

高温超伝導フィルタ設計技術とモバイル通信への応用

学位論文内容の要旨

将来のモバイル通信システムにおいて、ワイヤレスブロードバンドシステムを構築するためには広い周波数帯域が必要となるが、使い勝手の良い周波数帯は既に各種無線通信システムに割り当てられおり、新規周波数帯の開拓による連続した広い周波数帯域確保は困難な状況にある。周波数リソース再編により広い周波数帯を確保する方法があるが、周波数の移行に時間を要するため、新システムの迅速な導入は困難である。

近年 3GPP においては、Component Carrier (CC) と呼ばれる複数のキャリアを同時に用いて通信することで広帯域伝送を可能にする Carrier Aggregation (CA) と呼ばれる技術が、LTE-Advanced における伝送速度向上の主要素技術として検討されている。2009 年 12 月には Study Item から Work Item として承認され、標準化仕様策定に向けた準備が進められている。

CA のシナリオは CC の周波数配置によって、以下の 3 つに分類される。(1) Intra-band Contiguous CA: 20 MHz より大きい連続する帯域で通信を行う。広帯域の周波数が割り当てられる場合に適用される。(2) Intra-band Non-contiguous CA: 同じ周波数バンドのキャリアを複数用いて通信を行う。通信事業者への周波数割り当てが同一バンド内で断片的である場合に適用されることが想定される。(3) Inter-band Non-contiguous CA: 異なる周波数バンドのキャリアを複数用いて通信を行う。シナリオ (3) では、複数のキャリアを用いて通信を行うことによるスループットの向上に加えて、伝搬環境が異なる複数のキャリアを用いることによる通信の安定性向上が想定される。LTE-Advanced Rel.11 の仕様策定に向けて、オペレータからは 2 帯域の Inter-band Non-contiguous CA が提案されている。

異なる周波数バンドのキャリアを用いる Inter-band Non-contiguous CA においては、2 つの周波数帯域を同時に通過させることのできるデュアルバンド帯域通過フィルタが、CA 技術を支えるためのキーデバイスの一つとなる。CA 技術のキーデバイスとなるデュアルバンド帯域通過フィルタは、2 つの通過帯域間に他のシステムが配置されることから、通過帯域端の高い周波数選択特性とともに、通過帯域間の大きい阻止量が要求される。

一方、マイクロ波帯において常温の金属導体と比較して表面抵抗が 2 桁以上小さい超伝導体を用いた超伝導フィルタは、共振器を多段化してフィルタの通過帯域外減衰特性を急峻化しても、挿入損失を極めて小さく抑えることができる。取り分け臨界温度が液体窒素温度を超える高温超伝導体フィルタは、冷却装置を簡易に構成できることから、モバイル通信基地局用フロントエンドのフィルタへ応用する研究が多く行われている。上記デュアルバンド帯域通過フィルタに対する要求を鑑みると、高温超伝導体はデュアルバンド帯域通過フィルタを構成する導体材料としても有力な候補の一つとなり得る。高温超伝導体をフィルタの導体材料として用いた場合、入力信号レベルによっては材料の非線形特性によって発生する非線形ひずみが、また、冷却装置の冷却負荷軽減の観点から、フィルタの小型化が課題となる。

本論文では、モバイル通信における基地局用フロントエンドに関して、極めて高い周波数選択効果を得られる高温超伝導フィルタの構成法を、低ひずみ化、低雑音化や小型化の観点から、理論的及び実験的に考察した。また、モバイル環境下にて、2つの周波数帯域を同時に通過させることができる高温超伝導フィルタの構成法を示した。

具体的には、第1章では、モバイル通信システムの歴史及び今後の動向を概説した。また、超伝導体をマイクロ波帯フィルタへ適用する事の優位性を示した。

第2章では、高温超伝導フィルタの高耐電力(低ひずみ)化に向け、最大電流密度低減の観点から、共振器の特性インピーダンス及び地導体間隔に対する中心導体幅の比に着目したひずみ低減化手法を提案した。また、入出力励振部と共振器の特性インピーダンスが異なる場合のフィルタ設計について、入出力励振部及び共振器間のJインバータ π 型等価回路のパラメータを導出する式を示すとともに、特性インピーダンスが異なる場合のフィルタ設計手法を示した。

第3章では、高温超伝導フィルタの小型化に関して、2つの導体を近接配置した構造体を励振し、電磁界結合によって分離させた2つの周波数のうち、低域側共振周波数を用いることで小型化を図る手法について述べた。また、提案共振器構造は、小型であることに加え、直線状の $\lambda/4$ 共振器の無負荷Q値と比較して、ほぼ同等の無負荷Q値を維持可能な構造であることを示した。

第4章では、広帯域伝送を支える複数帯域同時通過フィルタについて、各通過帯域の中心周波数、及び、通過帯域幅を決定付ける共振器間結合係数を容易に調整可能な共振器構造、及び多段化手法を述べた。また、複数帯域同時通過フィルタの初期検討としてデュアルバンド帯域通過フィルタを設計・製作し、提案手法の有効性を確認するとともに、提案手法が相互変調ひずみ低減の観点からも有効であることを示した。

第5章では、モバイル通信基地局用フロントエンドへ高温超伝導フィルタを適用した場合の効果を、高選択度化と低雑音化の観点から定量的に評価した。高選択度化については、高温超伝導フィルタを適用したフロントエンドを屋内無線通信システム実験系に組み込み、隣接他事業者移動局の送信信号がシステムに与える影響を定量的に評価し、また、低雑音化については数値解析にて、システム容量の観点から定量的に評価した。

最後に、第6章では、第2章から第5章までの研究で得られた成果を総括し、提案した高温超伝導フィルタ設計技術が将来のモバイル通信システムへの応用に資することを示した。

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	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

高温超伝導フィルタ設計技術とモバイル通信への応用

次世代モバイル通信システムにおいて、ワイヤレスブロードバンドシステムを構築するためには広い周波数帯域が必要となるが、使い勝手の良い周波数帯は既に各種無線通信システムに割り当てられおり、新規周波数帯の開拓による連続した広い周波数帯域確保は困難な状況にある。周波数リソース再編により広い周波数帯を確保する方法があるが、周波数の移行に時間を要するため、新システムの迅速な導入が困難である。

近年、Component Carrier (CC) と呼ばれる複数のキャリアを同時に用いて通信することで広帯域伝送を可能にする Carrier Aggregation (CA) 技術が、LTE-Advanced における伝送速度向上の主要素技術として検討されている。この中で、伝搬環境が異なる複数のキャリアを用いることで通信の安定性向上が想定される Inter-band Non-contiguous CA が提案されているが、高い周波数選択特性と通過帯域間の大きい阻止量を有するデュアルバンド帯域通過フィルタが必要となる。

上記フィルタを構成するための導体材料として、高温超伝導体が有力な候補となり得る。マイクロ波帯において常温の金属導体と比較し表面抵抗が2桁以上小さい超伝導体を用いた超伝導フィルタは、共振器を多段化しフィルタの通過帯域外減衰特性を急峻化した場合でも、挿入損失を極めて小さく抑えることが可能である。取り分け、臨界温度が液体窒素温度を超える高温超伝導体フィルタは、冷却装置を簡易に構成できることから、モバイル通信基地局用フロントエンドのフィルタへ応用する研究が多く行われている。しかし、高温超伝導体をフィルタの導体材料として用いた場合、入力信号レベルによっては材料の非線形特性によって発生する非線形ひずみが、また、冷却装置の冷却負荷軽減の観点から、フィルタの小型化が課題となっている。

本論文は、モバイル通信における基地局用フロントエンドに関し、極めて高い周波数選択効果が得られる高温超伝導フィルタの構成法を、低ひずみ化、低雑音化や小型化の観点から、理論的及び実験的に考察している。また、モバイル環境下にて、2つの周波数帯域を同時に通過させることができる高温超伝導フィルタの構成法を示している。

第1章では、モバイル通信システムの歴史及び今後の動向を概説し、超伝導体をマイクロ波帯フィルタへ適用する事の優位性を示している。

第2章では、高温超伝導フィルタの高耐電力(低ひずみ)化に向け、最大電流密度低減の観点から、

共振器の特性インピーダンス及び地導体間隔に対する中心導体幅の比に着目したひずみ低減化手法を提案し、入出力励振部と共振器の特性インピーダンスが異なる場合のフィルタ設計について、入出力励振部及び共振器間の J インバータ π 型等価回路のパラメータを導出する式を示すとともに、特性インピーダンスが異なる場合のフィルタ設計手法を示している。

第 3 章では、高温超伝導フィルタの小型化に関し、2 つの導体を近接配置した構造体を励振し、電磁界結合によって分離させた 2 つの周波数のうち、低域側共振周波数を用いることで小型化を図る手法について述べている。また、提案共振器構造は、小型であることに加え、直線状の $\lambda/4$ 共振器の無負荷 Q 値と比較し、ほぼ同等の無負荷 Q 値を維持可能な構造であることを示している。

第 4 章では、広帯域伝送を支える複数帯域同時通過フィルタについて、各通過帯域の中心周波数及び通過帯域幅を決定付ける共振器間結合係数を容易に調整可能な共振器構造、さらに多段化手法を述べている。また、複数帯域同時通過フィルタの初期検討としてデュアルバンド帯域通過フィルタを設計・製作し、提案手法の有効性を確認するとともに、提案手法が相互変調ひずみ低減の観点からも有効であることを示している。

第 5 章では、モバイル通信基地局用フロントエンドへ高温超伝導フィルタを適用した場合の効果について、高選択度化と低雑音化の観点から定量的に評価している。高選択度化については、高温超伝導フィルタを適用したフロントエンドを屋内無線通信システム実験系に組み込み、隣接他事業者移動局の送信信号がシステムに与える影響を定量的に評価し、また、低雑音化については数値解析にて、システム容量の観点から定量的に評価している。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。提案した高温超伝導フィルタ設計技術が将来のモバイル通信システムへの応用に資することを示している。

これを要するに、著者は、無線通信装置の開発に寄与する周波数フィルタ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。