

学位論文題名

高温超伝導マイクロ波送信リアクションフィルタと
高度非線形ひずみ特性評価法に関する研究

学位論文内容の要旨

高温超伝導体(HTS : High-temperature superconductor) の有望な応用分野の一つとしてマイクロ波デバイスがある。HTS はマイクロ波帯において、通常導体に比較して数桁以上の低抵抗値を達成可能であるため、その画期的な特長を活用した様々なデバイスの研究開発が進められている。中でも HTS マイクロ波フィルタは、従来では実現困難な、超低損失性と高選択性を小型化マイクロ波 IC 回路で達成可能という、優れた利点を持つ。これは、最新の小型化冷凍機と組み合わせることで具体化することができる。実用化のための研究開発は、低電力を扱うため技術的に難易度の低い受信系への応用からまず進められ、既に米国等において携帯電話基地局や衛星用デバイスとして商用化されている。しかし、基地局装置の省電力化や小型化等への高い寄与が期待できる送信系応用については、高電力に伴う困難な技術課題が未解決なため、実用化回路構成法は未だ確立されていない。

これは、HTS のマイクロ波における物理的基本特性から、制限される項目が二つあるためである。一つ目は、HTS 自体の臨界電流密度超過により、超伝導状態維持が不可能になること、二つ目は、HTS は通常導体では問題にならない程度の入力電力レベルでデバイス入出力間不完全が出現し、相互変調ひずみ、高調波ひずみ等の非線形応答が発生することである。上記の制限は、主として次の理由による。すなわち、① HTS が有する高導電率特性のため、ロンドン侵入長が極めて浅く、デバイス特定箇所への電流密度集中が発生する、②従来の HTS マイクロ波送信フィルタ構成法では、高電力の送信信号が通過・共振するトランスミッション型を基本とするため、回路内の電流密度が本質的に上昇する、さらに、非線形応答に関して、③ HTS 自体が有する非線形マイスナー効果等の intrinsic な要因や、粒界接合における超伝導弱結合等の extrinsic な要因が HTS マイクロ波デバイスの非線形応答発生の発生機序として検討されているが、送信マイクロ波フィルタとして適用した場合の、詳細な相互変調ひずみ等の非線形ひずみ特性が明らかとなっていないためである。

本論文は、上記の問題点を解決し、携帯電話基地局等への応用が可能な、耐電力・急峻性に優れた HTS 送信リアクションフィルタの回路構成技術、並びに実用性評価に必要な高度な非線形ひずみ特性測定法を確立することを目的として行った研究の成果をまとめたものである。本論文で検討を行う HTS 送信フィルタは、携帯電話基地局の電力増幅器出力信号に含まれる隣接帯域漏洩電力を低減するため、従来用いられている増幅器回路の工夫(ひずみ補償回路技術)に代わり、送信系に適用可能であることを目標としている。まず、高電力の信号電力が共振器を通過しないリアクション型(反作用型)共振器を用いた帯域阻止フィルタを、HTS 送信フィルタに適用することを新たに提案し、動作電流の大幅な低下を図っている。また、

デバイス特定箇所への電流集中を避けるため、高無負荷 Q 値化および電流密度分散構造による耐電力特性向上を同時達成可能な、分割オープンリング共振器を考案している。これらの検討を踏まえ、リアクションフィルタ製作および S パラメータ周波数特性、相互変調ひずみ等の基本特性評価を行った上で、W-CDMA マルチキャリア信号を用い、電力増幅器出力信号の隣接帯域漏洩電力の改善効果を初めて実証している。さらに、HTS マイクロ波デバイスの非線形特性が明らかにするため、新たに非線形ひずみ位相も測定可能な相互変調ひずみ測定系を構築し、これまで未知であった非線形ひずみ特性を明らかにしている。これらの内容につき、以下の各章により詳細を述べる。

第 1 章は本論文の導入部であり、本研究の目的と意義、およびこれまでの HTS フィルタの研究経過と本研究の位置付けについて述べている。本章において、超伝導技術のマイクロ波通信への応用について概説している。

第 2 章は、高電力の信号電力が共振器を通過しないリアクション型共振器を用いた帯域阻止フィルタを、HTS 送信フィルタに適用することを提案し、その原理および基本動作について述べている。さらに、リアクションフィルタを、電力増幅器の信号出力に含まれる隣接帯域ひずみ抑圧に適用した場合の、電力増幅器効率改善量について検討を行っている。

第 3 章は、第 2 章でのリアクションフィルタ適用の提案を踏まえ、リアクションフィルタを構成する新たな構造を有する分割オープンリング共振器を考案している。提案する共振器は、特定箇所への電流集中を避けるため、高無負荷 Q 値化および電流密度分散効果による耐電力特性向上の同時達成が可能である。提案構造に基づくリアクション共振器を製作し、 S パラメータ周波数特性および相互変調ひずみ測定を行い、その効果を確認している。

第 4 章は、分割オープンリング共振器を用いた 2 種類のリアクションフィルタの設計・製作を行う。最初に、5 GHz 帯狭帯域リアクションフィルタの測定評価を行い、40 dB/MHz 以上の急峻遮断特性および相互変調ひずみ特性を実験確認している。次に、フィルタ抑圧帯域幅拡大および電力増幅器から発生するひずみ抑圧を目的とした、帯域幅 4 MHz および抑圧量 10 dB 以上の 5 GHz 帯隣接帯域ひずみ抑圧リアクションフィルタを設計・製作し、W-CDMA 規格で規定された隣接帯域ひずみ抑圧に必要な急峻遮断特性を達成している。

第 5 章は、第 4 章で製作した、隣接帯域ひずみ抑圧リアクションフィルタを用いた、電力増幅器の非線形ひずみ改善法を提案し、リアクションフィルタおよびマイクロ波 GaN HEMT 電力増幅器特性を W-CDMA マルチキャリア信号に適用した際の測定結果および解析結果を用い、その実現可能性を明らかにしている。リアクションフィルタが 40 dBm の高電力の広帯域拡散無線通信信号の隣接帯域ひずみ抑圧に有効であることを初めて実証している。さらに、フィルタ適用により電力効率が大幅に改善可能となる見通しを得ている。

第 6 章は、HTS マイクロ波フィルタの無線通信システム適用のため、詳細な相互変調ひずみ等の非線形ひずみ特性を明らかにするための、高度な非線形特性評価法について述べている。まず、詳細な第 3 次相互変調ひずみ振幅および位相の入力電力特性を、新たに提案・構築した詳細かつ高ダイナミックレンジで取得可能な測定系を用い、評価している。さらに、取得した非線形特性を的確かつ矛盾なく説明可能な、複素べき級数に基づく非線形特性解析を行い、HTS マイクロ波デバイスの非線形特性を明らかにしている。

第 7 章は、結言であり、本研究の結論と得られた成果を最後に概括している。さらに、今後の課題についても簡潔に述べる。

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

高温超伝導マイクロ波送信リアクションフィルタと 高度非線形ひずみ特性評価法に関する研究

高温超伝導体(HTS:High-temperature superconductor)の有望な応用分野の一つとしてマイクロ波デバイスがある。HTS マイクロ波フィルタは、従来実現困難な超低損失性と高選択性を小型化マイクロ波 IC 回路で達成可能という優れた利点を持つ。HTS フィルタ実用化のための研究開発は受信系への応用から進められ、携帯電話基地局や衛星用デバイスとして一部商用化されている。一方、基地局装置の省電力化や小型化等、より高い効果が期待できる送信系への応用については高電力に伴う困難な技術課題が未解決なため、実用化回路構成法は未だ確立されていない。

本論文は、携帯電話基地局等への応用が可能な、耐電力・急峻性に優れた HTS 送信リアクションフィルタの回路構成技術並びに実用性評価に必要な高度な非線形ひずみ特性測定法を確立することを目的として行われた研究成果をまとめたものである。はじめに、高電力の信号電力が共振器を通過しないリアクション型(反作用型)共振器を用いた帯域阻止フィルタを HTS 送信フィルタに適用することを新たに提案し、動作電流の大幅な低下を図っている。また、デバイス特定箇所への電流集中を避けるため、高無負荷 Q 値化および電流密度分散構造による耐電力特性向上を同時達成可能な分割オープンリング共振器を考案している。これら検討から、リアクションフィルタ製作および S パラメータ周波数特性、相互変調ひずみ等の基本特性評価を行い、W-CDMA マルチキャリア信号を用いて電力増幅器出力信号の隣接帯域漏洩電力の改善効果を実証している。さらに、非線形ひずみ位相の測定も可能な高精度相互変調ひずみ測定系を新たに構築し、HTS マイクロ波デバイスの非線形特性を明らかにしている。これらの内容につき、各章で詳細を述べている。

第 1 章は論文の導入部であり、本研究の目的と意義、およびこれまでの HTS フィルタの研究経過と本研究の位置付けについて述べている。本章において、超伝導技術のマイクロ

波通信への応用について概説している。

第 2 章は、高電力の信号電力が共振器を通過しないリアクション型共振器を用いた帯域阻止フィルタを HTS 送信フィルタに適用することを提案し、その原理および基本動作について述べている。さらに、リアクションフィルタを電力増幅器の信号出力に含まれる隣接帯域ひずみ抑圧に適用した場合の電力増幅器効率改善量について検討を行っている。

第 3 章は、リアクションフィルタを構成する新たな構造を有する分割オープンリング共振器を考案している。提案する共振器は、特定箇所への電流集中を避けるため、高無負荷 Q 値化および電流密度分散効果による耐電力特性向上の同時達成が可能である。提案構造に基づくリアクション共振器を製作し、S パラメータ周波数特性および相互変調ひずみ測定を行い、その効果を確認している。

第 4 章は、分割オープンリング共振器を用いた 2 種類のリアクションフィルタの設計・製作を行っている。最初に、5 GHz 帯狭帯域リアクションフィルタの測定評価を行い、40 dB/MHz 以上の急峻遮断特性および相互変調ひずみ特性を実験確認している。次に、フィルタ抑圧帯域幅拡大および電力増幅器から発生するひずみ抑圧を目的とした帯域幅 4 MHz および抑圧量 10 dB 以上の 5 GHz 帯隣接帯域ひずみ抑圧リアクションフィルタを設計・製作し、W-CDMA 規格で規定された隣接帯域ひずみ抑圧に必要な急峻遮断特性を達成したことを述べている。

第 5 章は、隣接帯域ひずみ抑圧リアクションフィルタを用いた電力増幅器の非線形ひずみ改善法を提案し、リアクションフィルタおよびマイクロ波 GaN HEMT 電力増幅器特性を W-CDMA マルチキャリア信号に適用した際の測定結果および解析結果を用いて、その実現可能性を明らかにしている。リアクションフィルタが 40 dBm の高電力の広帯域拡散無線通信信号の隣接帯域ひずみ抑圧に有効であることを実証している。さらに、フィルタ適用により電力効率が大幅に改善可能となる見通しを得たことを述べている。

第 6 章は、相互変調ひずみ等の非線形ひずみ特性を明らかにするための高度な非線形特性評価法について述べている。第 3 次相互変調ひずみ振幅および位相の入力電力特性について、新たに提案・構築した詳細かつ高ダイナミックレンジな測定系を用いて評価している。さらに、取得した非線形特性を的確かつ矛盾なく説明可能な、複素べき級数に基づく非線形特性解析を行い、HTS マイクロ波デバイスの非線形特性を明らかにしている。

これを要するに、著者は、移動通信用無線装置の高感度化・高選択度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。