

OFDM 伝送におけるピーク低減方式に関する研究

OFDMは、近年、多くの無線通信システムで用いられており、今後も多くの無線通信システムで採用されることが予想される。本稿では、OFDMの実用化における課題の1つであるピーク低減方式に関して行った研究について述べる。なお、本研究は岡山大学大学院 自然科学研究科モバイル通信学研究室（秦 正治教授，富里 繁助教授）との共同研究により実施した。

ふじい ひろまさ はぎわら じゅんいちろう よしの ひとし
藤井 啓正 萩原 淳一郎 吉野 仁

1. まえがき

無線LAN，WiMAX（Worldwide interoperability for Microwave Access）^{*1}，3GPP LTE（3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution）^{*2}，地上波デジタル放送など、最近の多くの無線通信システムや放送システムにおいては、基本的な伝送方式として直交周波数分割多重（OFDM：Orthogonal Frequency Division Multiplexing）が採用されている。これは、近年の伝送速度の高速化に対するニーズに起因している。高速伝送を行うには、より短い時間で1つの信号を送る必要があり、このような信号では、建物から反射波などによる受信品質の劣化が大きくなる。OFDMは、低速の無線回線（サブキャリア）を複数束ねて伝送するなどにより、反射波などによる影響に対して耐性が高い方式となっている。

一方、OFDMを実現するうえで、送信信号において大きな電力を持つ信号（以下、ピーク信号）が発生するという問題がある。このようなピーク信号が送信機の電力増幅器などの非線形デバイスに入力されると、出力信号に歪みが生じる。この歪みは伝送品質の劣化や隣接システムに対して干渉となる帯域外輻射の増大の原因となる。入出力特性

の優れたデバイスを用いることにより、大きなピーク信号に対して歪みを小さくすることも可能であるが、消費電力の増加などにつながる。このため、送信信号に発生するピーク信号は小さいことが望ましい。

従来、このピーク信号の発生に対して、さまざまな方式が提案されているが、本研究では、ピーク低減効果が大きく、ピーク低減に関する制御情報が不要なクリッピングとフィルタリングを用いる方式[1]をベースとしたピーク低減方式に着目し、同方式について先行して研究を進めていた岡山大学大学院 自然科学研究科モバイル通信学研究室と共同で検討を進めた。本稿では、OFDMの基本原理とピーク信号の発生に関して説明した後、本研究で提案した以下の2つのピーク低減に関する方式について概説する。

- ・サブキャリアごとにピーク低減信号の制限を行うピーク低減方式
- ・ピーク低減信号専用サブキャリア使用時のピーク低減信号生成方式

2. OFDMの原理とピーク信号の発生

OFDMが適用された送信機の構成を図1に示す。デジタル通信では、すべての情報（音声、ファイルなど）は0か1のビット列として送信される。このビット列は、シンボルマッピング部にてベクトルで表されるシンボル^{*3}にマッピングされる。マッピングの方法は、変調方式（4位相偏移

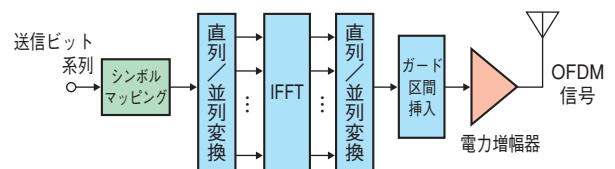


図1 送信機構成

*1 WiMAX：世界的な標準化団体IEEEで標準化された規格IEEE802.16に基づく無線通信システムを指す。
*2 3GPP LTE：第3世代移動通信システム（FOMA）の標準化を行っている団体である3GPPにおいて、第3世代移動通信システムの高度化との位置付けで検討されている規格。

*3 シンボル：本稿では、変調時の電波の振幅、位相を決定する値で、ベクトル（2つの数の組）で表現される。送信される情報ビット（の組）で決定される。

変調 (QPSK: Quadrature Phase Shift Keying)^{*4}, 16値直交振幅変調 (16QAM: Quadrature Amplitude Modulation)^{*5}など)により異なる。続く逆高速フーリエ変換 (IFFT: Inverse Fast Fourier Transform)^{*6}部には、複数のシンボルが同時に入力されるが、これらは、複数のサブキャリアで並列に伝送される。サブキャリアとは、周波数の異なる正弦波であり、対応するシンボルの種類に応じて各サブキャリアの位相や振幅が設定される (図2)。ここで位相とは、正弦波を送信するタイミングであり、位相を変化させることは、正弦波の巡回シフト (横方向にずらすこと) に対応する。そして、これらの信号が合成されOFDM信号が生成される。

IFFT部には、一度に多くのシンボルが入力されるため、さまざまなシンボルの組合せの種類が存在し、送信するシンボルの組合せによっては、非常に大きなピーク信号が発生する。

従来、ピーク低減を行う方式として、クリッピングとフィルタリング法 (以下、従来方式) が提案されている [1]。クリッピング (ピーク信号のカット) を行うと、信号の電力に比べ小さいレベルではあるが、占有帯域内外にピーク低減信号が発生する。特に、帯域外に輻射される電力は、他システムなどへの干渉の原因となるため、一般に厳しく制限される。そこで、この方法では、フィルタリングにより帯域外のピーク低減信号を抑圧する。

3. サブキャリアごとにピーク低減信号の制限を行うピーク低減方式

3.1 現状と課題

OFDMにおいては、サブキャリアの組ごとに割り当てる

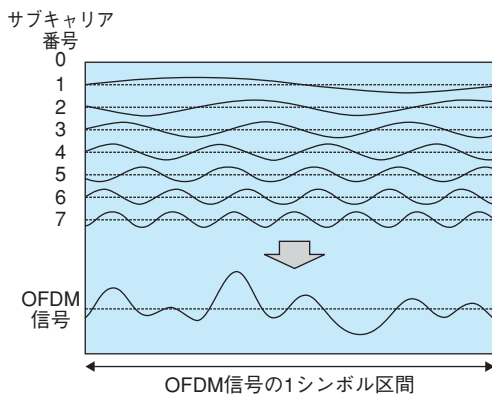


図2 OFDM 信号 (時間領域)

ユーザを変えることで、複数のユーザの信号を同時に伝送することが可能である。一方で、最近の通信システムでは、電波状況により変調方式を変えることで、電波状況の良い場所では高速な伝送を可能としている。このため、OFDM伝送においては、「サブキャリアにより、異なる変調方式が適用される」状況が生じ得る。この一例を図3に示す。

従来方式では、占有帯域内でのピーク低減信号の制御が考慮されていないため、占有帯域内にわたり均一に発生する。ピーク低減信号は、受信機での信号検出という観点からは、雑音である。そして、高速な伝送速度に対応する変調方式は雑音に対する耐性が低く、ピーク低減信号が伝送品質の大きな劣化要因となり得る。

3.2 提案方式

提案方式では、対応するサブキャリアで適用される変調方式に従い、挿入されるピーク低減信号の大きさを調整する (適応的なフィルタリングを行う) [2]。提案する送信機は、図1におけるIFFT部を、図4に示す構成に変更したものととなる。この方法で、一度生成されたOFDM信号は、ピーク検出処理部に入力され、ピーク信号のみが抽出される。次に高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform)^{*7}部により、ピーク信号の各サブキャリアに対応する信号成分が計算される。続くフィルタリング処理部では、帯域外のピーク低減信号の抑圧に加え、雑音耐性の低い変調方式が用いられているサブキャリアに加算されるピーク低減信号が少なくなるように制御される。また、一度で大きなピーク低減効果を得ようとすると、伝送品質の劣化が大きくなるため、これらの処理を複数回、繰り返す。

3.3 特性評価

本評価においては、128サブキャリアのOFDM伝送を想定し、各サブキャリアではQPSKあるいは16QAMが使用さ

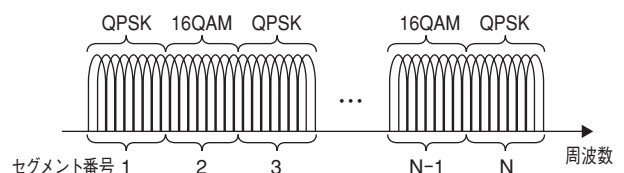


図3 OFDM 信号 (周波数領域) と変調方式の割当ての一例

* 4 4位相偏移変調: 電波の位相を4つのパターンに変化させることで信号を伝送する (シンボルの種類も4種類)。この場合1つのシンボルにマッピングされるビット数は2bitである。
 * 5 16値直交振幅変調: 電波の位相と振幅を延べ16のパターンに変化させることで信号を伝送する (シンボルの種類も16種類)。この場合1つのシンボルにマッピングされるビット数は4bitである。

* 6 逆高速フーリエ変換: 入力された複数の周波数成分に対応する時間信号系列を効率良く計算する方法。
 * 7 高速フーリエ変換: 入力された時間信号系列における周波数成分を効率良く計算する方法。

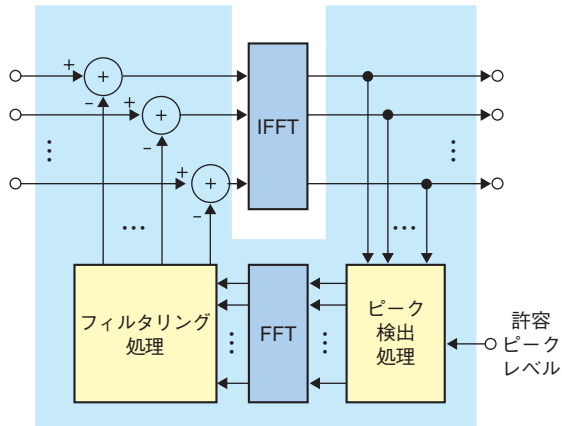


図4 提案する処理を行う送信機構成 (一部)

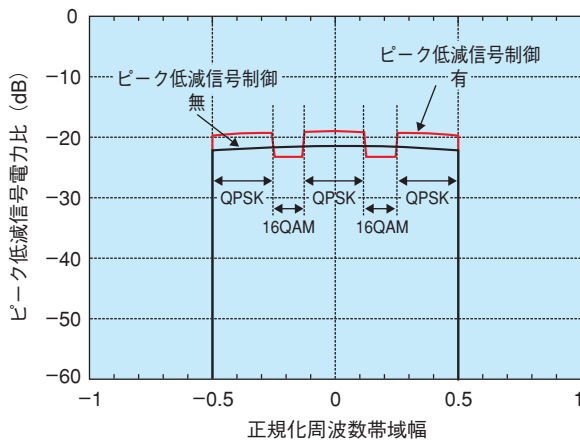
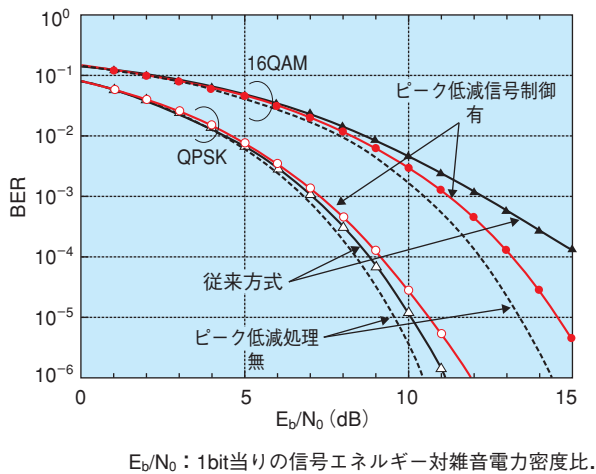


図5 ピーク低減信号の周波数特性



E_b/N_0 : 1bit当りの信号エネルギー対雑音電力密度比。

図6 BER特性

れるものとする、さらに、前述のフィルタリングの動作としては、16QAM信号を送信するサブキャリアに対して加算されるピーク低減信号が一定値以下になるように制御を行う。

計算機シミュレーションにより評価した各帯域に挿入されるピーク低減信号の量を図5に示す。図より、耐性の低い16QAMの伝送に用いている帯域では、ピーク低減信号が小さく、また、雑音に対する耐性の高いQPSKが使用されている帯域には、ピーク低減信号が大きくなるように制御されていることが分かる。

QPSKと16QAMで伝送した情報に対するビット誤り率 (BER: Bit Error Rate) の特性を図6に示す。ここでは、最終的に得られる送信信号のピーク電力対平均電力比 (PAPR: Peak to Average Power Ratio)^{*8}が6dB以下となるように設定した。BER = 10^{-4} における特性に着目すると、QPSKでは制御を行わない場合に対して若干の劣化があるものの、ほぼ同等の特性を示すのに対して、16QAMにおいては制御を行わない場合と比較して大きな改善が得られていることが分かる。

4. ピーク低減信号専用サブキャリア使用時のピーク低減信号生成方式

4.1 提案方式

セルラシステムを想定した場合、隣接セルとの干渉を考慮すると、セル内では一部のサブキャリアしか用いない状態での運用も想定される。この場合、割り当てる電力値に一定の制限を加えることで、これらの使用されない一部のサブキャリアを、ピーク低減信号専用として使用することも可能となると考えられる。そこで、3章で示した提案方式 (以下、ピーク信号制御方式) を拡張することで、ピーク低減信号専用のサブキャリア使用時のピーク低減信号生成方式 (以下、拡張ピーク信号制御方式) を検討した。具体的には、ピーク信号制御方式において、ピーク低減信号を用いるサブキャリアに対しては、データを送信するサブキャリアよりもピーク低減信号に対する許容レベルを大きく設定する。

4.2 特性評価

本評価においては、64サブキャリアのOFDM伝送を想定し、占有帯域の両端に位置するそれぞれ5サブキャリアを

*8 ピーク電力対平均電力比: ピークの大きさを示す指標であり、平均信号電力に対するピーク信号の電力の比を指す。

ピーク低減信号専用として使用可能であるとした。

ピーク信号制御方式、拡張ピーク信号制御方式および従来方式を適用した場合のピーク低減効果を図7に示す。

図において、全サブキャリアの許容レベルを一定とするピーク信号制御方式では、 $\text{PAPR} = 9\text{dB}$ に対応する相補的累積確率分布 (CCDF: Complementary Cumulative Distribution Function) が 10^{-4} となっている。CCDFとは、生成されたOFDMシンボルのPAPRが発生する確率で、この場合、 10^4 OFDMシンボルに1回の確率で9dB (平均電力の約8倍)を上回る信号が発生することを意味する。一方で、拡張ピーク信号制御方式では、CCDFが 10^{-4} に対応するピーク電力は6.5dB弱であり、前述のピーク信号制御方式に比べ3dB近くの改善 (ピーク信号の大きさをほぼ半分にするに相当) が得られる。また、拡張ピーク信号制御方式と従来方式では、同等のピーク信号低減効果が得られている。ただし、拡張ピーク信号制御方式は、従来方式に比べ、データサブキャリアにおけるピーク低減信号量が少なく抑えられているため、低いBERでの伝送が可能である。

さらに、本評価条件における拡張ピーク信号制御方式では、ピーク低減信号専用サブキャリアで送信される電力がデータ信号を送信する場合の約1/20であり、他のセルに対して与える影響を少なく抑えることも可能であると考えられる。

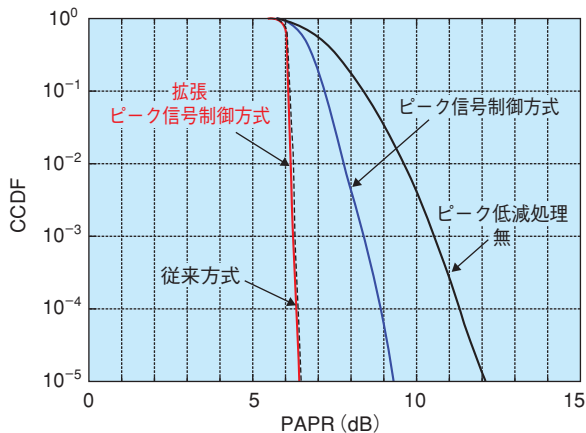


図7 ピークの出現確率

5. あとがき

OFDMの実用化における課題の1つであるピーク低減に関して、クリッピングとフィルタリング法に基づくピーク低減信号生成法を提案し、特性評価により提案方式の有効性を示した。

今後、本検討の成果がWiMAXにおいて活用されるように検討を進めたいと考えている。

文献

- [1] X. Li and J. Cimini: "Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM," IEEE Commun. Lett., Vol. 2, No. 5, May 1998.
- [2] A. Kubo, S. Tomisato, M. Hata and H. Yoshino: "Transmission Performance Evaluation for Designing an OFDM Transmitter that Offers Iterative Peak Reduction," IEICE Trans. FUNDAMENTALS Lett., Vol.E89-A, No. 7, Jul. 2006.