

学位論文題名

モバイル通信用マルチバンド高能率無線回路技術に関する研究

(Highly efficient RF circuit technologies for multi-band mobile communication systems)

学位論文内容の要旨

モバイル通信用無線 (Radio frequency: RF) 回路においては、動作帯域 (バンド) の変更に対応するマルチバンド化が進められている。マルチバンド RF 回路は、特定国のバンドだけでなく、ローミングに必要な世界各国のバンドにも対応するグローバル端末にとっては必須であり、モバイル通信の利便性向上に大きく貢献している。しかし、従来のマルチバンド化ではシングルバンド用 RF 回路を対応バンド数分並列に配置する構成がとられており、実装スペースの制限により対応バンド数が上限を迎えつつある。そこで、高性能でかつ小型な RF 回路のマルチバンド化構成および設計法の確立が求められている。本研究では、インピーダンス整合回路のマルチバンド化構成を提案し、提案構成によるマルチバンド電力増幅器 (Power amplifier: PA) の設計法を確立する。提案構成は、必要な設計自由度を最小限の回路素子で獲得するため低損失であり、設計においてバンド間相互作用が無い場合各バンドで整合条件を最適化できるといった特徴がある。これらの特徴に加え、回路素子定数と素子配置の最適化により低損失かつ小型なマルチバンド PA を達成する。

本論文では提案構成を機能的に分類し、各章にて構成、設計法を示すとともに、数値計算および実験によりマルチバンド高効率増幅動作を実証する。

第 2 章では本研究の要となる「整合回路による整合条件の最適化」と「送信多系統化におけるマルチポート PA による低消費電力化」について技術的特徴を整理し、各技術の課題抽出を行った。まず、PA に求められる各性能 (出力電力、電力利用効率、隣接チャネル漏洩電力など) に対する整合インピーダンスがそれぞれ異なることを示した。本研究の試作で用いるトランジスタでは大信号時の出力電力を最大化する整合とすることで一般的な利得を最大化する整合に対して最大出力電力が 1.3 dB 増加し、電力利用効率も 11% 増加することを示し、PA 設計における整合条件最適化の重要性を示した。また、最も少ない素子数で整合条件最適化が可能なシングルスタブ整合回路の整合帯域幅は比帯域で 5% 程度であることを示し、動作帯域が比帯域で 100% を超えるマルチバンド化には帯域切替や複数帯域同時整合といった新たな整合条件最適化手法が必要であることを示した。また、マルチポート PA についてマルチバンド化に向けた技術的課題を示すとともに、低損失化および工業上利用性向上に向けた課題を示した。

第 3 章では整合回路内部に設けたスイッチにより整合帯域を変更する帯域切替増幅形 PA を提案した。伝送線路にスイッチを介してスタブを接続し、伝送線路の線路長とスタブのリアクタンスを設計することにより各バンドでの整合条件を最適化した。ここで、伝送線路は各バンドで共通に用いるため、スイッチとスタブのみの追加で容易に対応バンド数を増加できる、そして、各バンドでの整合に寄与する素子数が少ないため低損失であるという特徴を示した。さらに、オフ状態スイッチのアイソレーション特性により他バンドでの整合に必要なスタブを完全に切り離すことができるため、設計におけるバンド間の相互作用を考える必要がなく、各バンドで容易に整合条件最適化が可能であることを示した。しかし、オン状態スイッチの挿入損失によって生じる整合回路損失は PA の

出力電力や電力利用効率低下させる。そこで、適切な位置に適切なりアクタンスを有するスタブを追加することでスイッチ挿入損失による整合回路損失を最小化できることを示し、スイッチ接続位置を特定する設計法を示した。また、MEMS(Microelectro mechanical systems) スイッチ、半導体スイッチを用いた試作マルチバンド PA の実証実験結果を示した。スイッチとしての性能が理想的な MEMS スイッチを用いた試作によりバンド切替増幅の実現性を確認した。また、半導体スイッチを用いた試作により、9 バンド切替増幅を確認した。この際、スイッチでの損失を最小化する設計法を用いて高効率増幅動作を実証した。さらに実用化に向けて 1.5 GHz~2.5 GHz の 3GPP バンドをカバーする PA を試作し、従来のシングルバンド用 PA と遜色ない特性を 6 mm × 8 mm サイズで達成できることを実証した。

第 4 章では第 3 章の整合回路内部に設けたスイッチの代わりにタンク回路を用いることにより複数バンドで同時整合する複数帯域増幅形 PA を提案した。伝送線路の線路長とスタブのリアクタンスにより最小の素子数で各バンドでの整合条件最適化が可能な特徴は帯域切替増幅形と同じである。ここで、タンク回路は共振周波数でオフ状態のスイッチと特性上等価となるため、設計においてバンド間の相互作用を考慮することなく複数バンドで整合条件最適化が可能となることを示した。しかし、オフ状態スイッチと等価とみなせる帯域幅はタンク回路の構成に依存し狭帯域である。また、タンク回路の挿入損失により整合回路に損失が生じる。そこで、数値計算によりタンク回路適用によって得られる整合帯域幅と損失を定量化し、モバイル通信用帯域幅をカバーし、低損失な回路が構成できることを示した。さらに、タンク回路以外にも分枝スタブを用いた構成や伝送線路を短縮化する T 型回路を用いた構成を示し、各構成での試作をし、複数帯域増幅を確認した。そして、最大 3 バンドでの高出力、高効率増幅動作を実証した。

第 5 章では第 3 章、第 4 章で示した各構成を組み合わせることで同時増幅バンドを切替える複数帯域切替増幅形 PA を提案した。第 3 章と第 4 章の PA 設計法を踏襲できるため、各バンドでの整合に際しバンド間の相互作用を考慮する必要がないことを示した。また、3 バンドから選択した 2 バンドを同時に増幅する PA を設計し、各スイッチ状態での周波数特性から所望のバンドへの切替増幅を確認した。また、整合条件最適化により得られる各バンドでの高効率増幅動作を示した。

第 6 章ではマルチポート PA のマルチバンド化のためバトラーマトリクスを構成する $\pi/2$ ハイブリッドのマルチバンド化構成を示した。また、マルチバンド整合回路を適用することで $\pi/2$ ハイブリッドの動作帯域を広帯域化できることを示した。一方、バトラーマトリクスには RF ケーブルの交差接続が必要であるため、小型化が困難、工業上利用性が低いという問題があった。そこで $\pi/2$ ハイブリッドを 3 次元配置することで交差接続を無くし、平面回路化することでこの問題を解決した。試作により個別増幅の飽和電力を 1/8 程度にできる 8 ポート PA を平面回路で構成し大幅に小型化できることを示した。

最後に、第 7 章では本研究で得られた成果を総括した。

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	特任教授	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

モバイル通信用マルチバンド高能率無線回路技術に関する研究

(Highly efficient RF circuit technologies for multi-band mobile communication systems)

モバイル通信用無線 (RF) 回路において、動作帯域の変更に適応するマルチバンド化が進められている。マルチバンド RF 回路は、特定国のバンドだけではなく、ローミング時に必要な世界各国のバンドにも対応するグローバル端末にとっては必須であり、モバイル通信の利便性向上に大きく貢献している。しかし、従来のマルチバンド化ではシングルバンド用 RF 回路を対応バンド数分並列に配置する構成がとられており、実装スペースの制限により対応バンド数が上限を迎えつつある。そこで、高性能でかつ小型な RF 回路のマルチバンド化構成および設計法の確立が求められている。

本研究は、インピーダンス整合回路の新たなマルチバンド化構成を提案し、提案構成によるマルチバンド電力増幅器 (Power amplifier: PA) の設計法について明らかにしたものである。

第 1 章は序論であり、研究の背景および現在求められている課題を挙げ、本論文の位置づけおよび構成について述べている。

第 2 章では、整合条件の最適化と送信多系統化におけるマルチポート PA による低消費電力化について技術的特徴を整理し、各技術の課題抽出を行っている。PA に求められる各性能に対する整合インピーダンスがそれぞれ異なることを示している。試作で用いるトランジスタは大信号時の出力電力を最大化する整合とすることで一般的な利得を最大化する整合に対し最大出力電力が 1.3 dB 増加し、電力利用効率も 11% 増加することを示している。また、最も少ない素子数で整合条件最適化が可能なシングルスタブ整合回路の整合帯域幅は比帯域で 5% 程度であることを示し、動作帯域が比帯域で 100% を超えるマルチバンド化には帯域切替や複数帯域同時整合といった新たな整合条件最適化手法が必要であることを示している。

第 3 章では、整合回路内部に設けたスイッチにより整合帯域を変更する帯域切替増幅型 PA を提案している。伝送線路にスイッチを介してスタブを接続し、伝送線路の線路長とスタブのリアクタンスを設計することにより各バンドでの整合条件を最適化する。MEMS スイッチ、半導体スイッチを用いた試作マルチバンド PA の実証実験結果を示している。スイッチでの損失を最小化する設計法を用いて高効率増幅動作を実証している。さらに、1.5 GHz~2.5 GHz の 3GPP バンドをカバーす

る PA を試作し、従来のシングルバンド用 PA と同等以上の特性を $6\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ サイズで達成できることを実証している。

第 4 章では、整合回路内部に設けたスイッチの代わりにタンク回路を用いることで複数バンドでの同時整合を実現する複数帯域増幅形 PA を提案している。タンク回路は共振周波数でオフ状態のスイッチと特性上等価となり、設計においてバンド間の相互作用を考慮することなく複数バンドで整合条件最適化が可能となることを示している。数値計算によりタンク回路適用によって得られる整合帯域幅と損失を定量化し、モバイル通信用帯域幅をカバーしつつ低損失な回路が構成できることを示している。また、タンク回路以外にも分枝スタブを用いた構成や伝送線路を短縮化する T 型回路を用いた構成を示し、各構成での試作から複数帯域増幅を確認している。さらに、最大 3 バンドでの高出力、高効率増幅動作を実証している。

第 5 章では、同時増幅バンドを切替える複数帯域切替増幅形 PA を提案している。前章までに示した PA 設計法を踏襲できるため、バンド間の相互作用を考慮する必要がないことを示している。また、3 バンドから選択した 2 バンドを同時に増幅する PA を設計し、各スイッチ状態での周波数特性から所望のバンドへの切替増幅を確認している。さらに、整合条件最適化により得られる各バンドでの高効率増幅動作を示している。

第 6 章では、マルチポート PA のマルチバンド化のためバトラーマトリクスを構成する $\pi/2$ ハイブリッドのマルチバンド化構成を示している。また、マルチバンド整合回路を適用することで $\pi/2$ ハイブリッドの動作帯域を広帯域化できることを示している。バトラーマトリクスには RF ケーブルの交差接続が必要となるため、小型化が困難で工業上利用性が低いという問題がある。これに対し $\pi/2$ ハイブリッドを 3 次元配置することで交差接続を無くし、平面回路化することでこの問題を解決できることを明らかにしている。試作により個別増幅の飽和電力を $1/8$ 程度にできる 8 ポート PA を平面回路で構成し大幅に小型化できることを示している。

第 7 章では、本研究で得られた成果を総括している。

これを要するに、著者は、無線通信装置の開発に寄与する電力増幅技術に関して有益な新知見を得たものであり、情報通信工学分野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。