要が高まっている。それに伴いネットワーク上のデータ量は増加の一途をたどっている。よって、これらの要求に応えるには、高速度・高品質なデータ伝送を可能とする無線通信方式が必須となる。しかし、使用できる周波数帯域は限られており、周波数利用効率の高い通信方式が検討されている。その中で、OFDM(直交周波数分割多重:Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 伝送方式は、周波数利用効率が高く、マルチパスフェージングの影響を受けにくいことから、地上波デジタル放送 [1]、無線 LAN(IEEE 802.11a/g/n)[2]、WiMAX[3] 等の通信方式として採用されている [4, 5]。

OFDM 方式は多重化方式の一種であり、周波数軸上で互いに直交関係を有する複数のサブキャリアを多重化する方式である。OFDM 方式は1つの通信回線上に複数の信号を重ね合わせる技術であり、周波数をずらしながら独立の信号を割り当てる。よって、信号波が互いに直交関係を有していることから、周波数間隔を狭く設定することができる。このため OFDM 方式は周波数の利用効率に優れている。だが、OFDM 方式をはじめとするマルチキャリア伝送の送信信号は変調された各キャリアの足し合わせであるために、従来のシングルキャリア伝送と比較して、組み合わせによっては平均電力に比べて非常に高いピーク電力を持つ問題が挙げられる。これは PAPR(ピーク対平均電力比:Peak-to-Average Power Ratio) 問題と呼ばれている。信号は送信アンテナから送信される前に信号増幅器によって増幅され、PAPR の高い信号を入力すると非線形特性の影響を大きく受け、送信信号が劣化し誤りの多い通信となる。従って、OFDM 信号の PAPR を低減する研究が広く検討されている。

しかしながら、評価指標である PAPR は、PAPR の低減に伴い発生する BER(ビ

ット誤り率:Bit Error Rate)の劣化や、非線形特性をもつHPA(大電力増幅器:High-Power Amplifier)の影響などの考慮がされていない。通常、送信信号は送信アンテナから送信する前にHPAによって増幅される。そして、HPAの出力特性は入力振幅が大きな値であればあるほど出力信号に大きな劣化が生じる非線形特性をもつ。バックオフにより増幅器を線形領域で動作させることで、その劣化を避けることができるが、これによって電力効率が低下する。よって、実際の通信システムに適用する場合はこれらの影響を考慮する必要がある。

従来からもシステムの送信機側でHPAが置かれることを想定し、その場合PAPRを最小にすることがシステム全体を最良にするものとして扱われてきた。しかし、本研究ではただ単純にPAPRを低くすることが最適ではないことを示し、PAPRに代わる評価指標として、Efficient PAPR指標を用いることで、全体のシステムを考慮にいれた最適な評価が可能であることを提案する。今回提案するEfficient PAPR指標ではBERの劣化とSSPA(固体電力増幅器:Solid State Power Amplifier)を通した後のOBO(出力バックオフ:Output Back-off)の影響を総劣化量として評価を行う。また、Efficient PAPR指標は、帯域外輻射への影響も考慮し、全体のシステムを考慮に入れた性能評価を行うことができる指標である。このEfficient PAPR指標を用いることでシステムに応じたPAPRを求めることができる。これらの有効性を示すために本論文では、無線LAN環境下でのSSPAのIBO(入力バックオフ:Input Back-off)を最適値に設定し、現行システムと提案システムとの性能評価の比較を行う。また、無線LAN以外のシステムにも適用できるようにSSPAのIBO値をPAPRと同じ値に設定したシミュレーション検証も行った。

本論文の構成は以下に示すとおりである。第2章でOFDM方式の概要について説明し、OFDM方式の問題点であるPAPR特性について述べる。第3章ではピーク電力削減手法として、本研究で用いる技術であるCI(Carrier Interferometry)符号化とクリッピング&フィルタリングについて説明する。そして、従来より評価指標として用いられているPAPRの問題点を述べる。第4章では、非線形特性を考慮にいれた評価指標であるEfficient PAPRの提案を行う。第5章では計算機シミュレーションにより提案手法の評価を行う。最後に第6章では結論を述べる。

第2章 OFDM方式

本章では、OFDM方式の基本的な概念と性質を述べる。そして、OFDM方式のようなマルチキャリア伝送方式では、非常に高いピーク電力をもつ信号が発生してしまう問題点があることを述べる。そして、そのピーク電力の成分を測る評価指標である PAPR 特性についても述べる。

2.1. OFDM方式

OFDM方式は周波数軸上で互いに直交関係を有する複数のサブキャリアを多重化する方式である。

OFDM方式では複数の搬送波を用いて情報伝送を行うことにより、システム全体では高速な情報伝送を可能にすることができる。

有限なエネルギーを持つ複素関数の直交性は以下の式で定義される。

$$\int_0^T f_n(t) \cdot f_m^*(t) dt = \begin{cases} 0 & (n \neq m) \\ \text{finite value} & (n = m) \end{cases} \quad (2.1)$$

ここで、 m, n は整数、 $*$ は複素共役、 T はシンボル長である。上式の $f(t)$ を三角関数とすると、直交性は以下の次式で表される。

$$\int_0^T e^{j\frac{2\pi nt}{T}} \cdot e^{-j\frac{2\pi mt}{T}} dt = \begin{cases} 0 & (n \neq m) \\ T & (n = m) \end{cases} \quad (2.2)$$

直交関係にある信号は、その振幅に関わらず互いに干渉しないので、その信号振幅を変えることで情報を伝送できる。シンボル区間 T_s 、周波数間隔 Δf が $1/T_s$ である正弦波は直交関係にあるので、それぞれに独立した情報を伝送することが

できる。伝送される信号は、これらを加えたものであり、その合成信号波形 $x(t)$ は次式で表される。

$$x(t) = \sum_k c_k e^{j \frac{2\pi k t}{T}} \quad (2.3)$$

ここで、 c_k は送信データである。ここで、加え合わせる数を N 、シンボル区間 T_x を N 等分 (サンプリング間隔 $\Delta T = T_s/N$) とすると、各サンプル点 $t = n\Delta T$ の信号点は次式となる。

$$x(n\Delta T) = \sum_{k=0}^{N-1} \{d_k e^{j2\pi n k/N}\} \quad (2.4)$$

ここで、 d_k は送信データで d_k である。上式 (2.4) は複素数 d_k の逆フーリエ変換 (IFFT) となっていることが分かる。また、復調はこの逆の操作であるフーリエ変換 (FFT) を行う。受信信号を $x(n\Delta T)$ とすると、復調されたデータは次式で表される。

$$d_k = \sum_{n=0}^{N-1} \{x(n\Delta T) \cdot e^{-j2\pi n k/N}\} \quad (2.5)$$

ここで、この信号に乗せる情報はアナログでもデジタルでもよく、種々の変調方式を採用することができる。

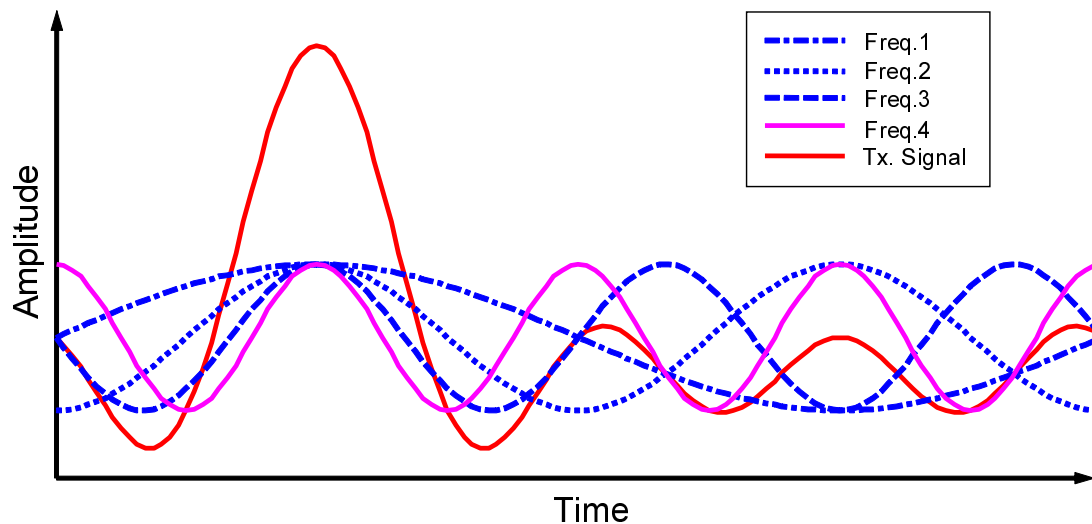


図 2.1 OFDM シンボルの波形

2.2. PAPR 特性

OFDM 方式のようなマルチキャリア通信の信号は変調された各キャリアの足し合わせであるために、信号の平均電力に比べて極めて高いピーク電力を持つ信号成分が発生してしまう。そこで、信号のピーク成分の大きさを示す指標として、信号の 1 周期あたりの平均電力に対する最大電力の比率を表す PAPR(ピーク対平均電力比:Peak to Average Power Ratio) が用いられている。PAPR の定義は次式で与えられる [6, ?]。

$$PAPR = \frac{\max_{0 < t < T_s} |s(t)|^2}{\text{mean}_{0 < t < T_s} |s(t)|^2} \quad (2.6)$$

ここで、 $|s(t)|^2$ は、送信信号の電力、 T_s は 1OFDM シンボル時間を表しており、 $\max_{0 < t < T_s} |s(t)|^2$ はピーク電力を、 $\text{mean}_{0 < t < T_s} |s(t)|^2$ は平均電力をそれぞれ表している。図 2.1 に示されるように、OFDM 信号はそれぞれの周波数の足し合わせであるために、ある時間においては他の信号成分に比べて極めて大きな値を持つピーク成分が発生してしまう。このように高いピークを持つ OFDM 信号を非線形特性をもつ増幅器に通すと、非線形歪みを大きく受けるだけでなく、帯域外に不要な輻射が生じ、信号品質劣化の原因になる。このため、OFDM 信号の PAPR を低減する技術が必要とされている。

第3章 ピーク電力削減手法

前章では、OFDM方式の概念と性質を説明し、OFDM方式の問題点であるPAPRについて述べた。本章ではピーク電力を削減するための手法であるCI符号とクリッピング&フィルタリングについて説明をする。そして、計算機シミュレーションにより、それぞれのピーク電力削減手法の特性評価を示す。

3.1. CI/OFDM方式

3.1.1 CI符号

CI符号は、各サブキャリアを足し合わせる際に、各サブキャリアに一定量の位相回転を加えることでピークの発生を抑えることができる符号である [7, 8]。

デジタル信号におけるCI符号の概念を説明する。サブキャリア数を N_{sub} とした時の、 $N_{sub} \times N_{sub}$ のCI符号行列 CI は次式で与えられる。

$$CI = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{j2\pi \frac{1 \cdot 1}{N_{sub}}} & \dots & e^{j2\pi \frac{1 \cdot (N_{sub}-1)}{N_{sub}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{j2\pi \frac{(N_{sub}-1) \cdot 1}{N_{sub}}} & \dots & e^{j2\pi \frac{(N_{sub}-1) \cdot (N_{sub}-1)}{N_{sub}}} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

(3.2)

各サブキャリアの振幅と位相を表す周波数軸上での送信信号ベクトルを $D = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$ とすると、時間軸上での送信信号ベクトル d は、

$$d = CI^H D = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (3.3)$$

と表せる。式 3.3 は、1 シンボル内の先頭のサンプル点にのみ値を持ち、他のサンプル点では 0 になる。これは、時間軸上で振幅と位相が直交することを示す。さらに、各サブキャリアに位相回転を加えることで、周波数軸上での送信信号ベクトルを $D' = [1 \ e^{j2\pi\frac{N_1}{N_{sub}}} \ \dots \ e^{j2\pi\frac{(N_{sub}-1)}{N_{sub}}}]$ とすると、時間軸上での送信信号ベクトル d' は次式で表される。

$$d' = CI^H D' = [0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (3.4)$$

式 3.4 は、各サブキャリアに位相回転を加えることで、時間波形は、1OFDM シンボル内でインパルスの位置がずれることを意味する。

図 3.1 に CI/OFDM シンボルの波形を示す。図 3.1 より、各サブキャリアに位相回転が加わっているために、各シンボルごとにピーク的位置が異なった波形を示す。そして、それらを足し合わせた CI/OFDM の合成波は、各シンボルごとに位置が異なっているため、あるシンボルのピーク的位置には他のどのシンボルも影響を与えていないことが分かる。その結果、OFDM シンボルの波形 (図 2.1) と違い、合成波のピークを抑えることができる。

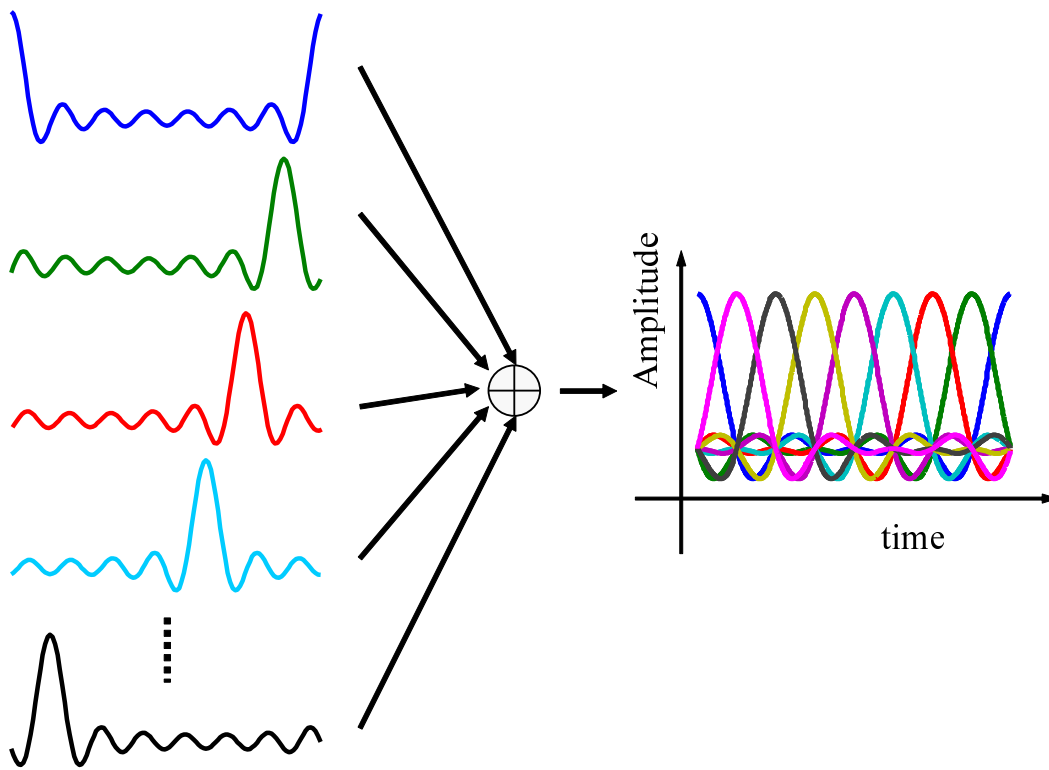


図 3.1 CI/OFDM シンボルの波形

3.1.2 OFDM システムと CI/OFDM システムとの比較

ここでは、3.1.1 節で説明したピーク電力削減手法である CI 符号を用いた OFDM 方式と CI/OFDM 方式におけるそれぞれの PAPR 特性を計算機シミュレーションにより求め比較を行う。また、BER 特性と PSD(電力スペクトル密度:Power Spectrum Density) 特性の影響を図示し明らかにする。

a) PAPR 特性比較

OFDM 方式と CI 符号を用いた CI/OFDM 方式におけるそれぞれの PAPR 特性を図 3.2 に示す。ここでのサブキャリア数は 52 であり、変調方式は QPSK を

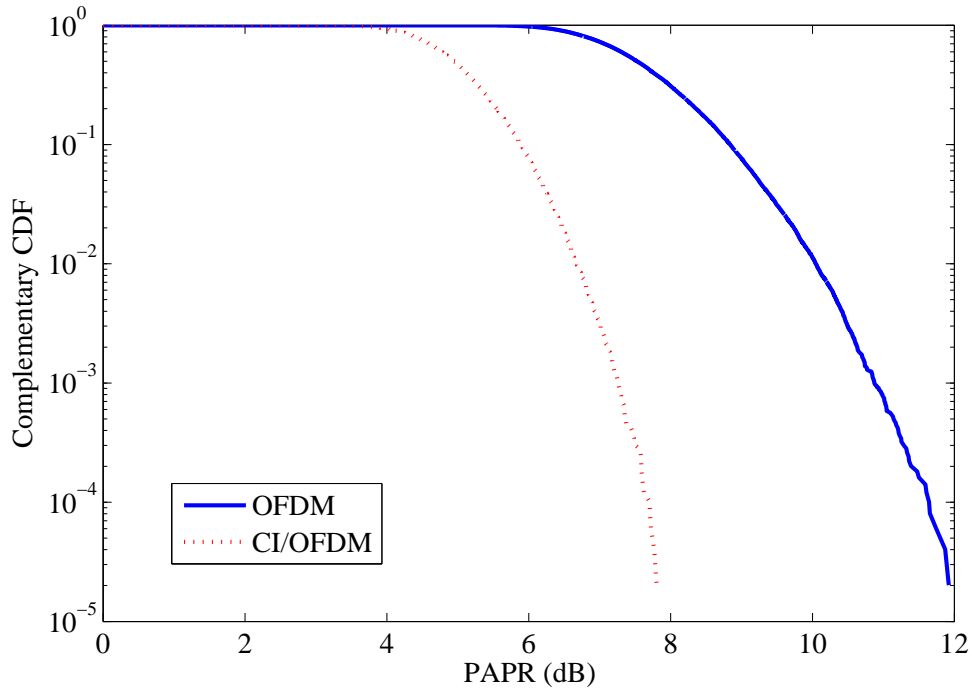


図 3.2 OFDM 方式と CI/OFDM 方式の PAPR 特性

用いる。次の b) と c) で示す BER 特性と PSD 特性についてもパラメータは同様である。そして横軸は基準 PAPR、縦軸は PAPR の CCDF(相補累積分布関数:Complementary Cumulative Distribution Function) である。CCDF は瞬時電力が基準となる PAPR を超える確率を表している。たとえば、基準 PAPR が 10 dB の時に $CCDF=10^{-4}$ である場合、全サンプルのうち基準となる PAPR(10 dB) を超える確率が 10000 分の 1 であるということである。 $CCDF=10^{-4}$ 以下の瞬時電力をもつサンプルの影響は無視できると考えられる。よって、本論文では $CCDF=10^{-4}$ となるような瞬時電力を PAPR と定義する。

図からも分かるように、CI 符号を用いた場合は、 $CCDF=10^{-4}$ において PAPR はおよそ 2 dB 抑えられていることが分かる。これは、前節でも述べたように CI 符号化によりそれぞれのキャリアのピークが同相で重畳されなくなったためと考えられる。

b) BER 特性比較

次に、非線形増幅器の影響を考慮していないBER特性について述べる。図3.3に

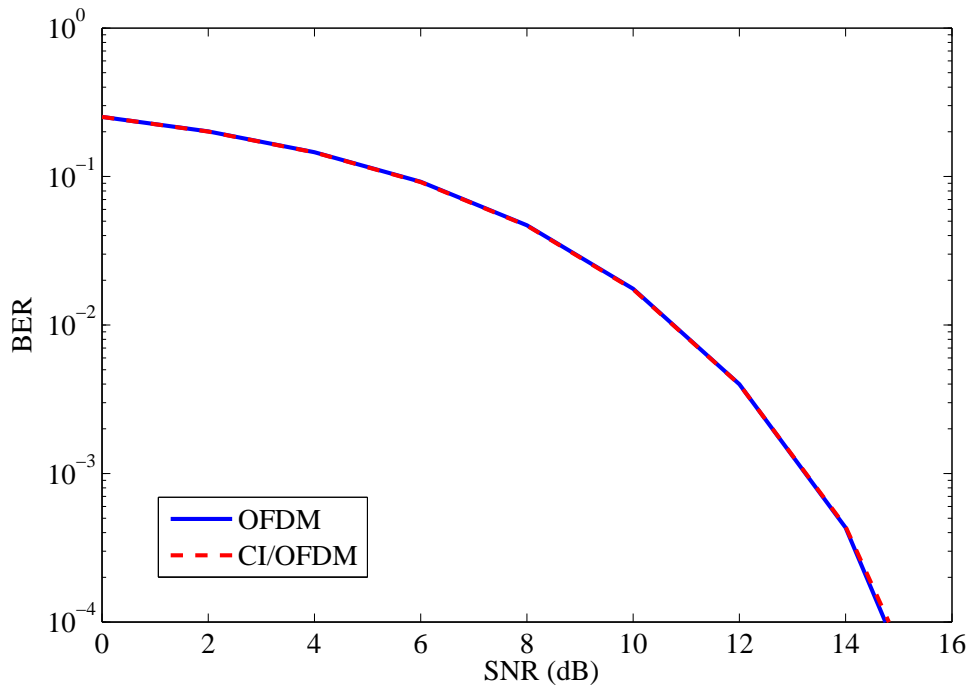


図 3.3 OFDM 方式と CI/OFDM 方式の BER 特性

OFDM 方式と CI/OFDM 方式の BER 特性を示す。横軸は SNR(Signal-to-Noise Ratio)、縦軸は BER(ビット誤り率:Bit Error Rate) である。BER は、ある送信ビット列に対して、受信側で復調されたビット列の中で誤っているビット数の割合のことを示す。

図 3.3 から、それぞれの方式の BER 特性はほぼ一致しており、CI 符号を用いた場合においても OFDM 方式とほぼ同様の BER 特性が得られることが分かる。

c) PSD 特性比較

最後に PSD 特性について述べる。こちらも BER 特性の時と同様に非線形増幅器

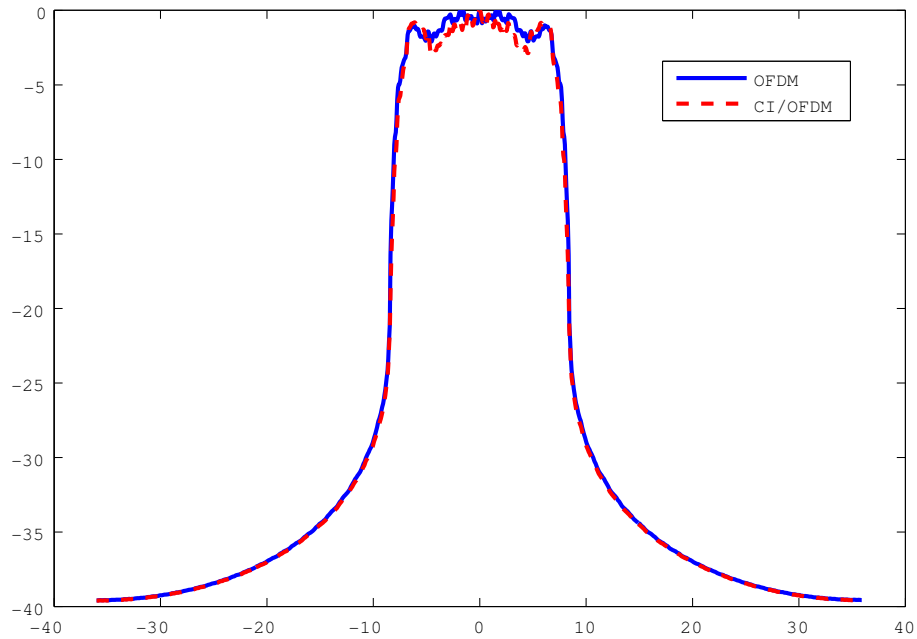


図 3.4 OFDM 方式と CI/OFDM 方式の PSD 特性

の影響を考慮していない。図 3.4 に OFDM 方式と CI/OFDM 方式の PSD 特性を示す。横軸は周波数、縦軸は PSD(電力スペクトル密度:Power spectral Density)である。PSD 特性は帯域外に輻射するエネルギーの評価である単位周波数あたりの電力を表す。

図 3.4 から、CI 符号を用いた場合でも帯域外雑音が発生することはなく、OFDM 方式とほぼ同様の周波数スペクトラムを持つ。また隣接するキャリアとはお互いに影響を与えない最小の周波数間隔が空けられているために、OFDM 方式が有する高い周波数効率を維持していることが分かる。

3.2. クリッピング&フィルタリング

3.2.1 原理

ピーク電力を低減する技術として CAF(クリッピング&フィルタリング) 法がある [9, 10]。クリッピングは、OFDM シンボルとなった時間情報のピーク成分を CR(クリッピング比:Clipping Ratio) の値に応じたレベルで切り取ることで、シンボルのピークを下げ、ピーク電力を抑圧する技術である。ここで、CR は、クリッピング後の最大電力とクリッピング前の平均電力との比である。また、クリッピング処理は非線形な操作であるため、クリッピング後の信号は帯域外に不要な輻射が生じる。帯域外輻射は周波数利用効率の劣化につながるため、フィルタを通して取り除く必要がある。CAF 法は、送信機に組み込むだけなので、規格を変更できないシステムや運用中のシステムにも適用することが可能である。

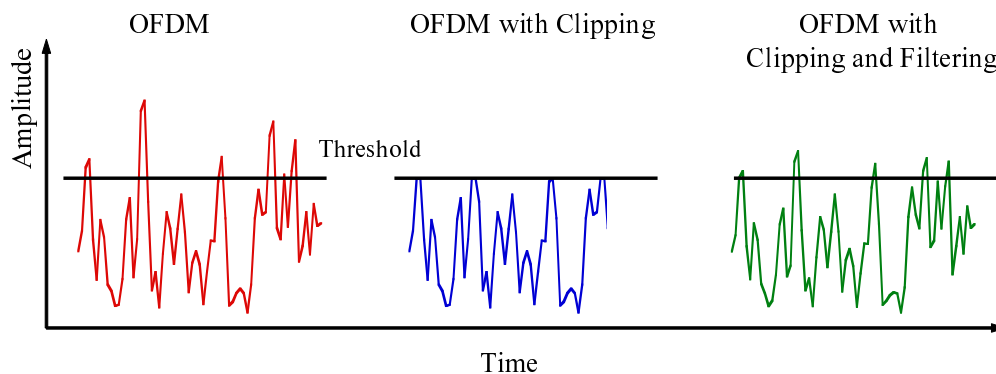


図 3.5 クリッピング&フィルタリング

図 3.5 にクリッピング&フィルタリングを用いた OFDM 信号を示す。図の左側はクリッピングを行う前の信号、真ん中はクリッピングを行った後の信号、右側はクリッピング&フィルタリングを行った後の信号を示す。それぞれ、横軸は時間、縦軸は信号の振幅を表す。クリッピング前の OFDM 信号の電力値 $s(t)$ 、切り

取る電力値を A とすると、出力信号 $\bar{s}(t)$ は以下の条件式により求められる。

$$|\bar{s}(t)| = \begin{cases} A, & (A \geq |s(t)|) \\ |s(t)|, & (A < |s(t)|), \end{cases} \quad (3.5)$$

また、CR は、

$$CR = \frac{A}{\sigma} \quad (3.6)$$

と表現できる。これより、切り取る信号の電力値 A を求めることができる [11]。ここで σ は OFDM 信号の二乗平均平方根 (rms : root-mean-square) 値である。

3.2.2 クリッピング&フィルタリングによる OFDM システムへの影響

ここでは、3.2.1 節で説明した CAF 法による信号への影響を示すために、CAF 前後の PAPR、BER、PSD 特性を用いて、クリッピングによって信号特性がどのように変化するかを示す。これらの特性評価については非線形増幅器を考慮に入れていない。

a) PAPR 特性

図 3.6 に CAF 前後の OFDM 方式の PAPR 特性を示す。ここのでのサブキャリア数は 52 であり、変調方式は QPSK を用いる。図 3.7 と図 3.8 で示す BER 特性と PSD 特性についても同じパラメータを用いる。横軸が PAPR、縦軸が PAPR の CCDF である。図中の結果はクリッピングを行わない場合と CR の値を 1.0、1.2、1.5 と設定したときの値を示す。

図 3.6 より、CAF を行うことで CI 符号を用いる時よりも CR の値によっては PAPR を低く抑えられていることが確認できる。また、CR の値を小さく設定すればするほど、PAPR も低く抑えられることがわかる。これは、CR の値を小さく設定することにより切り取る信号の電力値が低くなる。これは、式 3.5 での A

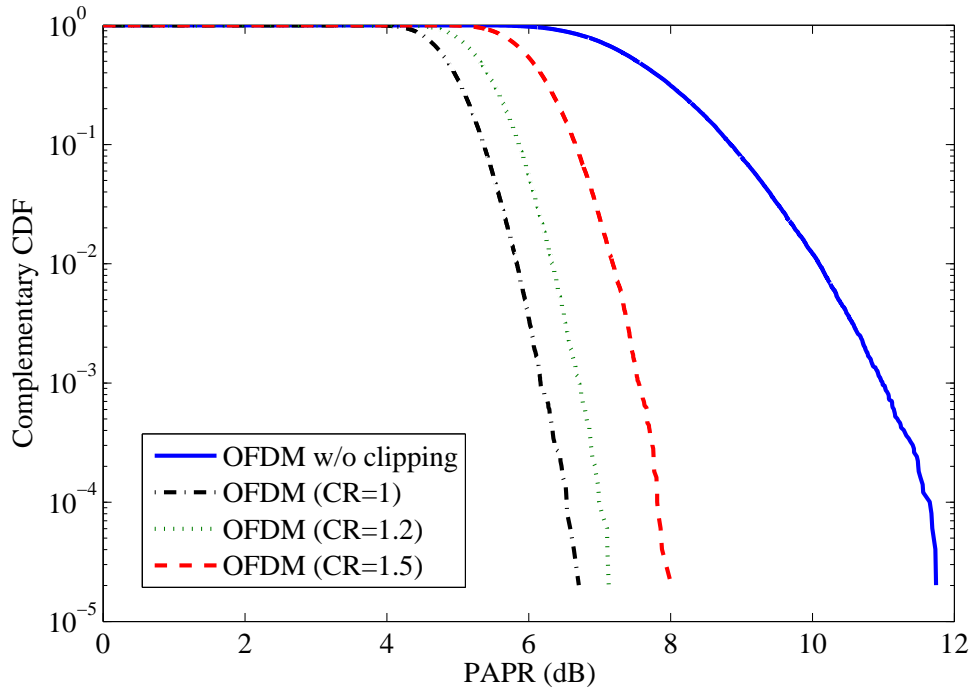


図 3.6 OFDM システムにおけるクリッピング前後の PAPR 特性

が小さくなるからである。平均電力値に変化はないので、切り取る電力値が小さくなるということは、PAPR が低く抑えられることを意味し、図 3.6 にもその結果が現れている。

b) BER 特性

図 3.7 に CAF 前後の OFDM 方式の BER 特性を示す。横軸は SNR、縦軸は BER である。

図 3.7 より、CAF を行うことで、CAF を行わない場合と比較して全ての CR の値において BER が劣化していることが確認できる。また、CR の値を小さく設定すればするほど、BER の劣化も大きくなっていることがわかる。これは、CR を小さく設定することで非常に多くの信号成分が切り取られてしまうからである。

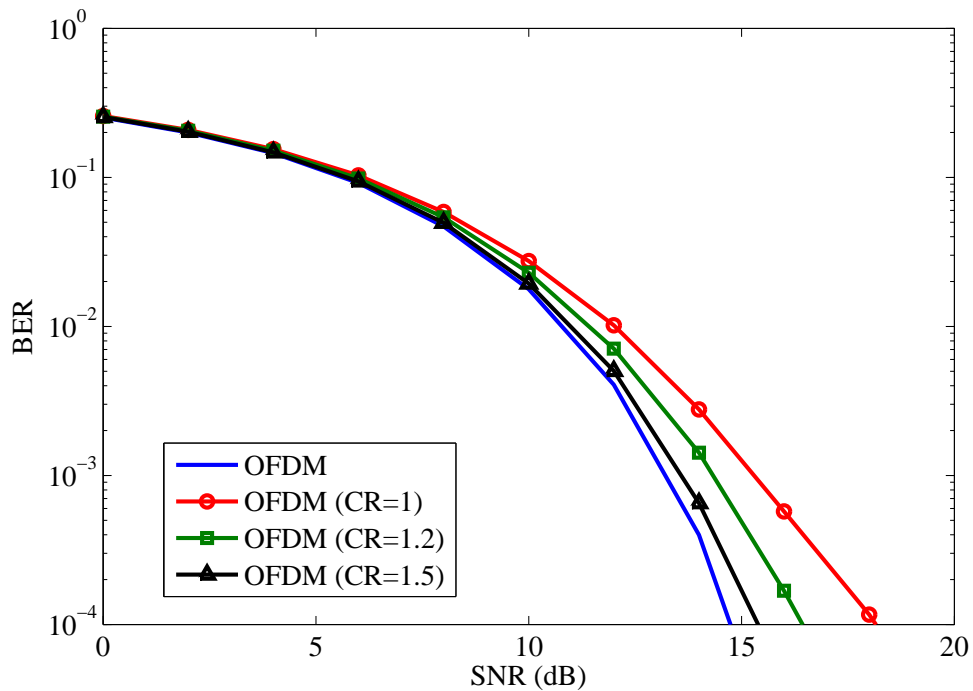


図 3.7 OFDM システムにおけるクリッピング前後の BER 特性

c) PSD 特性

図 3.8 に CAF 前後の OFDM 方式の PSD 特性を示す。横軸は周波数、縦軸は PSD である。

図 3.8 より、CAF を行った場合においても帯域外雑音が発生することなく、OFDM 方式とほぼ同様の周波数スペクトラムを持つ。これは、クリッピングを行うことで帯域外雑音が大きくなるが、クリッピング後にフィルタを通すため帯域外雑音が除去されるので、図 3.8 のように、OFDM 方式とほぼ同様の PSD 特性を示していることが考えられる。

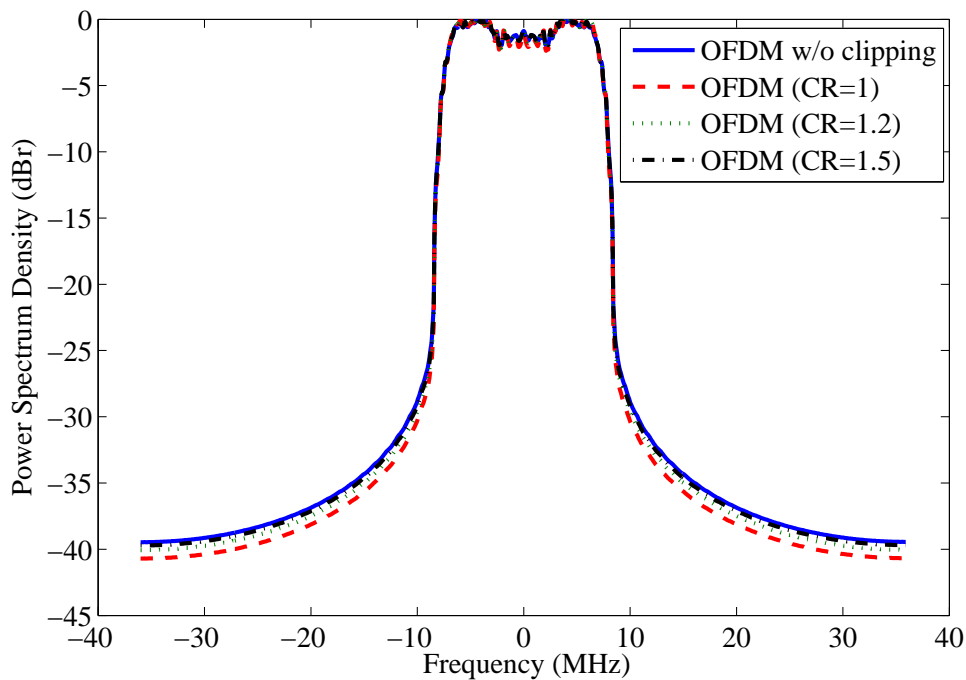


図 3.8 OFDM システムにおけるクリッピング前後の PSD 特性

3.3. 繰り返しクリッピング&フィルタリング

3.3.1 原理

繰り返し CAF とは、複数回 CAF を行うことで信号のピークを徐々に削減し、PAPR を低くする手法である [12, 13]。図 3.9 に繰り返し CAF モデルを示す。図中の t は時間領域、 n は周波数領域の値を示す。今回は、クリッピングを行う際に、毎回それぞれの繰り返し処理を行う時に二乗平均平方根である rms の σ を計算することにする。まず、 $s(t)$ の信号は、式 3.5 の条件で信号がカットされ、 $\bar{s}(t)$ となる。その信号を FFT に入力することで時間情報から周波数情報へ変化され、フィルタリングが行われる。このような流れで繰り返し処理を回数に応じて行うことにする。

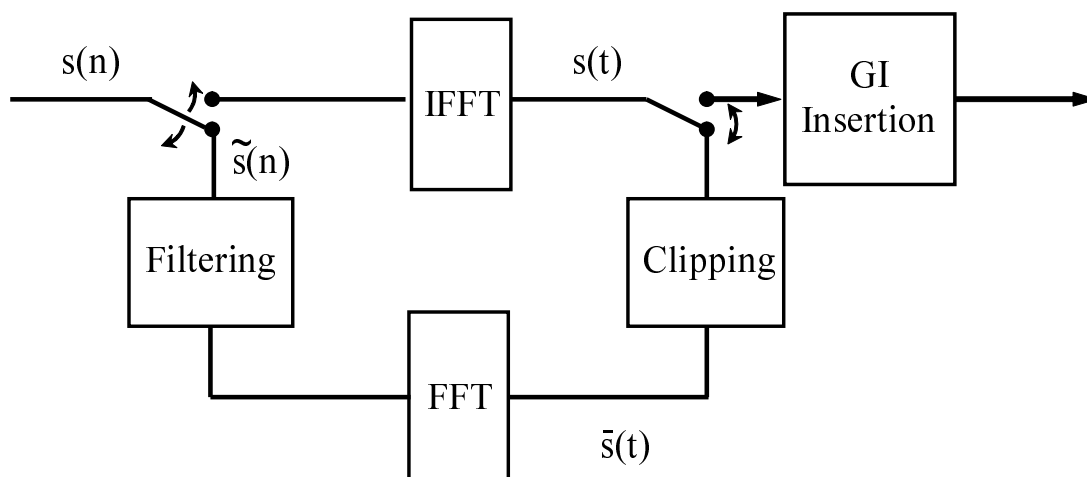


図 3.9 繰り返しクリッピング&フィルタリングモデル

3.3.2 CAF を用いた CR と PAPR の関係

図 3.10 と図 3.11 は OFDM 方式と CI/OFDM 方式の CR と PAPR の関係を表した図である。図 3.10 と図 3.11 より繰り返し処理の回数を増やすと PAPR を低く抑えられていることが確認できる。ただ、回数の増加に伴い、PAPR を低く抑えることができなくなっているのが分かる。

この繰り返し CAF は、効果的ではあるが、繰り返し処理の回数に比例して計算量やフィルタ遅延が大きくなる欠点がある。そのため、ピーク電力と計算量の間にはトレードオフの関係があるといえる。

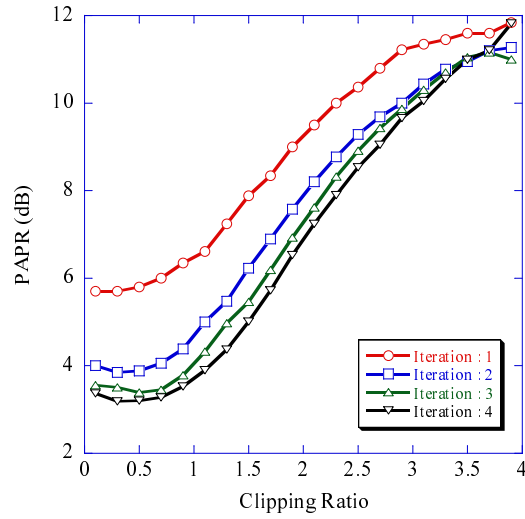


図 3.10 CR と PAPR の関係 (OFDM, 繰り返し処理回数:1~4)

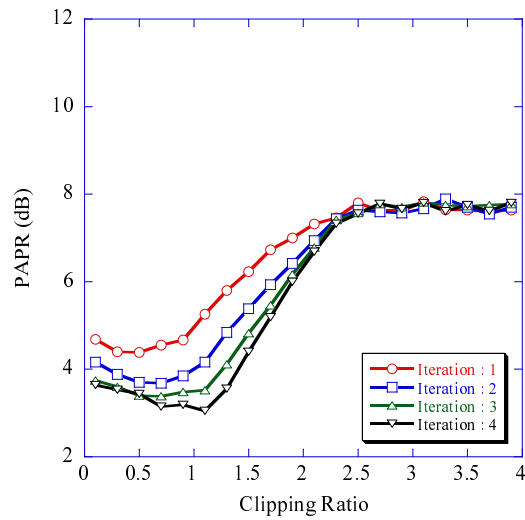


図 3.11 CR と PAPR の関係 (CI/OFDM, 繰り返し処理回数:1~4)

第4章 非線形特性を考慮にいたった 評価手法の提案

本章では、まず初めに非線形伝送路における OFDM 方式の概要を述べる。そして、従来より評価指標として用いられている PAPR の問題点について述べ、最後に今回提案する評価指標の説明をする。

4.1. 非線形伝送路における OFDM 方式

マルチキャリア通信のようなピーク電力の大きい信号が発生する OFDM 方式では、非線形伝送路で相互変調雑音が発生し、特性の劣化が生じる。そこで、OFDM 方式では、送信側で非線形特性をもつ HPA が用いられている。HPA の出力特性は入力振幅が大きな値であるほど、出力信号に大きな劣化が生じる非線形特性をもつ。通常、通信に用いる際、電力増幅は不可欠であり、それらを行うデバイスは非線形回路である。送信側からでた非線形歪みの影響を受けた信号は、伝送路で雑音を付加され受信側へ送られる。

次に、非線形増幅器について述べる。実際に利用されている増幅器として、SSPA(固体電力増幅器:Solid State Power Amplifier)、TWTA(進行波管増幅器:Traveling Wave Tube Amplifier) などがあるが、ここでは本論文で用いる SSPA について述べる。SSPA の入出力特性は次式で与えられる [14]。

$$A[\rho] = \frac{\rho}{\left[1 + \left(\frac{\rho}{A_{sat}}\right)^{2p}\right]^{\frac{1}{2p}}} \quad (4.1)$$

ここで、 ρ は入力振幅、 A_{sat} は飽和出力、 p は非線形の強さを示すパラメータを表す。また、図 4.1 に非線形特性パラメータ p を変化させた時の入出力特性を示

す [15]。

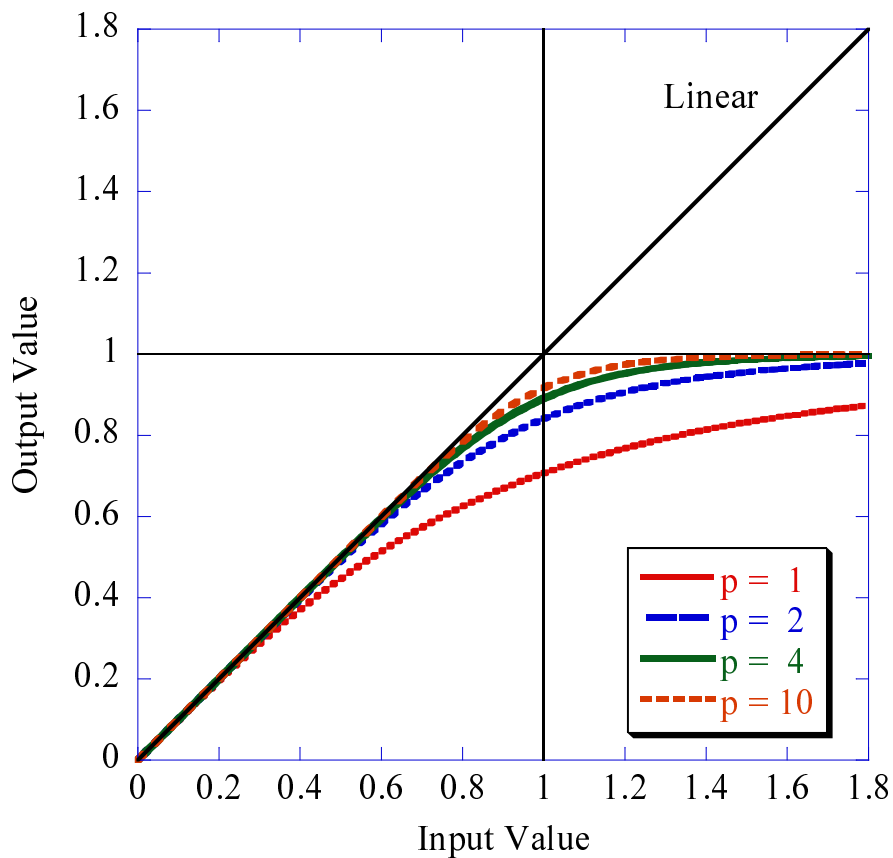


図 4.1 SSPA 増幅器の入出力特性

図 4.1 より、 p の値を大きくした場合は線形状態に近くなるが、 p の値を小さくした場合は非線形領域が広くなり非線形が強くなっている。

SSPA における非線形歪みの影響の大きさは増幅器の動作点に依存する。この動作点を決定するパラメータとして IBO(入力バックオフ:Input Back-Off)と

OBO(出力バックオフ:Output Back-off)がある。これらは次式により与えられる [16]。

$$\begin{aligned} \text{IBO}_{\text{dB}} &= 10 \log_{10} \frac{\rho^2}{\langle P_{\text{in}} \rangle} \\ \text{OBO}_{\text{dB}} &= 10 \log_{10} \frac{\rho_0^2}{\langle P_{\text{out}} \rangle} \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで、 $\langle P_{\text{in}} \rangle$ は入力信号の平均電力、 $\langle P_{\text{out}} \rangle$ は出力信号の平均電力、 ρ は入力振幅、 ρ_0 は出力振幅を表している。式 4.2 より、IBO が大きいほど動作点は非線形歪みの影響を受けにくい点となるが、入力信号電力が小さくなるため電力効率が悪くなり、また雑音の影響をより大きく受けることになる。

4.2. PAPR 指標における問題点

OFDM 方式のようなマルチキャリア通信システムにおいてピーク電力を削減することは非常に重要である。そのピーク電力を削減するために、本章で述べた CI 符号やクリッピング&フィルタリング技術が用いられている。また、OFDM 信号の平均電力とピーク電力の比を表す評価指標として、PAPR が用いられている。PAPR が高い OFDM 信号を非線形特性の増幅器に通すと、非線形歪みの影響や帯域外輻射が生じ、信号の劣化が起こる。よって、PAPR を低く抑える研究が幅広く行われている。しかし、ピーク電力削減技術を用いて PAPR を低く抑えることは、BER の劣化を伴う。これは、本章の??で説明をした。CAF 法を用いて PAPR を低く抑えた場合の方が、CAF 法を用いない場合と比較して、BER 劣化が大きいことが確認できる。図 3.5 に示したように、クリッピングは、CR の値に応じて、信号を切り取ってしまうことより、PAPR が低ければ低いほど、BER の劣化が大きいことがわかる。よって、ただ単に PAPR を小さくすれば良いという問題ではないことが分かる。

また、PAPR 指標においては、非線形特性をもつ HPA(高出力増幅器:High Power Amplifier) の影響が考慮されていない。HPA の出力特性は入力振幅が大きな値であるほど出力信号に大きな劣化が生じる非線形特性をもつ。よって、実際の通信

システムに適用する場合は、非線形特性の影響も考慮する必要がある。

よって、従来より評価指標として用いられている PAPR 指標だけでは、全体のシステムの性能評価を行うには不十分であると考えられる。

4.3. Efficient PAPR 指標

4.2 節で、PAPR 指標における問題を述べた。その問題点として、

- PAPR の削減に伴う BER の劣化
- 非線形特性を持つ増幅器の影響 (更なる BER の劣化)

が考慮されていないことが挙げられる。そこで、これらを考慮にいれた評価指標である Efficient PAPR の説明を行い、さらに今回提案する評価指標を述べることにする。

4.3.1 Efficient PAPR 指標の概要

従来より評価指標として用いられている PAPR は全体のシステムの性能評価を行う際には不十分な指標であることを述べてきた。そこで、PAPR に代わる評価指標として Efficient PAPR 指標を用いることにする。

Efficient PAPR 指標は、Dov Wulich によって提案された評価指標である [17]。Wulich の提案する Efficient PAPR 指標は増幅器の IBO を一定に設定し、BER の劣化が最小値を示すときの PAPR を Efficient PAPR と定義している。しかし、増幅器の平均電力に対する飽和瞬時電力レベルの比である IBO を一定に保つことは、送信信号が大きく歪む可能性があることを意味する。一般的に、送信信号が高いピーク電力を有する場合は、IBO を大きくとる必要がある。もし、IBO を大きくとらなければ、送信信号の歪みにより BER の劣化や、帯域外輻射が発生し隣接チャンネルへの干渉が起こる。逆に、送信信号が低いピーク電力を有する場合は、IBO を小さくとることができる。よって、増幅器の IBO の最適値は PAPR の値に応じて変化すると考えられる。

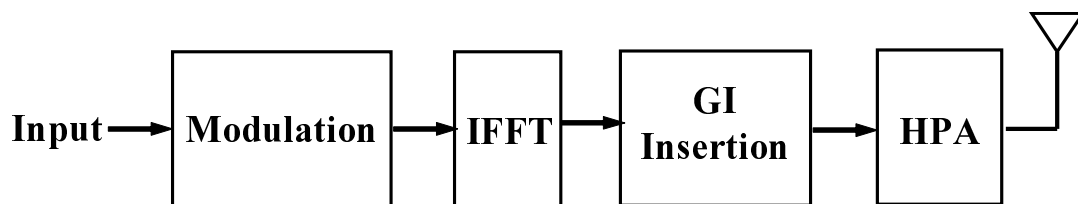


図 4.2 非線形伝送路における送信機モデル

図 4.2 に非線形伝送路における送信機モデルを示す。非線形特性をもつ HPA (大電力増幅器: High-Power Amplifier) が送信側で用いられる。無線通信において電力増幅は不可欠であり、現在利用されているシステムは非線形回路である。送信側から出た非線形歪みの影響を受けた信号は、伝送路で雑音を付加され受信側へ送られる。

従来の性能評価においては、HPA による正確な劣化の検証なしに評価が行われていたが、先ほども述べたように、実際の通信システムに適用する場合は HPA が用いられる。よって、今回提案する評価指標では HPA を考慮したときのシステムモデルで考えることにする。

4.3.2 提案手法の Efficient PAPR 指標

本論文で提案する Efficient PAPR 指標は、BER の劣化と SSPA を通した後の出力バックオフ (OBO) の影響を示すパラメータとして TD (総劣化量: Total Degradation) 特性を用いる。CI 符号や CAF 法を用いて得られた、各 PAPR における TD を示し、その TD が最も小さくなる時の PAPR を Efficient PAPR として求める。Efficient PAPR の評価法を用いることで、PAPR の評価法を求めるだけでは明確にできなかった非線形増幅器による伝送品質の劣化と PAPR の削減に伴う BER の劣化を明らかにすることができる。これより、通信系全体のシステムを考慮にいれた最適な点を見つけることができる。TD 特性は次式により表される [18]。

$$TD = \left(\text{SNR}_{\text{SSPA}} - \text{SNR}_{\text{linear}} + \text{OBO} \right) \text{ dB}, \quad (4.3)$$

ここで、式 4.3 の SNR_{SSPA} は、非線形歪みの影響を受けた場合の、定められた基準 $\text{BER}(10^{-3})$ を達成するための所要 SNR を表し、 $\text{SNR}_{\text{linear}}$ は、非線形歪みの影響を受けなかった場合の定められた基準 $\text{BER}(10^{-3})$ を達成するための所要 SNR を表している。

OBO が大きくなれば、非線形歪みの影響は小さくなるが、信号電力も小さくなるため、ガウス雑音の影響は大きくなる。逆に OBO を小さくすれば、信号電力を大きくとることができ、ガウス雑音の影響は小さくなる。しかし、増幅器において非線形歪みの影響が大きいところで増幅しなければならなくなり BER は悪くなる。このトレードオフの関係より、TD 特性を調べ最も全体の劣化量が小さくなる時の PAPR を求めることによって、最適な Efficient PAPR を求めることができる。

図 4.3 に今回の Efficient PAPR を求める手順を示す。まず各 PAPR(1 dB ~ 10 dB までの範囲) の CR を求める。その CR を用いて非線形歪みの影響を受けた場合の定められた基準 $\text{BER}(10^{-3})$ を達成する所要 SNR を求める。また、非線形増幅器(SSPA)の IBO は、帯域外輻射の影響を考慮にいれて、スペクトルマスクの規定を満たす範囲内の値を用いることにする。その IBO を SSPA に通して、OBO を算出する。そして、その SNR と OBO の劣化量を足し合わせて、Total Degradation とする。この一連の作業を各 PAPR において行い、その中で、Total Degradation が最も小さくなる時の PAPR を Efficient PAPR とする。

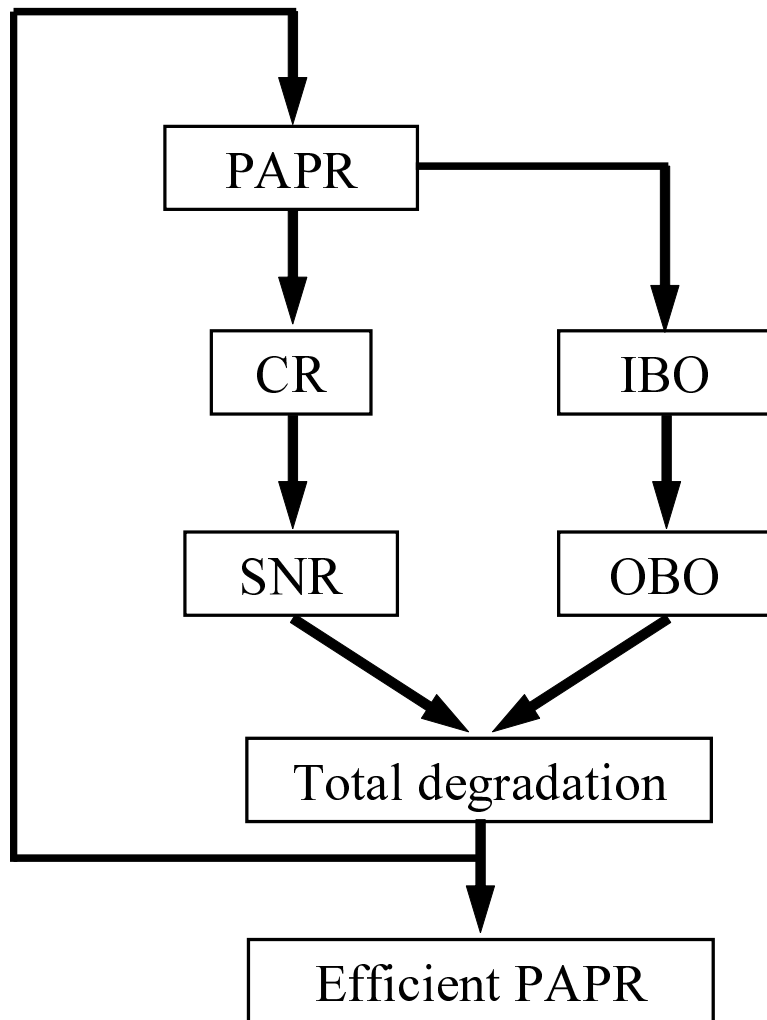


図 4.3 Efficient PAPR 評価法の概要図

第5章 性能評価

本章では第4章で提案した指標である Efficient PAPR の有効性を示すために、計算機シミュレーションを行う。5.3 節で IBO の最適化を行うために IBO を変化させ、SSPA を通した後に出力される OBO、定められた基準 BER(10^{-3}) を達成するための所要 SNR、帯域外輻射への影響を考慮しながら、TD 特性について調べる。次に、5.5 節で、IBO の値を PAPR と同じに設定し、Efficient PAPR 指標を用いることで、TD 特性にどの程度影響を与えるかについて検証する。

5.1. シミュレーション条件

計算機シミュレーションのためのシステムパラメータとして表 5.1 を用いる。変調方式は、QPSK、サブキャリア数は 52 で、オーバサンプリングファクタを 4 とする。FFT ポインタ数は 4 倍オーバサンプルするため 256 点 (64×4) とする。OFDM 変調における FFT サイズは 64 でガードインターバルは 16 シンボルとっている。用いる非線形増幅器は SSPA、伝送路は、AWGN(白色ガウス雑音: Additive White Gaussian Noise) を想定している。今回は、無線 LAN の規格 (IEEE 802.11a) に基づいたシミュレーション環境で行うことにする。また、SSPA の IBO 値の設定に関しては、2 つの条件下でシミュレーションを行った。1 つ目は 5.3 節で無線 LAN のスペクトルマスク規定の要求性能を満たす範囲で最も IBO 値が低い場合である。そして、2 つ目は 5.5 節で IBO の値を PAPR と同じに設定した場合である。それぞれの条件下においてシミュレーションを行った。

表 5.1 シミュレーション諸元

Parameters	Values
Modulation Scheme	QPSK
Number of Subcarriers	52
Oversampling Factor	4
FFT size	64×4
GI Length	16×4
Model of non-linear amplifier	SSPA
Non-linear parameter	$p = 4$
IBO	Optimization (1-10 dB) same PAPR
Channel	AWGN

5.2. OFDM・CI/OFDM送受信機モデル

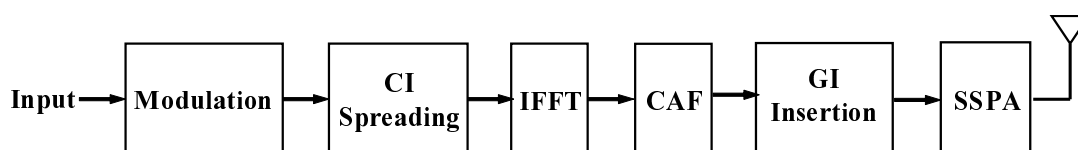


図 5.1 OFDM・CI/OFDM送信機モデル

ここでは、本論文で用いる OFDM システムと CI/OFDM システムの送信機モデルを図 5.1、受信機モデルを図 5.2 で示す。

送信側では、まず 0 または 1 のデジタル信号列を QPSK や QAM のシンボル点にマッピングを行う。マッピングされた信号は、シリアルパラレル変換器に入力され直列信号から並列信号に変換される。その信号に CI 符号を乗算する。CI 符

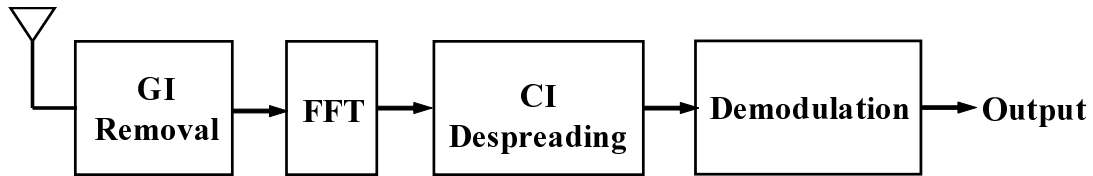


図 5.2 OFDM・CI/OFDM 受信機モデル

号を乗算することで、各キャリアの情報は他の全てのキャリアへ拡散される。その信号は逆フーリエ変換器に入力され、周波数情報から時間情報への変換を行う。次に、そのデータを CR の値に応じたレベルで切り取り、そのひずみにより発生した帯域外成分を帯域外フィルタを用いて除去する。そして、ガードインターバルを付加し、最後に非線形特性をもつ SSPA で電力増幅を行い、送信周波数へ変調され送信される。

受信側では、受信信号からベースバンド信号を取り出し、ガードインターバルを取り除く。次に高速フーリエ変換器により FFT が行われ、時間情報から周波数情報のデータを得る。最後に、復調を行い送信されたビット列が復元される。

5.3. 非線形増幅器の IBO の変化に伴う PSD 特性

前章でも述べたように、非線形増幅器の IBO はピーク電力の大きさに応じて変化させる必要がある。送信信号が高いピークを有する場合は、IBO を大きくとる必要があり、逆に送信信号が低いピーク電力を有する場合は、IBO を小さくとることができる。もし、IBO を小さく設定した場合、送信信号の歪みにより帯域外輻射が発生し隣接チャネルへの干渉が発生する。よって、ここでは、それぞれの PAPR において非線形増幅器の IBO の値を変化させ、無線 LAN 環境下での IBO の最適値を求めることにする。

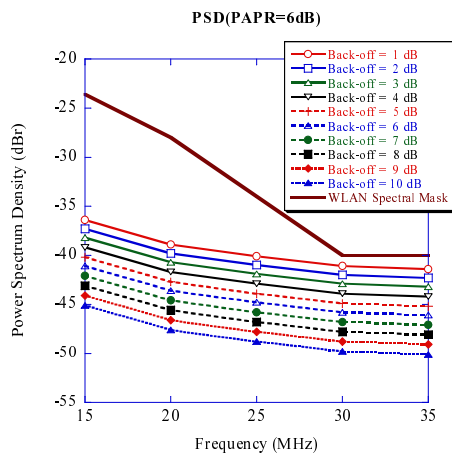


図 5.3 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=6dB,CR=0.75,OFDM)

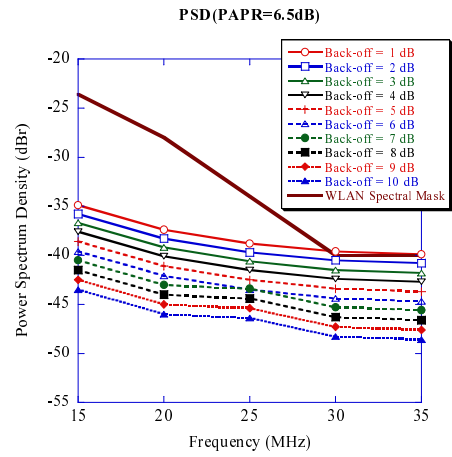


図 5.4 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=6.5dB,CR=0.97,OFDM)

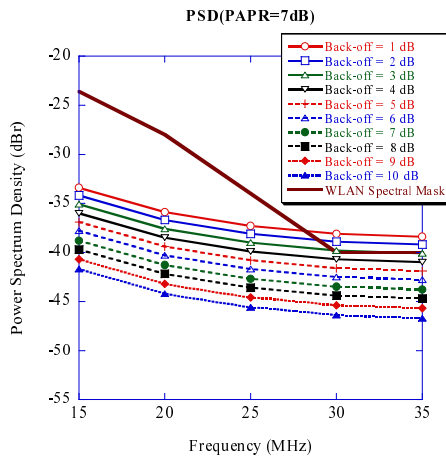


図 5.5 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=7dB,CR=1.18,OFDM)

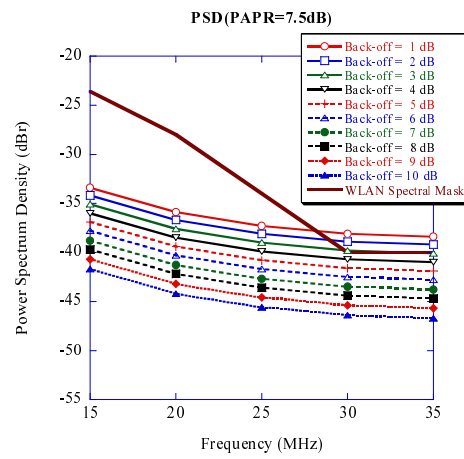


図 5.6 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=7.5dB,CR=1.4,OFDM)

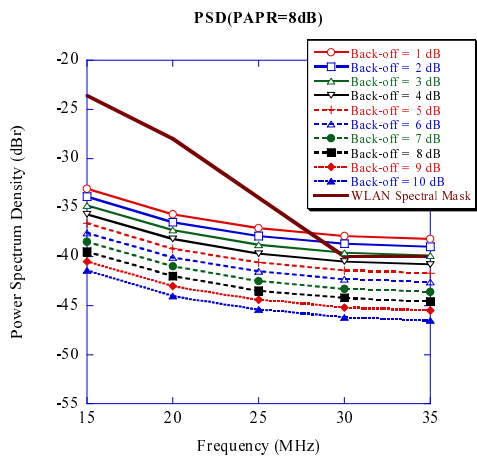


図 5.7 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=8dB,CR=1.55,OFDM)

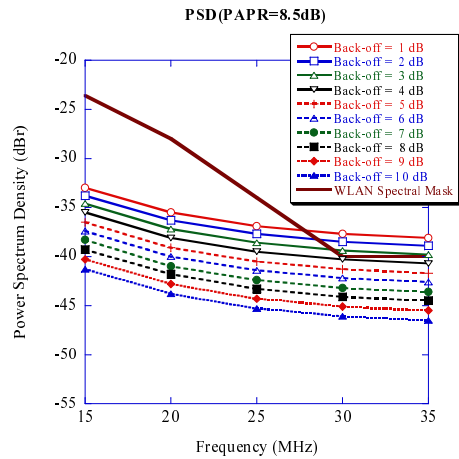


図 5.8 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=8.5dB,CR=1.7,OFDM)

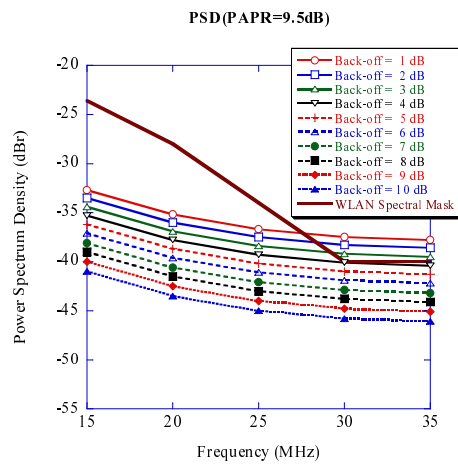


図 5.9 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=9dB,CR=1.91,OFDM)

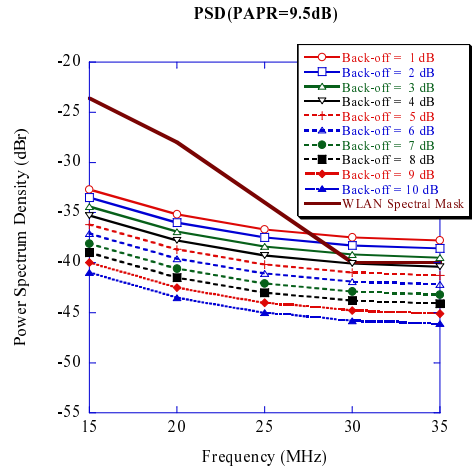


図 5.10 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=9.5dB,CR=2.11,OFDM)

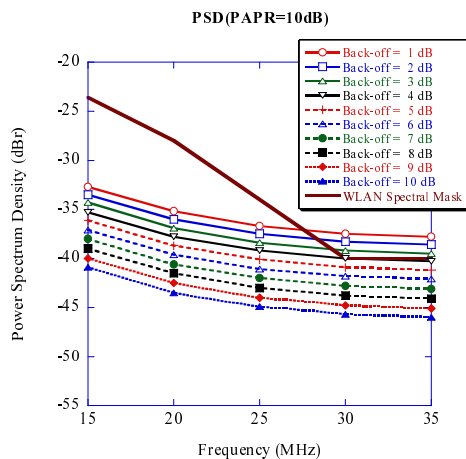


図 5.11 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=10dB,CR=2.29,OFDM)

5.3.1 OFDM システムモデルにおける IBO の最適値

図 5.3～図 5.11 に、OFDM システムモデルのそれぞれの PAPR における非線形増幅器の IBO を 1 dB ～ 10 dB まで変化させた場合の PSD 特性と無線 LAN のスペクトルマスク規定を示す。図 5.3～図 5.11 の横軸は周波数 (MHz)、縦軸は電力スペクトル密度 (dBm) を表す。横軸の周波数の範囲においては、15 ～ 35 (MHz) の部分を抜粋して示す。

図 5.3～図 5.11 より、明らかに PAPR の増加に伴い、送信信号に歪みが生じ帯域外への成分が増加することが分かる。これらの図より PAPR が 6.5 dB 以上のものは IBO の大きさによっては、無線 LAN のスペクトルマスクを満たしていないものがある。これらは実際の通信システムに適用することができない。表 5.2 に各 PAPR に対して、使用することができる IBO の値を示す。

5.3.2 CI/OFDM システムモデルにおける IBO の最適値

図 5.12～図 5.19 に、CI/OFDM システムモデルのそれぞれの PAPR における非線形増幅器の IBO を 1 dB ～ 10 dB まで変化させた場合の PSD 特性と無線 LAN

表 5.2 OFDM システムモデルの各 PAPR に対する最適な IBO 値

PAPR	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
IBO	1	3	4	5	5	5	5	5	5

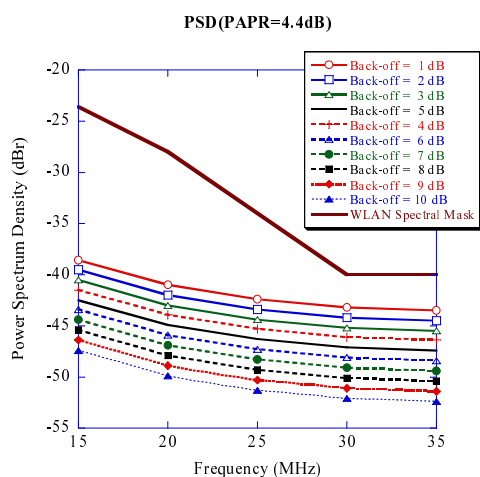


図 5.12 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=4.4dB, CR=0.6, CI/OFDM)

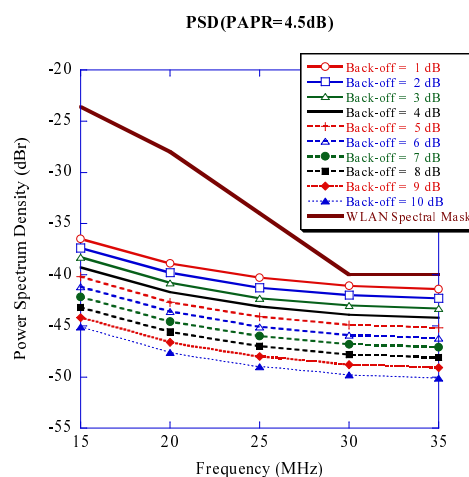


図 5.13 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=4.5dB, CR=0.8, CI/OFDM)

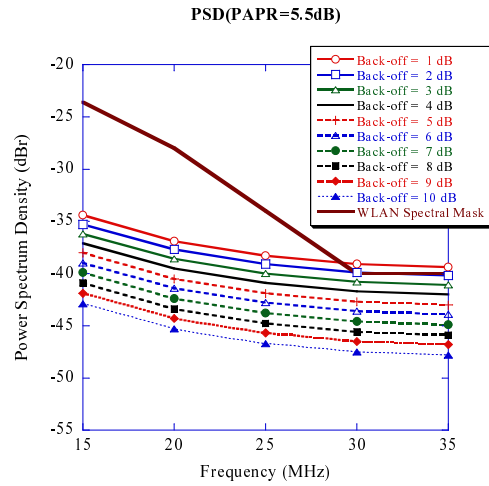
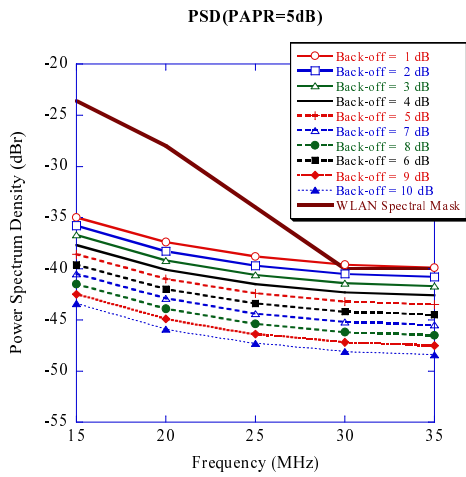


図 5.14 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=5dB, CR=1.04, CI/OFDM) 図 5.15 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=5.5dB, CR=1.21, CI/OFDM)

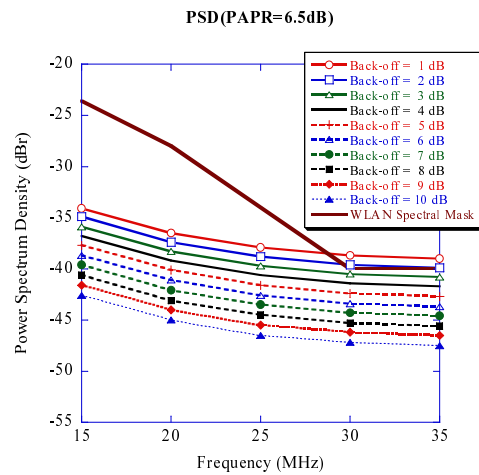
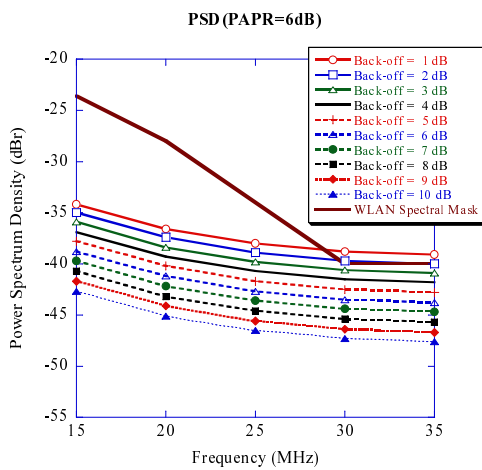


図 5.16 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=6dB, CR=1.37, CI/OFDM) 図 5.17 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=6.5dB, CR=1.6, CI/OFDM)

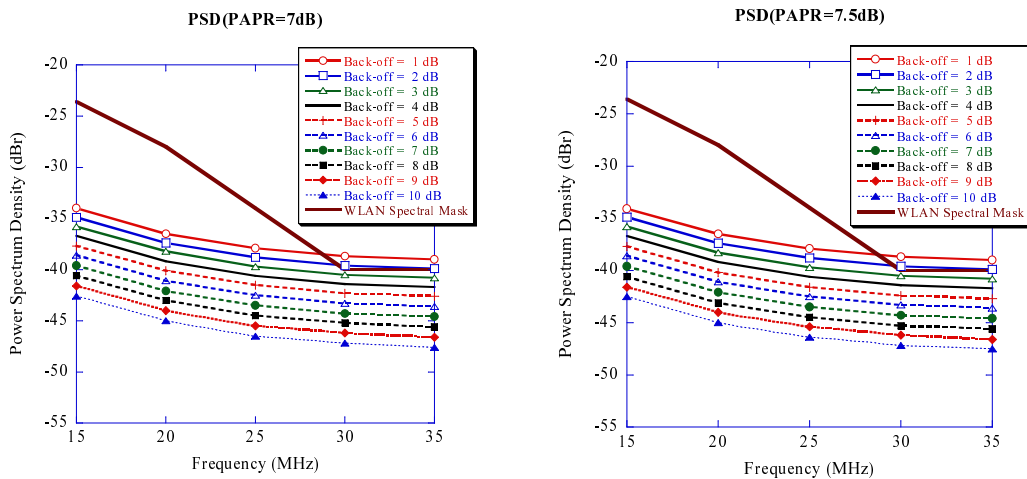


図 5.18 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=7dB,CR=1.9,CI/OFDM) 図 5.19 バックオフの違いによる PSD 特性 (PAPR=7.5dB,CR=2.33,CI/OFDM)

表 5.3 CI/OFDM システムモデルの各 PAPR に対する最適な IBO 値

PAPR	4.4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5
IBO	1	1	3	4	4	4	4	4

のスペクトルマスク規定を示す。図 5.12~ 図 5.19 も OFDM システムモデルの時と同様に、PAPR の増加に伴い、送信信号に歪みが生じ帯域外への成分が増加することが分かる。これらの図より、PAPR が 5 dB 以上のものは IBO の大きさによっては、無線 LAN のスペクトルマスクを満たしていないものがある。この場合は、OFDM システムモデルでも述べたように、実用システムに適用することができない。表 5.3 に各 PAPR に対して、使用することができる IBO の値を示す。

5.3.3 最適値の IBO を用いた TD 特性

図 5.20 と図 5.21 に、無線 LAN 環境下での OFDM と CI/OFDM システムモデルにおける IBO を最適値に設定した TD 特性を示す。横軸は、PAPR を表し、縦軸には SSPA を通した後に出力される OBO と定められた基準 BER(10^{-3}) を達成するための所要 SNR を足し合わせた TD を表す。これらの図においては、それぞれの PAPR において、IBO に表 5.2 と表 5.3 で得られた最適値を用いることにする。

OFDM と CI/OFDM システムモデルの両方とも繰り返し処理の回数が増えるごとに TD を低く抑えることができる。ただ、繰り返し処理の回数が増えるごとに、TD の値があまり変わらなくなっているのも確認できる。よって、実際の通信システムに適用する場合においては、繰り返し処理の回数に比例して計算量やフィルタ遅延が大きくなることも考慮にいて、繰り返し処理の回数を決める必要がある。

OFDM システムモデルにおける、それぞれの繰り返し処理の回数による Efficient PAPR は、繰り返し処理 1, 2, 3, 4 回の時、7 dB, 6.5 dB, 6 dB, 6 dB を示す。表 5.4 に OFDM システムモデルでの繰り返し処理の回数に応じた Efficient PAPR と TD を示す。同様に CI/OFDM システムモデルにおける、それぞれの繰り返し処理の回数による Efficient PAPR は、繰り返し処理 1, 2, 3, 4 回の時、全て 4.5 dB を示す。表 5.5 に CI/OFDM システムモデルでの繰り返し処理の回数に応じた Efficient PAPR と TD を示す。

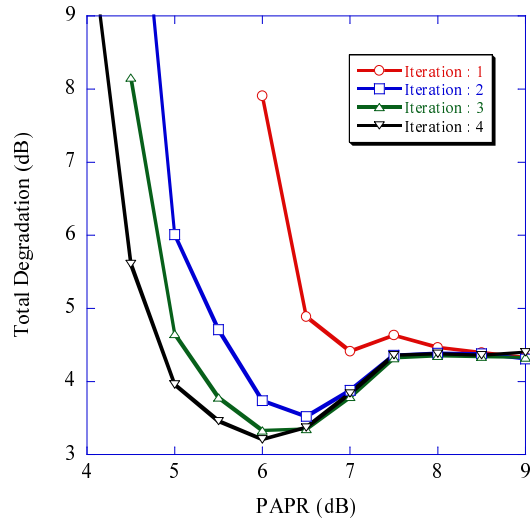


图 5.20 TD 特性 (OFDM, Iteration:1-4, IBO=Optimization)

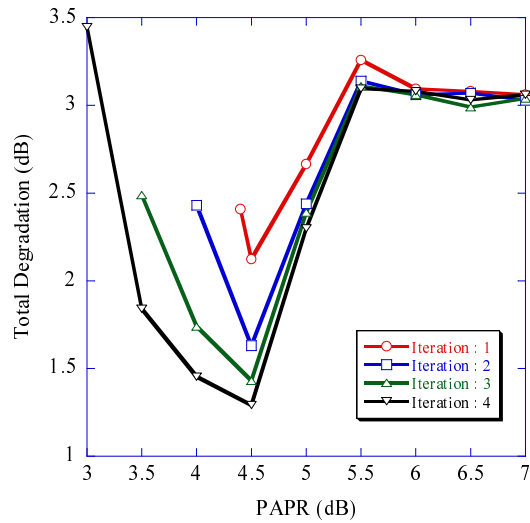


图 5.21 TD 特性 (CI/OFDM, Iteration:1-4, IBO=Optimization)

表 5.4 OFDM システムモデルにおける Efficient PAPR と TD (IBO=Optimization)

	Iteration : 1	Iteration : 2	Iteration : 3	Iteration : 4
Efficient PAPR (dB)	7	6.5	6	6
(TD (dB))	(4.41)	(3.52)	(3.33)	(3.21)

表 5.5 CI/OFDM システムモデルにおける Efficient PAPR と TD (IBO=Optimization)

	Iteration : 1	Iteration : 2	Iteration : 3	Iteration : 4
Efficient PAPR (dB)	4.5	4.5	4.5	4.5
(TD (dB))	(2.12)	(1.63)	(1.43)	(1.29)

5.4. 現行システムと Efficient PAPR 評価法を用いたシステムとの無線 LAN 環境における性能比較

ここでは、5.3 節で得られた無線 LAN のスペクトルマスクで規定した場合の最適な IBO 値で評価して得られた Efficient PAPR 評価法を用いたシステムの結果と現行の無線 LAN システムにおいて、PAPR、増幅器 (SSPA) の効率性、総劣化量 (TD) の観点からシステムの性能評価の比較を行うことにする。増幅器の効率に関しては、PAPR の大きさに応じて効率が変化するものとする [19]。

表 5.6 と表 5.7 に OFDM と CI/OFDM システムモデルにおける無線 LAN 環境下での現在使用されているシステムと提案指標である Efficient PAPR で評価されたシステムとの比較を表す。IEEE 802.11a での無線 LAN の基準は、PAPR=8 dB で設計されている。

表 5.6 の OFDM システムモデルの結果をみると、PAPR においては、現行のシ

システムと比較すると提案指標を用いたシステムの繰り返し処理回数が1回の場合には1 dB、繰り返し処理回数が2回の場合には1.5 dB改善できることが確認できる。それに伴い、Class Aでの増幅器の効率は、2%と4%向上し、Class Bでの増幅器の効率は4%と6%向上することがわかる。そして、総劣化量は現行システムと比較すると、繰り返し処理回数が1回の場合には2.7 dB、繰り返し処理回数が2回の場合には3.58 dB改善できることが確認できる。

同様に、表5.7のCI/OFDMシステムモデルの結果をみると、現行のシステムと比較すると提案指標を用いたシステムの繰り返し処理回数が1回と2回の場合の両方とも3.5 dB改善できることが確認できる。それに伴い、Class Aでの増幅器の効率は10%向上し、Class Bでの増幅器の効率は15%向上することがわかる。そして、総劣化量は現行システムと比較すると、繰り返し処理回数が1回の場合には4.68 dB、繰り返し処理回数が2回の場合には5.17 dB改善できることが確認できる。

表5.6、5.7より、OFDM、CI/OFDMシステムモデルの両方において、Efficient PAPR指標で評価したシステムの方が、SSPAの効率、総劣化量の優れた最適なPAPRを見つけることができる。よって、この指標を用いることで、無駄のない通信システムを構築することができる。

表 5.6 無線 LAN 環境における現行システムと提案システムとの比較 (OFDM システムモデル)

	Current system	Proposed system (Iteration : 1)	Proposed system (Iteration : 2)
PAPR	8 dB	7 dB	6.5 dB
Efficiency of SSPA (Class A)	20 %	22 %	24 %
Efficiency of SSPA (Class B)	32 %	36 %	38 %
Total Degradation	7.1 dB	4.4 dB	3.52 dB

表 5.7 無線 LAN 環境における現行システムと提案システムとの比較 (CI/OFDM システムモデル)

	Current system	Proposed system (Iteration : 1)	Proposed system (Iteration : 2)
PAPR	8 dB	4.5 dB	4.5 dB
Efficiency of SSPA (Class A)	20 %	30 %	30 %
Efficiency of SSPA (Class B)	32 %	47 %	47 %
Total Degradation	6.8 dB	2.12 dB	1.63 dB

5.5. IBOをPAPRと同じ値に設定した場合のTD特性

5.3.1 節と 5.3.2 節で示した結果の通り、IBO の設定においてはスペクトルマスク規定の条件に応じて変化させる必要性がある。また無線 LAN のスペクトルマスク規定は、他のシステムと比較しても最低限満たさなければならない基準である。よって、スペクトルマスク規定が無線 LAN のスペクトルマスク規定より厳しい条件下においても適用でき、また全体の干渉なども考慮にいれて、IBO の値に幅を持たせたシミュレーション検証を行うことにする。ここでは、IBO の値を PAPR と同じ値に設定して、その時の TD 特性を調べることにする。

図 5.22 と図 5.23 に OFDM と CI/OFDM システムモデルにおける IBO の値を PAPR と同じ値に設定した TD 特性を示す。横軸は PAPR を表し、縦軸は TD を表す。OFDM と CI/OFDM システムモデルの両方において、繰り返し処理の回数が増加するごとに、TD を低く抑えることができる。こちらも先ほどと同様に、繰り返し処理の回数が増加するごとに、計算量やフィルタ遅延が大きくなるので、実際の通信システムに適用する場合にはこれらを考慮に入れて繰り返し処理の回数を決める必要がある。

OFDM と CI/OFDM システムモデルの両方において、TD が最小を示す時の PAPR より大きい PAPR においては、PAPR の増加に伴い、TD が増加していることが確認できる。これは、IBO を PAPR と同じ値に設定したために、SSPA を通した後に出力される OBO が増加したことが原因と考えられる。また、TD が最小を示す時の PAPR より小さい PAPR においては、CAF を行い信号を大きくカットしているため、信号に歪みが生じてしまい BER の劣化の影響が大きく受けていることが分かる。これらを、図 5.22 の繰り返し処理 1 回の OFDM システムモデルを例にとって確認をする。繰り返し処理が 1 回の OFDM システムモデルにおいては、TD が最小を示す時の PAPR は、7 dB である。PAPR が 7 dB 以上においては、PAPR が大きくなるにつれて、TD も増加している。これは、先ほど述べた OBO の影響が原因である。一方、PAPR が 7 dB 以下においては、PAPR が小さくなるにつれて、TD も増加している。これは BER の劣化の影響が原因である。よって、繰り返し処理が 1 回の時の OFDM システムモデルの、Efficient PAPR は、TD が最小を示す 7 dB の時である。これと、同様に OFDM と CI/OFDM シ

ステムモデルのそれぞれの繰り返し処理の回数に応じた Efficient PAPR と TD を表 5.8 と表 5.9 に示す。

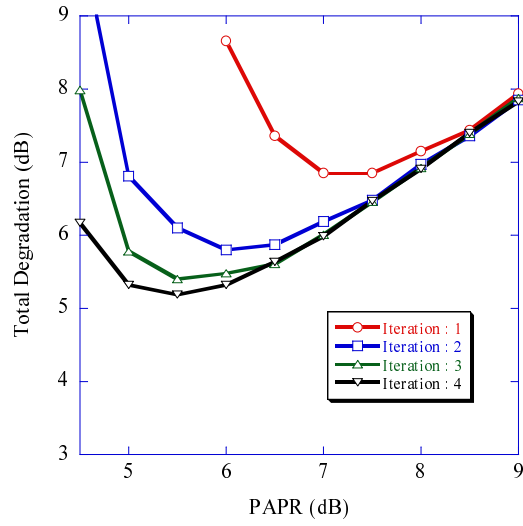


図 5.22 TD 特性 (OFDM, Iteration:1-4, IBO=PAPR)

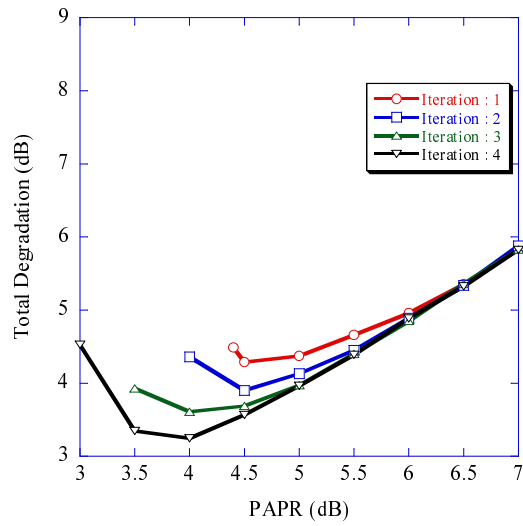


図 5.23 TD 特性 (CI/OFDM, Iteration:1-4, IBO=PAPR)

表 5.8 OFDM システムモデルにおける Efficient PAPR と TD (IBO=PAPR)

	Iteration : 1	Iteration : 2	Iteration : 3	Iteration : 4
Efficient PAPR (dB)	7	6	5.5	5.5
(TD (dB))	(6.85)	(5.8)	(5.4)	(5.19)

表 5.9 CI/OFDM システムモデルにおける Efficient PAPR と TD (IBO=PAPR)

	Iteration : 1	Iteration : 2	Iteration : 3	Iteration : 4
Efficient PAPR (dB)	4.5	4.5	4	4
(TD (dB))	(4.29)	(3.9)	(3.61)	(3.24)

5.6. 本章のまとめ

本章では、Efficient PAPR 指標の有効性を示すために、無線 LAN 環境下での SSPA の IBO を最適値に設定し、現行の無線 LAN(IEEE 802.11a) システムと、Efficient PAPR で評価されたシステムとの比較を行った。また、無線 LAN 以外のシステムにも適用できるように、SSPA の IBO に幅を持たせて、IBO を PAPR と同じ値に設定を行い、シミュレーション検証も行った。その結果、Efficient PAPR 指標を用いることで、従来より評価指標として用いられている PAPR 指標よりも全体のシステムを考慮に入れた性能評価を行うことができ、システムに応じた PAPR を求めることが可能になった。

無線 LAN の環境下でスペクトルマスク規定を満たす IBO を用いた場合の PAPR と、IBO を PAPR と同じ値で設定した場合の Efficient PAPR と総劣化量の比較をする。表 5.4 と表 5.8 の OFDM システムモデルにおいては、Efficient PAPR は繰り返し処理回数が 1 回の時は同じで、繰り返し処理回数が 2 回から 4 回においては、0.5 dB だけ IBO を PAPR と同じに設定した方が低く抑えることができる。

また、総劣化量を比較すると、繰り返し処理の回数に関係なく IBO を最適化させた方が低く抑えることができ、全ての繰り返し処理回数の総劣化量を平均すると 2.19 dB 低く抑えることができる。

一方、表 5.5 と表 5.9 の CI/OFDM システムモデルにおいては、Efficient PAPR は繰り返し処理回数が 1 回と 2 回の際は同じで、繰り返し処理回数が 3 回と 4 回の際は 0.5 dB だけ IBO を PAPR と同じに設定した方が低く抑えることができる。また、総劣化量を比較すると、繰り返し処理の回数に関係なく IBO を最適化させた方が低く抑えることができ、全ての繰り返し処理回数の総劣化量を平均すると 2.14 dB 低く抑えることができる。

これらの結果より、実際の通信システムに適用する場合には、総劣化量をなるべく低く抑えなければいけないシステムにおいては IBO の値を最適化させる必要がある。また総劣化量より PAPR をなるべく低く抑えなければいけないシステムにおいては IBO の値を PAPR と同じ値を設定する必要があることがわかる。

第6章 結論

本論文では、従来より評価指標として用いられている PAPR における問題について述べ、PAPR 指標に代わる新たな提案手法の評価指標である Efficient PAPR 指標の提案を行い、その有効性についてクリッピング&フィルタリングを用いた OFDM 方式と CI/OFDM 方式による検証により確認した。

OFDM 方式のようなマルチキャリア通信の信号は変調された各キャリアの足し合わせであるために、信号の平均電力に比べて極めて高いピーク電力を持つ信号が発生してしまう。そのピーク電力と平均電力の比を表す指標として従来より PAPR が用いられている。しかし、PAPR 指標においては、PAPR の低減に伴う BER の劣化、帯域外輻射、非線形特性をもつ増幅器の影響が考慮されておらず、実際の通信システムに適用する場合、ただ単純に PAPR を低く抑えるだけでは不十分である。

そこで、信号品質の影響を表す BER の劣化と非線形増幅器を運用する場合の OBO を考慮に入れて、総劣化量を最も抑えることができる PAPR のことを Efficient PAPR とし、この評価指標を用いて検証を行った。

提案手法の有効性を実証するために、2つの条件下で計算機シミュレーションによる特性評価を行った。1つ目は、無線 LAN のスペクトルマスク規定を満たす範囲で IBO の値を最適化した特性評価を行い、2つ目は IBO の値を PAPR と同じに設定した時の特性評価を行った。

その結果、無線 LAN 環境においては、現行システムと比較して、提案手法である Efficient PAPR 指標を用いることで、従来の評価方法で得た最適点よりも良い点を見つけることが出来、繰り返し処理回数が1回の場合、PAPR は 1 dB 低減でき、SSPA の効率においては Class A では 2 %、Class B では 4 % 向上し、総劣化量では 2.5 dB 性能改善できることがわかった。

また、IBO の値に幅をもたせて、IBO を PAPR と同じ値に設定した場合においても検証を行い、評価指標として Efficient PAPR を用いることで、実際の通信システムに適用する場合に、システムの要求に応じたパラメータを決めることができることがわかった。

謝辞

本研究を行うにあたり、本学情報科学研究科 岡田 実 教授には、終始格別な御指導、御鞭撻を賜り、心より深く感謝致し、ここに厚く御礼申し上げます。

副指導教官として、御助言、御教示を賜りました、本学情報科学研究科 関 浩之 教授に深く感謝致します。

本学情報科学研究科 原 孝雄 准教授には数々の有益な御助言と御討論を頂きましたことを心から感謝致します。

本学学長特別顧問 山本 平一 先生には、貴重な御助言を頂くとともに、学生生活においてもお世話になりました。ここに深く御礼申し上げます。

本学情報科学研究科 齋藤 将人 助教 には、研究を進めるにあたり、日頃から多くの御指導、御議論をいただき研究を支えて頂きましたことを心より感謝致します。

日頃の研究活動を通し、御意見、御協力を頂きました本学情報科学研究科 宮本 龍介 助教に深く感謝致します。

本論文をまとめるにあたり、この2年間、日々研究に対する的確なアドバイスをいただき、また論文や資料の作成手順や研究を行う上での環境設定などについて日々御意見、御指導を頂きました、北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 Khoirul Anwar 助教には、心より感謝致します。

また同講座の皆様には、研究に限らず、日々の生活においても大変お世話になり、深く感謝致します。

最後に、本当に長い学生生活を今まで温かく見守り、支えてくれた家族に感謝致します。

参考文献

- [1] A. STD-B31, 地上デジタルテレビジョン放送の伝送方式. 電波産業会, 2001.
- [2] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Std., 1999.
- [3] *Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*, IEEE Std., 2005.
- [4] R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM for wireless multimedia communications*. Artech House Publishers, 2000.
- [5] 伊丹誠, わかりやすい OFDM 技術. オーム社, 2005.
- [6] K. Anwar, A. U. Priantoro, M. Saito, T. Hara, M. Okada, and H. Yamamoto, “On the PAPR Reduciton for Wavelet Based Transmultiplexer,” *International Conference on Communications and Computer Networks (CCN2004)*, pp. 138–143, November 2004.
- [7] D. A. Wiegandt, Z. Wu, and C. R. Nassar, “High-throughput, high-performance OFDM via pseudo-orthogonal carrier interferometry spreading codes,” *IEEEa Trans. on Commun.*, vol. 51, no. 7, July 2003.
- [8] Z. Wu, D. A. Wiegandt, and C. R. Nassar, “High-performance 64-QAM OFDM via carrier interferometry spreading codes,” *IEEE VTC-Fall 2003*, pp. 561–577, 2003.
- [9] H. Ochiai and H. Imai, “Performance analysis of deliberately clipped OFDM signals,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, pp. 89–101, Jan. 2002.

- [10] X. L. and L. J. C. Jr., “Effect of clipping and filtering on the performance of OFDM,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, pp. 131–133, May 1998.
- [11] K. Anwar, A. U. Priantro, T. Hara, M. Okada, and K. Ando, “Digital terrestrial television transmission over OFDM/FM using satellite communications system,” in *LASTED International Conference on Communications, Internet and Information Technology (CIIT 2004)*, S. Thomas, Ed., Virgin Island, USA, November 2004.
- [12] K. Anwar, *Peak-to-Average Power Ratio Reduction of OFDM Signals Using Carrier Interferometry Codes and Iterative Processing*. Master Thesis of Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, 2005.
- [13] 久保田明子, 上田裕紀, 富里繁, and 秦正治, “繰り返し生成による低ピーク OFDM 信号の受信特性,” 電子情報通信学会総合大会, B-5-51, March 2005.
- [14] R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Artech House Publishers, 2000.
- [15] C. Rapp, “Effects of HPA-nonlinearity on a 4-DPSK/OFDM-signal for a digital sound broadcasting system,” in *Proceedings of the Second European Conference on Satellite Communications, Liege, Belgium*, pp. 179–184, October 22-24 1991.
- [16] K. Anwar, *Peak power reduction for multicarrier systems in satellite and radio communications*. Ph.D. dissertation, Nara Institute of Science and Technology, 2008.
- [17] D. Wulich, “Definition of efficient PAPR in OFDM,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 20, pp. 832–834, September 2005.
- [18] T. Noguchi, K. Anwar, M. Saito, and M. Okada, “Efficient PAPR for OFDM and CI/OFDM systems with iterative clipping,” *5th International Confer-*

ence on Innovations in Information Technology, Al Ain. United Arab Emirates, December 16-18 2008.

- [19] S. L. Miller and R. J. O’Dea, “Peak power and bandwidth efficient linear modulation,” *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 46, no. 12, pp. 1639–1648, Dec. 1998.

研究業績

国際会議

- T. Noguchi, K. Anwar, M. Saito and M. Okada, "Efficient PAPR for OFDM and CI/OFDM Systems with Iterative Clipping", 5th International Conference on Innovations in Information Technology, Al Ain., United Arab Emirates, December, 2008.

大会発表

- 野口知宏, Khoirul Anwar, 原孝雄, 岡田実, "グラディエントクリッピングを用いた CI/OFDM の性能評価", 電子情報通信学会総合大会, B-5-8, 2008年3月.