

適応ハウリング・キャンセラはフィードバック・システムであるにもかかわらず、複数の時定数（極）がある場合の安定性の問題に関わるスタガ比（時定数の比）についてまったく知られていないようです。そのため、適応ハウリング・キャンセラのスタガ比設定について簡単な資料を作成しました。

当社の適応ハウリング・キャンセラは、システム内に含まれる時定数の適切なスタガ比設定により、適応フィルタの収束特性／バイアス蓄積特性が改善され、dither信号付加無しでも安定して動作できるようになっています。（ハウリング抑圧特性も向上し、ピーク利得6dBではマイク移動時もハウリング抑圧可能です）

適応ハウリング・キャンセラの基本構成を図1、図2に示します。システム同定の構成の適応システムにフィードバックがかかっている、システム内部に音声信号が注入されています。そのためシステム中のすべての時定数（極）がフィードバック・ループ内に含まれ、その位相特性が適応ハウリング・キャンセラの安定性／バイアス蓄積特性に影響を与えることになります。

基本構成の図からはシステムが時定数を持っているように見えませんが、適応フィルタのステップサイズ・パラメータ $\mu$ は時定数そのものです。実用レベルのハウリング・キャンセラには帯域制限フィルタや各種補助処理が含まれるため、それらが持つ時定数も存在します。

decorrelatorに周波数シフト／変調処理を用いると、decorrelatorも位相特性に影響します。

注意すべきことは、特性改善のための付加処理を追加した場合、付加処理の持つ時定数もシステム全体の特性・安定性に影響を及ぼすことです。例えば、入力信号の周波数補正前処理に用いる時変特性のフィルタの係数を求める演算に用いる平滑化用のローパス・フィルタ（LPF）の位相特性の違いによって、適応ハウリング・キャンセラ全体の動作特性・安定性も変化します。

実用レベルの適応ハウリング・キャンセラは多数の時定数を有するため、電子回路のNFB回路の位相補正と類似した安定性、（適応フィルタの動作特性の）過渡応答の問題が生じます。そのためNFB回路設計の考え方を援用して適切なスタガ比設定をおこなう必要があります。

具体的事例として、ある補助処理のパラメータ（時変係数）の平滑化に用いるローパス・フィルタ（LPF）の特性を示します。（図3）

最初、カットオフ周波数20Hzの1次LPFでは減衰量が不足したために、2次のBessel特性LPFを使ってみたところ、期待したほど適応ハウリング・キャンセラの特性は改善されず、バイアス蓄積特性が劣化するという現象が発生しました。いろいろ試してみたところ、十分なスタガ比（カットオフ周波数の比）をとった2つの1次LPFの縦続接続で好ましい動作特性が得られました。1次LPFを2つ用いたのでは、Bessel特性の2次LPFより減衰特性は劣りますが、ハウリング・キャンセラとしての処理の安定性は2次LPFを上回りました。

図3左が $f_c=20\text{Hz}$ 、Bessel特性2次LPFの特性、右が $f_c=20\text{Hz}$ と $f_c=200\text{Hz}$ の2つの1次LPFを縦続接続したものの特性です。（サンプリング周波数8000Hz）グラフを見ると1次LPF2つの縦続接続の減衰特性は2次LPFより劣りますが、位相回転は緩やかです。電子回路のNFB回路で常識的に用いられている1:10のスタガ比設定を用いて適応ハウリング・キャンセラの動作は安定性が向上しましたが、1:10のスタガ比が最適値かどうかは不明です。残念ながら、適応ハウリング・キャンセラに含まれる時定数が多く、さらに回路動作に様々な干渉現象が生じているため、NFB回路のようにボーデ線図を描いて厳密な解析をすることは困難です。

最近ではデバイスの特性が飛躍的に向上して、ごく一般的な設計で十分なオープンループ・ゲインと帯域幅が得られるため、普通のオーディオ・アンプ設計などでスタガ比の問題が議論されることは稀なようです。インターネットの検索エンジンで『スタガ比』を検索すると、検索結果は趣味的な真空管アンプ設計の話が多くを占めます。

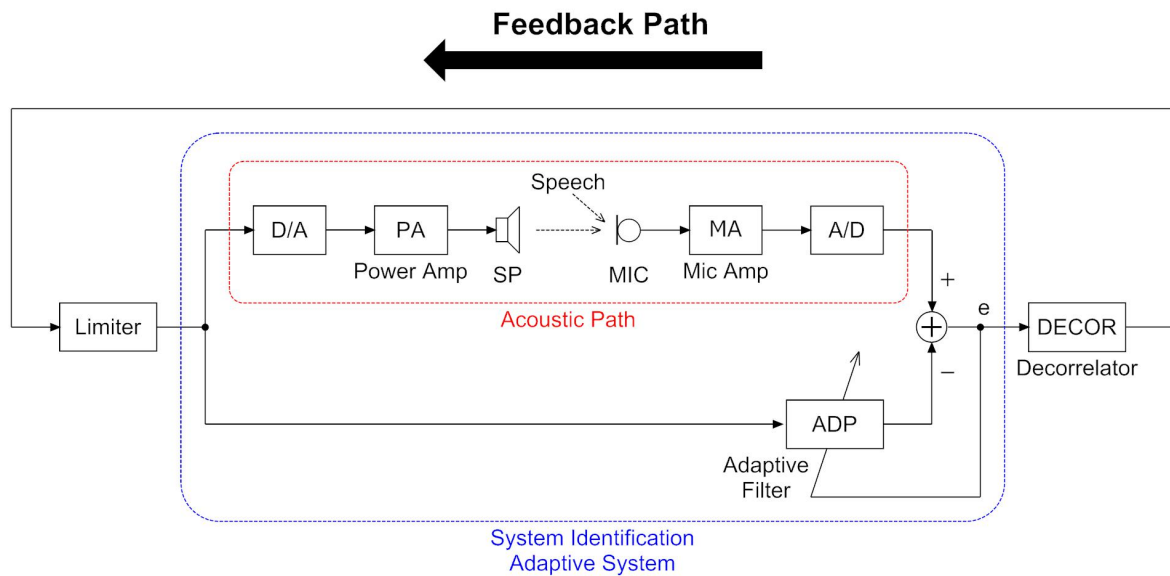


図 1 構成要素を個別に描いた適応ハウリング・キャンセラの基本構成

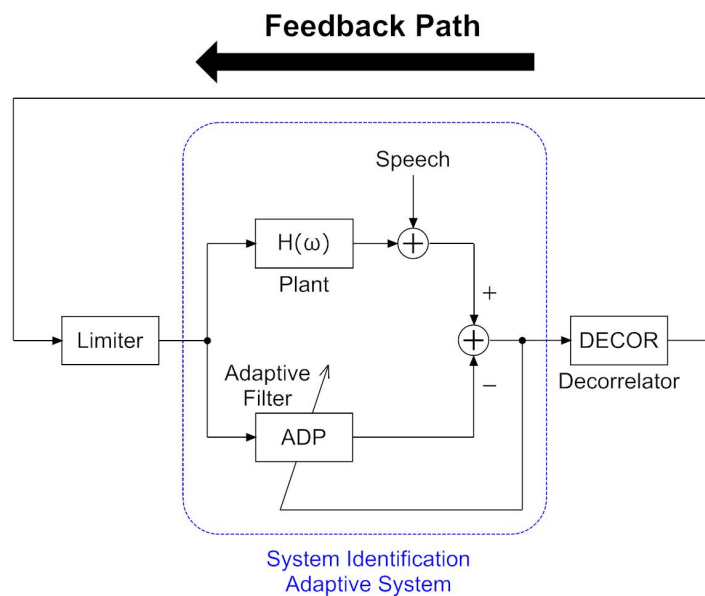
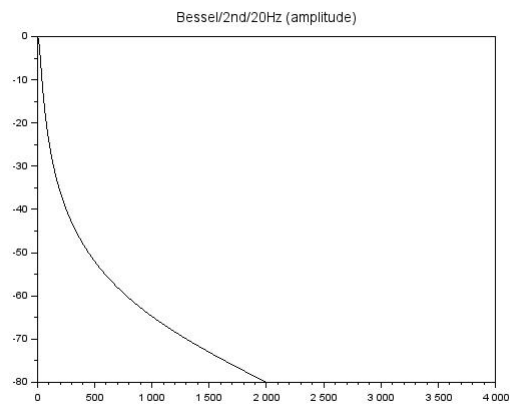


図 2 適応ハウリング・キャンセラの基本構成

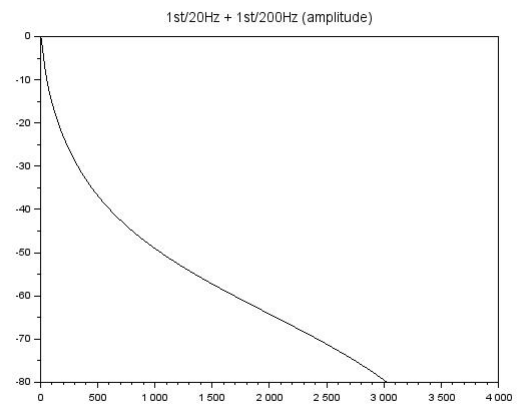
基本構成の図には帯域制限用のフィルタや各種補助処理は描かれていないが、それらが持つすべての極／時定数はフィードバック・ループの内側に含まれる。

適応フィルタのステップサイズ・パラメータ  $\mu$  も時定数である。

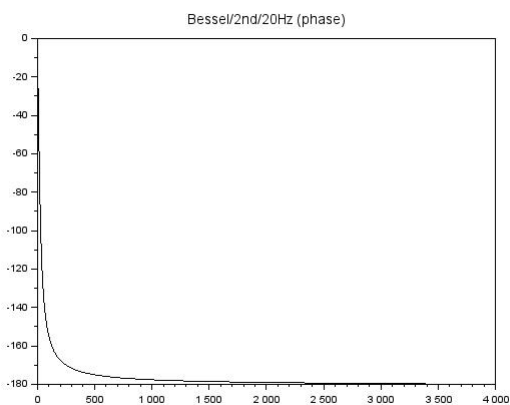
場合によってはdecorrelatorに位相回転や周期的特性変動がある



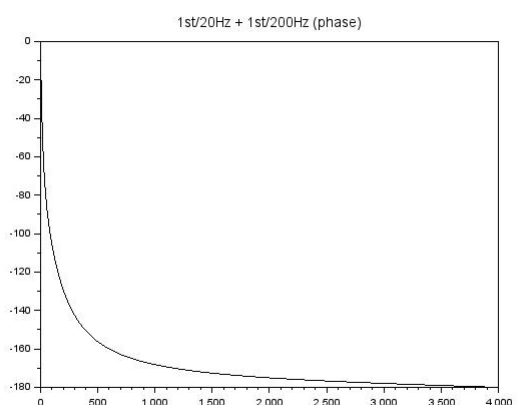
fc=20Hz 2次ベッセル・フィルタの  
振幅周波数特性 (fs=8000Hz)  
縦軸[dB]、横軸[Hz]



fc=20Hz、fc=200Hzの1次フィルタの  
縦続接続 (スタガ比 1:10) の振幅周波数特性  
(fs=8000Hz)  
縦軸[dB]、横軸[Hz]



fc=20Hz 2次ベッセル・フィルタの  
位相特性 (fs=8000Hz)  
縦軸[degree]、横軸[Hz]



fc=20Hz、fc=200Hzの1次フィルタの  
縦続接続 (スタガ比 1:10) の位相特性  
(fs=8000Hz)  
縦軸[dB]、横軸[Hz]

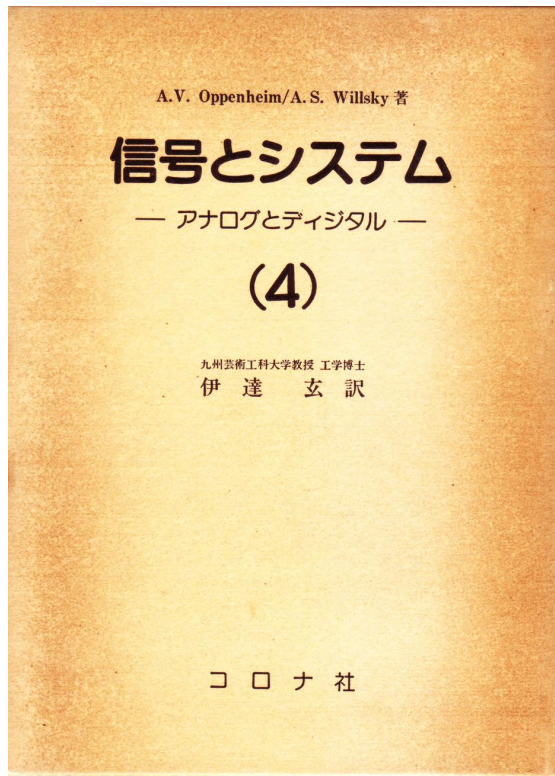
図3 2次ベッセルLPFと1次LPF2ヶの縦続接続の特性比較

ある補助処理の時変パラメータの平滑化処理に2次のフィルタを用いるよりも、  
1次LPF2ヶの縦続接続 (スタガ比 1:10) を用いた時の方が  
適応ハウリング・キャンセラの動作特性が安定になった

(適応ハウリング・キャンセラ無しの) 拡声系の安定性の検討例を取り上げた教科書に下記のものがあります。(Prentice-Hall の Signals and Systems の訳です)

『信号とシステム —アナログとディジタル—』(全4巻)、A. V. Oppenheim/A. S. Willsky 著、伊達玄 訳、コロナ社

絶版になっていて、コロナ社には2巻と3巻の在庫しか無いようです。  
4巻の11章「線形帰還システム」で拡声システムの安定性を取り上げています。  
(自分が校正のアルバイトをした本なのに、拡声システムの安定性の記述があることを忘れていました)



#### 11. 線形帰還システム

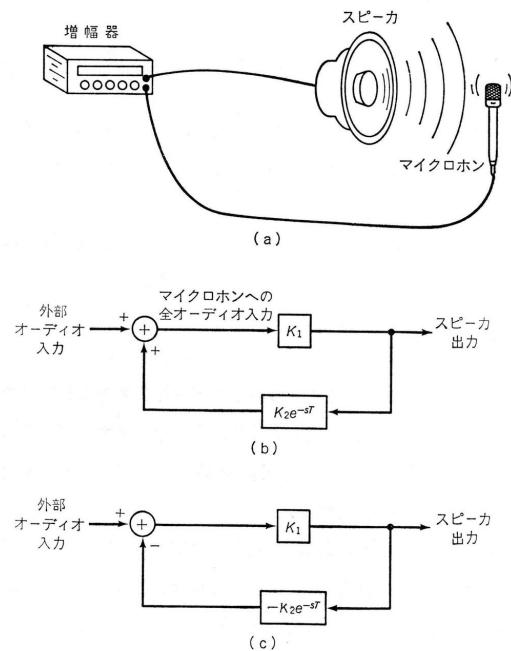


図 11.7 (a) オーディオ帰還現象の絵による説明；(b) (a) のブロック・ダイアグラム表現；(c) 負帰還システムとして書き直した(b)のシステム。注意： $e^{-sT}$  は  $T$  秒の時間遅れを示すシステム関数である。

大学のエレキ系の学科の離散時間信号処理の講義では『信号とシステム』で扱っているようなシステム解析までは深く取り上げないようです。大学の先生になった高校の先輩から「離散時間信号処理を教えているのは電子・電気系の学科だけでは無い。化学系の学科には離散時間系の制御理論の授業がある」と聞いたことがあります。(大昔にアナログ・コンピュータを用いていたようなプラント制御システムをデジタル化するのに『信号とシステム』は必読の教科書なのかもしれません)