

## 学位論文題名

## 2次高調波注入法に基づいた マイクロ波電力増幅器用高効率線形化技術

### 学位論文内容の要旨

通信において増幅器は必須の構成要素であり、その特性に関する研究は古くから行われている。特に通信システムにおいて送信部の最終段に配置される送信電力増幅器は、通常最も多くの電力を消費する部分であることから、直流給電から高周波出力への高効率な変換動作が強く求められる。一方、通信において高い周波数利用効率の達成は基本的課題の1つであり、そのためには送信電力増幅器の線形性が重要である。電力増幅器の入出力非線形は利得圧縮、相互変調ひずみを発生させ、これがシステム全体の通信品質を劣化させる主要な原因となる。

一般に電力増幅器はより高い効率で動作する飽和出力に近づくほど非線形ひずみが大きくなり、両者はトレードオフの関係にある。したがってこの解消、すなわち飽和出力からのバックオフを小さくした状態でひずみを抑圧することが極めて重要であり、これを実現する各種の補償技術とその実用化への具体的回路が古くから研究・考案されている。その中の1つであるプリディストーション(PD)法は、小型・低コストの面から特に優れており、固定マイクロ波通信や衛星通信、近年では携帯電話基地局などに幅広く利用されている。PD法のほとんどは、キャリア信号へ干渉するひずみのうちもっとも支配的な3次相互変調ひずみ(IM3)を補償の対象としているが、高次ひずみの影響が強くなる低バックオフ動作においては、従来のPDでは十分な補償量が得られないという問題がある。

その一方で、線形増幅器の効率改善のためには、ひずみ補償の適用のみならず、増幅器が持つ最大効率そのものを極限的に高めることが必要である。マイクロ波帯でこれを実現する技術としては、F級増幅器に代表されるスイッチング増幅器が有効とされている。F級増幅器は、出力高調波の制御によって高効率な出力電圧・電流波形を成形する。しかし、この手法は最適な出力高調波処理を行うための負荷回路の調整が難しいほか、ひずみが大きく線形増幅器として利用することが困難である。

本論文は、上記の背景を元に、マイクロ波移動通信における装置の小型化、省電力化に直結する問題である電力増幅器の高効率線形化を目的として、増幅器入力への2次高調波注入が電力増幅器の効率とひずみの双方にもたらす非線形効果に注目し、これらを改善する技術についての研究結果をまとめたものである。まず、2次高調波注入による5次相互変調ひずみ(IM5)の集中的補償法を考案し、これに基づく混成PDを提案している。その補償特性の解析と実験の結果から、より低バックオフの動作において良好な線形性を達成している。次に、同じ2次高調波注入により増幅器出力の動作波形を制御し、スイッチング動作に近づけることで高効率化を図る原理を提案し、実験によって簡易な構成で大幅な効率改善を達成している。これらの内容につき、以下の各章により詳細を述べている。

第1章は本論文の導入部であり、増幅器研究の歴史的背景と、通信システムにおける高効率線形電

力増幅器の重要性を述べている。その上で、増幅器研究における本研究の目的と意義を示している。

第2章では電力増幅器の動作原理を示した上で、効率とひずみについて基礎的な事項を説明している。基本的な動作級の効率とひずみの特性を動作波形の解析によって明らかにし、それぞれの改善技術について代表的なものを紹介している。また、本研究においてひずみ補償原理の解析に用いる複素べき級数モデルについても説明している。

第3章では、過去に提案されたIM3補償法であるCuber Predistortion(CPD)を、現代の携帯電話通信で使用されている2GHz帯W-CDMA信号用電力増幅器に適用した実験結果を示している。まず2章において示した複素べき級数モデルを用いてCPDの補償原理を説明し、回路構成を示し、その上でひずみ補償実験を行った結果、ある程度のバックオフを取った領域では高いIM3補償能力を持つことを確認している。

第4章では、低バックオフ領域において補償能力が低下するというCPDの問題点を解決するための手法として、2次高調波注入法に基づいたIM5補償法を考案し、動作原理の解析並びに妥当性の実験的確認を行っている。2次高調波注入法は従来IM3の補償に用いられていたものであり、IM5補償への適用は本研究の独創的な点である。2章において示した複素べき級数モデルの考え方を拡張し、それを用いた補償原理の説明と、ひずみ改善特性について解析を行っている。IM5補償の効果を確認するためのひずみ補償実験を行い、低バックオフ動作時においてIM5が大きく改善されることを確認している。

第5章では、第3章で現代のマイクロ波通信用増幅器に対し有効性を確認したCPDと、第4章において提案した2次高調波注入法を組み合わせた3次・5次ひずみ同時補償混成PDを提案し、実験によりその動作確認を行っている。CPDのひずみ信号と2次高調波信号は異なる周波数帯を用いており、互いの干渉が小さいため、他の3次・5次ひずみ補償法と比較して低損失で調整の容易な構成を実現している。混成PDを適用した実験により、低バックオフ領域を含めた高ダイナミックレンジにおいてIM3とIM5の同時補償が実現できることを確認し、W-CDMA信号に対しても従来のPDより隣接チャネル漏洩電力を大きく改善できることを確認している。

第6章では、2次高調波注入がもたらすもう1つの増幅器特性改善効果として、動作電流波形をスイッチング動作に近づける非線形効果を利用した高効率化手法を提案している。B級増幅器における高効率化の原理を説明し、FETの特性を近似したモデルを用いた解析により、2次高調波注入によって直流供給電力が低減され、結果として効率が改善される現象を確認している。2GHz帯の実験において同様の効果を確認し、本手法は高効率・高利得な特性を持つGaN HEMTを用いた電力増幅器に対し特に大きな有効性を示すことを明らかにしている。

第7章は結論であり、本研究の内容と得られた成果を最後に概括している。

本研究は、2次高調波注入法の利用が低バックオフでの非線形ひずみ抑圧による高効率動作と最大効率の改善の両者を同時に実現する可能性を示すものであり、今後の無線通信や放送等における装置の飛躍的な小型化、省電力化並びに高性能化を可能とする線形増幅器の開発に大きく貢献することが期待される。

# 学位論文審査の要旨

|     |     |         |
|-----|-----|---------|
| 主 査 | 教 授 | 野 島 俊 雄 |
| 副 査 | 教 授 | 宮 永 喜 一 |
| 副 査 | 教 授 | 小 柴 正 則 |
| 副 査 | 教 授 | 小 川 恭 孝 |
| 副 査 | 准教授 | 山 本 学   |

学 位 論 文 題 名

## 2 次高調波注入法に基づいた マイクロ波電力増幅器用高効率線形化技術

通信システムにおいて、電力増幅器は高効率化実現の要求が最も強いデバイスである。さらに、周波数資源がひっ迫した現在、高い周波数利用効率の達成が基本的課題となっており、そのためには送信電力増幅器の線形性が重要である。一般に電力増幅器はより高い効率で動作する飽和出力に近いほど非線形性が顕著になるが、その状態でも低ひずみを実現することが要求されている。これを実現するための各種補償法の研究および実用化がなされてきた。プリディストーション (PD) 法は、小型・低コストの面から特に優れており、固定マイクロ波通信や衛星通信、携帯電話基地局などに幅広く利用されている補償法の 1 つである。多くの PD 補償回路は、キャリア信号へ干渉するひずみのうち支配的な 3 次相互変調ひずみ (IM3) を補償対象としているが、高次ひずみの影響が強くなる低バックオフ動作においては十分な補償量が得られないという技術課題がある。

一方、線形増幅器の効率改善のためには、増幅器の最大効率そのものを極限的に高めることが必要である。マイクロ波帯での技術として F 級増幅器に代表されるスイッチング増幅器が有効とされている。F 級増幅器は、出力高調波の制御により高効率な出力電圧・電流波形を成形するが、最適な出力高調波処理を行うための負荷回路の調整が難しく、ひずみ発生量が大きいう課題があった。

本論文は、マイクロ波移動通信における電力増幅器の高効率線形化実現のため、これら課題を改善する技術についての研究結果をまとめたものである。はじめに、2 次高調波注入による 5 次相互変調ひずみ (IM5) の集中的補償法を考案し、これに基づき混成 PD を提案している。次に、同じ 2 次高調波注入により増幅器出力の動作波形を制御し、スイッチング動作に近づけることで高効率化を図る原理を提案し、実験によって簡易な構成で大幅な効率改善が実現可能であることを示している。これらの内容につき、各章により詳細を述べている。

第 1 章は導入部であり、増幅器研究の歴史的背景と、通信システムにおける高効率線形電力増幅器の重要性を述べている。その上で、増幅器研究における本研究の目的と意義を示している。

第 2 章では電力増幅器の動作原理を示し、効率とひずみについての基礎的な事項を説明している。動作級の効率とひずみの特性を動作波形の解析により明らかにし、代表的な改善技術につき紹

介している。また、ひずみ補償原理の解析に用いる複素べき級数モデルについて説明している。

第3章では、過去に提案されたIM3補償法であるCuber Predistortion(CPD)を、現代の携帯電話通信で使用されている2GHz帯W-CDMA信号用電力増幅器に適用した場合の実験結果を示している。複素べき級数モデルを用いてCPDの補償原理および回路構成を示し、ひずみ補償実験から、適当なバックオフを取った領域で高いIM3補償能力を持つことを確認している。

第4章では、低バックオフ領域において補償能力が低下するCPDの問題点を解決するための手法として、2次高調波注入法に基づいたIM5補償法を考案し、理論および実験的検討を行っている。2次高調波注入法は従来IM3の補償に用いられていたものであり、IM5補償への適用は本研究の独創的な点である。複素べき級数モデルの考え方を拡張し、それを用いた補償原理とひずみ改善特性について解析を行っている。補償実験を行い、低バックオフ動作時においてIM5が大きく改善されることを確認している。

第5章では、CPDと2次高調波注入法を組み合わせた3次・5次ひずみ同時補償混成PDを提案し、実験により動作確認を行っている。CPDのひずみ信号と2次高調波信号は異なる周波数帯を用いており、互いの干渉が小さいため、他の3次・5次ひずみ補償法と比較して低損失で調整の容易な構成を実現している。混成PDを適用した実験により、低バックオフ領域を含めた高ダイナミックレンジにおいてIM3とIM5の同時補償が実現できることを確認し、W-CDMA信号に対しても従来のPDより隣接チャネル漏洩電力を大きく改善できることを確認している。

第6章では、2次高調波注入の更なる効果として、動作電流波形をスイッチング動作に近づける非線形効果を利用した高効率化手法を提案している。B級増幅器における高効率化の原理を説明し、FETの特性を近似したモデルを用いた解析により、2次高調波注入によって直流供給電力が低減され、結果として効率が改善される現象を確認している。2GHz帯の実験において効果を確認し、高効率・高利得な特性を持つGaN HEMTを用いた電力増幅器に対し特に大きな有効性を示すことを明らかにしている。これを要するに、著者は、無線通信装置の高効率化に貢献するとともに周波数利用効率向上に寄与する基盤技術に関する有益な新知見を得たものであり、情報通信技術の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。