

博士論文審査報告書

論文題目

A Study on Nonlinear Distortion
Suppression Scheme Employing Transmit
Power Control in OFDM Transmission
OFDM 伝送における送信電力制御を用いた
非線形ひずみ抑圧法に関する研究

申請者

Shoya	TAKEBUCHI
竹渕	翔矢

情報理工学専攻 無線信号処理研究

2015年2月

近年のスマートフォンに代表される無線通信ネットワークのトラフィック量の著しい増加に伴い、無線通信システムにおける更なる高速化・大容量化は、まさに喫緊の課題である。無線通信システムの高速化を実現するためには、遅延波が次シンボルに対して干渉することにより生じるシンボル間干渉を克服することが不可欠となる。

直交周波数分割多重 (OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing)方式は、複数の搬送波 (サブキャリア) を用いた並列伝送を最小の周波数間隔で行うことにより、送信信号の伝送速度を実効的に低速化させる伝送技術であり、無線通信の高速化を図る上で問題となるシンボル間干渉の影響を効果的に克服できる。したがって、OFDM方式は、現在、3GPP-LTEに代表される移動通信システム、IEEE 802.11 高速無線 LAN、ISDB-T 地上波デジタル放送といった高速無線システムの共通基盤技術として広く適用されており、次世代の移動通信システムや高速無線 LAN に対しても、引き続き、その適用が検討されている。

ところが、OFDM方式は、単一の搬送波伝送とは異なり、多数の搬送波を束ねることにより信号伝送を行うことから、送信波形が多数の搬送波の重ね合わせとなり、時間領域波形のピーク対平均電力比 (PAPR : Peak-to-Average Power Ratio) は極めて高くなる問題がある。具体的には、OFDM時間領域波形が送信機内の電力増幅器 (HPA : High Power Amplifier) を通過すると、HPAの入出力特性の非線形性から、深刻な非線形ひずみが発生し、帯域外輻射の増加とともにビット誤り率 (BER : Bit Error Rate) の劣化が生じる。

これまでに、OFDM方式特有の問題点である非線形ひずみの対策として、プレディストーション、クリッピング&フィルタリング (CAF : Clipping and Filtering)、部分系列伝送をはじめ数々の手法が提案されてきたが、中でも、CAFは、プレディストーションや部分系列伝送が必要とする十分なバックオフ余裕やサブキャリア毎の制御情報伝送といった制約条件を受けることなく、簡易な構成で帯域外輻射の影響を抑圧できることから、実用的に優れた非線形ひずみ抑圧法として知られている。ところが、CAFは、HPAにおいてピーク信号の抑圧を生じさせないよう、その前段で予めクリッピング処理を時間領域波形に対して行うことから、帯域外輻射を十分に抑圧できるものの、深刻な波形ひずみが生じ、BERが大幅に劣化する問題がある。CAF適用時に生じるBERの劣化の対策については、これまでに、送信側の対策として、ピーク低減用サブキャリアを挿入する方式やフィルタリングによって生じるピーク再現量を予め調べることによりクリッピングレベルを常に最適に保持する方式が提案されており、受信側の対策としては、非線形ひずみ成分を推定・除去する方式が提案されている。しかしながら、これらの方式は、いずれも繰り返し信号処理を必要とすることから、1シンボル毎に多くの計算コストを要し、リアルタイムの演算処理を行う上で大きな障害となる。また、これらのアプローチは、総じ

てヒューリスティックな信号処理機構であることから、システムを動作させる前に伝送路環境とシステムとの整合性の検証を十分に行い、検証結果をシステムの各種パラメータへ反映させることが求められる。

本論文の筆者は、上記問題に着目し、CAFにおけるBERの劣化といった問題点を簡易かつ決定論的なアプローチにより克服する方式を考案した。具体的には、CAFの前段に送信電力制御機構を設け、送信電力制御を行う際の送信信号レベルを簡易な理論式により決定する方式の提案を行い、その有効性を計算機シミュレーションにより明らかにした。さらに、今後の無線通信システムの更なる大容量化の要求に鑑み、その鍵を握るMIMO(Multiple Input Multiple Output)技術に対して、提案技術の適用を図り、その高い適用性と有効性を明らかにした。

本論文は、6章から構成されており、以下各章の概要を述べ、評価を加える。

第1章「Introduction」では、本研究の背景と目的を明らかにするとともに、本論文の概要について述べている。

第2章「Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)」では、本研究を理解する上で必要となるOFDM方式の概念と基本原理について述べるとともに、フェージングに加えて非線形ひずみが存在する環境下におけるOFDM信号の振る舞いについてBER特性と周波数特性の両面から詳細に解説している。

第3章「OFDM Clipping and Filtering Employing Transmit Power Control」では、CAFの問題点であるBERの劣化を克服すべく、希望信号電力対雑音及びひずみ電力比(SNDR: Signal-to-Noise-plus-Distortion Power Ratio)をHPAのバックオフと受信CNRをパラメータとした理論式により算出するとともに、その値が最大となるような入力信号レベルで送信電力制御を行う方式を提案している。具体的には、離散的な入力信号レベルにより送信電力制御を行う方式とOFDM信号振幅の統計的な性質を用いてより一層簡易な形で連続的に送信電力制御を行う方式を提案している。特性評価の結果、提案方式は、CAFへの入力信号レベルをSNDRが最大となるように制御でき、送信電力レベルを一定に保持した通常のCAF方式と比較して、帯域外輻射の影響を抑圧しつつ、BER特性を大幅に改善できることを明らかにしている。提案方式は、送信電力制御の指標となるSNDRと送信信号レベルを関係づけた簡易な理論式により、繰り返し信号処理を一切用いることなくBER特性の劣化を克服できることから、OFDM方式が適用される、移動通信システム、高速無線LANをはじめとする各種無線通信システムの周波数利用効率を大幅に高められる可能性がある。なお、本章で示した提案の内容および特性評価の結果は、今後求められる無線通信システムの大容量化の鍵となるMIMO技術への適用を検討した次章以降の提案のベースとなるものである。

第4章「OFDM Clipping and Filtering Employing Transmit Power Control

for SU-MIMO Systems」では，単一ユーザの高速無線通信に有効なSU-MIMO (Single-User MIMO)伝送を対象として，前章の内容をさらに発展させた提案を行っている．具体的には，SU-MIMO伝送に対して通常のCAF方式を適用した場合，各送信アンテナにおいて生じる非線形ひずみの影響が送信アンテナ数の増加に伴い受信側で累積し，伝送特性が大幅に劣化するといった問題点を指摘し，非線形ひずみを各送信アンテナで抑圧できる提案方式が受信側の信号分離性能を大幅に向上させ，特に，信号分離技術として空間ダイバーシチ利得が得られるMLD (Maximum Likelihood Detection)が適用された場合，BER特性を大幅に改善できることを明らかにしている．第3章で述べた基本となる提案を，無線通信システムのより一層の高速化に不可欠なSU-MIMO伝送への適用に発展させた点は評価できる．

第5章「OFDM Clipping and Filtering Employing Transmit Power Control for MU-MIMO Systems」では，同一周波数・同一時刻に複数のユーザとの通信を可能にするMU-MIMO(Multi-User MIMO)伝送を対象として，第3章の内容をさらに発展させた提案を行っている．具体的には，MU-MIMO伝送に対して通常のCAF方式を適用した場合，全送信アンテナからの非線形ひずみが各ユーザ端末において重畳されることから，送信アンテナ数の増加に伴い伝送特性が大幅に劣化するといった問題点を指摘し，空間直交性を担保すべく，CAFへの入力信号レベルを全送信アンテナで共通化した上で，提案する送信電力制御の適用を図ることにより，BER特性を大幅に改善できることを明らかにしている．第3章で述べた基本となる提案を，無線通信システムの今後のより一層の大容量化に不可欠なMU-MIMO伝送への適用に発展させた点は評価できる．

第6章「Conclusion」では，本研究において得られた成果を総括している．

以上を要するに，本研究では，移動通信システム，無線LAN，地上波デジタル放送をはじめとする広帯域無線システムを基盤的に支えるOFDM方式を対象として，実用上避けることのできない非線形ひずみ問題に加えて，今後より一層求められる無線通信システムの高速化・大容量化に向けた課題を克服できる独創性の高い数々の提案を行い，基礎段階から応用段階に至る貴重で有効な知見を得ている．筆者の研究成果は，広帯域無線通信技術分野の発展に大きく貢献するものと考えられる．よって本論文は，博士（工学）早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める．

2015年2月

審査員

主査	早稲田大学教授	博士（工学）（早稲田大学）	前原	文明
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	高畑	文雄
	早稲田大学教授	博士（工学）（東京大学）	甲藤	二郎
	東北大学准教授	博士（工学）（早稲田大学）	平	明徳