

適応ハウリング・キャンセラの動作原理をご存じ無い方が多いようなので、簡単な説明資料を作成しました。
(一部その他の関連情報も含まれます)

ただし、以下の説明は基本構成・基本動作に関するもので、入力信号の周波数特性補正前処理や decorrelator の変調処理の詳細、安定動作するための位相特性の制約条件、バイアス蓄積対策のための dither 信号付加等については触れていません。

適応フィルタについては既知であるとして、適応フィルタ／適応アルゴリズムについての説明は省略しています。基本的には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だけなので理解の困難なところは無いはずで

1. 適応ハウリング・キャンセラの働き

ハウリング・キャンセラはハウリングが発生した時にハウリングを抑圧をするものだと考えている方が多いようですが、適応ハウリング・キャンセラはそのような動作をするものではありません。

ハウリング・キャンセラ無しではハウリングが常時発生する動作条件(0dB以上の利得)で、拡声システムをハウリング無しに正常動作させるものです。動作している間はハウリングが発生しないのですから、通常は拡声装置の利用者／聴衆が適応ハウリング・キャンセラの存在を意識することはありません。

たとえ音響系の伝達特性の変動によりハウリングが発生したとしても制御を失うことなく、適応フィルタが収束してハウリングを抑圧します。ハウリング音が発生した時に、ハウリングを抑圧しきれず制御不能状態になることがあるハウリング・キャンセラはハウリング・キャンセラとは言えません。

残念ながら、他のほぼすべての既存の適応ハウリング・キャンセラの文献の手法では100%の制御の安定性を保証することが出来ません。現在のところ、当社のもので以外には安定動作を保証できて、現実の拡散音場において実時間動作する実用レベルの拡声装置向けハウリング・キャンセラは存在しません。

実用上は、適応ハウリング・キャンセラを用いると指向性マイクロホン(音圧傾度型マイクロホン)に頼り切ったハウリング対策が不要となるという拡声システムの運用上の大きなメリットがあります。

無指向性マイクロホン(全指向性・音場型マイクロホン)を用いてマイクから50cm~1m程度離れたところから喋ってもハウリングせずに十分な拡声音量が得られます。(指向性マイクロホンとの併用も可)

図1の適応ハウリング・キャンセラのフィードバック・パス（Feedback Path）を切断すると、当然ながらフィードバックがかからなくなるので、システムは100%安定になります。（ただし拡声システムとしての機能は失われます）

一方、音響系の信号経路を切断しても適応フィルタ（ADP, Adaptive Filter）を経由した閉じた信号経路（図3中の緑色のループ）があるので、システムの安定性を保証できません。したがって音響系はフィードバック・パスではありません。

システムに適応フィルタを追加したために、適応ハウリング・キャンセラ無しの拡声システムとはシステムの性質が変わって、フィードバック・パスの位置も変化することになります。適応フィルタを追加したのに、あたかも適応フィルタが存在しないかのごとく音響系の信号経路をフィードバック・パスとして扱うのは誤りです。

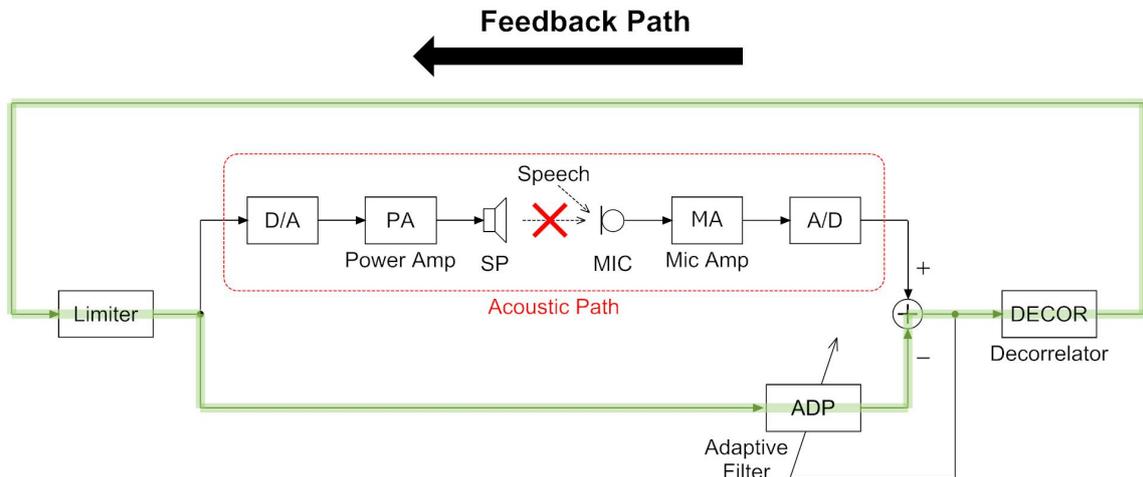


図3 適応ハウリング・キャンセラの音響系の信号経路の切断
音響系を切断しても適応フィルタ（ADP, Adaptive Filter）を経由した閉じた信号経路（緑色）が存在するので安定性を保証できない
したがって音響系はフィードバック・パスでは無い

3. limiter の動き

音響系の信号経路（図1赤枠内）のA/Dコンバータ、パワー・アンプ、スピーカ、マイク、マイク・アンプ、A/Dコンバータは有限振幅特性（飽和特性）・非線形特性を有します。信号がクリップして歪が生じると適応フィルタの収束が妨げられます。limiterは音響系での信号のクリップを防いで線形領域内でシステム同定の構成の適応システムを動作させるためのものです。逆説的ですが、非線形なlimiter追加により適応システム（図1青枠内）の線形動作が保証されます。

limiterは単純なリミッタ回路（ハード・リミッタ）でもソフト・リミッタでも時定数を有するコンプレッサ回路でもかまいません。D/Aコンバータの入力信号レベルとA/Dコンバータの出力信号レベルが絶対値1以下に正規化されていて音響系のピーク利得を G_v とした場合、リミット値はとりあえず $1/G_v$ と設定すれば問題ありません。 $1/G_v$ は厳密な最適値ではありませんが、実用上はリミット値設定が必ずしも最適でなくても適応フィルタは収束します。（音響系の利得測定については『6. 音響系の利得の測定方法』参照）なお、スピーカ、パワー・アンプ、マイク、マイク・アンプはlimiter動作中に飽和しないだけの十分なダイナミック・レンジを有している必要があります。

適応フィルタ係数がすべて0の初期状態からシステムを起動した場合、適応フィルタの収束が追いつかないためにハウリングが発生します。しかし発生したハウリング音の振幅はlimiterで制限されるので、音響系の構成要素（D/Aコンバータ、パワーアンプ、スピーカ、マイク、マイク・アンプ、A/Dコンバータ）は線形領域内で動作します。したがってハウリング音発生中も適応フィルタは正常に収束動作を継続し、最終的にはハウリングは抑圧されます。

起動時にハウリング音が発生するのは実用上好ましくありませんが、拡声系の利得を0dB以下から徐々に上昇させ、その間に適応フィルタの収束を進める等の手法により対策が可能です。

スピーカー、マイク位置の変化により音響系の伝達特性の大きな変動が生じてハウリング音が発生した場合も伝達特性の変動が止まれば適応フィルタの収束が追いついて、いずれハウリングは抑圧されます。ハウリング音はリミッタで振幅が制限されるために、耳をつんざくような聴感的に不快な音にはなりません。(高レベルの高調波成分は発生しない)

適応フィルタのタップ長とステップサイズ・パラメータ μ 、limiter のリミット値設定が適切であれば、図 1 の適応ハウリング・キャンセラは適応フィルタが必ず収束してハウリング抑圧を出来ることが保証されます。(ハウリング音が発生しても制御不能状態には陥らない)

ただし、ハウリング抑圧可能な拡声系の利得の最大値は音響系の伝達特性の揺らぎや暗騒音特性等の制約を受けます。これらの問題が無いコンピュータ・シミュレーションでは、有限値である限りいかなる利得設定でもハウリング抑圧可能です。

既存のほぼすべての補聴器の適応ハウリング・キャンセラの論文では図 1 とは異なる構成を用いています。そのために、これらの論文の手法では適応フィルタの収束性を保証することが出来ず、制御不能状態に陥ることを避けるために甘い条件設定でシミュレーションをおこなっています。

4. decorrelator の働き

decorrelator には遅延回路や周波数シフト回路、各種変調回路を用います。decorrelator が無いと適応システムの入出力信号は『雑音』成分(入力音声、図 1 中の Speech)も含めて白色化(スペクトル包絡の平坦化)されるため、拡声音は高域強調されたハイ上がりの音になります。最低 1 サンプルの遅延があれば拡声音の白色化は起こりません。

decorrelator の働きは、フィードバック・パスを切り開いた適応ハウリング・キャンセラのオープンループ・モデルを見れば明らかです。(図 4) decorrelator が入出力信号間の相関を完全に取り除くことが出来なければ、適応フィルタの収束特性にはバイアスが生じます。(適応フィルタの入力信号 $x'[n]$ と相関のある雑音 $\text{noise}[n]=x[n]$ が加わるため)

処理遅延の制約や音質劣化の問題などから、実用レベルで使用可能な decorrelator の処理効果は限定的であるため、バイアス発生を避けることは出来ません。decorrelator に周波数シフト回路や変調回路を用いた場合、適応フィルタや各種補助処理(時変処理)で生じた歪/バイアスがフィードバックにより処理帯域内全体にスペクトラム拡散されることとなります。そのためバイアス蓄積の問題への対処が難しくなります。

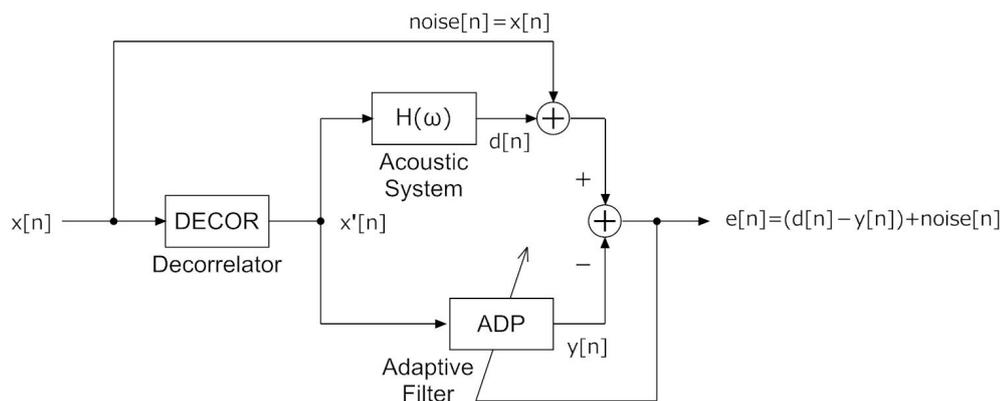


図 4 適応ハウリング・キャンセラのオープンループ・モデル

Decorrelator は遅延を有するため、 $x'[n]$ を入力信号とする適応フィルタ (ADP, Adaptive Filter) にとって適応動作不可能な未来の信号 $x[n]$ が雑音 $\text{noise}[n]$ として付加されることになる

図 4 からは音響系 $H(\omega)$ の利得が大きいほど、適応システム中に注入される雑音成分 $\text{noise}[n]=x[n]$ の信号レベルが相対的に小さくなるのが分かります。したがって、原理的に適応ハウリング・キャンセラは $H(\omega)$ の利得が大きければ大きいほど収束特性が向上するという、常識に反するかの様な性質を有します。(現実には音響系の伝達特性の揺らぎ等のために、どんどん $H(\omega)$ の利得を上げればそれだけ特性が良くなるというわけではありません)

5. 適応フィルタのタップ長の設定

適応フィルタのタップ長は部屋の残響時間の半分程度で必要にして十分です。それ以下のタップ長でもハウリング抑圧は可能ですが、拡声音に過剰な残響がつきます。

残響時間は音のエネルギーが60dB減衰するまでの時間と定義されていますが、現実の残響測定の測定精度・S/Nはたかだか20dB~30dB程度で、外挿によって-60dBまでの減衰時間を求めています。残響測定の精度・S/Nからも、残響時間の1/2相当の適応フィルタのタップ長設定は妥当と考えられます。

直接測定が困難な-60dBのレベルで規定される残響時間の定義は不自然だと思われるかもしれませんが、大ホールや教会堂で備え付けの大音圧のパイプオルガンを音源に用いて研究をおこなっていた、室内音響学の黎明期の論文の定義が今もそのまま用いられています。

6. 音響系の利得の測定方法

ハウリング・キャンセラ付きの拡声システムの音響系の利得は図5の構成で測定可能です。D/Aコンバータの入力信号を $x[n]$ 、A/Dコンバータの出力信号 $y[n]$ 、それぞれの実効値を $x[n]_{rms}$ 、 $y[n]_{rms}$ とすると、利得は $y[n]_{rms}/x[n]_{rms}$ となります。適切なテスト信号を用いて全帯域の平均利得、ピーク利得/ピーク周波数を測定することが出来ます。

適応ハウリング・キャンセラ付きの拡声システムは連続時間システムと離散時間システムが一体になったものですが、図5で測定されるのは離散時間システム側から見た連続時間システムの利得になります。拡声システムの有/無（オン/オフ）による聴衆の位置での音声レベルの違いである拡声利得とは異なります。

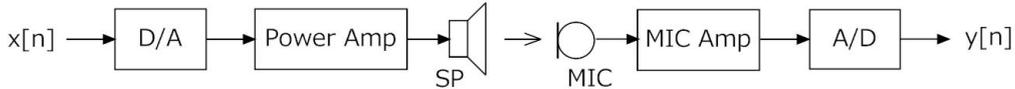


図5 音響系の利得の測定方法

この方法で測定されるのは拡声システムとしての拡声利得では無い

7. ハウリング・キャンセラの誤った性能表示

ハウリング・キャンセラ関連の製品資料や文献の中には意図的に誤った性能表示をしているものがあるので注意が必要です。図6に示すように、拡声システムの利得（音量）を上げて発生した G_h [dB] のハウリングを抑圧することが出来たときに、 G_h をハウリング抑圧性能とするのは誤りです。利得の増加分 G_{up} [dB] がハウリング・キャンセラの本当の性能です。

既存のハウリング対策製品の性能は間欠的に生じた 2dB~3dB 程度の G_{up} に対応出来る程度です。当社の適応ハウリング・キャンセラでは 10dB~15dB の G_{up} でも、拡声システムを安定動作させることが出来ます。

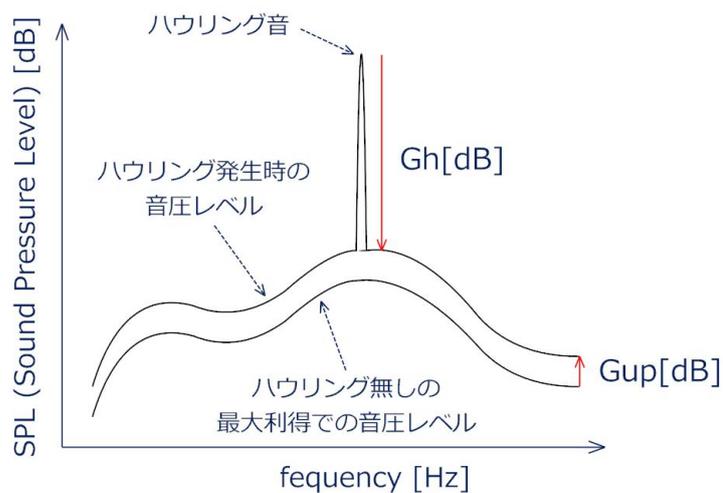


図6 ハウリング・キャンセラの性能表示
 G_h [dB] のハウリング音を抑圧できても、ハウリング抑圧性能は G_h ではなく G_{up} [dB] となる。

8. Windows PCを使った適応ハウリング・キャンセラの実験

拡散音場（次ページ参照）で動作する拡声装置向けの適応ハウリング・キャンセラには、コンピュータ・シミュレーションでは分からない特徴的な性質・対処すべき問題点が多数あります。適応ハウリング・キャンセラの動作原理が正しく理解されないのは、実時間動作するシステムの構築に手間がかかるために実験をするのが面倒・実験をする機会が無いことも一つの理由であると考えられます。

実時間動作する適応ハウリング・キャンセラの実装には DSP (Digital Signal Processor) ボードや FPGA (Field Programmable Gate Array) ボードが必要です。汎用組込プロセッサは乗算器を内蔵していても、連続的な積和演算能力が DSP より劣るためにハウリング・キャンセラには適していません。教育用途に良く用いられている Raspberry Pi は搭載している ARM プロセッサのスペックとしてはそれなりの演算性能を有していますが、適応フィルタの処理に向いているとまでは言えません。

大学・高専や企業の開発部門での基本原理の研究、実習・デモ用途であれば、一部機能・性能に制約がつくものの Windows PC と外付けの高品位 ASIO 対応 USB オーディオ・インターフェースを用いて適応ハウリング・キャンセラの実験が可能です。（図7）最近のx86系64bitプロセッサは動作クロック周波数が高く、一種のベクトル演算能力を持つので、適応フィルタの演算でも相当のパフォーマンスを発揮できます。Windows PCではどうしてもA/D・D/A処理での遅延が大きくなるために実用レベルの性能を得るのは困難ですが、実験・デモ用途には十分です。

Windows PC でのハウリング・キャンセラのソフトウェア開発にあたっては、プロセッサのアーキテクチャに依存した特別な最適化が不要なので非常に楽です。コンパイル時のオプション設定さえ適切であれば #pragma 文追加による制御も必要ありません。（DSPと違って細かいことを気にせずに済みます）

当社ではおもに大学・高専等の教育機関や企業の開発部門向けに、基本的な構成の適応ハウリング・キャンセラのソースコード（C言語）を含む Windows PC ベースのオーディオ実験キット AudioKit を販売しています。（各種サンプル・プログラム／ライブラリと ASIO 対応 USBオーディオ・インターフェース、スピーカー／マイク、パワー・アンプ、マイク・アンプ、接続ケーブル等のセット）実験をしてみれば適応ハウリング・キャンセラの驚くべき機能・特性を容易にご理解いただけると思います。AudioKit の詳細については当社まで直接お問い合わせください。（kit@cepstrum.co.jp, (042)357-0621）

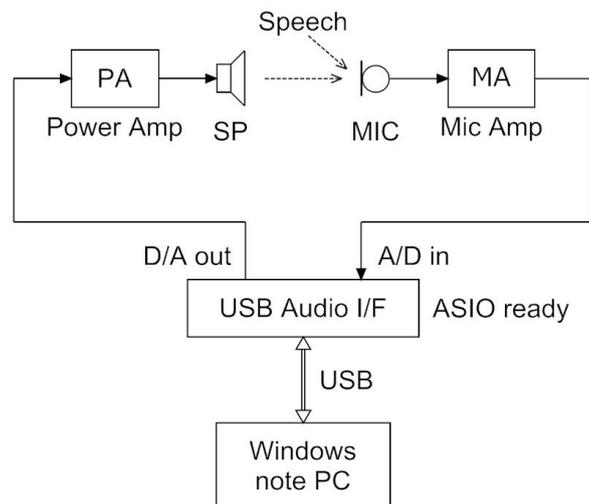


図7 Windows PC を用いたハウリング・キャンセラの実験システムの構成
ASIO対応の高品位のUSBオーディオ・インターフェースを用いる
理想的にはサンプリング・タイミングのドリフト等の問題の無い、
外部クロック源（Word Clock, DAI master signal）との
同期機能を有するオーディオ・インターフェースが望ましい

9. 拡散音場とは何か？

日本音響学会編の『音響用語辞典』の拡散音場の項目には次のように記されています。

拡散音場 (Diffuse sound field)

すべての点において音響エネルギー密度が等しく、かつ音響エネルギーの伝搬方向があらゆる方向に等確率である仮想的な音場

実は音響屋が気軽に『拡散音場』を口にする場合の多くは、上記の厳密な物理的定義を意味しているのではありません。『揺らぎのある普通の残響環境』、『(無響室ではない)残響のある部屋』を指して手短に『拡散音場』と言っているだけです。

音響と同様に波動現象を扱い、遠方界・近傍界の概念があることも共通する無線分野の専門家向けの表現にすると『激烈なフェージングを有する超々マルチパス環境』というところでしょうか。無線屋さんが恐れおののくようなマルチパス環境が音響の世界では当たり前ですし、それが音響系の本質的特性です。(そして音響特有の難しさです)

エレキ屋さんにとってはシステムの特性が常に大きく揺らいでいる状態など想像も出来ないでしょう。オーディオ・マニアやオーディオ機器業界で拡散音場の概念を理解している人など皆無です。

適応フィルタ／適応アルゴリズムの教科書では、適応対象のシステムの伝達特性は変化しない、または適応フィルタの収束速度と比較して伝達特性の変化が非常に遅いと仮定していることに注意する必要があります。揺らぎのある拡散音場で動作する適応ハウリング・キャンセラは教科書どりの収束特性が得られるわけではありません。

10. 音響学の常識に反する適応ハウリング・キャンセラの特性

シミュレーションや無響室での実験がうまく出来たからといって、拡散音場(残響のある普通の部屋)での処理がうまくいくとは限らない(簡単にはいかない)、拡散音場での処理は難しい～というのが音響の世界の常識です。ところが適応ハウリング・キャンセラは、その常識に反するかのような特性を持っています。

適応ハウリング・キャンセラ付きの拡声装置の動作中に、スピーカーとマイクの間を人が横切ったら何がおこるかを考えてみましょう。

無響室内で実験したならばスピーカー／マイク間の音の伝播が遮られ、音響系の伝達特性が大きく変動するために適応フィルタの収束が追いつかなくなり、一時的にハウリングが発生します。

ある程度の容積のある拡散性の良い部屋(適度な残響のある部屋)で実験すると、スピーカー／マイク間を人が動き回ってもハウリングは発生することなく拡声装置は正常動作します。なぜならば、直接音が遮られても壁からの反射音・残響成分のレベルが相対的に大きいため、音響系の伝達特性の変動が小さくなるからです。説明を読めば当たり前のように思われるかもしれませんが、これが実験をやってみなければなかなか気づくことの出来ない適応ハウリング・キャンセラの驚くべき特性の一つです。