

氏 名	MD. SAKIR HOSSAIN
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記番号	博理工乙第 245 号
学位授与年月日	平成 30 年 3 月 23 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	Spectrum Efficient Peak-to-Average Power Ratio Reduction for OFDM Systems (OFDM システムのための周波数効率の良いピーク対平均電力比低減)
論文審査委員	委員長 教 授 島村 徹也 委 員 教 授 長谷川孝明 委 員 教 授 大澤 裕 委 員 准教授 吉川 宣一

## 論文の内容の要旨

Wireless communications have witnessed an unprecedented growth in last two decades. This has enabled the explosive growth of multimedia communications in last decade, which demands high data rate. Since the spectrum is a limited resource, it is imperative to use it in the most efficient way to meet the demand. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), the most spectrum efficient waveform to date, is regarded as the best tool to meet the data rate demand. Meeting the rate demand, OFDM, however, introduces new problems, such as low energy efficiency, adjacent channel interference (ACI) and in-band noise, because of its high peak-to-average power ratio (PAPR). The high PAPR reduces the power efficiency of a high power amplifier (HPA), thereby causing power wastage; this reduces battery life of portable devices. Furthermore, this escalates operating expenditure of the networks. The ACI badly affects quality of service of the network by degrading bit error rate (BER). The high PAPR problem is so serious, from this reason OFDM could not be included in the uplink of fourth generation cellular networks considering longer battery requirement of cell phones. In addition, since most of the candidate waveforms for the forthcoming fifth generation (5G) wireless systems are based on the OFDM and energy efficiency is an important requirement of the 5G, it is necessary to make OFDM as an energy efficient system by reducing the high PAPR.

This thesis deals with the high PAPR issue. In contrast to the most of the traditional PAPR reduction techniques where spectrum efficiency of OFDM is partly compromised to attain the reduced PAPR by reserving a portion of the available bandwidth for either reducing PAPR or transmitting side information (SI), the aim of the thesis is to reduce PAPR maintaining 100% spectrum efficiency of an OFDM system. In this endeavor, we propose four different transmitter and receiver designs which attain significantly reduced PAPR without affecting the spectrum efficiency.

We propose a novel PAPR reduction scheme by utilizing pilot subcarriers in addition to their conventional use for channel estimation. We iteratively change the positions (which implies frequencies) of the pilot subcarriers among the data subcarriers to check which positions of the pilots produce the lowest PAPR. Instead of sending SI about the positions of the pilots, we design the receiver in such a way that it can detect the pilots blindly utilizing their comparatively

higher power and equidistant properties. This scheme can attain up to 2.5 dB PAPR reduction without sacrificing spectrum efficiency. Furthermore, the amount of power saving attained by it is also analyzed.

Next, we improve the performance of an existing null subcarrier assisted PAPR reduction technique which suffers from extremely high computational complexity and BER. We propose a new transmitter by changing switching strategy between the data and null subcarriers incorporating a new feature of the switched null subcarriers: any two neighboring null subcarriers must be equidistant. Utilizing the equidistant and zero energy property of the null subcarriers, we propose a very efficient receiver design that can attain more than 5 dB signal-to-noise ratio (SNR) gain and 98% reduction of the computational complexity.

The third proposed scheme modifies an existing PAPR reduction technique based on orthogonal pilot sequence (OPS). The OPS scheme suffers from very limited PAPR reduction capability. Instead of just changing pilot symbols' phases according to a set of orthogonal sequences as is done in the OPS scheme, we propose to use the pilot symbols' phases as the phase factors and multiply different groups of the data subcarriers by their respective phase factors produced from the corresponding pilot symbols' phases. This scheme can attain about three-times more PAPR reduction compared to the original OPS technique and requires 90% less computations compared to the existing modified OPS scheme.

Finally, we propose to improve dummy sequence insertion (DSI) and tone reservation techniques of PAPR reduction. These two techniques had been suffering from extremely low spectrum efficiency because of their requirement of the reservation of a certain number of subcarriers for the PAPR reduction. To overcome the shortcoming, we propose the notion of subcarrier group modulation which makes some data subcarriers free for the PAPR reduction by sending their corresponding data by some other means without any additional spectrum. This eliminates the rate loss caused by the PAPR reduction in the DSI scheme. In addition to the PAPR reduction application, it can be included for increasing spectrum efficiency of any unmodified OFDM system as well.

## 論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、平成 30 年 1 月 10 日に論文発表会を公開で開催し、多数の参加者のもとに、活発な質疑とともに論文内容の審査を行った。以下に、審査結果の要約を示す。

本論文は、無線通信システムにおいて幅広く利用されている直交周波数分割多重方式 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) に関し、その特徴を活かしつつ、問題点の改善に取り組むものである。限られた周波数帯域内で、効率的に複数のキャリアを取り扱う OFDM は、本質的に周波数効率性に優れている。また、サイクリックプレフィックス (Cyclic Prefix: CP) と呼ばれるガードインターバルを設けることにより、周波数選択性フェージングに耐性を与えることができる。しかしながら、OFDM の時間波形は、そのピーク対平均電力比 (Peak-to-Average Power Ratio: PAPR) が増大してしまうことがあり、高い送信パワーを必要とすることになる。これは、利用する電力増幅器に応じて、OFDM 方式における様々な特性劣化を引き起こす。従って、OFDM 方式においては PAPR 低減が重要な課題であり、本論文では、複数の従来技術を基本としつつ、4 つの PAPR 特性改善手法を提案し、それらの有効性をそれぞれ検証している。

まず第 1 章では、今日までの無線通信の普及とその将来の見込みに触れ、OFDM 方式の位置づけについて述べている。また、OFDM 方式の周波数効率性を保持する重要性を述べ、PAPR 低減を実現する提案法の概要をまとめている。そして、本論文の構成を説明している。

第 2 章では、理論展開の基礎として OFDM 方式についてまとめている。無線通信モデル、フェージング現象、符号間干渉の説明から、OFDM の発展の歴史とともに、マルチキャリア方式、直交性、信号生成、スペクトル特性、CP などの基礎的事項から、周波数効率性の定義に言及し、OFDM 方式での特性劣化が生じる原理までを詳細に説明している。

第 3 章では、PAPR の定義とその解釈が与えられ、従来の PAPR 低減手法を、その主として用いる技術的な側面から分類可能であることを示唆し、グラフ化して整理している。この章において、後述する PAPR 低減の提案法の基本技術が網羅しており、予備的な準備として数式表現が整理され、これまでの PAPR 低減研究が明解にまとめられている。

ここから続く 4 つの章において、本論文で提案する PAPR 低減のための方式がそれぞれ述べられる。

まず第 4 章では、パイロットシンボルをデータシンボルに組み入れる従来の OFDM 方式に工夫を与え、パイロットシンボルを等間隔に、かつデータシンボルよりも振幅値を大きく等しいレベルに設定する。このとき、パイロットシンボルの位置を 1 サンプルずつずらして、最小の PAPR を与えるパイロットシンボルとデータシンボルの組み合わせ設定で、OFDM 信号を生成し、それを受信側に届ける方法を提案する。受信側では、受信信号から、組み入れられているパイロット信号の位置情報を推定することで、データシンボルの情報を正確に受信することが可能である。計算機シミュレーション実験では、提案する PAPR 低減手法の有効性が確認されている。

第 5 章では、ゼロサブキャリアを利用する PAPR 低減手法が提案される。ゼロサブキャリアは、従来の OFDM 方式では、隣接する通信路との干渉を低減するために利用される技術であるが、ここでは、データシンボルとゼロサブキャリアをスイッチングするために利用する。PAPR を最小にする場合のスイッチングの設定で OFDM 信号が生成され、送信される。受信側では、受信信号からそのスイッチング情報を抽出できるため、送信側からの付加情報を利用することなく、送受信が可能となる。本章では、そのゼロサブキャリア支援型の提案手法の優位性を明らかにしている。

第6章の手法は、パイロットサブキャリアを利用する。パイロットサブキャリアに位相量を付加することで、その位相量の PAPR 最小化のための選択が可能である。しかしながら、通常はその位相量情報を受信側に伝送する必要がある。本章では、直交系列を導入することにより、この問題を可決する手法を提案している。提案法では、受信信号のみからパイロットサブキャリアに付加された位相情報を正確に推定することができる。計算機シミュレーション実験では、提案法の周波数効率を犠牲にすることなく、計算量の増大を避け、優れた PAPR を実現できる特性を実証している。

第7章では、サブキャリアグループ変調と呼ぶ、PAPR 低減のための新規の概念を導出し、それを従来の疑似系列挿入法と組み合わせることに成功している。サブキャリアグループ変調では、サブキャリアをいくつかのグループに分割し、そのそれぞれのグループに、疑似系列を利用して変調情報を付加する。この変調を PAPR が最小となるように設定するが、その変調情報は、受信側から変調推定方式を利用して推定可能である。計算機シミュレーション実験では、本提案法により、卓越した PAPR 低減が実現できることを示している。

第8章は、本論文のまとめである。提案する4つの PAPR 低減手法の特性を整理し、実際の環境においてそれぞれどのように利用可能であるかの示唆を与えている。

本論文は、以上に述べたように、OFDM 方式における PAPR 低減手法を提案し、その実験的評価を行っている。本論文の結果は、4編のレフリー付学術雑誌に採録され、また国際学会での発表で公表されている。

以上のように、本論文は新しい PAPR 低減手法の提案と、その有効性を検証した論文であり、博士（学術）の学位にふさわしい内容を持つものと判断し、審査委員会として「合格」の判定を行った。