

博士論文概要

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

2014 年 12 月

近年、モバイル・インターネットやスマートフォンの爆発的な普及による無線データトラヒックの急激な増加に伴い、無線通信システムへのさらなる高速化・高信頼化の要求が高まっている。このような要求を満足するためには、送信局と受信局間に多重伝搬路が形成されることによって生じるマルチパスフェージングへの対策が必須の課題であり、特に、高速無線通信を実現するためには、遅延波の影響に起因して生じる周波数選択性フェージングの影響を克服することが必要不可欠である。

このような周波数選択性フェージングの影響を効果的に抑圧できる無線通信方式の一つとして、直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)方式が挙げられる。OFDM方式はマルチキャリア伝送の一種であり、最小の周波数間隔に配置された複数の搬送波(サブキャリア)を用いて、異なる情報源を並列的に伝送する方式であり、高い周波数利用効率を実現できる。さらに、ガードインターバルを挿入することにより、周波数選択性フェージングに起因したシンボル間干渉を完全に抑圧できることから、高速無線通信システムの変調方式として、広く適用されている。

ところが、OFDM方式の問題点として、送信機内の電力増幅器(HPA: High Power Amplifier)をOFDM信号が通過した際に生じる非線形ひずみが挙げられる。具体的には、多数の搬送波の重ね合わせであるがゆえに、OFDM信号のピーク対平均電力比(PAPR: Peak-to-Average Power Ratio)は極めて高く、HPA通過後にクリッピングに代表される波形ひずみが発生し、ビット誤り率(BER: Bit Error Rate)が劣化するだけでなく、帯域外輻射が増加するといった問題が生じる。したがって、高速無線通信を実現すべく、OFDM方式を適用する場合、非線形ひずみをいかにして克服するかが極めて重要な課題と考えられる。本論文では、高速無線通信を実現する基盤技術として、OFDM方式に焦点をあて、OFDM方式特有の問題である非線形ひずみに対して有効なクリッピング&フィルタリング技術(CAF: Clipping and Filtering)の伝送特性を改善することを目的として行ってきた一連の研究成果をとりまとめたものである。本論文は、第1章から第6章までで構成されており、以下に各章の概要を説明する。

第1章では、本研究の位置付け及び目的について述べている。まず、上述したように、高速無線通信を実現するためには、周波数選択性フェージングの克服が不可欠であり、その対策として、OFDM方式が極めて有効であることを述べている。ところが、OFDM信号は、原理的にPAPRが極めて高くなることから、送信機内の電力増幅器を通過すると非線形ひずみが生じ、伝送特性が大幅に劣化するといった問題点を指摘している。このようなOFDM方式特有の問題点である非線形ひずみを克服すべく、これまでに、プレディストーション、CAF、部分系列伝送をはじめとする様々な手法が提案されてきたが、特に、CAFは、プレディストーションに要求されるバックオフに対する制約や部分系列伝送に要求されるサブ

キャリア毎の制御情報伝送を必要とすることなく、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であることを述べている。しかしながら、CAFでは、OFDM信号に対して、ピーク電力を制限すべく、フィルタリングに先立って、時間領域でクリッピングを行うことから、帯域外輻射は効果的に抑圧できるものの、BERが大幅に劣化するという問題点があることを指摘している。そこで、本研究では、CAFにおけるBERの劣化を克服することが目的であることを述べた後、1本のアンテナで送受信を行うSISO(Single-Input and Single-Output)伝送と複数のアンテナで送受信を行うMIMO(Multiple-Input and Multiple-Output)伝送の各々を対象として、BER特性の改善技術について検討を行うことを述べている。

第2章では、OFDM方式における非線形ひずみ対策技術の検討を進める上で理解の一助となる基礎知識について概説している。具体的には、OFDM方式の概念と基本原理について述べるとともに、周波数選択性フェージング環境下に加えて非線形ひずみ環境下におけるOFDM信号の振る舞いについてBER特性だけでなく周波数特性の観点からも概説している。特に、非線形ひずみでは、帯域外輻射が生じることから、ナイキストレートでサンプリングを行うと、スペクトルの折り返し(エイリアシング)が生じる問題があること、また、本問題を回避すべく、オーバーサンプリングが必要となることについて述べている。

第3章では、SISO伝送を想定したOFDM方式を対象として、CAFに基づく非線形ひずみ抑圧法の問題点、すなわちクリッピングによるBER特性の劣化のメカニズムについて説明するとともに、従来の代表的な対策技術について紹介している。具体的には、送信側の対策技術として、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有効であり、受信側の対策技術としては、非線形ひずみ成分を推定・除去する方式が有効であることを述べている。しかしながら、これらの方式は、いずれも比較的多くの計算コストを要する繰り返し信号処理に基づくヒューリスティックな手法であることから、これらの手法とは異なる、理論式を用いた簡易かつ決定論的なアプローチにより、CAFのBERの劣化といった問題点が克服されることが望ましいことを指摘している。以上の点に鑑み、本研究では、ヒューリスティックではなく決定論的な手法により、CAFにおけるBERの劣化を克服することを目的として、CAFの前段に送信電力制御機構を設けるとともに、CAFへの入力信号レベルを、非線形ひずみと熱雑音の両方の影響を考慮した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)が最大となるよう制御する方式を提案している。さらに、提案方式の有効性を明らかにすべく、送信電力制御を行わない通常のCAF方式を比較対象として、周波数スペクトルとBERの観点から計算機シミュレーションにより評価している。特性評価の結果、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、提案方式は、CAF への入力信号レベルの SNDR が最大となるように制御できることから、BER 特性を大幅に改善できることを明らかにしている。これより、提案方式が送信電力制御の指標となる SNDR と送信信号レベルとを関係づけた簡易な理論式を用いて、繰り返し信号処理を一切必要とすることなく、決定論的に BER 特性を改善できることを明らかにしている。

第 4 章では、第 3 章において提案した 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の応用として、本提案方式を単一ユーザの高速無線通信の実現に極めて有効な SU-MIMO (Single-User MIMO) 伝送に適用するとともに、その適用効果について検証している。具体的には、受信側の信号分離技術として、ZF (Zero-Forcing), MMSE (Minimum Mean Square Error), MLD (Maximum Likelihood Detection) といった 3 種類の信号分離技術を採り上げ、SU-MIMO 伝送に対して、通常の CAF 方式を適用した場合、各ストリームにおいて生じるクリッピングに起因したひずみの影響がストリーム数の増加に伴い累積することから、伝送特性が大幅に劣化し、特に MLD において期待される空間ダイバーシチ利得が大幅に低下することを指摘している。一方、提案する非線形ひずみ抑圧法を SU-MIMO 伝送に適用した場合、各送信ブランチにおいて行われる送信電力制御により、各ストリームにおいて生じる非線形ひずみを効果的に抑圧できることから、信号分離性能が大幅に向上し、BER 特性を大幅に改善できることを明らかにしている。

第 5 章では、第 4 章において対象とした単一ユーザとは異なり、複数のユーザを対象とした MIMO 伝送に対して、提案する非線形ひずみ抑圧法を適用するとともに、その適用法について検討している。具体的には、複数のユーザ端末を仮想的に大規模なアレーアンテナとみなすことにより実現できる MU-MIMO (Multi-User MIMO) 伝送に対して、通常の CAF 方式を適用した場合、各ユーザ端末において全送信アンテナからの非線形ひずみが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の劣化が深刻となることを指摘している。一方、提案する非線形ひずみ抑圧法を MU-MIMO 伝送に適用した場合、空間直交性を担保すべく、送信電力制御において、CAF への入力信号レベルを全送信アンテナで共通化する必要があることを述べている。特性評価の結果、MU-MIMO 伝送を想定した場合にも、通常の CAF と比較し、提案方式は BER 特性を大幅に改善できることを明らかにしている。

第 6 章では、第 3 章から第 5 章において得られた結果をまとめるとともに、今度の課題について述べている。

早稲田大学 博士 (工学) 学位申請 研究業績書

氏名 竹渕 翔矢 印

(2014年11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者 (申請者含む)
○論文	竹渕翔矢, 丸小倫己, 留場宏道, 小野寺毅, 窪田稔, 前原文明, 高畑文雄, "MU-MIMO THPにおいてmodulo誤りの影響を低減するHybrid ARQ方式," 信学論B, vol. J98-B, no. 1, 2015年1月. (採録決定済)
○論文	竹渕翔矢, 長田弦, 新井拓人, 神谷尚邦, 前原文明, "理論 SNDR に基づく送信電力制御を用いた OFDM クリッピング&フィルタリング," 信学論 B, vol.J97-B, no.2, pp.216-228, 2014年2月.
○論文	竹渕翔矢, 金古亮平, 前原文明, "MB-OFDM UWB 方式の理論ビット誤り率の導出法," 信学論 A, vol. J96-A, no. 5, pp. 273-277, 2013年5月.
論文	白井暢, 竹渕翔矢, 前原文明, "余剰アンテナ自由度を用いたマルチユーザ MIMO 伝送法," 信学論 B, vol. J96-B, no. 5, pp. 551-554, 2013年5月.
国際会議	T. Maruko, <u>S. Takebuchi</u> , G. Osada, and F. Maehara, "Clipping and filtering employing deterministic transmit power control in MU-MIMO-OFDM systems," Proc. International OFDM Workshop 2014 (InOWo'14), pp.106-111, Aug. 2014.
国際会議	K. Nishimura, <u>S. Takebuchi</u> , and F. Maehara, "Theoretical derivation of bit error rate for uplink OFDMA employing space diversity reception over nonlinear fading channels," Proc. 20th European Wireless (EW) Conference, pp.366-371, May 2014.
国際会議	G. Osada, <u>S. Takebuchi</u> , and F. Maehara, "Nonlinear distortion suppression scheme employing transmit power control for MU-MIMO-OFDM systems," Proc. 2014 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWW2014), pp. 46-48, Jan. 2014.
○国際会議	<u>S. Takebuchi</u> , H. Tomeba, T. Onodera, M. Kubota, F. Maehara, and F. Takahata, "Hybrid ARQ for modulo loss reduction in Multi-User MIMO THP systems," Proc. 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2013), WA2-E-4, pp. 375-380, Nov. 2013.
国際会議	K. Nishimura, <u>S. Takebuchi</u> , and F. Maehara, "Theoretical derivation of bit error rate for uplink OFDMA over nonlinear fading channels," Proc. 24th annual IEEE international symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC2013), pp. 761-765, Sept. 2013.
○国際会議	<u>S. Takebuchi</u> , G. Osada, and F. Maehara, "A deterministic transmit power control for OFDM clipping and filtering," Proc. 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC2013-Fall), pp. 1-5, Sept. 2013.
国際会議	S. Nagakubo, <u>S. Takebuchi</u> , K. Ogawa, and F. Maehara, "Experimental results of seamless localization employing GPS and wireless LAN," Proc. the 10th IEEE Vehicular Technology Society Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS2013), pp. 251-255, Aug. 2013.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○国際会議	<u>S. Takebuchi</u> , T. Arai, and F. Maehara, "A novel clipping and filtering method employing transmit power control for OFDM systems," Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2012 (WCNC2012), pp. 221-225, Apr. 2012.
○国際会議	<u>S. Takebuchi</u> , T. Arai, and F. Maehara, "Performance evaluation of OFDM clipping and filtering method using transmit power control," Proc. World Telecommunications Congress 2012 (WTC2012), PS-25, Mar. 2012.
講演	丸小倫己, 長田弦, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, "送信電力制御を用いた OFDM クリッピング & フィルタリングの MU-MIMO 方式への適用効果," 信学総大, B-5-15, 2014 年 3 月.
講演	<u>竹瀨翔矢</u> , 丸小倫己, 長田弦, 前原文明, "送信電力制御を用いた OFDM クリッピング & フィルタリングの MU-MIMO 方式への適用に関する検討," 信学技報, RCS2013-311, pp.31-36, 2014 年 3 月.
講演	丸小倫己, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, "現実的な非線形増幅を施したときの送信電力制御を用いた OFDM クリッピング & フィルタリングの適用効果," 信学技報, WBS2013-25, pp.25-30, 2013 年 10 月.
講演	長田弦, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, "MU-MIMO-OFDM 方式への非線形ひずみの影響に関する検討," 信学ソ大, B-5-29, 2013 年 9 月.
講演	西村慶, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, "非線形ひずみ存在下における MRC 受信ダイバーシチを適用したアップリンク OFDMA 方式の理論 BER 特性," 信学ソ大, B-5-30, 2013 年 9 月.
講演	西村慶, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, "非線形ひずみ存在下における受信ダイバーシチを適用したアップリンク OFDMA 信号の理論 BER の導出法," 信学技報, WBS2013-17, pp.21-26, 2013 年 7 月.
講演	<u>竹瀨翔矢</u> , 留場宏道, 小野寺毅, 窪田稔, 前原文明, 高畑文雄, "MU-MIMO THP への ARQ の適用に関する一検討," 信学総大, B-5-3, 2013 年 3 月.
講演	西村慶, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, "非線形ひずみとフェージングが混在する環境下におけるアップリンク OFDMA 方式の理論 BER 特性," 信学総大, B-5-107, 2013 年 3 月.
講演	西村慶, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, "非線形増幅を伴うアップリンク OFDM 信号の理論 BER の導出法に関する検討," 信学技報, RCS2012-353, pp.411-416, 2013 年 3 月.
講演	長田弦, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, "[ポスター講演] 送信電力制御を用いた MU-MIMO-OFDM 非線形ひずみ抑圧法に関する検討," 信学技法, WBS2012-42, pp.33-38, 2012 年 11 月.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<u>竹瀨翔矢</u> , 長田弦, 前原文明, ``SNDRに基づく送信電力制御を用いた OFDM クリッピング&フィルタリングに関する検討," 信学技法, WBS2012-26, pp.1-6, 2012年10月.
講演	中村瞬, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, ``DF型 OFDM 協力通信への送信電力制御を用いた非線形ひずみ抑圧法の適用効果," 信学ソ大, A-5-1, 2012年9月.
講演	長田弦, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, ``MU-MIMO 伝送への送信電力制御を用いた OFDM 非線形ひずみ抑圧法の適用性に関する検討," 信学ソ大, A-5-3, 2012年9月.
講演	<u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, ``SNDRに基づく送信電力制御を用いた OFDM クリッピング&フィルタリング," 信学ソ大, B-5-49, 2012年9月.
講演	白井暢, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, ``空間自由度を用いた MU-MIMO 伝送法の特性," 信学ソ大, B-5-52, 2012年9月.
講演	<u>竹瀨翔矢</u> , 新井拓人, 前原文明, "送信電力制御を用いた OFDM クリッピング&フィルタリングの MIMO 適用時の伝送特性評価,"信学総大, B-5-23, 2012年3月.
講演	<u>竹瀨翔矢</u> , 新井拓人, 前原文明, "送信電力制御を用いた OFDM クリッピング&フィルタリングの MIMO 適用時の伝送特性評価,"信学総大, B-5-23, 2012年3月.
講演	<u>竹瀨翔矢</u> , 新井拓人, 前原文明, "送信電力制御を用いた OFDM クリッピング&フィルタリングに関する検討,"信学技報, WBS2011-34, pp.13-18, 2011年12月.
講演	<u>竹瀨翔矢</u> , 新井拓人, 前原文明, "OFDM 非線形ひずみ抑圧方式の MIMO 伝送への適用," 信学ソ大, B-5-14, 2011年9月.
講演	<u>竹瀨翔矢</u> , 新井拓人, 前原文明, "送信電力制御を用いた OFDM 非線形ひずみ抑圧方式へのクリッピング&フィルタリングの適用,"信学総大, B-5-109, 2011年3月.
講演	長久保咲絵, 小川博人, <u>竹瀨翔矢</u> , 小川賀代, 前原文明, ``GPS と無線 LAN を用いたシームレス位置推定に関する検討," 信学技報, WBS2013-36, pp.13-17, 2013年12月.
講演	坂田佳謙, 長田弦, <u>竹瀨翔矢</u> , 前原文明, ``タクシー無線における GPS 位置情報を用いた基地局間協調制御法," 信学技報, WBS2013-8, pp.43-47, 2013年5月.
	その他講演 7 件