

学位論文題名

複素非対称フィルタの設計と回路的デジタル実現の研究

学位論文内容の要旨

信号の電氣的な記録・再生・伝送は広範な弱電応用の基本である。通信路や記録媒体の有効利用には信号の周波数成分や時間的な姿態を加工する装置が必須であり、これをフィルタという。特に実部信号と虚部信号の対、即ち複素信号を用いる系を複素フィルタと呼び、1940年代頃から通信の理論で用いられてきた。電磁的な装置では複素化のコストが大きく実装の途が限られていたが、発達しつつあるリアルタイムなデジタルフィルタでは、信号を数値処理するので容易に複素化できる。

複素信号の最大の特徴は正周波数と負周波数の成分が異なることであり、不要信号を伴わずに変調できる。変調とは音声を電波に乗せるなど信号の周波数帯域を移す操作をいい、実信号の場合は正周波数と負周波数の成分が対称かつ不可分なために冗長な帯域が生じる。信号の周波数成分が一部に集中している場合、零周波数付近に移して複素処理すればフィルタは低速な系でもよく、有効性が高い。

ところでフィルタ設計では、基準フィルタの周波数特性の写像によって帯域の異なるフィルタ、あるいは多次元フィルタや可変フィルタを導く手法があり、周波数変換と呼ばれている。この方法は基準となる値を修整するだけで設計が完了でき、理論や設計ツールの統合にも益があるために、典型的な周波数選択性の実現では標準的な手法となっている。従来の複素フィルタの設計では、実の特性を周波数シフトする変換が広く用いられてきた。しかしこの変換では零周波数に関して対称な特性を平行移動するだけなので、得られる特性が中心周波数に関して対称な特性に限定されてしまう。

本研究では、この制約を取り払って複素非対称特性のための周波数変換を導くとともに、回路的な見地から数値安定性が保証されるある種のデジタルフィルタについて、提案した変換の構造的かつ経済的な実現法を明らかにする。

本論文は緒論を序章とする7章より構成されている。次に2章以下の概要を述べる。

第2章では、複素フィルタと解析信号について以後の議論で必要となる事項を準備する。解析

信号とは正周波数成分のみの複素信号である。実信号の正周波数成分を抽出すれば同等の情報をもつ解析信号に変換できる。また解析信号の実部をとれば対応する実信号が得られる。このような変換により実信号システムの中で複素フィルタを自由に活用できる。また解析信号と一般の複素信号の損失を必要な帯域や複素フィルタの設計との関連で述べ、両者の相互変換についても考察する。

第3章では新たな周波数変換を提案し、実の特性から中心周波数に関して非対称な複素特性を導く。非対称特性では周波数の低い側の遮断の急峻さと周波数の高い側の遮断の急峻さが異なっており、両者に対する仕様の要求が異なるとき、中心対称な特性よりもフィルタの次数が節減できる。実の帯域通過フィルタでも非対称特性が研究されていたが、正周波数の特性と負周波数の特性を対称に配置し、かつ相互の干渉による影響を補償しなければならないために、設計が困難であった。提案する複素の周波数変換はこのような問題がない。

全ての周波数で減衰のない周波数関数をオールパス関数といい、デジタルフィルタの一般的な周波数変換は、もとの関数の遅延演算を適当なオールパス関数に置換して実現される。しかしこの操作を周波数関数に対してでなく、シグナルフローの遅延器をオールパス関数のフローに置換する方法で実行しようとする、特別な場合を除き計算不能になるという問題がある。そのため構造の定められた参照フィルタに変換を施す場合、一般にはあらかじめ伝達関数などから構造を決定しなおす必要がある。これに対しアナログの無損失回路においては、周波数変換は無損失素子を適当な無損失回路で置換する操作としても実現でき、周波数関数に立ち戻る必要がない。

第4章では前章で提案したものと等価な周波数変換の複素回路における表現を与え、デジタルフィルタとの構造的な対応が可能であることを示す。適当な構造の実の無損失等長分布定数回路を参照し、電力と関連付けられた入反射波の散乱過程とみなして模擬を行えば、回路的な構造を継承した数値安定性の高いデジタルフィルタが導出され、かつその周波数特性は参照回路と一致する。このフィルタはウェーブデジタルフィルタ(WDF)と呼ばれる。この関係を複素系に拡張する際の参照回路について論じるとともに、WDFの概念とその複素拡張の特徴を述べる。

第5章では、梯子形複素WDFの構造の単純化および受動性の確保について論じ、提案した周波数変換をシグナルフローの変更としても実現できる安定なデジタルフィルタの存在を示す。

デジタルフィルタは実現精度が乗算器係数の語長によって限られており、帰還路をもつフィルタでは、本来は安定となる伝達関数の極が語長制限により移動して安定性を失ったり、あるいは

は持続的な寄生振動が発生するなど、致命的な問題が生じ得る。しかし WDF では入反射波のフローを参照回路から継承することにより数値化された電力（疑似電力）を考えることができ、係数語長の制限による影響が疑似電力の散逸として反映される構造を用いるならば、語長制限後も安定性を確保できる。

両側抵抗終端の梯子形無損失回路は、代表的な周波数選択特性の設計公式が多く知られ、この構造を継承する実 WDF は係数語長を制限しても無損失性を保つ。これは参照回路の素子値のパラメータ数と、ウェーブディジタルフィルタで独立に語長制限される乗算器係数の個数とが一致し、かつ両者が線形な関係を保っているために、語長制限による特性への影響が回路における無損失素子の偏差と同一視できることによる。しかし複素の梯子形 WDF では、複素乗算器が実乗算器の組み合わせで構成されているために独立に語長制限される乗算器係数が増加してしまい、回路の無損失性が継承されなくなる。そこでシグナルフローの構成に配慮し、乗算器を節減して構成の経済性を高めるとともに、少なくとも疑似電力の散逸を含む純受動系としての実現が可能であることを示し、安定性の保証を与える。

第 6 章では複素ウェーブディジタルフィルタの具体的な実現例を示し、4 章および 5 章の議論の妥当性を確認する。

第 7 章ではこれまでの章を総括し、本研究の成果を要約する。また本研究に残された課題について述べる。

本研究の目的である複素非対称特性の設計と回路的ディジタル実現について、周波数変換にもとづく実用的な設計法を導き、さらにこの変換をシグナルフローに対して安定に適用できるディジタルフィルタの存在を示すとともに、その構造の簡単化を行うことができた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	永井信夫
副査	教授	伊藤精彦
副査	教授	小川吉彦
副査	教授	栃内香次
副査	助教授	三木信弘

電気信号の記録・再生・伝送では、通信路や記録媒体を有効に利用するために信号の姿態をさまざまに加工する装置が必須であり、これをフィルタという。特に実部信号と虚部信号の対を用いるものを複素フィルタと呼び、デジタルフィルタでは信号を数値化するため複素化が特に容易である。複素フィルタは可変特性の実現、多次元処理、信号の帯域を変換する変調操作、などに適している。

フィルタ設計では、基準フィルタの特性を周波数軸上で写像して所望のフィルタを導く手法が広く用いられ、周波数変換と呼ばれる。従来の複素フィルタでは実の特性を周波数シフトする変換が広く用いられてきた。しかし零周波数に関して対称な実の特性を平行移動するだけなので、得られる特性が中心対称な帯域特性に限られてしまう。本研究では、この制約を取り払って複素非対称特性のための周波数変換を導き、回路論的な見地から、提案した変換の数値安定かつ経済的な一実現法を明らかにしている。本論文は緒論以下の7章より構成されている。次に2章以下の概要を記す。

第2章では、複素フィルタと解析信号について以後必要となる事項が準備されている。解析信号は正周波数成分のみの複素信号である。実信号の正周波数成分を抽出すれど同等の情報をもつ解析信号に変換できる。また解析信号の実部をとれば対応する実信号が得られる。このような変換により実信号システムの中で複素フィルタを自由に活用できる。また解析信号と一般の負周波数成分を有する複素信号とを比較し、必要な帯域や複素フィルタの設計との関連でそれぞれの得失を述べ、両者の相互変換についても論じている。

第3章では新たな周波数変換を提案し、実の特性から中心周波数に関して非対称な複素特性を導いている。非対称特性では周波数の低い側の遮断の急峻さと周波数の高い側の遮断の急峻さが異なっており、両者に対する仕様の要求が異なるとき、従来の中心対称な特性よりも次数が節減できる。

全ての周波数で減衰のない周波数関数をオールパス関数といい、デジタルフィルタの周波数変換は一般に、もとの関数の遅延演算を適用なオールパス関数に置換して実現される。しかし変換を周波数関数に対してでなく、シグナルフローの遅延器をオールパス関数のフローに置換する方法で行うと、特別な場合を除き計算不能になる。これに対しアナログの無損失回路では、無損失素子を適当な無損失回路で置換する操作として変換を実現でき、周波数関数に立ち戻る必要がない。適当な構造の実の無損失等長分布定数回路を参照し、電力と関連付けられた入反射波の散乱過程とみなして模擬を行えば、回路的な構造を継承したデジタルフィルタが導出され、演算による誤差を除けばその周波数特性は参照回路と一致する。このフィルタはウェーブデジタルフィルタ(WDF)と呼ばれている。第4章では前章の変換と等価な変換を複素分布定数回路において表現し、この回路とWDFとの構造的な対応が可能であることを示すことにより、非対称特性の複素デジタルフィルタを構造に基づく周波数変換によって導出している。

第5章では、梯子形複素WDFの構造の簡単化および受動性の確保について論じ、提案した周波数変換がシグナルフローの変更としても数値的に安定に実現できることを示している。デジタルフィルタは実現精度が乗算器係数の語長によって限られており、帰還路をもつフィルタでは、本来は安定となる伝達関数の極が語長制限により移動して安定性を失うなど致命的な問題が生じ得る。しかしWDFでは入反射波のフローを参照回路から継承することにより数値化された電力(疑似電力)を考えることができ、係数語長の制限による影響が疑似電力の散逸として反映される構造を用いるならば、語長制限後も安定性を確保できる。さらにシグナルフローの構成に配慮することにより、乗算器を節減して構成の経済性を高めている。

第6章では複素ウェーブデジタルフィルタの実現例を示し、提案した設計法の妥当性を確認している。

第7章では本研究の成果が要約され、残された課題が述べられている。

以上のように本論文では、今日的な信号処理の重要な基盤であるデジタルフィルタについて、周波数変換による複素非対称特性の組織的な設計法を確立し、かつこれを安定に実現する実用的な構造を導出しており、デジタル信号処理と電子工学に対して寄与するところ大なるものがある。よって著者は、博士(工学)の学位に授与される資格あるものと認める。