

振幅特性を考慮した高次の可変帯域阻止フィルタに基づく狭帯域雑音除去システム

坂本 英史[†] 越田 俊介[†] 阿部 正英[†] 川又 政征[†]

[†] 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻

1 まえがき

広帯域信号に混入した狭帯域雑音の検出・除去は、基礎信号処理における重要な手法であり、音声・音響信号処理ではハウリングサプレッサなどに応用される。著者らはこれまで、周波数変換に基づく高次の可変帯域阻止フィルタ (Variable Band-Stop Filter: VBSF) を用いた適応システムを提案している [1]。この手法は既存の手法よりも高い SN 比を得られるが、プロトタイプフィルタを振幅特性にリップルを持たないバターースフィルタに限定している。これは、リップルを持つフィルタでは適応システムが局所解に収束してしまう可能性があるためである。本稿では文献 [1] の手法を発展させ、チェビシェフフィルタなどのリップルを持つフィルタでも、プロトタイプフィルタに用いて適応システムを構築できることを示す。そして提案法が文献 [1] より優れた SN 比を得ることが可能であることを示す。

2 高次 VBSF に基づく狭帯域雑音除去システムの改良

本章では、まず、VBSF を生成するために用いる周波数変換 [2] について述べる。次に、周波数変換における周波数写像関係とプロトタイプフィルタの零点に着目することで、振幅特性にリップルを持つフィルタでもプロトタイプフィルタとして用いることができることを示し、新たな狭帯域雑音除去システムを提案する。

2.1 周波数変換

VBSF の伝達関数 $H_{BS}(z, \alpha)$ は、次式の低域-帯域阻止 (LP-BS) 変換によって生成される。

$$H_{BS}(z, \alpha) = H_p(z) \Big|_{z^{-1} \leftarrow T(z, \alpha)} \quad (1)$$

$$T(z, \alpha) = -z^{-1} \frac{1 - \alpha z^{-1}}{z^{-1} - \alpha} \quad (2)$$

A Narrowband Noise Removal System Based on a High-order Variable Band-Stop Filter in Consideration of Magnitude Characteristics

Hidefumi SAKAMOTO[†], Shunsuke KOSHITA[†], Masahide ABE[†], and Masayuki KAWAMATA[†]

[†]Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

ここで、 $H_p(z)$ はプロトタイプフィルタとなる低域通過フィルタ (Low-Pass Filter: LPF)、 α は VBSF の中心周波数 ω_0 に関するパラメータであり、 $\alpha = \cos \omega_0$ の関係にある。式 (1) の変換によって得られる VBSF は帯域幅が固定であり、可変パラメータ α の調節だけで中心周波数 ω_0 を調節できる。

ここで、LP-BS 変換における周波数写像関係に着目すると、LPF の $\omega = \pi$ [rad] に対応する点が、VBSF の中心周波数 ω_0 [rad] に対応する点へ写像される。これはプロトタイプフィルタとなる LPF の周波数特性、次数に関わらず成立する。

2.2 振幅特性を考慮した高次 VBSF に基づく狭帯域雑音除去システムの提案

図 1 は提案法のブロック図である。提案法では文献 [1] と同様に、プロトタイプフィルタを奇数次の LPF とし、その構造を継続形とする。プロトタイプフィルタの次数を N とすると、その伝達関数 $H_p(z)$ は、1 個の 1 次セクションと $(N-1)/2$ 個の 2 次セクションからなる。ゆえに式 (1) による LP-BS 変換を $H_p(z)$ に適用して得られる VBSF は、1 個の 2 次セクションと $(N-1)/2$ 個の 4 次セクションからなる。そして、適応アルゴリズムによって、中心周波数 ω_0 に関するパラメータ α を逐次更新し、狭帯域雑音を検出する。このときの評価関数は、フィルタ全体の出力 $y(n)$ ではなく、2 次 VBSF の出力 $y_0(n)$ の 2 乗の期待値 $E[y_0^2(n)]$ である。これを適応アルゴリズムで最小化する。

ここで、プロトタイプフィルタの 1 次セクションの伝達関数 $H_0(z)$ について考える。 $H_1(z)$ は次式で表される。

$$H_0(z) = \frac{1 - qz^{-1}}{1 - pz^{-1}} \quad (3)$$

ここで、 p と q はそれぞれ $H_1(z)$ の極と零点を表す実数である。フィルタの安定性を保証するため、 $|p| < 1$ とすると、式 (3) より、

$$q < p \quad -1 \leq q < 1 \quad (4)$$

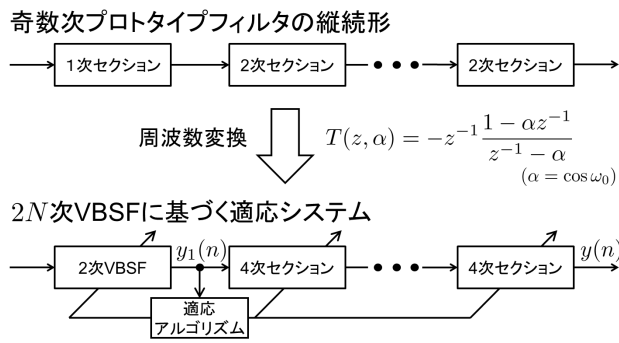


図 1: 提案する高次 VBSF に基づく狭帯域雑音除去システム

あるいは,

$$\frac{1}{q} < p \quad |q| > 1 \quad (5)$$

を満たすとき、 $H_0(z)$ の振幅特性はリップルを持たず $\omega = \pi$ [rad] に向かって単調減少な LPF になることを明らかにした。チェビシェフフィルタの零点の配置を例に挙げると、フィルタの次数が奇数であるとき $z = -1$ に必ず零点を持つため、1 次セクションの伝達関数は式 (4) を満たす。つまり、チェビシェフフィルタを縦続形で構成したとき、その 1 次セクションは、リップルを持たず $\omega = \pi$ [rad] で振幅が 0 になる単調減少な LPF となる。

以上の議論より、提案法では、縦続形の 1 次セクション $H_0(z)$ が式 (4) または式 (5) を満たすような奇数次の LPF をプロトタイプフィルタとする。このとき、 $H_0(z)$ を LP-BS 変換して得られる 2 次セクションは 2 次の VBSF となるが、その中心周波数が ω_0 [rad] となり、フィルタ全体の中心周波数と一致する。さらに、この 2 次セクションの振幅特性はリップルを持たず、 ω_0 [rad] で最小値を持つ単峰性の形状となる。ゆえに、図 1 に示されるように、この 2 次セクションの出力 $y_0(n)$ を評価関数に用いて適応アルゴリズムを動作させれば、リップルを持つフィルタをプロトタイプフィルタに用いても局所解が生じず、最適解へ収束する適応システムを構築できる。

3 実験：狭帯域雑音検出

提案法のシステムを用いた狭帯域雑音除去の計算機シミュレーションを行い、提案法の有効性を示す。

実験条件を以下に述べる。プロトタイプフィルタは、比較のため、阻止域にリップルを持つ第 2 種チェビシェフフィルタと、文献 [1] の手法であるバターワースフィルタの 2 つとし、VBSF の帯域幅は 0.05π [rad] とし、2 つのプロトタイプフィルタをそれぞれ用いた場合での SN 比を比較するため、次数は 6 次と 10 次とした。入力信号の仕様については、広帯域信号は平均 0、分散 0.01 の白

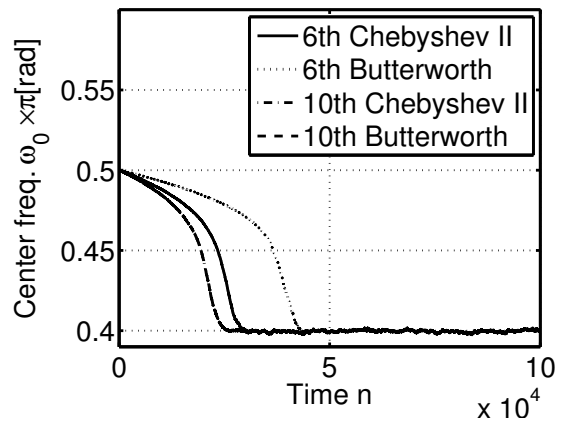


図 2: 中心周波数 ω_0 の時間変化

表 1: 広帯域信号と狭帯域雑音の減衰量の比較

次数	プロトタイプフィルタ	SN 比 [dB]
6 次	バターワース	9.6918
	第 2 種チェビシェフ	10.2138
10 次	バターワース	11.0878
	第 2 種チェビシェフ	11.9974

色ガウス雑音とし、狭帯域雑音は中心周波数 0.4π [rad]、帯域幅 0.05π [rad] とした。狭帯域雑音の分散は入力信号の SN 比が 0 [dB] となるよう設定した。適応アルゴリズムの仕様については、適応アルゴリズムは LMS アルゴリズムとし、ステップサイズパラメータ μ は、それぞれの次数およびプロトタイプフィルタの場合で適応システム収束後の α の分散が等しくなるように調整した。

シミュレーションの結果として、VBSF の中心周波数の時間変化を図 2 に示す。提案法では、振幅特性にリップルが生じるフィルタをプロトタイプフィルタに用いても、文献 [1] の手法と同様に最適解へ収束することが確認できた。

次に、SN 比の比較を表 1 に示す。6 次および 10 次いずれの場合でも、バターワースフィルタと比べ、第 2 種チェビシェフフィルタの方が SN 比が良いことがわかる。これは、第 2 種チェビシェフフィルタがリップルを許すものの、遷移域はバターワースフィルタより狭いため、広帯域信号を残しつつ狭帯域雑音を除去できるからである。

参考文献

[1] 越田, 熊本, 阿部, 川又, “縦続形の可変帯域阻止フィルタを用いた狭帯域雑音除去システム,” 第 26 回信号処理シンポジウム講演論文集, Nov 2011.

[2] A. G. Constantinides, “Spectral transformations for digital filters,” Proc. IEE, vol. 117, no. 8, pp. 1585–1590, Aug 1970.