

論文の内容の要旨

論文題目	Microwave Planar Resonators with Transmission Zeros and Their Applications to Bandpass Filters and Multiplexers (減衰極を有するマイクロ波平面型共振器とその帯域通過フィルタ及び分波回路への応用)
学位申請者	谷井 宏成

近年、無線通信技術の発展とそれに伴う無線機器の普及により、第3世代移動通信システムやLTE (Long Term Evolution), LTE Advance 等の第4世代移動通信システムを用いた携帯電話やスマートフォン等の無線端末はもちろん、ZigBee に代表されるように一般家電製品についても、無線通信技術が用いられる。また、無線電力伝送に関する研究も国内外で研究されており、その技術はRFID (Radio Frequency Identification) を用いたICタグによる非接触ICカードに応用され、今日でも幅広く用いられている。このような動向から将来、無線通信技術はこれまで以上に必要不可欠な技術となり、さらに1つの端末で同時に複数の無線通信システムに対応する必要があると予想される。そのため、無線通信に用いるフィルタ等をはじめとする受動回路等の電子部品に求められる要求も高くなり、それを満足させるため数多く検討されている。特に受動回路である高周波フィルタは無線通信を実現するための要となる部品であり、その応用範囲は広い。適応例として、通過帯域の広帯域化、多分波回路、帯域幅の可変機能、バランス機能、フレキシブル基板やCMOSプロセスの適用等が挙げられる。また、これら受動回路を実現するため、マイクロストリップ線路構造やコプレーナ線路構造を想定した平面型回路、また低温同時焼成セラミック基板等の積層技術を用いる必要がある。それら技術を適用した回路構成についても同様に検討されている。平面回路は、積層構造技術を用いて構成するよりもサイズの肥大化が予想される一方、容易に作製できることから低コスト化が期待できるだけでなく、要求の特性に対して柔軟に対応できるため、民生用、産業用、軍事用等にも用いられる。

本論文では、これらの応用に対応した平面型マイクロ波フィルタ及び分波回路を実現するため、目的となる回路の構成要素である共振器についてまず検討を行う。提案の共振器について減衰極の実現及び、その実現位置、共振周波数のチューナブル化、フレキシブル基板への対応等の多機能型共振器に着目して、それらの基本特性を確認した。先に、広帯域通過特性を有するBPFの構成要素となる共振器を、伝送線路に開放スタブや短絡スタブを接続したスタブ装荷型伝送線路共振器を用いて構成した。提案の共振器はこれら用いたスタブにより、減衰極を実現しつつ広帯域通過特性が得られていることを確認した。

さらに、減衰極を実現するため伝送線路とコンデンサを併用した擬似LC 並列共振器、スタブ装荷型伝送線路共振器に短絡スタブを並列接続することで、共振特性を改善しつつ共振器も小型化した共振器もそれぞれ提案している。フィルタの小型化や特性改善のため、結合線路やヘアピン型構造を用いたデュアルモード共振器についても共振条件及び減衰極の実現条件を導出し、共振器の共振特性の確認した。

フレキシブル基板を想定した共振器については、基本的な $1/2$ 波長共振器や $1/4$ 波長共振器を用いて構成し、その伝送特性を確認した。誘電体厚の薄いフレキシブル基板における共振器の共振特性とQ値について検討を行い、フレキシブル基板における共振器の損失について検討した。

次に、これら提案の共振器の特徴を積極的に用いてBPF を構成した。広帯域通過特性を有する共振器を用いた広帯域BPF については、4 段のスタブ装荷型伝送線路共振器を用いて実現し、特に減衰極の実現位置については、使用した共振器の特徴が得られた広帯域BPF の伝送特性を確認している。減衰極の実現位置が制御可能である特徴を利用して、同じフィルタ構造で通過帯域幅の異なるBPFも実現した。また、非常に小さな疑似LC 並列回路と短絡スタブを装荷したスタブ装荷型伝送線路共振器を併用することで、スタブ装荷型伝送線路共振器のみを用いたBPF と比較して回路の小型化を行い、帯域外特性の改善も併せて行った。さらにフィルタの小型化及び伝送特性の改善のための異なる手法として、デュアルモード共振器を用いたBPF を提案した。構成したフィルタは、結合線路を用いた広帯域BPF 及び、2 つのヘアピン型共振器を用いた狭帯域BPF であり、その伝送特性を試作実験と電磁界シミュレーションによって確認した。特にデュアルモード共振器を用いた狭帯域BPF については、原型LPFを用いた設計手法を提案し、それを用いることでBPF を実現した。フレキシブル基板を用いた共振器については、検討した共振器を用いた3 段のBPF と結合線路型BPF を構成するとともに、それらフィルタに対して基板の折り曲げ効果を含めた伝送特性の確認を行った。

最後に、複数のBPF を組み合わせた分波回路に関して、フィルタを接続するための整合回路の構成手法の提案と併せて検討を行った。分波回路には、結合線路を用いた広帯域デュアルモード共振器で構成された3 つの広帯域BPF による3 分波回路と、ヘアピン型共振器を基本とした4 つの狭帯域BPF による4 分波回路である。3 分波回路については、それぞれのBPF が広帯域特性を有していることから、広帯域通過特性に対しても適応可能な整合回路の構成を、また、4 分波回路については、帯域幅は狭いが隣接する通過帯域同士が非常に近接した場合でも対応できる分波回路をそれぞれ提案している。

以上のように、本論文において先にフィルタとして要求される特性に対し適した平面型共振器の提案、及びその基本特性を理解する。提案の共振器は、目的のBPF及び分波回路に対応可能な多機能特性を有しており、共振周波数や帯域幅はもちろん、減衰極の実現位置、チューナブル特性や基板の影響等を考慮した共振特性は、BPF を構成する際に非常に重要である。次に、それら共振器を用いたフィルタへの応用を行う。フィルタの伝送特性は、共振器の共振特性によって特徴付けられるため、共振器の共振特性及び、共振器が有する機能を積極的に用いることで、用いた共振器の特徴が付加されたマイクロ波平面型フィルタの実現が可能となることを示す。小型かつ、良好な伝送特性が得られたBPF については、さらに分波回路への適用を行う。用いたBPF の伝送特性を悪化させることなく、BPF の特徴を活用させる整合回路を提案することで、分波回路を実現する。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 谷井 宏成

審査委員主査 和田 光司

委員 唐沢 好男

委員 水柿 義直

委員 肖 鳳超

委員 範 公可

近年、無線通信技術の発展とそれに伴う無線機器の普及により、第3世代移動通信システムやLTE(Long Term Evolution), LTE Advance 等の第4世代移動通信システムを用いた携帯電話やスマートフォン等の無線端末はもちろん、ZigBee に代表されるように一般家電製品についても、無線通信技術が用いられる。また、無線電力伝送に関する研究も国内外で研究されており、その技術はRFID(Radio Frequency Identification)を用いたICタグによる非接触ICカードに応用されている。このような動向から将来、無線通信技術はこれまで以上に必要不可欠な技術となり、さらに1つの端末で同時に複数の無線通信システムに対応する必要があると予想される。そのため、無線通信に用いるアンテナ、フィルタをはじめとする受動回路等の部品に求められる要求も高くなり、それを満足させるため数多く検討・報告されている。特に受動回路である高周波フィルタは無線通信を実現するための要となる部品であり、その応用範囲は広い。適応例として、通過帯域の広帯域化、多分波回路、帯域幅の可変機能、バランス機能、フレキシブル基板やCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)プロセスの適用等が挙げられる。また、これら受動回路を実現するため、マイクロストリップ線路構造やコプレーナ線路構造を想定した平面型回路、また、低温同時焼成セラミック基板等の積層技術を用いる必要があり、それら技術を適用した回路構成についても同様に検討されている。平面型回路は、積層構造技術を用いて構成するよりもサイズの肥大化が予想される一方、容易に製作できることから低コスト化が期待できるだけでなく、要求の特性に対して柔軟に対応できるため、民生用、産業用、軍事用等にも用いられる。

本論文では、これらの応用に対応した平面型マイクロ波フィルタ及び分波回路の実現を目的とし、5章より構成されている。

第1章は、序論で本研究の技術背景、目的、章構成の提示による研究の概要をまとめている。

第2章は、提案の共振器による減衰極の実現及び、その実現位置、共振周波数

のチューナブル化，フレキシブル基板への対応等に着眼して，それらの基本特性を確認した．先に，広帯域通過特性を有するBPFの構成要素となる共振器を，伝送線路に開放スタブや短絡スタブを接続したスタブ装荷型伝送線路共振器を用いて構成した．提案の共振器はこれら用いたスタブにより，減衰極を実現しつつ広帯域通過特性が得られていることを確認した．さらに，減衰極を実現するため伝送線路とコンデンサを併用した擬似LC並列共振器，スタブ装荷型伝送線路共振器に短絡スタブを並列接続することで，共振特性を改善しつつ小型化した共振器もそれぞれ提案している．フィルタの小型化や特性改善のため，結合線路やヘアピン型構造を用いたデュアルモード共振器についても共振条件及び減衰極の実現条件を導出し，共振器の共振特性の確認した．フレキシブル基板を想定した共振器については，基本的な $1/2$ 波長共振器や $1/4$ 波長共振器を用いて構成し，その伝送特性を確認した．誘電体厚の薄いフレキシブル基板における共振器の共振特性とQ値について，電磁界シミュレーションにより検討を行い，フレキシブル基板における共振器の損失について検討した．

第3章はこれら提案の共振器の特徴を積極的に用いたBPFについて検討している．広帯域通過特性を有する共振器を用いた広帯域BPFについては，4段のスタブ装荷型伝送線路共振器を用いて実現し，特に減衰極の実現位置については，使用した共振器の特徴が得られた広帯域BPFの伝送特性を確認している．減衰極の実現位置が制御可能である特徴を利用して，同じフィルタ構造で通過帯域幅の異なるBPFも実現した．また，非常に小さな擬似LC並列回路と短絡スタブを装荷したスタブ装荷型伝送線路共振器を併用することで，スタブ装荷型伝送線路共振器のみを用いたBPFと比較して回路の小型化を行い，帯域外特性の改善も併せて行った．さらにフィルタの小型化及び伝送特性の改善のための異なる手法として，デュアルモード共振器を用いたBPFを提案した．構成したフィルタは，結合線路を用いた広帯域BPF及び，2つのヘアピン型共振器を用いた狭帯域BPFであり，その伝送特性を試作実験と電磁界シミュレーションによって確認した．特にデュアルモード共振器を用いた狭帯域BPFについては，原型LPFを用いた設計手法を提案し，それを用いることでBPFを実現した．フレキシブル基板を用いた共振器については，検討した共振器を用いた3段のBPFと結合線路型BPFを構成するとともに，それらフィルタに対して基板の折り曲げ効果を含めた伝送特性の確認を行った．

第4章は，複数のBPFを組み合わせた分波回路に関して，フィルタを接続するための整合回路の構成手法の提案と併せて検討を行った．分波回路には，結合線路を用いた広帯域デュアルモード共振器で構成された3つの広帯域BPFによる3分波回路と，ヘアピン型共振器を基本とした4つの狭帯域BPFによる4分波回路である．3分波回路については，それぞれのBPFが広帯域特性を有していることから，広帯域通過特性に対しても適応可能な整合回路の構成を，また，4分波回路については，帯域幅は狭いが隣接する通過帯域同士が非常に近接した場合でも対応できる分波回路を実現した．

第5章は，本論文の結論と今後の課題について述べている．

以上の内容の発表に対して質疑応答を行い，同時に申請者の研究に対する資質，能力，基礎学力について総合的に評価を行った．その結果，申請者が研究を推進する能力を十分有すること，また工学的立場から詳細に論文を記述していることを確認した．よって，本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める．