

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4595166号  
(P4595166)

(45) 発行日 平成22年12月8日(2010.12.8)

(24) 登録日 平成22年10月1日(2010.10.1)

(51) Int.Cl.

F I

H03H 17/06 (2006.01)

H03H 17/06 633C

H03H 17/06 633Z

請求項の数 4 (全 56 頁)

(21) 出願番号 特願2000-189743 (P2000-189743)  
 (22) 出願日 平成12年6月20日(2000.6.20)  
 (65) 公開番号 特開2002-9592 (P2002-9592A)  
 (43) 公開日 平成14年1月11日(2002.1.11)  
 審査請求日 平成19年2月28日(2007.2.28)

(73) 特許権者 000002185  
 ソニー株式会社  
 東京都港区港南1丁目7番1号  
 (74) 代理人 100094053  
 弁理士 佐藤 隆久  
 (72) 発明者 茂木 幸彦  
 東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソ  
 ニー株式会社内  
 (72) 発明者 西堀 一彦  
 東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソ  
 ニー株式会社内  
 審査官 畑中 博幸

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 F I Rフィルタの係数の設定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、タップ数が可変で、バンド設定は変更可能なF I Rフィルタのフィルタ係数の設定方法であって、

少なくともF I Rフィルタの設定、バンドの設定、プリフィルタの係数の設定、通過させたい任意の周波数点の入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定を行うステップで、タップ数、フィルタの対称性の情報、バンド数、通過域の始点周波数、阻止域の終点周波数、各バンドの所望の振幅値、各バンドに対する重み付け、プリフィルタの係数、通過させたい点の周波数と振幅値、阻止域の減衰量、近似帯域で極値となる周波数を設定する初期設定ステップと、

現在の周波数の振幅特性の極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する第1ステップと、

上記第1ステップで得られた補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定するステップで、補間に用いた極値点から計算される重み付け近似誤差の極値を近似帯域全体にわたり探索して求め、求めた値を新しい極値点とする第2ステップと、

上記第1ステップおよび第2ステップを繰り返し、極値の位置が変化しなくなったときの最適近似が得られたとする所定条件により終了する第3ステップと、

上記第3ステップで近似された振幅特性から阻止域の減衰量を調べる第4ステップと、調べた減衰量と指定した阻止域の減衰量を比較し、比較結果が所定の条件を満足してい

るか否かを判断する第 5 ステップと、

上記第 5 ステップの比較結果が所定の条件を満足していない場合にバンドの設定を変更する第 6 ステップと、

上記第 6 ステップでバンド変更後、現在のタップ数で阻止域の減衰量を満足できるか否かを判断する第 7 ステップと、

上記第 7 ステップで満足していないと判断した場合に、タップ数を変更する第 8 ステップと、

上記第 5 ステップで所定の条件を満足した上記第 3 ステップにより近似された振幅特性から上記フィルタ係数を求める第 9 ステップと、を有し、

上記第 4 ステップでは、阻止域における最小の減衰量を調べ、

10

上記第 8 ステップではタップ数を増やし、

上記第 9 ステップでは、上記タップ数が可変で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通してような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重み付け近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する

FIR フィルタのフィルタ係数の設定方法。

#### 【請求項 2】

上記重み付け近似は、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通してレムズ交換 (Remez Exchange) アルゴリズムを用いて、所望の特性に対して行う

請求項 1 記載の FIR フィルタのフィルタ係数の設定方法。

20

#### 【請求項 3】

インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、タップ数が可変で、バンド設定は変更可能な FIR フィルタのフィルタ係数の設定方法であって、

少なくとも FIR フィルタの設定、バンドの設定、プリフィルタの係数の設定、通過させたい任意の周波数点の入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定、遷移域の指定周波数での減衰量の指定を行うステップで、タップ数、フィルタの対称性の情報、バンド数、通過域の始点周波数、阻止域の終点周波数、通過域の利得、阻止域の利得、通過域と阻止域に対する重み付け、プリフィルタの係数、通過させたい点の周波数と振幅値、阻止域の減衰量、遷移域の周波数とその減衰量、近似帯域で極値となる周波数を設定する初期

30

設定ステップと、  
現在の周波数の振幅特性の極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する第 1 ステップと、

上記第 1 ステップで得られた補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定するステップで、補間に用いた極値点から計算される重み付け近似誤差の極値を近似帯域全体にわたり探索して求め、求めた値を新しい極値点とする第 2 ステップと、

上記第 1 ステップおよび第 2 ステップを繰り返し、極値の位置が変化しなくなったときの最適近似が得られたとする所定条件により終了する第 3 ステップと、

上記第 3 ステップで近似された振幅特性から阻止域の減衰量を調べる第 4 ステップと、

上記第 4 ステップで調べた減衰量と指定した阻止域の減衰量を比較し、比較結果が所定の条件を満足しているか否かを判断する第 5 ステップと、

40

上記第 5 ステップの比較結果が所定の条件を満足していない場合にバンドの設定を変更する第 6 ステップと、

上記第 6 ステップでバンド変更後、現在のタップ数で阻止域の減衰量を満足できるか否かを判断する第 7 ステップと、

上記第 7 ステップで満足できないと判断した場合にタップ数を変更する第 8 ステップと、

上記第 5 ステップで所定の条件を満足した遷移域の指定周波数の減衰量を調べる第 9 ステップと、

上記第 9 ステップで調べた遷移域の指定周波数の減衰量と指定した遷移域の減衰量を比

50

較し、比較結果が所定の条件を満足しているか否かを判断する第10ステップと、

上記第10ステップの比較結果が所定の条件を満足していない場合にバンドの設定を変更する第11ステップと、

上記第11ステップでバンド変更後、現在のタップ数で遷移域の指定周波数を通過させることができるか否かを判断する第12ステップと、

上記第12ステップで通過させることができないと判断した場合にタップ数を変更する第13ステップと、

上記第10ステップで所定の条件を満足した近似された振幅特性から上記フィルタ係数を求める第14ステップと、を有し、

上記第4ステップでは、阻止域における最小の減衰量を調べ、

上記第8ステップおよび第13ステップではタップ数を増やし、

上記第14ステップでは、上記タップ数が可変で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足し、かつ遷移域の指定周波数の減衰量を通過する、任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重み付け近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する

FIRフィルタのフィルタ係数の設定方法。

#### 【請求項4】

上記重み付け近似は、阻止域の減衰量を満足し、かつ遷移域の指定周波数の減衰量を通過する、任意の周波数点を通過するレムズ交換(Remez Exchange)アルゴリズムを用いて、所望の特性に対して行う

請求項3記載のFIRフィルタのフィルタ係数の設定方法。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【0001】

#### 【発明の属する技術分野】

本発明は、デジタル信号処理に必要なFIRフィルタおよびその係数の設定方法に関するものである。

#### 【0002】

#### 【従来の技術】

画像や音声のデジタル信号処理では、フィルタ処理がよく使われる。そのフィルタ処理に使われるフィルタは、有限のタップ数で直線位相を持つという特徴から直線位相FIR (Finite Impulse Response; 有限インパルス応答) フィルタがよく利用される。

#### 【0003】

図1は、直線位相FIRフィルタのトランスバーサル型回路構成を示す図である。

この直線位相FIRフィルタ1は、図1に示すように、入力端子TINに対して縦続接続されシフトレジスタを構成する $(n-1)$ 個の遅延器 $2-1 \sim 2-n-1$ と、入力端子TINに入力された信号および各遅延器 $2-1 \sim 2-n-1$ の出力信号に対してそれぞれフィルタ係数 $h(0) \sim h(n-1)$ を乗算する $n$ 個の乗算器 $3-1 \sim 3-n$ と、 $n$ 個の乗算器 $3-1 \sim 3-n$ の出力信号を加算し出力端子TOUTに出力する加算器4により構成される。

#### 【0004】

このような直線位相FIRフィルタの代表的な設計法としては、たとえばParks, T.W. and McClellan, J.H. らが直線位相FIRフィルタに適用したレムズ交換(Remez Exchange)アルゴリズムが知られている(Parks, T.W. and McClellan, J.H.: "Chebyshev Approximation for Nonrecursive Digital Filters with Linear Phase", IEEE Trans. Circuit Theory, CT-19, 2, pp.189-194, 1972、およびRabiner, L.R., McClellan, J.H. and Parks, T.W.: "FIR Digital Filter Design Techniques Using Weighted Chebyshev Approximation", Proc. IEEE, Vol 63, April, pp.595-610, 1975 参照)。

#### 【0005】

レムズ交換アルゴリズムは、所望の振幅特性に対して重みつき近似誤差が等リプルな形になるように近似するアルゴリズムである。

#### 【0006】

10

20

30

40

50

**【発明が解決しようとする課題】**

ところで、直線位相 F I R フィルタの設計仕様で、周波数  $w = 0$  のときの直流利得を 1 にしなければならない場合がある。

**【0007】**

しかしながら、レムズ交換アルゴリズムには、次のような課題がある。

すなわち、図 2 に示すように、レムズ交換アルゴリズムでは、指定した任意の周波数点を通過するような振幅特性を得ることができない。

**【0008】**

本発明は、かかる事情に鑑みてなされたものであり、その目的は、任意の周波数点を通過する周波数応答を持つことが可能な F I R フィルタおよびその係数の設定方法を提供することにある。

10

**【0009】****【課題を解決するための手段】**

上記目的を達成するため、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっておる F I R フィルタであって、上記フィルタ係数が、任意の周波数点を通過するレムズ交換 (Remez Exchange) アルゴリズムを用いて、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより設定されている。

**【0010】**

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっている F I R フィルタのフィルタ係数の設定方法であって、任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

20

**【0011】**

また、本発明では、上記重み付け近似は、任意の周波数点を通過するレムズ交換 (Remez Exchange) アルゴリズムを用いて、所望の特性に対して行う。

**【0012】**

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっている F I R フィルタのフィルタ係数の設定方法であって、周波数の振幅特性の極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する第 1 ステップと、上記第 1 ステップで得られた補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する第 2 ステップと、上記第 1 ステップおよび第 2 ステップを繰り返し、所定条件により終了する第 3 ステップと、上記第 3 ステップで近似された振幅特性から上記フィルタ係数を求める第 4 ステップとを有する。

30

**【0013】**

本発明では、上記第 3 のステップの終了条件としては、たとえば極値の位置が所望の範囲内に近似されたか否かを判断する場合、所望の振幅値との近似誤差の最大値が指定した範囲内に収まった場合、あらかじめ設定した反復回数に達した場合を採用することができる。

**【0014】**

また、本発明では、上記第 1 ステップを行う前に、少なくとも F I R フィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点の入力、初期極値点の設定を行う初期設定ステップを有する。

40

**【0015】**

また、本発明では、上記第 2 ステップおよび第 3 ステップでは、補間に用いた極値点から計算される重みつき近似誤差の極値を近似帯域全体にわたり探し求め、求めた極値を新しい極値点とし、極値の位置が変化しなくなったときに最適近似が得られたと判断する。

**【0016】**

また、本発明では、上記第 4 ステップでは、任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

50

## 【 0 0 1 7 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、任意のタップを有するFIRフィルタであって、上記フィルタ係数が、上記タップ数を可変とし、バンドを固定した場合に、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより設定されている。

## 【 0 0 1 8 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、任意のタップを有するFIRフィルタのフィルタ係数の設定方法であって、上記タップ数を可変とし、バンドを固定した場合に、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

10

## 【 0 0 1 9 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、タップ数に変更可能で、バンドが固定されているFIRフィルタのフィルタ係数の設定方法であって、周波数の振幅特性の極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する第1ステップと、上記第1ステップで得られた補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する第2ステップと、上記第1ステップおよび第2ステップを繰り返し、所定条件により終了する第3ステップと、上記第3ステップで近似された振幅特性から阻止域の減衰量を調べる第4ステップと、調べた減衰量と指定した阻止域の減衰量を比較し、比較結果が所定の条件を満足しているか否かを判断する第5ステップと、上記第5ステップの比較結果が所定の条件を満足していない場合にタップ数を変更する第6ステップと、上記第5ステップで所定の条件を満足した上記第3ステップにより近似された振幅特性から上記フィルタ係数を求める第7ステップとを有する。

20

## 【 0 0 2 0 】

また、本発明では、上記第1ステップを行う前に、少なくともFIRフィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点の入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定を行う初期設定ステップ。

30

## 【 0 0 2 1 】

また、本発明では、上記第4ステップでは、阻止域における最小の減衰量を調べ、上記第6ステップではタップ数を増やす。

## 【 0 0 2 2 】

また、本発明では、上記第7ステップでは、上記タップ数を可変とし、バンドを固定した場合に、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

## 【 0 0 2 3 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、任意のタップを有するFIRフィルタであって、上記フィルタ係数が、上記タップ数が固定で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより設定されている。

40

## 【 0 0 2 4 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、任意のタップを有するFIRフィルタのフィルタ係数の設定方法であって、上記タップ数が固定で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィル

50

タ係数を算出する。

【 0 0 2 5 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、タップ数が固定で、バンド設定は変更可能なFIRフィルタのフィルタ係数の設定方法であって、周波数の振幅特性の極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する第1ステップと、上記第1ステップで得られた補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する第2ステップと、上記第1ステップおよび第2ステップを繰り返し、所定条件により終了する第3ステップと、上記第3ステップで近似された振幅特性から阻止域の減衰量を調べる第4ステップと、調べた減衰量と指定した阻止域の減衰量を比較し、比較結果が所定の条件を満足しているか否かを判断する第5ステップと、上記第5ステップの比較結果が所定の条件を満足していない場合にバンドの設定を変更する第6ステップと、上記第5ステップで所定の条件を満足した上記第3ステップにより近似された振幅特性から上記フィルタ係数を求める第7ステップとを有する。

10

【 0 0 2 6 】

また、本発明では、上記第1ステップを行う前に、少なくともFIRフィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点の入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定を行う初期設定ステップ。

【 0 0 2 7 】

また、本発明では、上記第4ステップでは、阻止域における最小の減衰量を調べる。

20

【 0 0 2 8 】

また、本発明では、上記第7ステップでは、上記タップ数が固定で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

【 0 0 2 9 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、任意のタップを有するFIRフィルタであって、上記フィルタ係数が、上記タップ数が可変で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより設定されている。

30

【 0 0 3 0 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、任意のタップを有するFIRフィルタのフィルタ係数の設定方法であって、上記タップ数が可変で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

【 0 0 3 1 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、タップ数が可変で、バンド設定は変更可能なFIRフィルタのフィルタ係数の設定方法であって、周波数の振幅特性の極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する第1ステップと、上記第1ステップで得られた補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する第2ステップと、上記第1ステップおよび第2ステップを繰り返し、所定条件により終了する第3ステップと、上記第3ステップで近似された振幅特性から阻止域の減衰量を調べる第4ステップと、調べた減衰量と指定した阻止域の減衰量を比較し、比較結果が所定の条件を満足しているか否かを判断する第5ステップと、上記第5ステップの比較結果が所定の条件を満足していない場合にバンドの設定を変更する第6ステップと、上記第6ステップでバンド変更後、現在のタップ数で阻止域の減衰量を満足できるか否かを判断する第7ステップと、上記第7ステ

40

50

ップで満足していないと判断した場合に、タップ数を変更する第8ステップと、上記第5ステップで所定の条件を満足した上記第3ステップにより近似された振幅特性から上記フィルタ係数を求める第9ステップとを有する。

【0032】

また、本発明では、上記第1ステップを行う前に、少なくともFIRフィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点の入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定を行う初期設定ステップ。

【0033】

また、本発明では、上記第4ステップでは、阻止域における最小の減衰量を調べ、上記第8ステップではタップ数を増やす。

【0034】

また、本発明では、上記第9ステップでは、上記タップ数が可変で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足する任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

【0035】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、任意のタップを有するFIRフィルタであって、上記フィルタ係数が、上記タップ数が固定で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足し、かつ遷移域の指定周波数の減衰量を通過する、任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより設定されている。

【0036】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、任意のタップを有するFIRフィルタのフィルタ係数の設定方法であって、上記タップ数が固定で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足し、かつ遷移域の指定周波数の減衰量を通過する、任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

【0037】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、タップ数が固定で、バンド設定は変更可能なFIRフィルタのフィルタ係数の設定方法であって、周波数の振幅特性の極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する第1ステップと、上記第1ステップで得られた補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する第2ステップと、上記第1ステップおよび第2ステップを繰り返し、所定条件により終了する第3ステップと、上記第3ステップで近似された振幅特性から阻止域の減衰量を調べる第4ステップと、上記第4ステップで調べた減衰量と指定した阻止域の減衰量を比較し、比較結果が所定の条件を満足しているか否かを判断する第5ステップと、上記第5ステップの比較結果が所定の条件を満足していない場合にバンドの設定を変更する第6ステップと、上記第5ステップで所定の条件を満足した遷移域の指定周波数の減衰量を調べる第7ステップと、上記第7ステップで調べた遷移域の指定周波数の減衰量と指定した遷移域の減衰量を比較し、比較結果が所定の条件を満足しているか否かを判断する第8ステップと、上記第7ステップの比較結果が所定の条件を満足していない場合にバンドの設定を変更する第9ステップと、上記第7ステップで所定の条件を満足した近似された振幅特性から上記フィルタ係数を求める第10ステップとを有する。

【0038】

また、本発明では、上記第1ステップを行う前に、少なくともFIRフィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点の入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定、遷移域の指定周波数での減衰量の指定を行う初期設定ステップを有する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 3 9 】

また、本発明では、上記第 4 ステップでは、阻止域における最小の減衰量を調べる。

## 【 0 0 4 0 】

また、本発明では、上記第 1 0 ステップでは、上記タップ数が固定で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足し、かつ遷移域の指定周波数の減衰量を通過する、任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

## 【 0 0 4 1 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、任意のタップを有する F I R フィルタであって、上記フィルタ係数が、上記タップ数が可変で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足し、かつ遷移域の指定周波数の減衰量を通過する、任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより設定されている。

10

## 【 0 0 4 2 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、任意のタップを有する F I R フィルタのフィルタ係数の設定方法であって、上記タップ数が可変で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足し、かつ遷移域の指定周波数の減衰量を通過する、任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

20

## 【 0 0 4 3 】

また、本発明は、インパルス応答が有限時間長で表され、当該インパルス応答がフィルタ係数となっており、タップ数が可変で、バンド設定は変更可能な F I R フィルタのフィルタ係数の設定方法であって、周波数の振幅特性の極値点通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する第 1 ステップと、上記第 1 ステップで得られた補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する第 2 ステップと、上記第 1 ステップおよび第 2 ステップを繰り返し、所定条件により終了する第 3 ステップと、上記第 3 ステップで近似された振幅特性から阻止域の減衰量を調べる第 4 ステップと、上記第 4 ステップで調べた減衰量と指定した阻止域の減衰量を比較し、比較結果が所定の条件を満足しているか否かを判断する第 5 ステップと、上記第 5 ステップの比較結果が所定の条件を満足していない場合にバンドの設定を変更する第 6 ステップと、上記第 6 ステップでバンド変更後、現在のタップ数で阻止域の減衰量を満足できるか否かを判断する第 7 ステップと、上記第 7 ステップで満足できないと判断した場合にタップ数を変更する第 8 ステップと、上記第 5 ステップで所定の条件を満足した遷移域の指定周波数の減衰量を調べる第 9 ステップと、上記第 9 ステップで調べた遷移域の指定周波数の減衰量と指定した遷移域の減衰量を比較し、比較結果が所定の条件を満足しているか否かを判断する第 1 0 ステップと、上記第 1 0 ステップの比較結果が所定の条件を満足していない場合にバンドの設定を変更する第 1 1 ステップと、上記第 1 1 ステップでバンド変更後、現在のタップ数で遷移域の指定周波数を通過させることができるか否かを判断する第 1 2 ステップと、上記第 1 2 ステップで通過させることができないと判断した場合にタップ数を変更する第 1 3 ステップと、上記第 1 0 ステップで所定の条件を満足した近似された振幅特性から上記フィルタ係数を求める第 1 4 ステップとを有する。

30

40

## 【 0 0 4 4 】

また、本発明では、上記第 1 ステップを行う前に、少なくとも F I R フィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点の入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定、遷移域の指定周波数での減衰量の指定を行う初期設定ステップを有する。

## 【 0 0 4 5 】

また、本発明では、上記第 4 ステップでは、阻止域における最小の減衰量を調べ、上記第

50



8ステップおよび第13ステップではタップ数を増やす。

【0046】

また、本発明では、上記第14ステップでは、上記タップ数が固定で、バンド設定は変更可能な場合に、阻止域の減衰量を満足し、かつ遷移域の指定周波数の減衰量を通過する、任意の周波数点を通過するような制約条件を加えたアルゴリズムを用いて、阻止域の減衰量を満足するように、所望の特性に対して重みつき近似を行うことにより、上記フィルタ係数を算出する。

【0047】

本発明によれば、たとえば初期設定により、通過させたい任意の周波数点が入力され、直線位相FIRフィルタの設定、バンドの設定、プリフィルタの係数の設定、初期極値点の

10

設定が行われる。  
次に、現在の極値点と通過させたい任意の周波数点から振幅特性を補間する補間多項式が生成される。

次に、生成した補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点が決定される。

これらが繰り返されて、たとえば極値の位置が所望の範囲内に近似されたか否かが判断される。

そして、近似された振幅特性からフィルタ係数が求められる。

【0048】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態について図面に関連付けて説明する。

20

【0049】

本発明に係る直線位相FIRフィルタは、等価的にはたとえば図1に示すようなトランスバーサル型回路構成をとることが可能である。

ただし、フィルタ係数 $h$ は、以下に詳述するように、チェビシェフ近似問題(Chebyshev approximation problem)を解くレムズ交換(Remez Exchange)アルゴリズムを拡張し、任意の周波数点を通過するように所望の振幅特性をチェビシェフ近似し、近似された振幅特性から求められる。

【0050】

以下、本発明に係る直線位相FIRフィルタの係数設定の具体的な方法について、図面に関連付けて順を追って説明する。

30

以下の説明において、周波数領域で通過させたい任意の周波数点の個数を $N_p$ と表す。

【0051】

直線位相FIRフィルタの伝達関数 $K(z)$ は、図3に示すように、直線位相を持つために4つの場合に分類される。

具体的には、図3(A)に示す奇数タップ、偶対称の場合1、図3(B)に示す偶数タップ、偶対称の場合2、図3(C)に示す奇数タップ、奇対称の場合3、および図3(D)に示す偶数タップ、奇対称の場合4の4つ場合に分類される。

【0052】

そして、その振幅特性関数 $H(e^{j\omega})$ を場合1はそのままにして、場合2~4を次のように書き直す。

40

【0053】

【数1】

$$\sum_{n=0}^{(L-1)/2} a(n) \cos(n\omega) \quad (1-1)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^{L/2} b(n) \cos\left\{\left(n-\frac{1}{2}\right)\omega\right\} \\ &= \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) \sum_{n=0}^{L/2-1} \tilde{b}(n) \cos(n\omega) \end{aligned} \quad (1-2) \quad 10$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^{(L-1)/2} c(n) \sin(n\omega) \\ &= \sin(\omega) \sum_{n=0}^{(L-3)/2} \tilde{c}(n) \cos(n\omega) \end{aligned} \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^{L/2} d(n) \sin\left\{\left(n-\frac{1}{2}\right)\omega\right\} \\ &= \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \sum_{n=0}^{L/2-1} \tilde{d}(n) \cos(n\omega) \end{aligned} \quad (1-4) \quad 20$$

【 0 0 5 4 】

すなわち、振幅特性関数  $H(e^{j\omega})$  は、図 4 に示した固定パラメータの関数  $Q(e^{j\omega})$  と設計パラメータを含む余弦級数  $P(e^{j\omega})$  との積で表される。以後、各式 (1-1) ~ (式 1-4) の和の上限を  $R-1+2 \times N_p$  と表すことにする。すなわち、 $R$  は図 4 のように計算される。また、 $a(n)$ ;  $b(n)$ ;  $c(n)$ ;  $d(n)$  を  $p(n)$  と総称する。

【 0 0 5 5 】

所望の振幅特性  $D(e^{j\omega})$  とし、各周波数に対する重みを  $W(e^{j\omega})$  とするとき、重みつき近似誤差は次のように定義される。

【 0 0 5 6 】

【 数 2 】

$$E(e^{j\omega}) = W(e^{j\omega}) \{D(e^{j\omega}) - H(e^{j\omega})\} \quad (2)$$

【 0 0 5 7 】

【 数 3 】

$$H(e^{j\omega}) = Q(e^{j\omega}) \cdot P(e^{j\omega}) \quad (3)$$

【 0 0 5 8 】

式 (2) に式 (3) を代入すると次のようになる。

【 0 0 5 9 】

【 数 4 】

10

20

30

40

$$E(e^{j\omega}) = \hat{W}(e^{j\omega}) \{ \hat{D}(e^{j\omega}) - P(e^{j\omega}) \} \quad (4)$$

【 0 0 6 0 】

ただし、 $\hat{W}(e^{j\omega})$ 、 $\hat{D}(e^{j\omega})$  は下記のものであるとする。

【 0 0 6 1 】

【 数 5 】

10

$$\hat{W}(e^{j\omega}) = W(e^{j\omega}) \cdot Q(e^{j\omega}) \quad (5)$$

【 0 0 6 2 】

【 数 6 】

$$\hat{D}(e^{j\omega}) = \frac{D(e^{j\omega})}{Q(e^{j\omega})} \quad (6)$$

【 0 0 6 3 】

20

式(4)は、場合1～場合4の4つの場合の直線位相FIRフィルタの重みつき近似誤差を表している。

重みつきチェビシェフ近似問題は、式(2)において指定周波数帯域内での $|E(e^{j\omega})|$ の最大値を最小にするような式(1-1)～(1-4)の $a(n)$ 、 $b(n)$ 、 $c(n)$ 、 $d(n)$ を決定することである。

【 0 0 6 4 】

以下、具体例に関連付けて説明する。

ここでは、下記式および図5に示すように、振幅特性 $D(e^{j\omega})$ を定義する。

【 0 0 6 5 】

【 数 7 】

30

$$\begin{aligned} D(e^{j\omega}) &= 1 \quad (\text{誤差} \pm \delta_1 \text{以内}, 0 < \omega < \omega_p) \\ D(e^{j\omega}) &= 0 \quad (\text{誤差} \pm \delta_2 \text{以内}, \omega_s < \omega < \pi) \end{aligned} \quad (7)$$

【 0 0 6 6 】

ただし、 $R$ が与えられると、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ の値は任意に指定できないが、その比率を指定することができる。

$W(e^{j\omega})$ は通過域では一定値 $W_1$ 、阻止域では $W_2$ とし、 $W_1 - \delta_1 = W_2 + \delta_2$ が成立するように選ぶ。たとえば、 $W_1 = 1$ 、 $W_2 = 1 - \delta_2 / \delta_1$ と選ぶ。このとき、次の交番定理が成り立つ。

40

【 0 0 6 7 】

定理

$(R - 1)$ 次の余弦級数 $P(e^{j\omega})$ が $\omega$ の区間 $(0, \pi)$ で目的特性に対する最良重みつきチェビシェフ近似であるための必要十分条件は、

(1)  $E(e^{j\omega})$ は区間 $(0, \pi)$ で少なくとも $(R + 1)$ 回、極値をとる周波数を $\omega_0 < \omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_{R-1} < \omega_R$ とする。

(2) 隣り合う極値の符号は異なり、かつすべての極値の絶対値は等しいこと。

すなわち、次の条件を満足する。

【 0 0 6 8 】

50

【数 8】

$$\begin{aligned} E(e^{j\omega_i}) \cdot E(e^{j\omega_{i+1}}) &< 0 \quad (i=0, 1, \dots, R-1) \\ |E(e^{j\omega_i})| &= |E(e^{j\omega_{i+1}})| \quad (i=0, 1, \dots, R-1) \end{aligned} \quad (8)$$

【0069】

したがって、 $|E(e^{j\omega_i})|$  は区間内での  $|E(e^{j\omega})|$  の最大値に等しい。

【0070】

最良なチェビシェフ近似を得る手法に交番定理に基づいたレムズ交換アルゴリズム(Remez Exchange Algorithm)がある(Rabiner, L.R., McClellan, J.H. and Parks, T.W.: "FIR Digital Filter Design Techniques Using Weighted Chebyshev Approximation", Proc. IEEE, Vol 63, April, pp.595-610, 1975 参照)。

任意の周波数点を通過するようにレムズ交換アルゴリズムは、周波数領域で所望の振幅特性をチェビシェフ近似し、近似された振幅特性から直線位相 FIR フィルタの係数を求めるものである。

【0071】

図6は、本発明に係る任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムのフローチャートである。

具体的な任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムは以下になる。

【0072】

step 0

図6に示すように、まず、初期設定を行う(F101)。この初期設定では、直線位相 FIR フィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意周波数点を入力、初期極値点の設定を行う。

具体的に設定する項目は以下の通りである。

- ・タップ数、
- ・直線位相 FIR フィルタは、偶対称あるいは奇対称、
- ・バンドの数、
- ・各バンドの両端の周波数、
- ・各バンドの所望の振幅値、
- ・各バンドに対する重みづけ、
- ・通過させたい点の周波数と振幅値 ( $w_{R+1}$ ,  $D(e^{jw_{R+1}})$ ,  $i = 1, \dots, Np$ )
- ・近似帯域で極値となる周波数  $w^{(0)} = w_k^{(0)}$  ( $k = 0, \dots, R$ )

ただし、右肩文字(i) は繰り返しの回数を表している。

【0073】

step 1

次に、現在の極値点から振幅特性を補間するラグランジュ補間多項式を生成する(F102)。

上記式(2)で示すチェビシェフ近似の目的関数が最小になる必要十分条件は交番定理により示されている。そこで、交番定理をもとにして、各極値点で所望の振幅特性からの重みつき近似誤差<sup>(i)</sup>が等しく、符号が交番するように、次のパラメータ  $p(n)$  を求める。

【0074】

【数 9】

$$P(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{R-1} p(n) \cos(n\omega) \quad (9)$$

【0075】

すなわち、周波数点  $w^{(i)} = w_k^{(i)}$  ( $k = 0, \dots, R$ ) における式 (4) の重みつき近似誤差が次式を満足する。

【 0 0 7 6 】

【 数 1 0 】

$$\hat{W}(e^{j\omega_k}) \{ \hat{D}(e^{j\omega_k}) - P(e^{j\omega_k}) \} = (-1)^k \delta^{(0)} \quad (k=0, 1, \dots, R) \quad (10)$$

【 0 0 7 7 】

以下、簡略化のために右肩文字 (i) は省略する。式 (10) を変形すると次のようになる 10

【 0 0 7 8 】

【 数 1 1 】

$$P(e^{j\omega_k}) + \frac{(-1)^k \delta}{\hat{W}(e^{j\omega_k})} = \hat{D}(e^{j\omega_k})$$

$$\sum_{n=0}^{R-1} p(n) \cos(n\omega_k) + \frac{(-1)^k \delta}{\hat{W}(e^{j\omega_k})} = \hat{D}(e^{j\omega_k}) \quad (k=0, 1, \dots, R) \quad (11)$$

20

【 0 0 7 9 】

式 (11) に制約として周波数領域で通過させたい周波数点の等式が加わる。

【 0 0 8 0 】

【 数 1 2 】

$$P(e^{j\omega_k}) = \hat{D}(e^{j\omega_k})$$

30

$$\sum_{n=0}^{R-1} p(n) \cos(n\omega_k) = \hat{D}(e^{j\omega_k}), \quad (k = R+1, \dots, R+N_p) \quad (12)$$

【 0 0 8 1 】

式 (11) と式 (12) を行列表現すると、次のようになる。

【 0 0 8 2 】

【 数 1 3 】

$$\begin{bmatrix}
 1 & \cos(\omega_0) & \cos(2\omega_0) & \cdots & \cos((R-1)\omega_0) & \frac{1}{\hat{W}(e^{j\omega_0})} \\
 1 & \cos(\omega_1) & \cos(2\omega_1) & \cdots & \cos((R-1)\omega_1) & \frac{-1}{\hat{W}(e^{j\omega_1})} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 1 & \cos(\omega_{R-1}) & \cos(2\omega_{R-1}) & \cdots & \cos((R-1)\omega_{R-1}) & \frac{(-1)^{R-1}}{\hat{W}(e^{j\omega_{R-1}})} \\
 1 & \cos(\omega_R) & \cos(2\omega_R) & \cdots & \cos((R-1)\omega_R) & \frac{(-1)^R}{\hat{W}(e^{j\omega_R})} \\
 1 & \cos(\omega_{R+1}) & \cos(2\omega_{R+1}) & \cdots & \cos((R-1)\omega_{R+1}) & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 1 & \cos(\omega_{R+N_D}) & \cos(2\omega_{R+N_D}) & \cdots & \cos((R-1)\omega_{R+N_D}) & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 p(0) \\
 p(1) \\
 \vdots \\
 p(R-1) \\
 \delta
 \end{bmatrix}
 \quad (10)$$

$$= \begin{bmatrix}
 \hat{D}(e^{j\omega_0}) \\
 \hat{D}(e^{j\omega_1}) \\
 \vdots \\
 \hat{D}(e^{j\omega_{R-1}}) \\
 \hat{D}(e^{j\omega_R}) \\
 \hat{D}(e^{j\omega_{R+1}}) \\
 \vdots \\
 \hat{D}(e^{j\omega_{R+N_D}})
 \end{bmatrix} \quad (13)$$

【 0 0 8 3 】

しかし、この式を解くのは非常に計算量が多いので、まず を解析的に求める。

【 0 0 8 4 】

【 数 1 4 】

$$\delta = \frac{\sum_{j=0}^R \alpha_j \hat{D}(e^{j\omega_j})}{\sum_{j=0}^R (-1)^j \alpha_j / \hat{W}(e^{j\omega_j})} \quad (14)$$

【 0 0 8 5 】

【 数 1 5 】

$$\alpha_k = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^R \frac{1}{(x_k - x_j)} \quad (15)$$

【 0 0 8 6 】

【 数 1 6 】

$$x_j = \cos(\omega_j) \quad (16)$$

10

【 0 0 8 7 】

$k$  は行列  $F$  の  $k$  行 ( $R + 1$ ) 列の要素の余因子である。ただし、 $\hat{W}(e^{j\omega})$ 、 $\hat{D}(e^{j\omega})$  は、それぞれ式 (5)、式 (6) を使う。

次にこの を用いて次式のようにおく。

【 0 0 8 8 】

【 数 1 7 】

$$C_k = \hat{D}(e^{j\omega_k}) - (-1)^k \frac{\delta}{\hat{W}(e^{j\omega_k})} \quad (17)$$

( $k=0, \dots, R$ )

20

【 0 0 8 9 】

【 数 1 8 】

$$C_k = \hat{D}(e^{j\omega_k}), \quad (k=R+1, \dots, R+N_p) \quad (18)$$

【 0 0 9 0 】

30

極値点以外の周波数の振幅特性を求めるために、極値点と通過させたい周波数点を用いて補間する補間多項式として、今回はラグランジュ補間多項式を用いることにする。すなわち、 $P(e^{j\omega})$  は、ラグランジュ補間多項式を用いて、 $w_k$  ( $k = 0, \dots, R + N_p$ ) で値  $C_k$  をとるような補間をすることで計算される。

【 0 0 9 1 】

【 数 1 9 】

$$P(e^{j\omega}) = \frac{\sum_{k=0}^{R-1} C_k \left( \frac{\beta_k}{x - x_k} \right)}{\sum_{k=0}^{R-1} \left( \frac{\beta_k}{x - x_k} \right)} \quad (19)$$

40

【 0 0 9 2 】

【 数 2 0 】

$$\beta_k = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{R-1} \frac{1}{(x_k - x_j)} \quad (20)$$

【 0 0 9 3 】

【 数 2 1 】

$$x = \cos(\omega) \quad (21)$$

10

【 0 0 9 4 】

この結果は、式 ( 1 3 ) を解いたことに相当する。

【 0 0 9 5 】

s t e p 2

補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を求めることと ( F 1 0 3 )、最適近似が得られた否かを繰り返し判断する ( F 1 0 4 )。

上記した s t e p 1 の結果の各極値点  $w_k$  は必ずしも重みつき誤差関数  $E(e^{jw})$  の極値になっておらず、 $|E(e^{jw})| > (i)$  となる点が存在することがある。そこで新しい極値点  $w^{(i+1)}$  を全点同時入れ替え法から決定する。

20

全点同時入れ替え法:

次式に基づいて、補間に用いた極値点から計算される重みつき近似誤差の極値を近似帯域全体にわたり探し求め、それを新しい極値点  $w^{(i+1)} = w_k^{(i+1)}$  ( $k=0, 1, \dots, R$ ) とし、s t e p 1 の処理に戻る。

【 0 0 9 6 】

【 数 2 2 】

$$E(e^{j\omega}) = \hat{W}(e^{j\omega}) \{ \hat{D}(e^{j\omega}) - P(e^{j\omega}) \} \quad (22)$$

30

【 0 0 9 7 】

極値の位置が変化しなくなったとき最適近似が得られたとする。これが繰り返しの終了条件であり、次の s t e p 3 の処理へ進む。

【 0 0 9 8 】

図 7 は、全点入れ替え法の概念図である。

簡単に説明すると、図 7 中の黒丸が補間に用いた極値点を表し、この極値点から求めた重みつき近似誤差  $E(e^{jw})$  が実線に相当する。

図 7 ( A ) に示すように、黒丸の極値点での重みつき近似誤差の値は白丸となるが、実際の極値は四角で示す周波数である。そこで、四角で示す周波数を新しい極値点として、s t e p 1 の処理に戻る。

40

また、図 7 ( B ) に示すように、補間に用いた極値点と実際の極値の周波数がずれているので、四角で示す周波数を新しい極値点として、s t e p 1 の処理に戻る。

そして、図 7 ( C ) に示すように、補間に用いた極値点と、実際の重みつき近似誤差の極値点 ( 白丸 ) が同じになったときに、繰り返しは終了する。

【 0 0 9 9 】

s t e p 3

近似された振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める ( F 1 0 5 )。

最適近似関数  $P(e^{jw})$  から N タップのインパルス応答  $h(n)$  を求める際に、 $p(n)$  から求める代わりに、次式から求める。

【 0 1 0 0 】

50



【数 2 3】

$$H(e^{j\omega}) = P(e^{j\omega}) \cdot Q(e^{j\omega}) \quad (23)$$

【0 1 0 1】

【数 2 4】

場合1:

$$h(n) = \frac{1}{N} \left\{ H(0) + 2 \sum_{k=1}^{\frac{N-1}{2}} (-1)^k H\left(\frac{2\pi}{N}k\right) \cos\left(\frac{2\pi}{N}k(n+\frac{1}{2})\right) \right\} \quad (24)$$

10

【0 1 0 2】

【数 2 5】

場合2:

$$h(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{\frac{N-1}{2}} (-1)^k H\left(\frac{2\pi}{N}(k+\frac{1}{2})\right) \sin\left(\frac{2\pi}{N}(k+\frac{1}{2})(n+\frac{1}{2})\right) \quad (25)$$

20

【0 1 0 3】

【数 2 6】

場合3:

$$h(n) = -\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{\frac{N-1}{2}} (-1)^k H\left(\frac{2\pi}{N}k\right) \sin\left(\frac{2\pi}{N}k(n+\frac{1}{2})\right) \quad (26)$$

30

【0 1 0 4】

【数 2 7】

場合4:

$$h(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{\frac{N-1}{2}} (-1)^k H\left(\frac{2\pi}{N}(k+\frac{1}{2})\right) \cos\left(\frac{2\pi}{N}(k+\frac{1}{2})(n+\frac{1}{2})\right) \quad (27)$$

【0 1 0 5】

40

もし、通過させたい任意の周波数点がない場合、 $Np = 0$  のときは、通常のレムズ交換アルゴリズムと同じである。

【0 1 0 6】

図 8 は、以下に示す仕様に対して、任意の周波数点を通過するように拡張したレムズ交換アルゴリズムで設定された低域通過フィルタの周波数応答を示す図である。

【0 1 0 7】

仕様

- ・タップ数 ; 2 4 タップ、
- ・対称性 ; 偶対称

【0 1 0 8】

50

## 【表 1】

## ● バンド

バンド	周波数範囲	利得	重み
1	$0 \leq w \leq 0.3\pi$	3	1
2	$0.5\pi \leq w \leq \pi$	0	1

【 0 1 0 9 】

10

## 【表 2】

## ● 指定周波数点

周波数	利得
$w = 0$	3
$w = 2\pi/3$	0

【 0 1 1 0 】

図 8 ( A ) はデシベルで表示した周波数応答を示す図、図 8 ( B ) はそのままの値で表示した周波数応答を示す図、図 8 ( C ) は利得 3 付近を拡大した図、図 8 ( D ) は利得 0 付近を拡大した図である。

20

また、図中、実線は最終的に得られた周波数特性を示している。また、点線はバンドの区切りを示し、黒丸は指定した周波数点を示している。

【 0 1 1 1 】

図 8、特に図 8 ( C )、( D ) から、本実施形態に係る任意の周波数点を通過するように拡張したレムズ交換アルゴリズムで設定された低域通過フィルタは、指定した周波数点を通過していることが確認できる。

【 0 1 1 2 】

次に、変形例として、指定された阻止域の減衰量を満足するアルゴリズムについて説明する。

30

このアルゴリズムは、任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムを用いて、バンド数が 2 である低域通過フィルタ、または、高域通過フィルタに対して、指定された阻止域の減衰量(重みつき近似誤差)を満足するアルゴリズムである。

なお、以下の説明では、低域通過フィルタを想定して記述しているが、高域通過フィルタに適用したいときは、「通過域」と「阻止域」は逆になる。

【 0 1 1 3 】

阻止域の減衰量を満足するための方法としては、以下に示す 3 種類のアプローチが存在する。

第 1 は、通過域の終点周波数  $w_p$  を可変、阻止域の始点周波数  $w_s$  を固定、およびタップ数を固定とするアプローチである。

40

第 2 は、通過域の終点周波数  $w_p$  を固定、阻止域の始点周波数  $w_s$  を可変、およびタップ数を固定とするアプローチである。

第 3 は、通過域の終点周波数  $w_p$  を固定、阻止域の始点周波数  $w_s$  を固定、タップ数を可変とするアプローチである。

【 0 1 1 4 】

以下、第 1、第 2、および第 3 のアプローチについて、図面に関連つけて順を追って説明する。

【 0 1 1 5 】

第 1 のアプローチ

50

まず、一つ目のアプローチでは、指定した阻止域の減衰量  $d B_s$  を満足する最も大きい通過域の終点周波数  $w_p$  を求めることになる。

図 9 は、阻止域の減衰量を満足するフィルタを求めるアルゴリズムのフローチャートを示す図である。

図 10 は、阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタを求めるアルゴリズムで、自由になるパラメータ（変数）と固定されるパラメータ（変数）を示している。

#### 【 0 1 1 6 】

ここで、このアルゴリズムで自由になるパラメータ、目的、そしてアルゴリズムの原理を列挙すると次のようになる。

- \* 自由パラメータ：通過域の終点周波数  $w_p$  である。
- \* 目的：指定した阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数  $w_p$  を持つフィルタを得る。
- \* 原理：通過域の始点周波数と阻止域の両端の周波数が固定であり、通過域の終点周波数が自由パラメータである。レムズ交換アルゴリズムによるチェビシェフ近似では、
  - ・ 通過域の終点周波数  $w_p$  が阻止域の始点周波数  $w_s$  よりも遠ざかる  
阻止域の減衰量は大きくなる。
  - ・ 通過域の終点周波数  $w_p$  が阻止域の始点周波数  $w_s$  に近づく  
阻止域の減衰量は小さくなる。

すなわち、阻止域の始点周波数  $w_s$  から遠い周波数（ $w = 0$  付近）に  $w_p^{(cur)}$  と阻止域の始点周波数に近い周波数  $w_p^{(pre)}$  を初期周波数として用意し、二分分割法を利用して指定した減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数の位置  $w_p$  を求める。

なお、このようなパラメータの直線探索法で最も効率の良い方法は黄金分割法であるが、ここでは、アルゴリズムの理解が容易な二分分割法を採用している。

#### 【 0 1 1 7 】

図 9 および以下に説明するアルゴリズムの各ステップ処理 F 1 0 2 , F 1 0 3 , F 1 0 4 , F 1 0 5 の内容は、図 6 に関連付けて説明した任意の周波数点を通るレムズ交換アルゴリズムと同じである。したがって、これらの処理については、図 6 と同じ符号を用いている。

#### 【 0 1 1 8 】

##### s t e p 1 0

図 9 に示すように、まず、初期設定を行う（F 2 0 1）。この初期設定では、直線位相 F I R フィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点を入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定、二分分割法の初期周波数の設定を行う。

具体的に設定する項目は以下の通りである。

- ・ タップ数、
- ・ 直線位相 F I R フィルタは、偶対称あるいは奇対称、
- ・ バンドの数は 2 個、
- ・ 通過域の始点周波数、
- ・ 通過域の利得、
- ・ 阻止域の両端の周波数、
- ・ 阻止域の利得、
- ・ 通過域と阻止域に対する重みづけ、
- ・ 通過させたい点の周波数と振幅値、
- ・ 阻止域の減衰量  $d B_s$  (すなわち、阻止域のリップルの大きさ 2 を指す) 、
- ・ 近似帯域で極値となる周波数  $w^{(0)} = w_k^{(0)}$  ( $k = 0, \dots, R$ )

ただし、右肩文字 (i) は繰り返しの回数を表している。

#### 【 0 1 1 9 】

また、図 11 は、阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタを求めるアルゴリズムにおける二分分割法の初期周波数を示す図である。

図 1 1 に示すように、本例では、二分割法の初期周波数として下記のような値を与えている。

【 0 1 2 0 】

【 数 2 8 】

$\omega_p^{(pre)}[0]$  = 阻止域の始点周波数の近傍

$\omega_p^{(cur)}[0]$  = 通過域の始点周波数の近傍 (28)

10

【 0 1 2 1 】

$w_p$  の後ろにある  $[t]$  の部分はサイクル数を表すものとする。

ここでは、周波数  $w_p^{(pre)}[0]$  に対しては任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムを実行して阻止域における最小の減衰量  $d B^{(pre)}[0]$  が求められているとして以下のステップについて説明する。

【 0 1 2 2 】

s t e p 1 1

任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムを実行する ( F 1 0 2 , F 1 0 3 , F 1 0 4 ) 。

具体的には、処理 F 1 0 2 では、 $w_p^{(cur)}[t]$  のときの極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する。

次いで、処理 F 1 0 3 において、補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する。

そして、処理 F 1 0 4 において、レムズ交換アルゴリズムの繰り返し判断を行う。

【 0 1 2 3 】

s t e p 1 2

次に、阻止域の減衰量を調べる ( F 2 0 6 ) 。

処理 F 1 0 2 で求めた補間多項式を用いて、阻止域における最小の減衰量 ( 最大の重みつき近似誤差 2 )  $d B_s^{(cur)}[t]$  を調べる。

【 0 1 2 4 】

s t e p 1 3

次に、指定した阻止域の減衰量との比較を行う ( F 2 0 7 ) 。

具体的には、指定した阻止域の減衰量  $d B_s$  と比較して、下記式 ( 2 9 ) または式 ( 3 0 ) を満足している場合には、s t e p 1 5 ( F 1 0 5 ) の処理に移行する。満足していない場合には s t e p 1 4 ( F 2 0 8 ) の処理に移行する。

【 0 1 2 5 】

【 数 2 9 】

$$|d B_s^{(cur)}[t] - d B_s| < \varepsilon_1 \quad (29)$$

40

【 0 1 2 6 】

【 数 3 0 】

$$|\omega_p^{(cur)}[t] - \omega_p^{(pre)}[t]| < \varepsilon_2 \quad (30)$$

【 0 1 2 7 】

ただし、 1 と 2 は非常に小さい値をしている。

【 0 1 2 8 】

50

s t e p 1 4

指定した阻止域の減衰量  $dBs$  との比較において、上記式 (29) または式 (30) を満足していない場合には、バンドの設定を変更する (F208)。

具体的には、新しい通過域の終点周波数  $w_p^{(cur)}[t+1]$  を設定する。その設定法として一回目のループの場合と二回目以降のループの場合に分けて説明する。

## 【0129】

一回目:

一回目の場合には、図12に示す3つのケースが考えられる。

すなわち、周波数  $w_p^{(pre)}[0]$ 、 $w_p^{(cur)}[0]$  に対して、図12(A), (B), (C) に示すケースが考えられる。

図12(A)に示すケースは、両方とも指定した減衰量を満足しているケースである。この場合、阻止域の始点周波数  $ws$  に近い周波数  $w_p^{(pre)}[0]$  を解として step 15 の処理に進む。

図12(B)に示すケースは、両方とも指定した減衰量を満足しないケースである。この場合、現在のタップ数では、指定した減衰量を実現することができないので、その旨を表示して終了する。

図12(C)に示すケースは、片方のみが指定した減衰量を満足するケースである。この場合は、下記式 (31) のようにして step 11 の処理に移行する。

なお、今回の初期周波数点の与え方では、 $w_p^{(pre)}[0]$  が満足し、 $w_p^{(cur)}[0]$  が満足しないケースは存在しない。

## 【0130】

## 【数31】

$$\begin{aligned}\omega_p^{(pre)}[1] &= \omega_p^{(cur)}[0] \\ \omega_p^{(cur)}[1] &= 0.5 \times (\omega_p^{(cur)}[0] + \omega_p^{(pre)}[0]) \\ dB^{(pre)}[1] &= dB^{(cur)}[0]\end{aligned}\quad (31)$$

## 【0131】

二回目以降:

二回目以降の場合には、図13に示す2つのケースが考えられる。二回目以降における新しい周波数の決め方において、 $w_p^{(pre)}[t+1]$  には必ず指定した減衰量  $dBs$  を満足する周波数を保存する。周波数  $w_p^{(pre)}[t]$ 、 $w_p^{(cur)}[t]$  に対して、図13(A), (B) に示すケースが考えられる。

図13(A)に示すケースは、片方のみが指定した減衰量を満足するケースである。この場合は、下記式 (32) のようにして次の step 11 の処理に移行する。

なお、常に  $w_p^{(pre)}[t]$  は指定した減衰量を満足した周波数があるので、 $w_p^{(pre)}[t]$  が満足しないケースは存在しない。

## 【0132】

## 【数32】

$$\begin{aligned}\omega_p^{(pre)}[t+1] &= \omega_p^{(pre)}[t] \\ \omega_p^{(cur)}[t+1] &= 0.5 \times (\omega_p^{(cur)}[t] + \omega_p^{(pre)}[t]) \\ dB^{(pre)}[t+1] &= dB^{(pre)}[t]\end{aligned}\quad (32)$$

## 【0133】

図13(B)に示すケースは、両方とも指定した減衰量を満足しているケースである。こ

10

20

30

40

50

の場合は、下記式 ( 3 3 ) のようにして次の s t e p 1 1 の処理に移行する。

【 0 1 3 4 】

【 数 3 3 】

$$\begin{aligned}\omega_p^{(pre)}[t+1] &= \omega_p^{(cur)}[t] \\ \omega_p^{(cur)}[t+1] &= \omega_p^{(cur)}[t] + 0.5 \times (\omega_p^{(cur)}[t] - \omega_p^{(pre)}[t]) \\ dB^{(pre)}[t+1] &= dB^{(cur)}[t]\end{aligned}\quad (33)$$

10

【 0 1 3 5 】

s t e p 1 5

近似された振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める ( F 1 0 5 )。

すなわち、最終的に得られた振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める。

【 0 1 3 6 】

図 1 4 は、「阻止域の減衰量を満足する最大の通過域の終点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタの周波数応答特性を示す図である。

図 1 4 ( A ) はデシベルで表示した周波数応答を示す図、図 1 4 ( B ) はそのままの値で表示した周波数応答を示す図、図 1 4 ( C ) は利得 3 付近を拡大した図、および図 1 4 ( D ) は利得 0 付近を拡大した図である。

20

【 0 1 3 7 】

この場合の基本アルゴリズム、求めたい変数、指定周波数点は以下の通りである。

【 0 1 3 8 】

基本アルゴリズム:

任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムである。

- ・ 2 4 タップ
- ・ 偶対称
- ・ 阻止域の減衰量は - 4 0 d B 以下

求めたい変数:

通過域の終点周波数  $w_p$  である。

30

【 0 1 3 9 】

【 表 3 】

- ・ バンド

バンド	周波数範囲	利得	重み
通過域	$0 \leq w \leq w_p$	3	1
阻止域	$0.5\pi \leq w \leq \pi$	0	1

【 0 1 4 0 】

【 表 4 】

40

- ・ 指定周波数点

周波数	利得
$w = 0$	3
$w = 2\pi/3$	0

【 0 1 4 1 】

なお、図 1 4 中において、実線は阻止域の減衰量を満足する最大の通過域の終点周波数をもつ低域通過フィルタの周波数応答を示している。また、点線はあらかじめ与えたバンドの区切りを示し、黒丸は指定した周波数点を示している。

50

## 【 0 1 4 2 】

図 1 4 ( A ) から指定した阻止域の減衰量を実現していることが確認できる。

また、図 1 4 ( C ) , ( D ) から指定した周波数点を通して確認できる。

## 【 0 1 4 3 】

すなわち、図 1 4 からわかるように、本発明に係る「阻止域の減衰量を満足する最大の通過域の終点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタは、良好な周波数応答特性を有している。

## 【 0 1 4 4 】

第 2 のアプローチ

次に、第 2 のアプローチでは、指定した阻止域の減衰量  $d B_s$  を満足する最も小さい阻止域の始点周波数  $w_s$  を求めることになる。

そのためのフローチャートは、第 1 のアプローチで参照した図 9 と等価なものとなる。

図 1 5 は、阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタを求めるアルゴリズムで、自由になるパラメータ ( 変数 ) と固定されるパラメータ ( 変数 ) を示している。

## 【 0 1 4 5 】

ここで、このアルゴリズムで自由になるパラメータ、目的、そしてアルゴリズムの原理を列挙すると次のようになる。

\* 自由パラメータ：阻止域の始点周波数  $w_s$  である。

\* 目的：指定した阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数  $w_s$  を持つフィルタを得る。

\* 原理：通過域の両端の周波数と阻止域の終点周波数が固定であり、阻止域の始点周波数が自由パラメータである。レムズ交換アルゴリズムによるチェビシェフ近似では、

・この阻止域の始点周波数  $w_s$  が通過域の終点周波数  $w_p$  よりも遠ざかる 阻止域の減衰量は大きくなる。

・この阻止域の始点周波数  $w_s$  が通過域の終点周波数  $w_p$  に近づく 阻止域の減衰量は小さくなる。

すなわち、通過域の終点周波数から遠い周波数  $w_s^{(pre)}$  と通過域の終点周波数に近い周波数  $w_s^{(cur)}$  を初期周波数として用意し、二分法を利用して指定した減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数の位置  $w_s$  を求める。

なお、この場合も、このようなパラメータの直線探索法で最も効率が良い方法は黄金分割法であるが、ここでは、アルゴリズムの理解が容易な二分法を採用している。

## 【 0 1 4 6 】

また、図 9 および以下に説明するアルゴリズムの各ステップ処理 F 1 0 2 , F 1 0 3 , F 1 0 4 , F 1 0 5 の内容は、第 1 のアプローチの場合と同様に、図 6 に関連付けて説明したプリフィルタの周波数応答を考慮したレムズ交換アルゴリズムと同じである。したがって、ここでの処理については、図 6 と同じ符号を用いている。

## 【 0 1 4 7 】

s t e p 2 0

図 9 に示すように、まず、初期設定を行う ( F 2 0 1 ) 。この初期設定では、直線位相 F I R フィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点を入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定、二分法の初期周波数の設定を行う。

具体的に設定する項目は以下の通りである。

- ・タップ数、
- ・直線位相 F I R フィルタは、偶対称あるいは奇対称、
- ・バンドの数は 2 個
- ・通過域の両端の周波数、
- ・通過域の利得、
- ・阻止域の終点周波数、
- ・阻止域の利得、

- ・通過域と阻止域に対する重みづけ、
- ・通過させたい点の周波数と振幅値、
- ・阻止域の減衰量  $d B_s$  (すなわち、阻止域のリップルの大きさ  $2$  を指す)、
- ・近似帯域で極値となる周波数  $w^{(0)} = w_k^{(0)}$  ( $k = 0, \dots, R$ )

ただし、右肩文字(i) は繰り返しの回数を表している。

【 0 1 4 8 】

また、図 1 6 は、阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域を持つフィルタを求めるアルゴリズムにおける二分割法の初期周波数を示す図である。

図 1 6 に示すように、本例では、二分割法の初期周波数として下記のような値を与えている。

【 0 1 4 9 】

【 数 3 4 】

$$\begin{aligned}\omega_s^{(pre)}[0] &= \text{通過域の終点周波数の近傍} \\ \omega_s^{(cur)}[0] &= \text{阻止域の終点周波数の近傍}\end{aligned}\tag{34}$$

【 0 1 5 0 】

$w_s$  の後ろにある  $[t]$  の部分はサイクル数を表すものとする。

ここでは、周波数  $w_s^{(pre)}[0]$  に対しては任意の周波数点を通してレムズ交換アルゴリズムを実行して阻止域における最小の減衰量  $d B^{(pre)}[0]$  が求められているとして以下のステップについて説明する。

【 0 1 5 1 】

s t e p 2 1

任意の周波数点を通してレムズ交換アルゴリズムを実行する ( F 1 0 2 , F 1 0 3 , F 1 0 4 )。

具体的には、処理 F 1 0 2 では、 $w_s^{(cur)}[t]$  のときの極値点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する。

次いで、処理 F 1 0 3 において、補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する。

そして、処理 F 1 0 4 において、レムズ交換アルゴリズムの繰り返し判断を行う。

【 0 1 5 2 】

s t e p 2 2

次に、阻止域の減衰量を調べる ( F 2 0 6 )。

処理 F 1 0 2 で求めた補間多項式を用いて、阻止域における最小の減衰量 ( 最大の重みつき近似誤差  $2) d B_s^{(cur)}[t]$  を調べる。

【 0 1 5 3 】

s t e p 2 3

次に、指定した阻止域の減衰量との比較を行う ( F 2 0 7 )。

具体的には、指定した阻止域の減衰量  $d B_s$  と比較して、下記式 ( 3 5 ) または式 ( 3 6 ) を満足している場合には、s t e p 2 5 ( F 1 0 5 ) の処理に移行する。満足していない場合には s t e p 2 4 ( F 2 0 8 ) の処理に移行する。

【 0 1 5 4 】

【 数 3 5 】

$$|dB_s^{(cur)}[t] - dB_s| < \varepsilon_1\tag{35}$$

10

20

30

40



【 0 1 5 5 】

【 数 3 6 】

$$|\omega_s^{(cur)}[t] - \omega_s^{(pre)}[t]| < \varepsilon_2 \quad (36)$$

【 0 1 5 6 】

ただし、 1 と 2 は非常に小さい値とする。

【 0 1 5 7 】

s t e p 2 4

10

指定した阻止域の減衰量との比較において、上記式 ( 3 5 ) または式 ( 3 6 ) を満足していない場合には、バンドの設定を変更する ( F 2 0 8 )。

具体的には、新しい阻止域の始点周波数  $w_s^{(cur)}[t + 1]$  を設定する。その設定法として一回目のループの場合と二回目以降のループの場合に分けて説明する。

【 0 1 5 8 】

一回目:

一回目の場合には、図 1 7 に示す 3 つのケースが考えられる。

すなわち、周波数  $w_s^{(pre)}[0]$ 、 $w_s^{(cur)}[0]$  に対して、図 1 7 ( A ) , ( B ) , ( C ) に示すケースが考えられる。

図 1 7 ( A ) に示すケースは、両方とも指定した減衰量を満足しているケースである。この場合、 $w = 0$  に近い周波数  $w_s^{(pre)}[0]$  を解とし s t e p 2 5 の処理に進む。

20

図 1 7 ( B ) に示すケースは、両方とも指定した減衰量を満足しないケースである。この場合、現在のタップ数では、指定した減衰量を実現することができないので、その旨を表示して終了。

図 1 7 ( C ) に示すケースは、片方のみが指定した減衰量を満足するケースである。この場合は、下記式 ( 3 7 ) のようにして s t e p 2 1 の処理に移行する。

なお、今回の初期周波数点の与え方では、 $w_s^{(pre)}[0]$  が満足し、 $w_s^{(cur)}[0]$  が満足しないケースは存在しない。

【 0 1 5 9 】

【 数 3 7 】

30

$$\begin{aligned} \omega_s^{(pre)}[1] &= \omega_s^{(cur)}[0] \\ \omega_s^{(cur)}[1] &= 0.5 \times (\omega_s^{(cur)}[0] + \omega_s^{(pre)}[0]) \\ dB_s^{(pre)}[1] &= dB_s^{(cur)}[0] \end{aligned} \quad (37)$$

【 0 1 6 0 】

二回目以降:

二回目以降の場合には、図 1 8 に示す 2 つのケースが考えられる。二回目以降における新しい周波数の決め方において、 $w_s^{(pre)}[t + 1]$  には必ず指定した減衰量  $dB_s$  を満足する周波数を保存することにする。周波数  $w_s^{(pre)}[t]$ 、 $w_s^{(cur)}[t]$  に対して、図 1 8 ( A ) , ( B ) に示すケースが考えられる。

40

図 1 8 ( A ) に示すケースは、片方のみが指定した減衰量を満足するケースである。この場合は、下記式 ( 3 8 ) のようにして次の s t e p 2 1 の処理に移行する。

なお、常に  $w_s^{(pre)}[t]$  は減衰量を満足した周波数がかかるので、 $w_s^{(pre)}[t]$  が満足しないケースは存在しない。

【 0 1 6 1 】

【 数 3 8 】

$$\begin{aligned}
 \omega_s^{(pre)}[t+1] &= \omega_s^{(pre)}[t] \\
 \omega_s^{(cur)}[t+1] &= 0.5 \times (\omega_s^{(cur)}[t] + \omega_s^{(pre)}[t]) \\
 dB_s^{(pre)}[t+1] &= dB_s^{(pre)}[t]
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

【 0 1 6 2 】

図 1 8 ( B ) に示すケースは、両方とも指定した減衰量を満足しているケースである。この場合は、下記式 ( 3 9 ) のようにして次の s t e p 2 1 の処理に移行する。

10

【 0 1 6 3 】

【数 3 9 】

$$\begin{aligned}
 \omega_s^{(pre)}[t+1] &= \omega_s^{(cur)}[t] \\
 \omega_s^{(cur)}[t+1] &= \omega_s^{(cur)}[t] + 0.5 \times (\omega_s^{(cur)}[t] - \omega_s^{(pre)}[t]) \\
 dB_s^{(pre)}[t+1] &= dB_s^{(cur)}[t]
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

【 0 1 6 4 】

s t e p 2 5

20

近似された振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める ( F 1 0 5 )。

すなわち、最終的に得られた振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める。

【 0 1 6 5 】

図 1 9 は、「阻止域の減衰量を満足する最小の阻止域の始点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタの周波数応答特性を示す図である。

図 1 9 ( A ) はデシベルで表示した周波数応答を示す図、図 1 9 ( B ) はそのままの値で表示した周波数応答を示す図、図 1 9 ( C ) は利得 3 付近を拡大した図、および図 1 9 ( D ) は利得 0 付近を拡大した図である。

【 0 1 6 6 】

この場合の基本アルゴリズム、求めたい変数、指定周波数点は以下の通りである。

30

【 0 1 6 7 】

基本アルゴリズム:

任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムである。

- ・ 2 4 タップ
- ・ 偶対称
- ・ 阻止域の減衰量は - 4 0 d B 以下

求めたい変数:

阻止域の始点周波数  $w_s$  である。

【 0 1 6 8 】

【表 5 】

40

- バンド

バンド	周波数範囲	利得	重み
通過域	$0 \leq w \leq 0.3\pi$	3	1
阻止域	$w_s \leq w \leq \pi$	0	1

【 0 1 6 9 】

【表 6 】

• 指定周波数点

周波数	利得
$w = 0$	3
$w = 2\pi/3$	0

【 0 1 7 0 】

なお、図 1 9 中において、実線は阻止域の減衰量を満足する最小の阻止域の始点周波数をもつ低域通過フィルタの周波数応答を示している。また、点線はあらかじめ与えたバンドの区切りを示し、黒丸は指定して周波数点を示している。

10

【 0 1 7 1 】

図 1 9 ( A ) から指定した阻止域の減衰量を実現していることが確認できる。

また、図 1 9 ( C ) , ( D ) から指定した周波数点を通過していることが確認できる。

【 0 1 7 2 】

すなわち、図 1 9 からわかるように、本発明に係る「阻止域の減衰量を満足する最小の阻止域の始点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタは、良好な周波数応答特性を有している。

【 0 1 7 3 】

第 3 のアプローチ

20

最後に、第 3 のアプローチでは、指定した阻止域の減衰量  $d B_s$  を満足する最小のタップ数  $N$  を求めることになる。

図 2 0 は、阻止域の減衰量を満足する最小のタップ数のフィルタを求めるアルゴリズムのフローチャート示す図である。

【 0 1 7 4 】

ここで、このアルゴリズムで、自由になるパラメータ、目的、そしてアルゴリズムの原理を列挙すると次のようになる。

\* 自由パラメータ：タップ数である。

\* 目的：指定された阻止域の減衰量を満足する最小タップ数のフィルタを得る。

\* 原理：バンドの変数はすべて固定であるので、指定した阻止域の減衰量を満足できない場合に、タップ数を 1 タップ増やす。

30

【 0 1 7 5 】

また、図 2 0 および以下に説明するアルゴリズムの各ステップ処理 F 1 0 2 , F 1 0 3 , F 1 0 4 , F 1 0 5 , の内容は、第 1 のアプローチの場合と同様に、図 6 に関連付けて説明した任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムと同じである。また、処理 F 2 0 6 の内容は第 2 のアプローチの場合と同様に、図 9 に関連付けて説明した処理と同様である。したがって、ここでの処理については、図 6 および図 9 と同じ符号を用いている。

【 0 1 7 6 】

s t e p 3 0

図 2 0 に示すように、まず、初期設定を行う ( F 4 0 1 ) 。この初期設定では、直線位相 F I R フィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点を入力、初期極値点の設定を行う。

40

具体的に設定する項目は以下の通りである。

- ・初期タップ数、
- ・直線位相 F I R フィルタは、偶対称あるいは奇対称、
- ・バンドの数は 2 個、
- ・各バンドの始点周波数と終点周波数、
- ・各バンドの利得、
- ・各バンドの重みづけ、
- ・通過させたい点の周波数と振幅値、

50

- ・ 阻止域の減衰量  $d B_s$  (すなわち、阻止域のリップルの大きさ 2 を指す)、
- ・ 近似帯域で極値となる周波数  $w^{(0)} = w_k^{(0)}$  ( $k = 0, \dots, R$ )

ただし、右肩文字 (i) は繰り返しの回数を表している。

【 0 1 7 7 】

s t e p 3 1

任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムを実行する ( F 1 0 2 , F 1 0 3 , F 1 0 4 )。

具体的には、処理 F 1 0 2 では、 $w_p^{(cur)}[t]$  のときの極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する。

次いで、処理 F 1 0 3 において、補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する。

そして、処理 F 1 0 4 において、レムズ交換アルゴリズムの繰り返し判断を行う。

【 0 1 7 8 】

s t e p 3 2

次に、阻止域の減衰量を調べる ( F 2 0 6 )。

処理 F 1 0 2 で求めた補間多項式を用いて、阻止域における最小の減衰量 ( 最大の重みつき近似誤差 2)  $d B_s^{(cur)}[t]$  を調べる。

【 0 1 7 9 】

s t e p 3 3

次に、指定した阻止域の減衰量との比較を行う ( F 4 1 2 )。

具体的には、指定した阻止域の減衰量  $d B_s$  と比較して、下記式 ( 4 0 ) を満足している場合には、s t e p 3 5 ( F 1 0 5 ) の処理に移行する。満足していない場合には s t e p 3 4 ( F 4 1 3 ) の処理に移行する。

【 0 1 8 0 】

【 数 4 0 】

$$dB_s^{(cur)}[t] < dB_s \quad (40)$$

【 0 1 8 1 】

s t e p 3 4

1 タップ増やす ( F 4 1 3 )。

すなわち、現在のタップ数を 1 タップ増やし、s t e p 3 0 の処理に移行する。

【 0 1 8 2 】

s t e p 3 5

近似された振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める ( F 1 0 5 )。

すなわち、最終的に得られた振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める。

【 0 1 8 3 】

図 2 1 は、「阻止域の減衰量を実現する最小のタップ数」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタの周波数応答特性を示す図である。

図 2 1 ( A ) はデシベルで表示した周波数応答を示す図、図 2 1 ( B ) はそのままの値で表示した周波数応答を示す図、図 2 1 ( C ) は利得 3 付近を拡大した図、および図 2 1 ( D ) は利得 0 付近を拡大した図である。

【 0 1 8 4 】

この場合の基本アルゴリズム、求めたい変数、指定周波数点は以下の通りである。

【 0 1 8 5 】

基本アルゴリズム:

任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムである。

- ・ 初期タップ数 1 0 タップ
- ・ 偶対称

10

20

30

40

50

・ 阻止域の減衰量は - 60 dB 以下

求めたい変数:

タップ数  $N$  である。

【0186】

【表7】

・ バンド

バンド	周波数範囲	利得	重み
通過域	$0 \leq w \leq 0.3\pi$	3	1
阻止域	$0.5\pi \leq w \leq \pi$	0	1

10

【0187】

【表8】

・ 指定周波数点

周波数	利得
$w = 0$	3
$w = 2\pi/3$	0

20

【0188】

なお、図21中において、実線は阻止域の減衰量が - 60 dB 以下になる最小のタップ数 (36タップ) の低域通過フィルタの周波数応答を示している。また、点線はあらかじめ与えたバンドの区切りを示し、黒丸は指定した周波数点を示している。

【0189】

図21(A)から指定した阻止域の減衰量を実現していることが確認できる。

また、図21(C), (D)から指定した周波数点を通過していることが確認できる。

【0190】

すなわち、図21からわかるように、本発明に係る「阻止域の減衰量を実現する最小のタップ数」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタは、良好な周波数応答特性を有している。

30

【0191】

次に、第2の変形例として、阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタを求めるアルゴリズムについて説明する。

【0192】

ここで、このアルゴリズムで自由になるパラメータ、目的、そしてアルゴリズムの原理を列挙すると次のようになる。

\* 自由パラメータ: 通過域の終点周波数  $w_p$  と阻止域の始点周波数  $w_s$  である。

\* 目的: 阻止域の減衰量  $d B_s$  を満足し、かつ、遷移域の周波数  $w_c$  で減衰量  $d B_c$  を通過するバンドを決定する。すなわち、遷移域の特定周波数  $w_c$  で減衰量  $d B_c$  となるような最も大きい通過域の終点周波数  $w_p$  と最も小さい阻止域の始点周波数  $w_s$  を得る。

40

\* 原理: 通過域の始点周波数と阻止域の終点周波数が固定であり、通過域の終点周波数  $w_p$  と阻止域の始点周波数  $w_s$  が自由パラメータである。2つの自由パラメータがあるので、同時に動かすと適切に決めることができない。そこで、片方のパラメータを固定し、阻止域の減衰量を満足するもう一方のパラメータを求める。遷移域の周波数  $w_c$  で減衰量  $d B_c$  を通過しない場合は、固定していたパラメータを変更する。以上のような反復を繰り返すことで、遷移域の周波数  $w_c$  で減衰量  $d B_c$  を通過するバンドを決定する。

阻止域の減衰量を満足するパラメータを求める方法は、2種類のアプローチ、すなわち、第1に「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」、

50

第 2 に「阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタ」があるので、それぞれをベースにしたアルゴリズムを順を追って説明する。

#### 【 0 1 9 3 】

図 2 2 は、阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタを求めるアルゴリズムのフローチャートを示す図である。

まず、図 2 2 ~ 図 2 7 に関連付けて、「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」をベースにしたアルゴリズムについて説明する。

#### 【 0 1 9 4 】

すなわち、本アルゴリズムでは、「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムを利用する。

具体的なアルゴリズムの方針は、図 2 3 に示すように、上記アルゴリズムを内側のループとして  $w_s$  を求め、さらに外側に  $w_p$  を求めるためのループをかぶせてバンドのパラメータを決定する。

すなわち、外側のループで通過域の終点周波数  $w_p$  を固定し、内側のループで阻止域の減衰量  $d B_s$  を満足する阻止域の始点周波数  $w_s$  を求める。

求められた振幅特性が指定した遷移域の点 ( $w_c$ ,  $d B_c$ ) を通過してないときは、「阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタ」を探索したときと同様に  $w_p$  を二分法を用いて探索する。

以下に具体的なアルゴリズムを示すが、内側のループである「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムは同じなので説明は省略する。

#### 【 0 1 9 5 】

また、図 2 2 および以下に説明するアルゴリズムの各ステップ処理 F 1 0 2, F 1 0 3, F 1 0 4, F 1 0 5, の内容は、第 1 のアプローチの場合と同様に、図 6 に関連付けて説明した任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムと同じである。また、処理 F 2 0 6, F 2 0 7, F 2 0 8 の内容は第 2 のアプローチの場合と同様に、図 9 に関連付けて説明した処理、すなわち「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」のアルゴリズムと同様である。したがって、ここでの処理については、図 6 および図 9 と同じ符号を用いている。

#### 【 0 1 9 6 】

##### s t e p 4 0

まず、図 2 2 に示すように、初期設定を行う (F 3 0 1)。この初期設定では、直線位相 F I R フィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点を入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定、二分法の初期周波数の設定を行う。

具体的に設定する項目は以下の通りである。

- ・ タップ数、
- ・ 直線位相 F I R フィルタは、偶対称あるいは奇対称、
- ・ バンドの数は 2 個、
- ・ 通過域の始点周波数  $w_s = 0$ 、
- ・ 通過域の利得、
- ・ 阻止域の終点周波数  $w_p =$  、
- ・ 阻止域の利得、
- ・ 通過域と阻止域に対する重みづけ、
- ・ 通過させたい点の周波数と振幅値、
- ・ 阻止域の減衰量  $d B_s$  (すなわち、阻止域のリップルの大きさ 2 を指す)、
- ・ 遷移域の周波数  $w_c$  とその減衰量  $d B_c$ 、
- ・ 近似帯域で極値となる周波数  $w^{(0)} = w_k^{(0)}$  ( $k = 0, \dots, R$ )

ただし、右肩文字 (i) は繰り返しの回数を表している。

#### 【 0 1 9 7 】

また、図 2 4 は、阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタを求め

るアルゴリズムにおける二分割法の初期周波数を示す図である。

図 2 4 に示すように、本例では、二分割法の初期周波数とし下記のような値を与えている。

【 0 1 9 8 】

【 数 4 1 】

$\omega_p^{(pre)}[0]$  = 通過域の始点周波数の近傍

$\omega_p^{(cur)}[0]$  =  $\omega_c$  の近傍 (41)

10

【 0 1 9 9 】

$w_p$  の後ろにある  $[t]$  の部分はサイクル数を表すものとする。

ここでは、周波数  $w_p^{(pre)}[0]$  に対しては任意の周波数点を通るレムズ交換アルゴリズムを実行して阻止域における指定した減衰量  $dB_s$  を満足する最小の阻止域の始点周波数  $w_s^{(pre)}[0]$  が求められ、そのときの  $w_c$  における利得  $dB_c^{(pre)}[0]$  が得られているとして以下のステップについて説明する。

【 0 2 0 0 】

s t e p 4 1

「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムを実行する (F102, F103, F104, F206, F207, F208)。

20

具体的には、処理 F 1 0 2 では、 $w_p^{(cur)}[t]$  のときの極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する。

次いで、処理 F 1 0 3 において、補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する。

そして、処理 F 1 0 4 において、レムズ交換アルゴリズムの繰り返し判断を行う。

次に、処理 F 2 0 6 において、阻止域における最小の減衰量 (最大の重みつき近似誤差) を求める。

次に、処理 F 2 0 7 において、阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数  $w_s$  を持つフィルタを求めるアルゴリズムの終了条件を得る。

また、処理 F 2 0 8 において、新しい阻止域の始点周波数  $w_s^{(cur)}$  の設定を行う。

30

【 0 2 0 1 】

s t e p 4 2

次に、遷移域に指定した周波数の減衰量を調べる (F 3 0 9)。

処理 F 1 0 2 において、「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数」を求めるアルゴリズムで最終的に求まったラグランジュ補間多項式を用いて、遷移域に指定した周波数  $w_c$  に対する減衰量  $dB_c^{(cur)}[t]$  を調べる。

【 0 2 0 2 】

s t e p 4 3

遷移域の指定減衰量との比較を行う (F 3 1 0)。

遷移域の周波数  $w_c$  に対する減衰量  $dB_c$  と比較して、下記式 (4 2) または式 (4 3) を満足している場合には、s t e p 4 5 (F 1 0 5) の処理に移行し、満足していない場合には s t e p 4 4 (F 3 1 1) の処理に移行する。

40

【 0 2 0 3 】

【 数 4 2 】

$|dB_c^{(cur)}[t] - dB_c| < \varepsilon_1$  (42)

【 0 2 0 4 】

【 数 4 3 】

50

$$|\omega_p^{(cur)}[t] - \omega_p^{(pre)}[t]| < \varepsilon_2 \quad (43)$$

【 0 2 0 5 】

ただし、 1 と 2 は非常に小さい値をしている。

【 0 2 0 6 】

s t e p 4 4

遷移域の周波数  $w_c$  に対する減衰量  $d B_c$  との比較において、上記式 ( 4 2 ) または式 ( 4 3 ) を満足していない場合には、バンドの設定を変更する ( F 3 1 1 )。

10

具体的には、新しい通過域の終点周波数  $w_p^{(cur)}[t + 1]$  を設定する。その設定法として一回目のループの場合と二回目以降のループの場合に分けて説明する。

【 0 2 0 7 】

一回目:

一回目の場合には、図 2 5 に示す 3 つのケースが考えられる。

すなわち、周波数  $w_p^{(pre)}[0]$ 、 $w_p^{(cur)}[0]$  に対して、図 2 5 ( A ) , ( B ) , ( C ) に示すケースが考えられる。

図 2 5 ( A ) に示すケースは、両方とも指定した減衰量  $d B_c$  を満足しているケースである。この場合、大きい周波数  $w_p^{(cur)}[0]$  を解として s t e p 4 5 の処理に進む。

図 2 5 ( B ) に示すケースは、両方とも指定した減衰量を満足しないケースである。この場合、現在のタップ数では、指定した減衰量を実現することができないので、その旨を表示して終了する。

20

図 2 5 ( C ) に示すケースは、片方のみが指定した減衰量を満足するケースである。この場合は、下記式 ( 4 4 ) のようにして s t e p 4 1 の処理に移行する。

なお、今回の初期周波数の与え方では、 $w_p^{(cur)}[0]$  が満足し、 $w_p^{(pre)}[0]$  が満足しないケースは存在しない。

【 0 2 0 8 】

【 数 4 4 】

$$\begin{aligned} \omega_p^{(pre)}[1] &= \omega_p^{(pre)}[0] \\ \omega_p^{(cur)}[1] &= 0.5 \times (\omega_p^{(cur)}[0] + \omega_p^{(pre)}[0]) \\ dB_c^{(pre)}[1] &= dB_c^{(pre)}[0] \end{aligned} \quad (44)$$

30

【 0 2 0 9 】

二回目以降:

二回目以降の場合には、図 2 6 に示す 2 つのケースが考えられる。二回目以降における新しい周波数  $w_p^{(cur)}[t + 1]$  の決め方において、 $w_p^{(pre)}[t + 1]$  には必ず指定減衰量  $d B_c$  を満足する周波数を保存する。周波数  $w_p^{(pre)}[t]$ 、 $w_p^{(cur)}[t]$  に対して図 2 6 ( A ) , ( B ) に示すケースが考えられる。

40

図 2 6 ( A ) に示すケースは、片方のみが指定した減衰量を満足するケースである。この場合は、下記式 ( 4 5 ) の処理を行い次の s t e p 4 1 の処理に移行する。

なお、常に  $w_p^{(pre)}[t]$  は指定した減衰量を満足した周波数があるので、 $w_p^{(pre)}[t]$  が満足しないケースは存在しない。

【 0 2 1 0 】

【 数 4 5 】



$$\begin{aligned}
 \omega_p^{(pre)}[t+1] &= \omega_p^{(pre)}[t] \\
 \omega_p^{(cur)}[t+1] &= 0.5 \times (\omega_p^{(cur)}[t] + \omega_p^{(pre)}[t]) \\
 dB_c^{(pre)}[t+1] &= dB_c^{(pre)}[t]
 \end{aligned} \tag{45}$$

【 0 2 1 1 】

図 2 6 ( B ) に示すケースは、両方とも指定した減衰量を満足しているケース。この場合は、下記式 ( 4 6 ) の処理を行い次の s t e p 4 1 の処理に移行する。

10

【 0 2 1 2 】

【 数 4 6 】

$$\begin{aligned}
 \omega_p^{(pre)}[t+1] &= \omega_p^{(cur)}[t] \\
 \omega_p^{(cur)}[t+1] &= \omega_p^{(cur)}[t] + 0.5 \times (\omega_p^{(cur)}[t] - \omega_p^{(pre)}[t]) \\
 dB_c^{(pre)}[t+1] &= dB_c^{(cur)}[t]
 \end{aligned} \tag{46}$$

【 0 2 1 3 】

s t e p 4 5

20

近似された振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める ( F 1 0 5 )。

すなわち、最終的に得られた振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める。

【 0 2 1 4 】

図 2 7 は、「最小の阻止域の始点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムをベースにした「阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタ」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタの周波数応答特性を示す図である。

図 2 7 ( A ) はデシベルで表示した周波数応答を示す図、図 2 7 ( B ) はそのままの値で表示した周波数応答を示す図、図 2 7 ( C ) は利得 3 付近を拡大した図、および図 2 7 ( D ) は利得 0 付近を拡大した図である。

【 0 2 1 5 】

30

この場合の基本アルゴリズム、求めたい変数、指定周波数点は以下の通りである。

【 0 2 1 6 】

基本アルゴリズム:

阻止域の減衰量を満足する最小の阻止域の始点周波数を求めるレムズ交換アルゴリズムである。

- ・ ( 0 . 4 , 1 2 d B ) を通過
- ・ 2 4 タップ
- ・ 偶対称
- ・ 阻止域の減衰量は - 4 0 d B 以下

求めたい変数:

40

通過域の終点周波数  $w_p$  と阻止域の始点周波数  $w_s$  である。

【 0 2 1 7 】

【 表 9 】

• バンド

バンド	周波数範囲	利得	重み
通過域	$0 \leq w \leq w_p$	3	1
阻止域	$w_s \leq w \leq \pi$	0	1

50

【 0 2 1 8 】

【表 1 0】

● 指定周波数点

周波数	利得
$w = 0$	3
$w = 2\pi/3$	0

【 0 2 1 9 】

なお、図 2 7 において、実線は阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過する低域通過フィルタの周波数応答を示している。また、黒丸は指定した周波数点（遷移域の周波数点と任意の周波数点）を示している。

10

【 0 2 2 0 】

図 2 7 ( A ) から指定した阻止域の減衰量を実現していることが確認できる。

図 2 7 ( B ) から遷移域に指定した阻止域の減衰量を実現していることが確認できる。

また、図 2 7 ( C ) , ( D ) から指定した周波数点を通過していることが確認できる。

【 0 2 2 1 】

すなわち、図 2 7 からわかるように、「最小の阻止域の始点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムをベースにした「阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタ」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタは、良好な周波数応答特性を有している。

20

【 0 2 2 2 】

次に、阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタを求めるアルゴリズムをベースにしたアルゴリズムについて、図 2 2、図 2 8 ~ 図 3 2 に関連付けて説明する。

この場合のフローチャートは、阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタを求めるアルゴリズムにおいて参照した図 2 2 と等価なものとなる。

【 0 2 2 3 】

本アルゴリズムでは、「阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムを利用する。

30

具体的なアルゴリズムの方針は、図 2 8 に示すように、上記アルゴリズムを内側のループとして  $w_p$  を求め、さらに外側に  $w_s$  を求めるためのループをかぶせてバンドのパラメータを決定する。

すなわち、外側のループで阻止域の始点周波数  $w_s$  を固定し、内側のループで阻止域の指定減衰量  $d B_s$  を満足する通過域の終点周波数  $w_p$  を求める。

求められた振幅特性が指定した遷移域の点 ( $w_c$ ,  $d B_c$ ) を通過してないときは、「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」を探索したときと同様に  $w_s$  を二分法を用いて探索する。

具体的に以下にアルゴリズムを示すが、内側のループである「阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムは同じなので説明は省略する。

40

【 0 2 2 4 】

また、図 2 2 および以下に説明するアルゴリズムの各ステップ処理 F 1 0 2 , F 1 0 3 , F 1 0 4 , F 1 0 5、の内容は、第 1 のアプローチの場合と同様に、図 6 に関連付けて説明した任意の週は数点を通過するレムズ交換アルゴリズムと同じである。また、処理 F 2 0 6 , F 2 0 7 , F 2 0 8 の内容は第 2 のアプローチの場合と同様に、図 9 に関連付けて説明した処理、すなわち「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」のアルゴリズムと同様である。したがって、ここでの処理については、図 6 および図 9 と同じ符号を用いている。

【 0 2 2 5 】

50

s t e p 5 0

図 2 2 に示すように、まず、初期設定を行う ( F 3 0 1 )。この初期設定では、直線位相 F I R フィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点を入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定、二分割法の初期周波数の設定を行う。

具体的に設定する項目は以下の通りである。

- ・ タップ数、
- ・ 直線位相 F I R フィルタは、偶対称あるいは奇対称、
- ・ バンドの数は 2 個、
- ・ 通過域の始点周波数  $w = 0$ 、
- ・ 通過域の利得、
- ・ 阻止域の終点周波数  $w =$  、
- ・ 阻止域の利得、
- ・ 通過域と阻止域に対する重みづけ、
- ・ 通過させたい点の周波数と振幅値、
- ・ 阻止域の減衰量  $d B_s$  (すなわち、阻止域のリップルの大きさ 2 を指す)、
- ・ 遷移域の周波数  $w_c$  とその減衰量  $d B_c$ 、
- ・ 近似帯域で極値となる周波数  $w^{(0)} = w_k^{(0)}$  ( $k = 0, \dots, R$ )

10

ただし、右肩文字 (i) は繰り返しの回数を表している。

【 0 2 2 6 】

また、図 2 9 は、阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通るフィルタを求めるアルゴリズムにおける二分割法の初期周波数を示す図である。

20

図 2 9 に示すように、本例では、二分割法の初期周波数として下記のような値を与えている。

【 0 2 2 7 】

【 数 4 7 】

$$\omega_s^{(cur)}[0] = \text{阻止域の終点周波数の近傍} \quad (47)$$

【 0 2 2 8 】

30

もう一方の  $w_s^{(pre)}[0]$  は下記のように値として「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」を探索するアルゴリズムで求めた  $w_s$  を  $w_s^{(pre)}[0]$  としている。

【 0 2 2 9 】

【 数 4 8 】

$$\omega_p^{(pre)}[0] = \text{通過域の始点周波数の近傍} \quad (48)$$

【 0 2 3 0 】

40

なお、本来ならば、下記式 ( 5 7 ) として探索すべきであるが、これでは阻止域を減衰量を満足するような  $w_p$  が見当たらない。そこで、 $w_p$  の最小の値は 0 . 0 1 程度であることから、このときの阻止域の減衰量を満足する阻止域の始点周波数  $w_s$  を初期周波数としている。

【 0 2 3 1 】

【 数 4 9 】

$$\omega_s^{(pre)}[0] = \omega_c \text{の近傍} \quad (49)$$

50

## 【 0 2 3 2 】

ws の後ろにある[t] の部分はサイクル数を表すものとする。

ここでは、周波数  $w_s^{(pre)}[0]$  に対しては、任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムを実行して阻止域における指定した減衰量 dBs を満足する最大の通過域の終点周波数  $w_p^{(pre)}[0]$  が求められ、そのときのwcにおける利得  $dB_c^{(pre)}[0]$  が得られているとして以下のステップについて説明する。

## 【 0 2 3 3 】

s t e p 5 1

「阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムを実行する(F102, F103, F104, F206, F207, F208)。

10

具体的には、処理 F 1 0 2 では、 $w_s^{(cur)}[t]$  のときの極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成する。

次いで、処理 F 1 0 3 において、補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する。

そして、処理 F 1 0 4 において、レムズ交換アルゴリズムの繰り返し判断を行う。

次に、処理 F 2 0 6 において、阻止域における最小の減衰量（最大の重みつき近似誤差）を求める。

次に、処理 F 2 0 7 において、阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数wpを持つフィルタを求めるアルゴリズムの終了条件を得る。

また、処理 F 2 0 8 において、新しい阻止域の始点周波数  $w_p^{(cur)}$  の設定を行う。

20

## 【 0 2 3 4 】

s t e p 5 2

次に、遷移域に指定した周波数の減衰量を調べる（F 3 0 9）。

処理 F 1 0 2 において、「阻止域の減衰量を満足する最も大きい阻止域の終点周波数」を求めるアルゴリズムで最終的に求まったラグランジュ補間多項式を用いて、遷移域に指定した周波数wc に対する減衰量  $dB_c^{(cur)}$  を調べる。

## 【 0 2 3 5 】

s t e p 5 3

指定した遷移域の減衰量との比較を行う（F 3 1 0）。

指定した遷移域の周波数wc に対する減衰量 dBc と比較して、下記式（50）または式（51）を満足している場合には、s t e p 5 5（F 1 0 5）の処理に移行し、満足していない場合にはs t e p 5 4（F 3 1 1）の処理に移行する。

30

## 【 0 2 3 6 】

## 【数 5 0】

$$|dB_c^{(cur)}[t] - dB_c| < \varepsilon_1 \quad (50)$$

## 【 0 2 3 7 】

## 【数 5 1】

40

$$|\omega_p^{(cur)}[t] - \omega_p^{(pre)}[t]| < \varepsilon_2 \quad (51)$$

## 【 0 2 3 8 】

ただし、 $\varepsilon_1$  と  $\varepsilon_2$  は非常に小さい値をしている。

## 【 0 2 3 9 】

s t e p 5 4

遷移域の周波数wc に対する減衰量 dBc との比較において、上記式（50）または式（51）を満足していない場合には、バンドの設定を変更する（F 3 1 1）。

50

具体的には、新しい阻止域の始点周波数  $w_s^{(cur)}[t+1]$  を設定する。その設定法として一回目のループの場合と二回目以降のループの場合に分けて説明する。

【 0 2 4 0 】

一回目:

一回目の場合には、図 3 0 に示す 3 つのケースが考えられる。

すなわち、周波数  $w_s^{(pre)}[0]$ 、 $w_s^{(cur)}[0]$  に対して、図 3 0 ( A ) , ( B ) , ( C ) に示すケースが考えられる。

図 3 0 ( A ) に示すケースは、両方とも指定した減衰量  $dB_c$  を満足しているケースである。この場合、大きい周波数  $w_s^{(cur)}[0]$  を解として  $step 55$  の処理に進む。

図 3 0 ( B ) に示すケースは、両方とも指定した減衰量を満足しないケースである。この場合、現在のタップ数では、指定した減衰量を実現することができないので、その旨を表示して終了する。

図 3 0 ( C ) に示すケースは、片方のみが指定した減衰量を満足するケースである。この場合は、下記式 ( 5 2 ) のようにして  $step 51$  の処理に移行する。

なお、今回の初期周波数の与え方では、 $w_s^{(cur)}[0]$  が満足し、 $w_s^{(pre)}[0]$  が満足しないケースは存在しない。

【 0 2 4 1 】

【 数 5 2 】

$$\begin{aligned}\omega_s^{(pre)}[1] &= \omega_s^{(pre)}[0] \\ \omega_s^{(cur)}[1] &= 0.5 \times (\omega_s^{(cur)}[0] + \omega_s^{(pre)}[0]) \\ dB_c^{(pre)}[1] &= dB_c^{(pre)}[0]\end{aligned}\quad (52)$$

【 0 2 4 2 】

二回目以降:

二回目以降の場合には、図 3 1 に示す 2 つのケースが考えられる。二回目以降における新しい周波数  $w_s^{(cur)}[t+1]$  の決め方において、 $w_s^{(pre)}[t+1]$  には必ず指定減衰量  $dB_c$  を満足する周波数を保存する。周波数  $w_s^{(pre)}[t]$ 、 $w_s^{(cur)}[t]$  に対して図 3 1 ( A ) , ( B ) に示すケースが考えられる。

図 3 1 ( A ) に示すケースは、片方のみが指定した減衰量を満足するケースである。この場合は、下記式 ( 5 3 ) のようにして次の  $step 51$  の処理に移行する。

なお、常に  $w_s^{(pre)}[t]$  は指定した減衰量を満足した周波数があるので、 $w_s^{(pre)}[t]$  が満足しないケースは存在しない。

【 0 2 4 3 】

【 数 5 3 】

$$\begin{aligned}\omega_s^{(pre)}[t+1] &= \omega_s^{(pre)}[t] \\ \omega_s^{(cur)}[t+1] &= 0.5 \times (\omega_s^{(cur)}[t] + \omega_s^{(pre)}[t]) \\ dB_c^{(pre)}[t+1] &= dB_c^{(pre)}[t]\end{aligned}\quad (53)$$

【 0 2 4 4 】

図 3 1 ( B ) に示すケースは、両方とも指定した減衰量を満足しているケース。この場合は、下記式 ( 5 4 ) のようにして次の  $step 51$  の処理に移行する。

【 0 2 4 5 】

【 数 5 4 】

$$\begin{aligned}
 \omega_s^{(\text{pre})}[t+1] &= \omega_s^{(\text{cur})}[t] \\
 \omega_p^{(\text{cur})}[t+1] &= \omega_s^{(\text{cur})}[t] + 0.5 \times (\omega_s^{(\text{cur})}[t] - \omega_s^{(\text{pre})}[t]) \\
 \text{dB}_c^{(\text{pre})}[t+1] &= \text{dB}_c^{(\text{cur})}[t]
 \end{aligned} \tag{54}$$

【 0 2 4 6 】

s t e p 5 5

近似された振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める ( F 1 0 5 )。

10

すなわち、最終的に得られた振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める。

【 0 2 4 7 】

図 3 2 は、「最大の通過域の終点周波数をフィルタ」を求めるアルゴリズムをベースにした「阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタ」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタの周波数応答特性を示す図である。

図 3 2 ( A ) はデシベルで表示した周波数応答を示す図、図 3 2 ( B ) はそのままの値で表示した周波数応答を示す図、図 3 2 ( C ) は利得 3 付近を拡大した図、および図 3 2 ( D ) は利得 0 付近を拡大した図である。

【 0 2 4 8 】

この場合の基本アルゴリズム、求めたい変数、指定周波数点は以下の通りである。

20

【 0 2 4 9 】

基本アルゴリズム:

阻止域の減衰量を満足する最小の阻止域の始点周波数を求める任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムである。

- ・ ( 0 . 4 , 1 2 d B ) を通過
- ・ 2 4 タップ
- ・ 偶対称
- ・ 阻止域の減衰量は - 4 0 d B 以下

求めたい変数:

通過域の終点周波数  $w_p$  と阻止域の始点周波数  $w_s$  である。

30

【 0 2 5 0 】

【表 1 1】

- ・ バンド

バンド	周波数範囲	利得	重み
通過域	$0 \leq w \leq w_p$	3	1
阻止域	$w_s \leq w \leq \pi$	0	1

【 0 2 5 1 】

40

【表 1 2】

- ・ 指定周波数点

周波数	利得
$w = 0$	3
$w = 2\pi/3$	0

【 0 2 5 2 】

なお、図 3 2 において、実線は阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過する低

50

域通過フィルタの周波数応答を示している。また、黒丸は指定した周波数点（遷移域の周波数点と任意の周波数点）を示している。

#### 【 0 2 5 3 】

図 3 2 ( A ) から指定した阻止域の減衰量を実現していることが確認できる。

図 3 2 ( B ) から遷移域に指定した阻止域の減衰量を実現していることが確認できる。

また、図 3 2 ( C ) , ( D ) から指定した周波数点を通過していることが確認できる。

#### 【 0 2 5 4 】

すなわち、図 3 2 からわかるように、「最大の通過域の終点周波数をフィルタ」を求めるアルゴリズムをベースにした「阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタ」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタは、良好な周波数応答特性を有している。

#### 【 0 2 5 5 】

次に、バンドを変更可能なレムズ交換アルゴリズムに対して、阻止域の減衰量を満足する最小タップ数のフィルタ設計のアルゴリズムについて説明する。

ここでは、前記「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムと、前記「阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタ」を求めるアルゴリズムに対して、指定した阻止域の減衰量を実現する最小タップ数のフィルタを求めるアルゴリズムについて説明する。

#### 【 0 2 5 6 】

図 3 3 は、阻止域の減衰量を実現する最小タップ数のフィルタを求めるアルゴリズムのフローチャートを示す図である。

#### 【 0 2 5 7 】

このアルゴリズムで自由になるパラメータ、目的、そしてアルゴリズムの原理を列挙すると次のようになる。

\* 自由パラメータ:

- ・ タップ数
- ・ 2 種類のアプローチが存在する。

第 1 に、通過域の終点周波数  $w_p$  を可変とし、阻止域の始点周波数  $w_s$  を固定する。

第 2 に、通過域の終点周波数  $w_p$  を固定し、阻止域の始点周波数  $w_s$  を可変とする。

\* 目的: バンドの変数のうち一つが可変であるアルゴリズムに対して、指定された阻止域の減衰量  $\text{dBs}$  を満足する最小タップ数のフィルタを得る。

\* 原理: 1 回目のループで「解なし」となるとき、タップ数が足りず指定した減衰量を実現できないので、1 タップ数を増やし再度ためしてみる。

#### 【 0 2 5 8 】

また、図 3 3 および以下に説明するアルゴリズムの各ステップ処理 F 1 0 2 , F 1 0 3 , F 1 0 4 , F 1 0 5、の内容は、第 1 のアプローチの場合と同様に、図 6 に関連付けて説明した任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムと同じである。また、処理 F 2 0 1 , F 2 0 6 , F 2 0 7 , F 2 0 8 の内容は第 2 のアプローチの場合と同様に、図 9 に関連付けて説明した処理、すなわち「阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタ」のアルゴリズム、および「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」のアルゴリズムと同様である。したがって、ここの処理については、図 6 および図 9 と同じ符号を用いている。

#### 【 0 2 5 9 】

##### s t e p 6 0

図 3 3 に示すように、まず、初期設定を行う ( F 2 0 1 )。この初期設定では、直線位相 F I R フィルタの設定、バンドの設定、通過させたい任意の周波数点を入力、初期極値点の設定、阻止域の減衰量の指定、二分除法の初期周波数の設定を行う。

具体的に設定する項目は以下の通りである。

- ・ タップ数、
- ・ 直線位相 F I R フィルタは、偶対称あるいは奇対称、

- ・バンドの数は2個、
- ・通過域の始点周波数  $w = 0$ 、
- ・通過域の利得、
- ・阻止域の終点周波数  $w =$  、
- ・阻止域の利得、
- ・通過域と阻止域に対する重みづけ、
- ・通過させたい点の周波数と振幅値、
- ・阻止域の減衰量  $d B_s$ (すなわち、阻止域のリップルの大きさ  $2$  を指す)、
- ・近似帯域で極値となる周波数  $w^{(0)} = w_k^{(0)}$  ( $k = 0, \dots, R$ )

ただし、右肩文字(i) は繰り返しの回数を表している。

10

- ・二分割法の初期周波数の入力

【0260】

#### step 6 1

任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムを実行する(F102, F103, F104)。

具体的には、処理F102では、極値点と通過させたい周波数点から振幅特性を補間する補間多項式を生成を生成する。

次いで、処理F103において、補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する。

そして、処理F104において、レムズ交換アルゴリズムの繰り返し判断を行う。

20

【0261】

#### step 6 2

次に、阻止域における最小の減衰量(最大の重みつき近似誤差)を求める(F206)。

【0262】

#### step 6 3

指定した阻止域の減衰量を満足する周波数の探索アルゴリズムの終了条件が成り立つか否かを判別する(F207)。

終了条件が成り立つ場合にはstep 6 7(F105)の処理に移行し、成り立たないときはstep 6 4(F208)の処理に移行する。

【0263】

30

#### step 6 4

指定した阻止域の減衰量を満足する周波数の探索アルゴリズムの終了条件が成り立たない場合に、バンドの設定を変更する(F208)。

【0264】

#### step 6 5

指定した阻止域の減衰量との比較を行う(F414)。

処理F208のバンドの設定変更において、1回目のループで「解なし」となる場合はstep 6 6(F414)の処理に移行し、それ以外の場合は、step 6 1の処理に戻る。

【0265】

40

#### step 6 6

1タップ増やす(F415)。

現在のタップ数を1タップ増やし、step 6 0(F201)の初期設定処理に移行する。

【0266】

#### step 6 7

近似された振幅特性から直線位相FIRフィルタの係数を求める(F105)。

【0267】

図34は、「阻止域の減衰量を満足する最小のタップ数」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタの周波数応答特性を示す図である。

50



図 3 4 ( A ) はデシベルで表示した周波数応答を示す図、図 3 4 ( B ) はそのままの値で表示した周波数応答を示す図、図 3 4 ( C ) は利得 3 付近を拡大した図、および図 3 4 ( D ) は利得 0 付近を拡大した図である。

【 0 2 6 8 】

この場合の基本アルゴリズム、求めたい変数、指定周波数点は以下の通りである。

【 0 2 6 9 】

基本アルゴリズム:

阻止域の減衰量を満足する最小の阻止域の始点周波数を持つフィルタを求める任意の周波数点を通してレムズ交換アルゴリズムである。

・ 偶対称

・ 阻止域の減衰量は - 6 0 d B 以下

求めたい変数:

・ タップ数  $N$

・ 阻止域の始点周波数  $w_s$

【 0 2 7 0 】

【 表 1 3 】

・ バンド:

バンド	周波数範囲	利得	重み
通過域	$0 \leq w \leq 0.3\pi$	3	1
阻止域	$w_s \leq w \leq \pi$	0	1

【 0 2 7 1 】

【 表 1 4 】

・ 指定周波数点

周波数	利得
$w = 0$	3
$w = 2\pi/3$	0

【 0 2 7 2 】

なお、図 3 4 中において、実線は阻止域の減衰量が - 6 0 d B 以下になる最小のタップ数 ( 1 7 タップ ) の低域通過フィルタの周波数応答を示している。また、点線はあらかじめ与えたバンドの区切りを示し、黒丸は指定した周波数点を示している。

【 0 2 7 3 】

図 3 4 ( A ) から指定した阻止域の減衰量を実現していることが確認できる。

また、図 3 4 ( C ) , ( D ) から指定した周波数点を通してしていることが確認できる。

【 0 2 7 4 】

すなわち、図 3 4 からわかるように、「阻止域の減衰量を満足する最小のタップ数」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタは、良好な周波数応答特性を有している。

【 0 2 7 5 】

また、図 3 5 は、「指定した阻止域の減衰量を実現する最小のタップ数」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタの周波数応答を示す図である。

図 3 5 ( A ) はデシベルで表示した周波数応答を示す図、図 3 5 ( B ) はそのままの値で表示した周波数応答を示す図、図 3 5 ( C ) は利得 3 付近を拡大した図、および図 3 5 ( D ) は利得 0 付近を拡大した図である。

【 0 2 7 6 】

この場合の基本アルゴリズム、求めたい変数、指定周波数点は以下の通りである。

【 0 2 7 7 】

基本アルゴリズム:

阻止域の減衰量を満足する最大の通過域の終点周波数を持つフィルタを求める任意の周波数点を通してレムズ交換アルゴリズムである。

- ・ 偶対称
- ・ 阻止域の減衰量は - 6 0 d B 以下

求めたい変数:

- ・ タップ数  $N$
- ・ 阻止域の始点周波数  $w_s$

【 0 2 7 8 】

【 表 1 5 】

- ・ バンド:

バンド	周波数範囲	利得	重み
通過域	$0 \leq w \leq w_p$	3	1
阻止域	$0.5\pi \leq w \leq \pi$	0	1

【 0 2 7 9 】

【 表 1 6 】

- ・ 指定周波数点

周波数	利得
$w = 0$	3
$w = 2\pi/3$	0

【 0 2 8 0 】

なお、図 3 5 中において、実線は阻止域の減衰量が - 6 0 d B 以下になる最小のタップ数 ( 1 7 タップ ) の低域通過フィルタの周波数応答を示している。また、点線はあらかじめ与えたバンドの区切りを示し、黒丸は指定した周波数点を示している。

【 0 2 8 1 】

図 3 5 ( A ) から指定した阻止域の減衰量を実現していることが確認できる。

また、図 3 5 ( C ) , ( D ) から指定した周波数点を通してしていることが確認できる。

【 0 2 8 2 】

すなわち、図 3 5 からわかるように、「指定した阻止域の減衰量を実現する最小のタップ数」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタは、良好な周波数応答特性を有している。

【 0 2 8 3 】

次に、阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通して最小タップ数のフィルタを求めるアルゴリズムについて説明する。

ここでは、前記「阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通してフィルタ」を求めるアルゴリズムに対して、阻止域の減衰量を満足し、かつ、遷移域の周波数点を通して最小タップ数のフィルタを求めるアルゴリズムについて説明する。

【 0 2 8 4 】

図 3 6 は、阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通して最小タップ数のフィルタを求めるアルゴリズムのフローチャートを示す図である。

【 0 2 8 5 】

このアルゴリズムで自由になるパラメータ、目的、そしてアルゴリズムの原理を列挙する

10

20

30

40

50

と次のようになる。

\* 自由パラメータ:

- ・ タップ数
- ・ 通過域の終点周波数  $w_p$
- ・ 阻止域の始点周波数  $w_s$

\* 目的: 指定された阻止域の減衰量  $d B_s$  を満足し、かつ、遷移域の周波数  $w_c$  で減衰量  $d B_c$  を通過する最小タップ数のフィルタを得る。すなわち、遷移域の特定周波数  $w_c$  で減衰量  $d B_c$  となるような最も大きい通過域の終点周波数  $w_p$  と最も小さい阻止域の始点周波数  $w_s$  を決め、最小のタップ数となるフィルタを得る。

\* 原理: 1 回目のループで「解なし」となるとき、タップ数が足りず指定した減衰量が実現できないので、1 タップ数を増やし再度ためしてみる。また、遷移域の周波数点を実現できない場合においても1 タップ数を増やし再度ためしてみる。

10

【 0 2 8 6 】

また、図 3 6 および以下に説明するアルゴリズムの各ステップ処理 F 1 0 2 , F 1 0 3 , F 1 0 4 , F 1 0 5、の内容は、第 1 のアプローチの場合と同様に、図 6 に関連付けて説明した任意の周波数点を通るレムズ交換アルゴリズムと同じである。また、処理 F 2 0 6 , F 2 0 7 , F 2 0 8 の内容は第 2 のアプローチの場合と同様に、図 9 に関連付けて説明した処理、すなわち「阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタ」のアルゴリズム、または「阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタ」のアルゴリズムと同様である。さらに、処理 F 3 0 1 , F 3 0 9 , F 3 1 0 , F 3 1 1 の内容は、図 2 2 に関連付けて説明した処理、すなわち、「阻止域の減衰量を満足し、遷移域の特定周波数での指定減衰量を通過するフィルタを求めるアルゴリズム」と同様である。したがって、ここでの処理については、図 6、図 9、および図 2 2 と同じ符号を用いている。

20

【 0 2 8 7 】

s t e p 7 0

図 3 6 に示すように、まず、初期設定を行う ( F 3 0 1 )。具体的には、阻止域の減衰量を満足し、かつ、遷移域に指定した減衰量を通過するフィルタを求めるアルゴリズムの初期設定を行う。

具体的に設定する項目は以下の通りである。

30

- ・ タップ数、
- ・ 直線位相 F I R フィルタは、偶対称あるいは奇対称、
- ・ バンドの数は 2 個、
- ・ 通過域の始点周波数  $w = 0$ 、
- ・ 通過域の利得、
- ・ 阻止域の終点周波数  $w =$  、
- ・ 阻止域の利得、
- ・ 通過域と阻止域に対する重みづけ、
- ・ 通過させたい点の周波数と振幅値、
- ・ 阻止域の減衰量  $d B_s$  (すなわち、阻止域のリップルの大きさ 2 を指す)、
- ・ 遷移域の周波数  $w_c$  とその減衰量  $d B_c$ 、
- ・ 近似帯域で極値となる周波数  $w^{(0)} = w_k^{(0)}$  (  $k = 0, \dots, R$  )

40

ただし、右肩文字 (i) は繰り返しの回数を表している。

- ・ 二分割法の初期周波数の入力

【 0 2 8 8 】

s t e p 7 1

任意の周波数点を通るレムズ交換アルゴリズムを実行する ( F 1 0 2 , F 1 0 3 , F 1 0 4 )。

具体的には、処理 F 1 0 2 では、極値点から振幅特性を補間する補間多項式を生成を生成する。

50

次いで、処理 F 1 0 3 において、補間多項式から求められた振幅特性から新しい極値点を決定する。

そして、処理 F 1 0 4 において、レムズ交換アルゴリズムの繰り返し判断を行う。

【 0 2 8 9 】

s t e p 7 2

次に、阻止域における最小の減衰量(最大の重みつき近似誤差)を求める(F 2 0 6)。

【 0 2 9 0 】

s t e p 7 3

指定した阻止域の減衰量を満足する周波数の探索アルゴリズムの終了条件が成り立つか否かを判別する(F 2 0 7)。

終了条件が成り立つ場合には s t e p 7 7 ( F 3 0 9 ) の処理に移行し、成り立たないときは s t e p 7 4 ( F 2 0 8 ) の処理に移行する。

【 0 2 9 1 】

s t e p 7 4

指定した阻止域の減衰量を満足する周波数の探索アルゴリズムの終了条件が成り立たない場合に、バンドの設定を変更する(F 2 0 8)。

【 0 2 9 2 】

s t e p 7 5

指定した阻止域の減衰量との比較を行う(F 4 1 4)。

処理 F 2 0 8 のバンドの設定変更において、1 回目のループで「解なし」となる場合は s t e p 7 6 ( F 4 1 5 ) の処理に移行し、それ以外の場合は、s t e p 7 1 の処理に戻る。

【 0 2 9 3 】

s t e p 7 6

1 タップ増やす(F 4 1 5)。

現在のタップ数を 1 タップ増やし、s t e p 7 0 ( F 3 0 1 ) の初期設定処理に移行する。

【 0 2 9 4 】

s t e p 7 7

指定した阻止域の減衰量を満足する周波数の探索アルゴリズムの終了条件が成り立たつ場合に、遷移域に指定した周波数の減衰量を調べる(F 3 0 9)。

【 0 2 9 5 】

s t e p 7 8

指定した阻止域の減衰量との比較を行う(F 3 1 0)。

終了条件が成り立つ場合には s t e p 8 2 ( F 1 0 5 ) の処理に移行し、成り立たないときは s t e p 7 9 ( F 3 1 1 ) の処理に移行する。

【 0 2 9 6 】

s t e p 7 9

終了条件が成り立たない場合に、バンドの設定を変更する(F 3 1 1)。

【 0 2 9 7 】

s t e p 8 0

指定した阻止域の減衰量との比較を行う(F 4 1 6)。

処理 F 3 1 1 のバンドの設定変更において、1 回目のループで「解なし」となる場合は s t e p 8 1 ( F 4 1 7 ) の処理に移行し、それ以外の場合は、s t e p 7 1 の処理に戻る。

【 0 2 9 8 】

s t e p 8 1

1 タップ増やす(F 4 1 7)。

現在のタップ数を 1 タップ増やし、s t e p 7 0 ( F 3 0 1 ) の初期設定処理に移行する。

10

20

30

40

50

【 0 2 9 9 】

step 8 3

近似された振幅特性から直線位相 F I R フィルタの係数を求める ( F 1 0 5 )。

【 0 3 0 0 】

図 3 7 は、「阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過する最小のタップ数のフィルタ」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタの周波数応答特性を示す図である。

図 3 7 ( A ) はデシベルで表示した周波数応答を示す図、図 3 7 ( B ) はそのままの値で表示した周波数応答を示す図、図 3 7 ( C ) は利得 3 付近を拡大した図、および図 3 7 ( D ) は利得 0 付近を拡大した図である。

10

【 0 3 0 1 】

この場合の基本アルゴリズム、求めたい変数、指定周波数点は以下の通りである。

基本アルゴリズム:

阻止域の減衰量を満足する最大の通過域の終点周波数を求めるアルゴリズムをベースにした、遷移域の周波数点を通過するフィルタを得るレムズ交換アルゴリズムである。

- ・ ( 0 . 4 , 1 2 d B ) を通過
- ・ 偶対称
- ・ 阻止域の減衰量は - 6 0 d B 以下

求めたい変数:

- ・ タップ数  $N$
- ・ 通過域の終点周波数  $w_p$
- ・ 阻止域の始点周波数  $w_s$

20

【 0 3 0 2 】

【表 1 7】

• バンド

バンド	周波数範囲	利得	重み
通過域	$0 \leq w \leq w_p$	3	1
阻止域	$w_s \leq w \leq \pi$	0	1

30

【 0 3 0 3 】

【表 1 8】

• 指定周波数点

周波数	利得
$w = 0$	3
$w = 2\pi/3$	0

40

【 0 3 0 4 】

なお、図 3 7 中において、実線は阻止域の減衰量が - 6 0 d B 以下になる遷移域の周波数 0 . 4 で減衰量 - 1 2 d B 以下となる最小のタップ数 ( 1 7 タップ ) の低域通過フィルタの周波数応答を示している。また、点線はあらかじめ与えたバンドの区切りを示し、黒丸は指定した周波数点を示している。

【 0 3 0 5 】

図 3 7 ( A ) から指定した阻止域の減衰量を実現していることが確認できる。

図 3 7 ( B ) から遷移域に指定した周波数点を通過していることが確認できる。

また、図 3 5 ( C ) , ( D ) から指定した周波数点を通過していることが確認できる。

50

## 【 0 3 0 6 】

すなわち、図 3 7 からわかるように、「阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過する最小のタップ数のフィルタ」を求めるアルゴリズムにより得られた低域通過フィルタは、良好な周波数応答特性を有している。

## 【 0 3 0 7 】

## 【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、任意の周波数点を通過する周波数応答を持つことが可能となる利点がある。

## 【図面の簡単な説明】

【図 1】FIR フィルタのトランスバーサル型回路構成を示す図である。

10

【図 2】従来方法における周波数応答と利得 1 付近の拡大図である。

【図 3】FIR フィルタが直線位相を持つ 4 つの場合のインパルス応答を示す図である。

【図 4】直線位相 FIR フィルタの 4 つの場合に対する  $Q(e^{j\omega})$  と  $R$  を示す図である。

【図 5】重みつきチェビシェフ近似の例を示す図である。

【図 6】本発明の任意の周波数点を通過するレムズ交換アルゴリズムのフローチャートである。

【図 7】重みつき近似誤差  $E(e^{j\omega})$  の新しい極値の決定法を説明するための図である。

【図 8】本発明の任意の周波数点を指定したときの周波数応答とその拡大図を示す図である。

【図 9】阻止域の減衰量を満足するフィルタを求めるアルゴリズムのフローチャートを示す図である。

20

【図 10】阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタを求めるアルゴリズムのパラメータを示す図である。

【図 11】阻止域の減衰量を満足する最も大きい通過域の終点周波数を持つフィルタを求めるアルゴリズムにおける二分割法の初期周波数を示す図である。

【図 12】一回目のループにおけるバンド設定の変更を示す図である。

【図 13】二回目以降のループにおけるバンド設定の変更を示す図である。

【図 14】阻止域の減衰量を満足する最大の通過域の終点周波数をもつフィルタの周波数応答を示す図である。

【図 15】阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタを求めるアルゴリズムのパラメータを示す図である。

30

【図 16】阻止域の減衰量を満足する最も小さい阻止域の始点周波数を持つフィルタを求めるアルゴリズムにおける二分割法の初期周波数を示す図である。

【図 17】一回目のループにおけるバンド設定の変更を示す図である。

【図 18】二回目以降のループにおけるバンド設定の変更を示す図である。

【図 19】阻止域の減衰量を満足する最小の阻止域の始点周波数をもつフィルタの周波数応答を示す図である。

【図 20】阻止域の減衰量を満足する最小のタップ数のフィルタを求めるアルゴリズムのフローチャートを示す図である。

【図 21】阻止域の減衰量を実現する最小のタップ数のフィルタの周波数応答とその拡大図を示す図である。

40

【図 22】阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタを求めるアルゴリズムのフローチャートを示す図である。

【図 23】阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタを求めるアルゴリズム (1) を示す図である。

【図 24】阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタを求めるアルゴリズムにおける二分割法の初期周波数を示す図である。

【図 25】一回目のループにおけるバンド設定の変更を示す図である。

【図 26】二回目以降のループにおけるバンド設定の変更を示す図である。

【図 27】阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタの周波数応答

50

とその拡大図を示す図である。

【図 2 8】阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタを求めるアルゴリズム ( 2 ) を示す図である。

【図 2 9】阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタを求めるアルゴリズムにおける二分割法の初期周波数を示す図である。

【図 3 0】一回目のループにおけるバンド設定の変更を示す図である。

【図 3 1】二回目以降のループにおけるバンド設定の変更を示す図である。

【図 3 2】阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過するフィルタの周波数応答とその拡大図を示す図である。

【図 3 3】阻止域の減衰量を実現する最小のタップ数のフィルタを求めるアルゴリズムのフローチャートを示す図である。

10

【図 3 4】阻止域の減衰量を満足する最小のタップ数のフィルタの周波数応答とその拡大図を示す図である。

【図 3 5】阻止域の減衰量を満足する最小のタップ数のフィルタの周波数応答とその拡大図を示す図である。

【図 3 6】阻止域の減衰量を満足し、遷移域の周波数点を通過する最小のタップ数のフィルタを求めるアルゴリズムのフローチャートを示す図である。

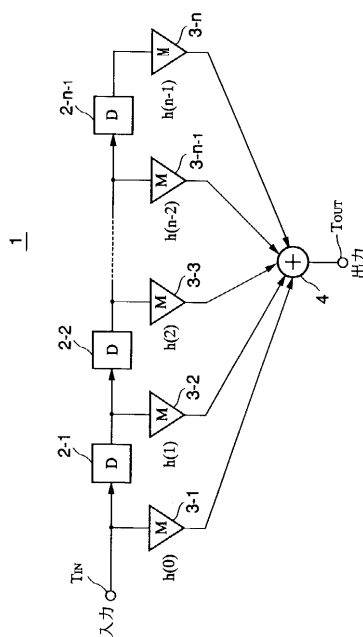
【図 3 7】阻止域の減衰量を満足し、かつ、遷移領域の周波数点を通過する最小タップ数のフィルタの周波数応答とその拡大図を示す図である。

【符号の説明】

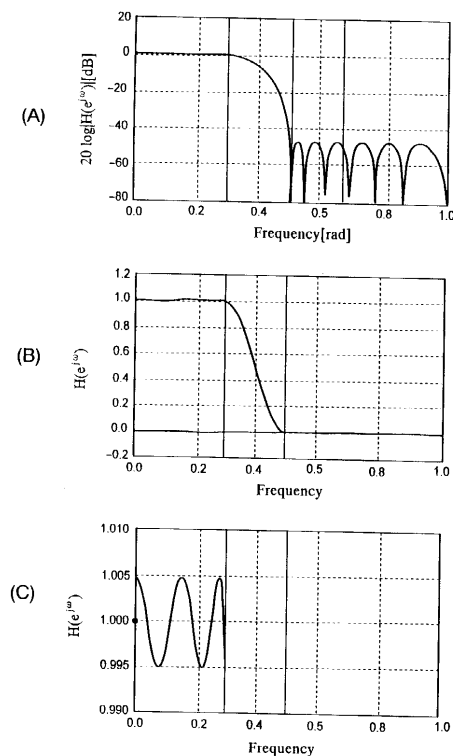
20

1 ... 直線位相 F I R フィルタ、2 - 1 ~ 2 - n-1 ... 遅延器、3 - 1 ~ 3 - n ... 乗算器、4 ... 加算器、 $h(0) \sim h(n-1)$  ... フィルタ係数、T IN ... 入力端子、T OUT ... 出力端子。

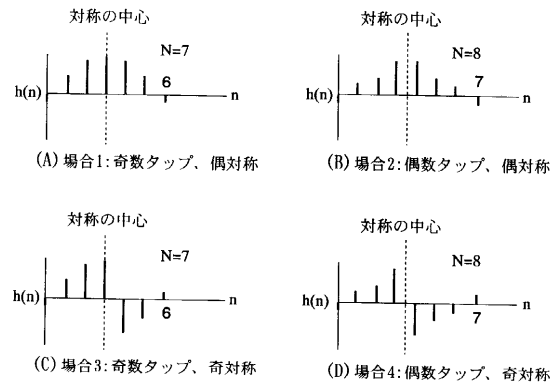
【図 1】



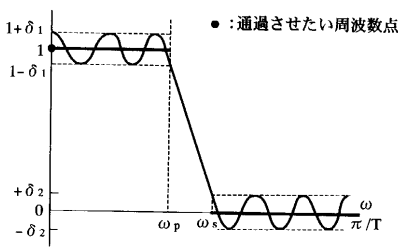
【図 2】



【図 3】



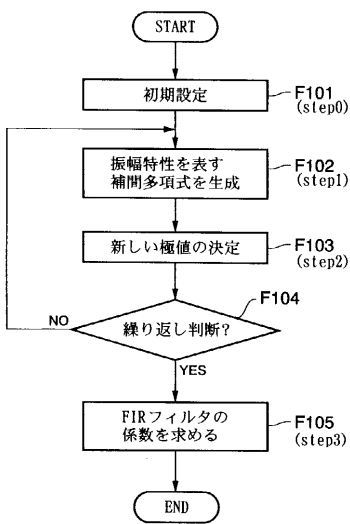
【図 5】



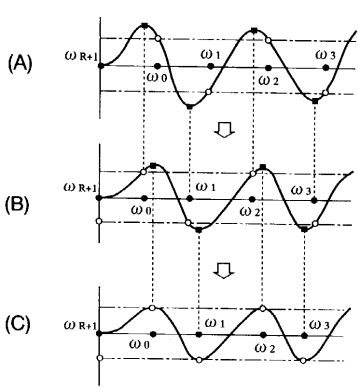
【図 4】

場合	$Q(e^{j\omega})$	R
1	1	$(N-1)/2+1-2 \times N_b$
2	$\cos(\omega/2)$	$N/2-1+1-2 \times N_b$
3	$\sin(\omega)$	$(N-3)/2+1-2 \times N_b$
4	$\sin(\omega/2)$	$N/2-1+1-2 \times N_b$

【図 6】

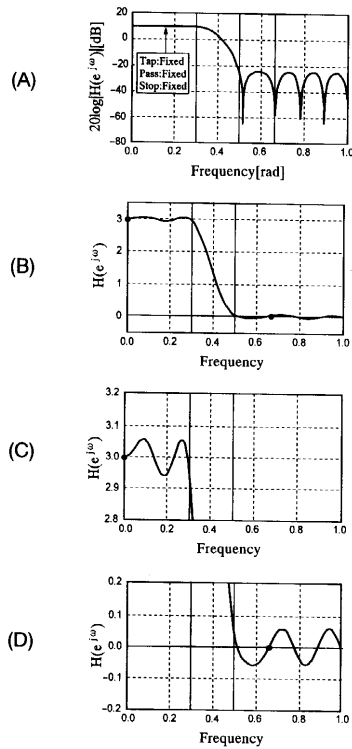


【図 7】

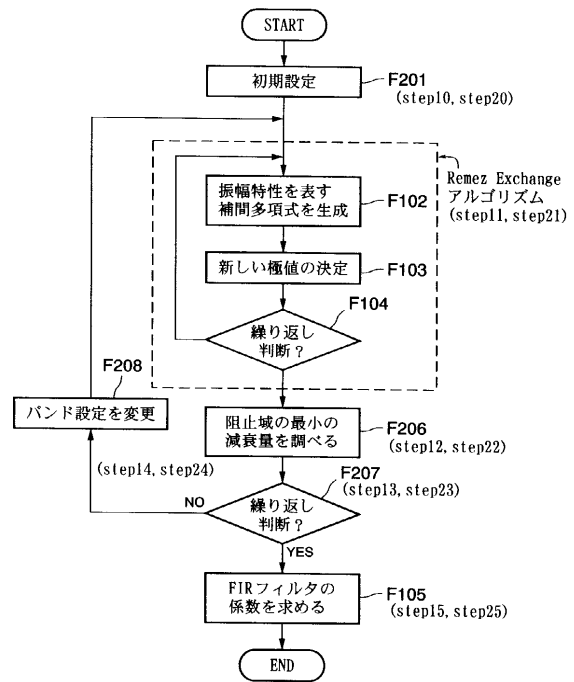




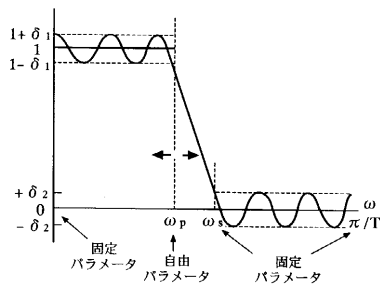
【図 8】



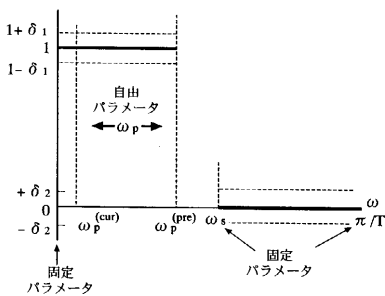
【図 9】



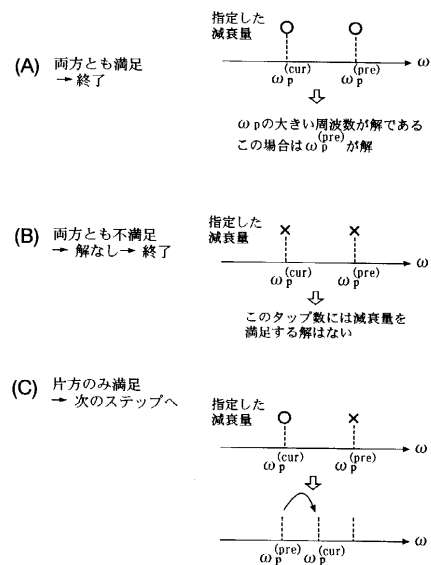
【図 10】



【図 11】

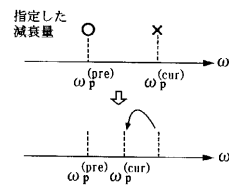


【図 12】

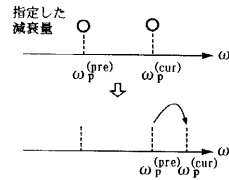


【図 13】

(A) 片方だけ満足  
→ 次のステップへ

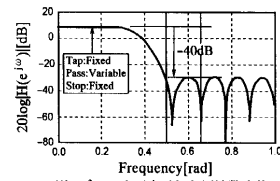


(B) 両方とも満足  
→ 次のステップへ



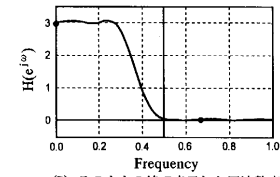
【図 14】

(A)



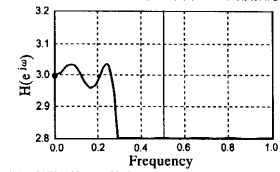
(A) デシベルで表示した周波数応答

(B)



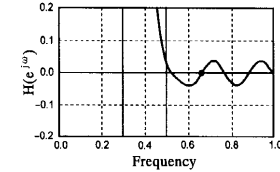
(B) そのままの値で表示した周波数応答

(C)



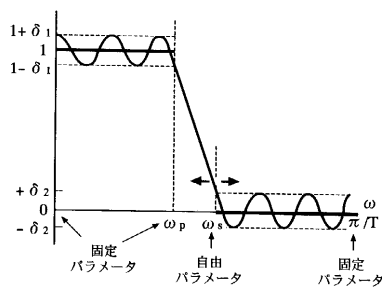
(C) 利得3付近を拡大した図 (ω=0のとき H(e^jω)=3 を通過)

(D)

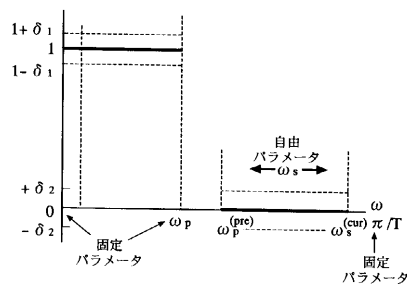


(D) 利得0付近を拡大した図 (ω=2π/3のとき H(e^jω)=0 を通過)

【図 15】

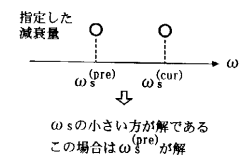


【図 16】

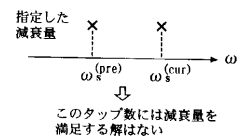


【図 17】

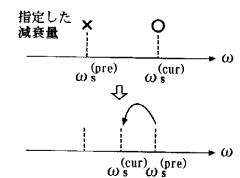
(A) 両方とも満足  
→ 終了



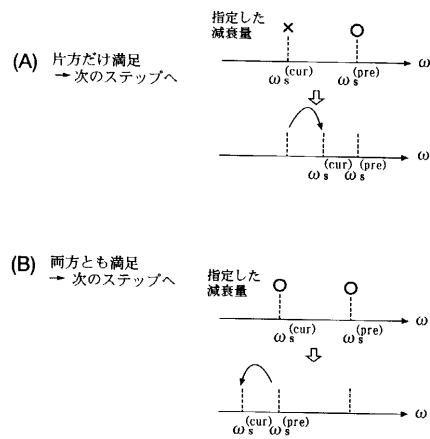
(B) 両方とも不満足  
→ 解なし → 終了



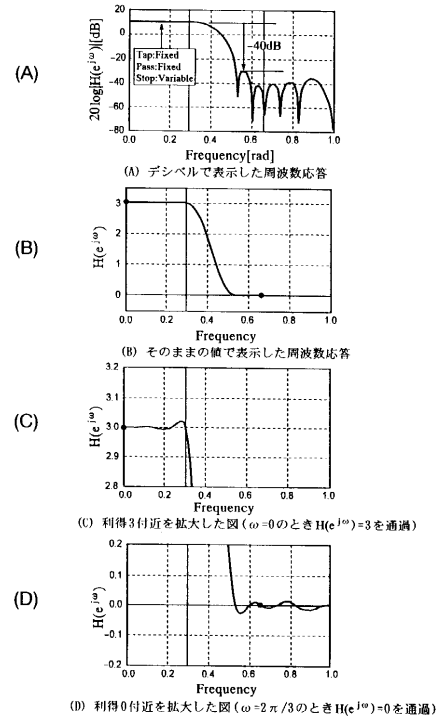
(C) 片方のみ満足  
→ 次のステップへ



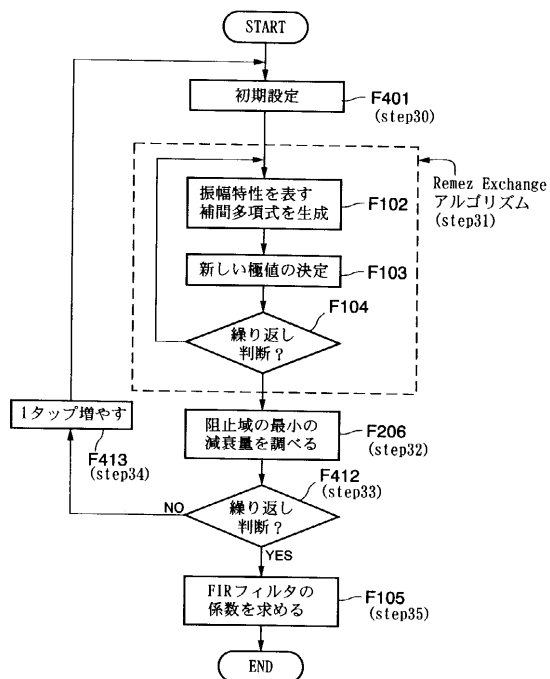
【図18】



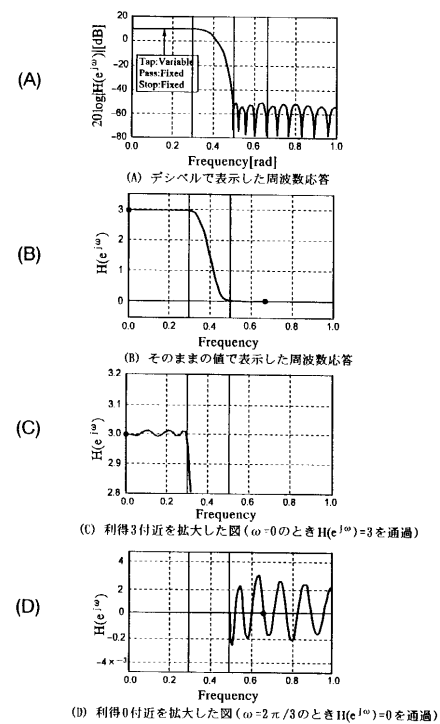
【図19】



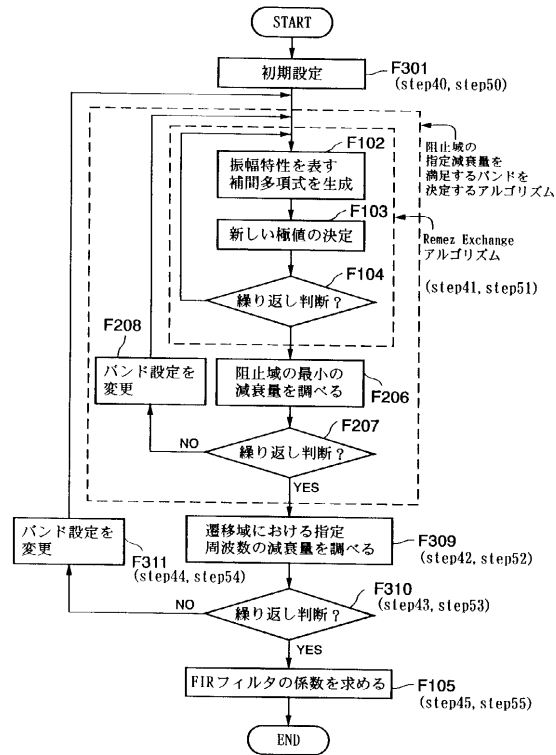
【図20】



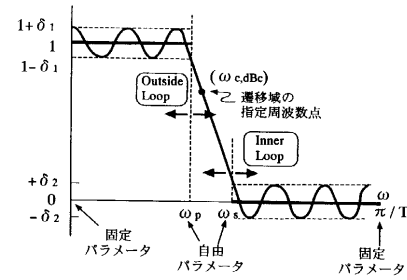
【図21】



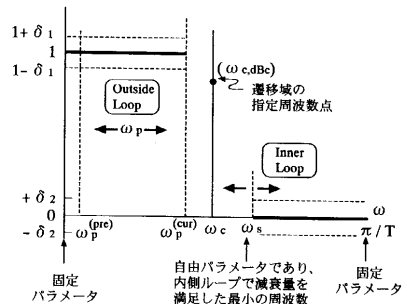
【図 22】



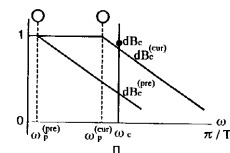
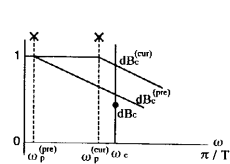
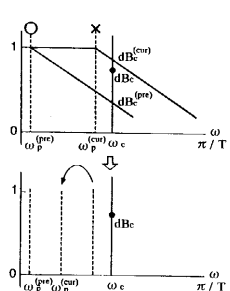
【図 23】



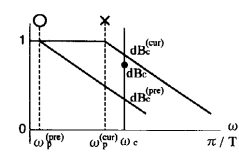
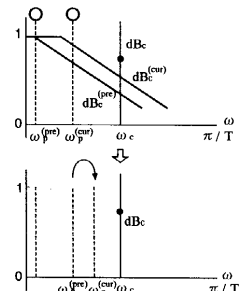
【図 24】



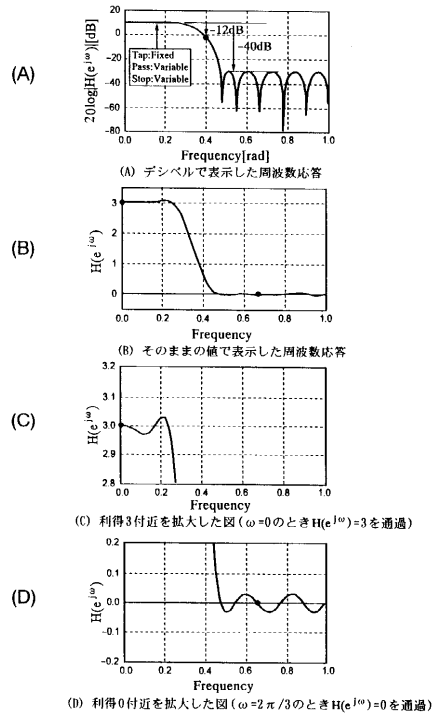
【図 25】

(A) 両方とも満足  
→終了(B) 両方とも不満足  
→解なし → 終了(C) 片方のみ満足  
→次のステップへ

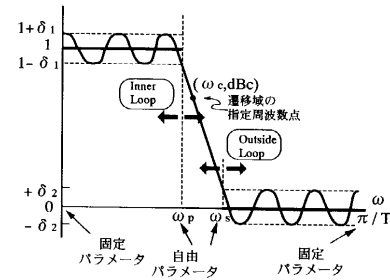
【図 26】

(A) 片方だけ満足  
→次のステップへ(B) 両方とも満足  
→次のステップへ

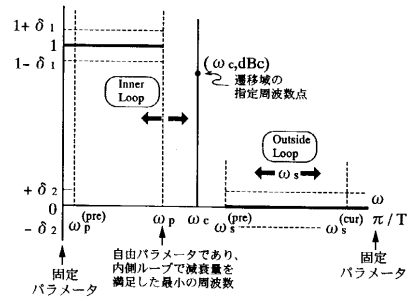
【図 27】



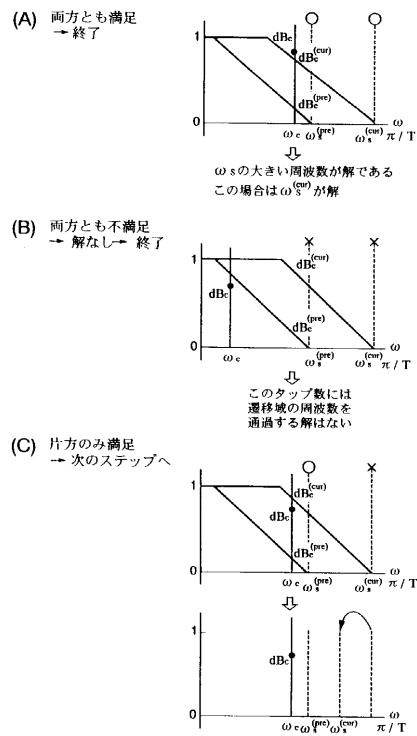
【図 28】



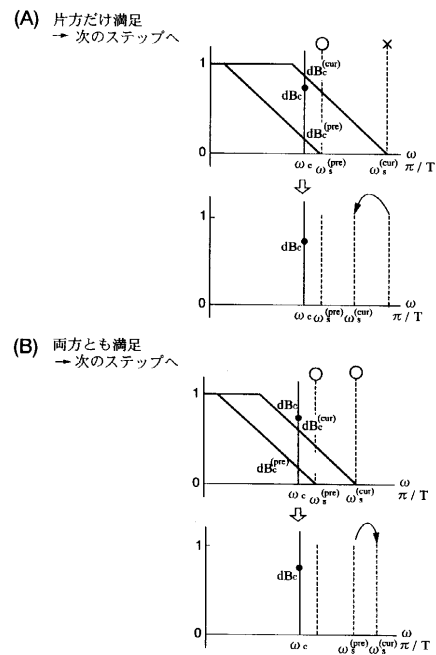
【図 29】



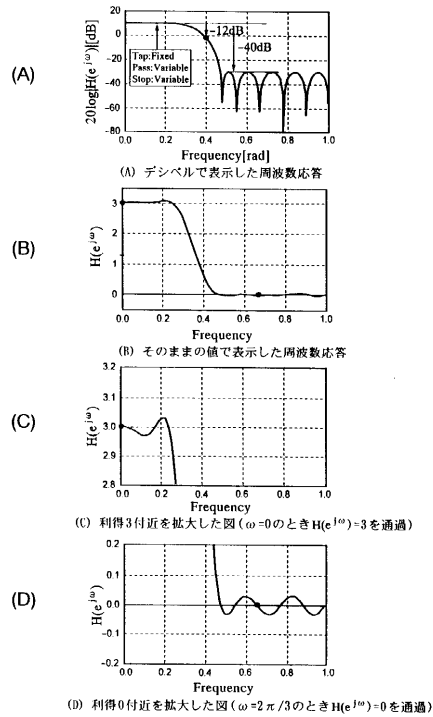
【図 30】



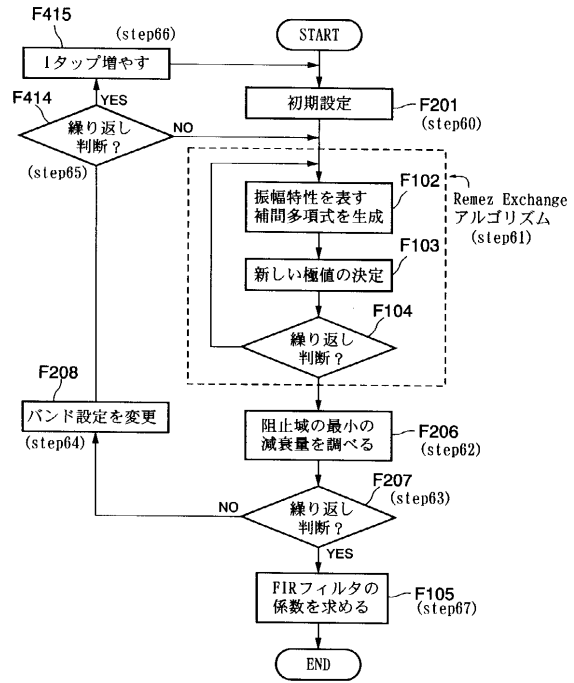
【図 31】



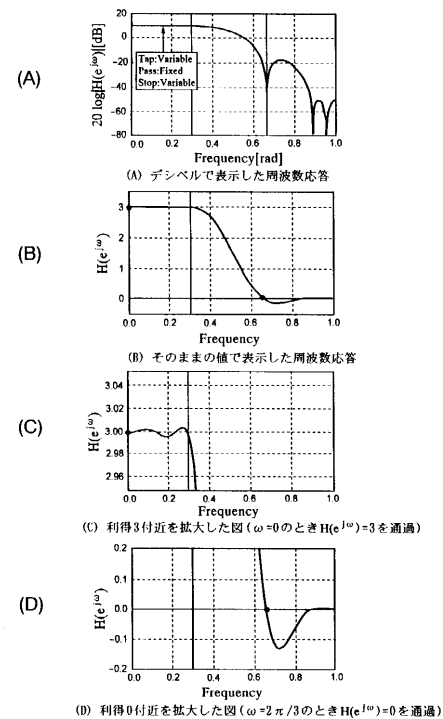
【図 3 2】



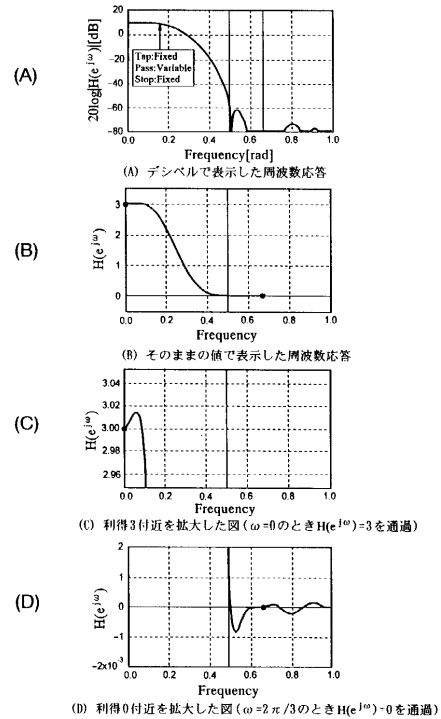
【図 3 3】



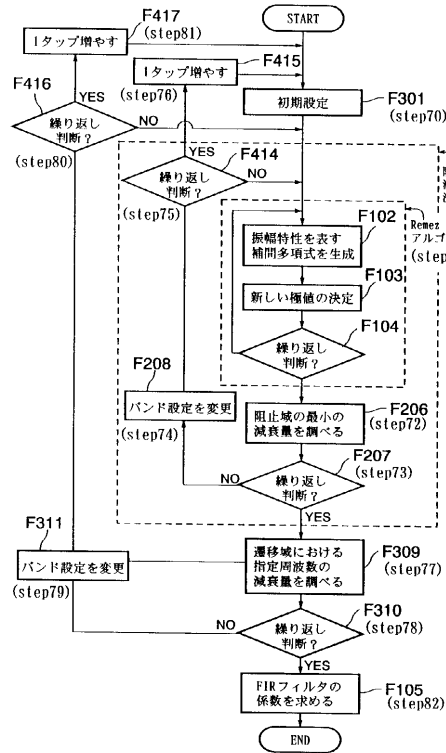
【図 3 4】



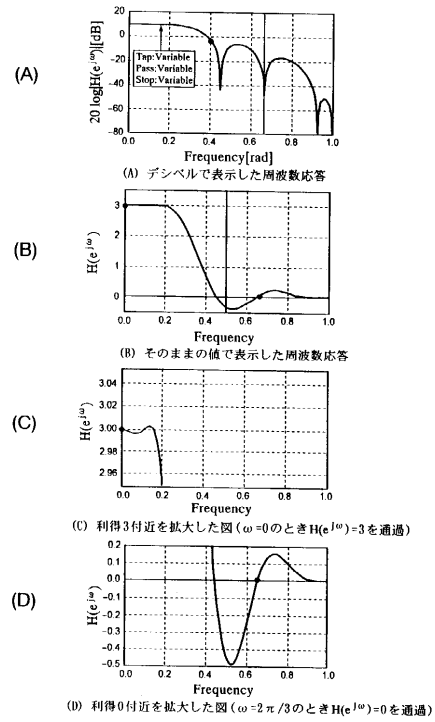
【図 3 5】



【図36】



【図37】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開平05-160675(JP,A)

特開2002-009591(JP,A)

三谷政昭, デジタルフィルタデザイン〔デジタル信号処理シリーズ3〕, 株式会社昭晃堂,  
1994年 4月20日, 初版第7刷, p.91、p.190

A.V.Oppenheim/R.W.Schaffer 著、伊達 玄 訳, デジタル信号処理  
(上), 株式会社コロナ社, 1978年 6月20日, 初版第1刷発行, p.254-266

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H03H 17/06