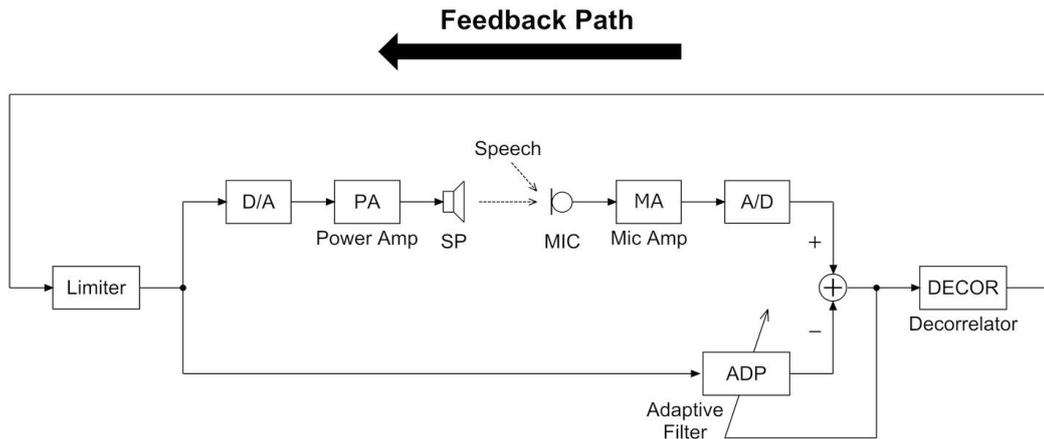


(有) ケプストラム

長年にわたり拡声システム向けの適応ハウリング・キャンセラの開発を続けた結果、ハウリング抑圧を実現できただけでなく、適応フィルタが安定動作するために必要な位相特性の制約条件を見出すことが出来ました。また、通常の拡声装置の運用では生じがたいような厳しい動作条件においても適応フィルタの安定性を維持するためのディザ信号付加処理を考案することも出来ました。

開発に一区切りがついたところで、脈絡の無い箇条書きの形ではありますが、適応ハウリング・キャンセラについての考察をまとめました。



適応ハウリング・キャンセラの基本構成

- ・ 適応フィルタは線形時不変 (LTI, Linear Time Invariant) では無い。
適応フィルタはフィルタ係数が変化する時変システムなので、時不変では無い。
フィルタ係数の変化によって非線形な歪が発生するので線形でも無い。
- ・ 適応アルゴリズムは数学的に厳密に方程式の解を求めるようなアルゴリズムでは無い。
音響系を対象としたシステム同定の構成の適応フィルタは変化する伝達特性をふらつきながらトラッキングしているに過ぎない。
- ・ 適応フィルタを用いて音響系の「正確」な伝達特性／インパルス・レスポンスを求めることは出来ない。
学生時代の指導教官の先生は離散時間信号処理（デジタル信号処理）の専門家にして、残響測定の実験家でもあったのですが、学生に向かって残響測定の話をする時には常に以下のように強調されていたものです。
「(本質的に揺らぎがある) 音響系の伝達特性・部屋の音響特性はその集合平均特性を測定することしか出来ないし、集合平均特性を論ずることしか出来ない」

$$w[n+1] = w[n] + \alpha \cdot e[n]$$

適応アルゴリズム (LMS/NLMS) の簡略化した表記

誤差信号 $e[n]$ を積分しながらフィルタ係数 $w[n]$ を更新する形になっている

- ・ 適応アルゴリズム (LMS/NLMS) が数値計算アルゴリズムとして期待どおりに安定して収束するとは限らない。
確率的にはNLMSアルゴリズムは有色の入力信号であっても収束することが証明されているが、有限語長演算の数値計算法としての安定性、演算誤差累積の問題はまだ十分に精査されていないはずである。

- ・ 固定小数点演算DSPでのエコー・キャンセラの実装においては、適切に丸め処理をおこなう必要があることが良く知られている。一方、補聴器のハウリング・キャンセラのシミュレーション研究の文献等では有限語長演算の問題はほとんど無視されている。浮動小数点演算であっても有限語長演算であることにかわりはない。IEEE754単精度浮動小数点の演算語長（仮数部）は「わずか」24bitにすぎない。
- ・ 適応アルゴリズム／適応フィルタの数値計算法としての安定性や誤差累積が十分に議論されていないのは、既存のエコー・キャンセラ等のアプリケーションが極めて小規模で安定性の問題が顕在化していなかったからにすぎないと考えられる。数値計算の専門家が取り扱うスーパーコンピュータを使うような大規模問題とエコー・キャンセラやハウリング・キャンセラなどを比較すると文字どおり演算規模の桁が異なる。
- ・ ハウリング・キャンセラと同様にフィードバックのかかったシステムの適応フィルタとしては、IIR構成の適応フィルタがある。（IIRフィルタ自体にフィードバックがある）
専門家では無いので詳しいことは良く知らないが、過去にIIR構成適応フィルタの安定化のために誤差信号をフィルタリング／平滑化する処理手法の研究があったものの、安定性の問題の本質的な解決策にはならないという結論に落ち着いたそうである（らしい）。
- ・ 適応ハウリング・キャンセラにはdecorrelatorが必須である。decorrelatorが無ければ教科書に書いてあるとおりに、誤差信号（出力信号／拡声信号）は白色化される。処理対象が音声である場合は、スペクトル抱絡が平坦化されたハイ上がりの拡声音になってしまう。decorrelatorに最小1サンプルの遅延を用いれば拡声音の白色化は生じない。
- ・ decorrelatorとして遅延以外に、周波数シフト、変調処理が用いられる。
いずれを用いても実用上の処理遅延の制約から処理性能が限定され、入力信号と出力信号を完全に無相関化することは出来ない。
- ・ A/D・D/Aの変換遅延や音響系の伝播遅延（スピーカー／マイク間の距離）が大きければ、decorrelatorの遅延が大きいのと等価でハウリング・キャンセラの動作は安定になる。遅延が大きければ特に歪・バイアス蓄積対策の処理が無くても安定動作するが、過大な遅延は拡声装置として実用上好ましくない。商品レベルでは低遅延の周波数シフト、変調処理をdecorrelatorに用いる必要がある。
- ・ 処理遅延の制約から周波数シフト、変調処理に必要なI/Q成分生成処理に理想特性のフェーズシフターを用いることは出来ない。そのためdecorrelatorに用いた周波数シフト、変調処理は歪を発生する。（時変の適応フィルタ自身も歪・バイアスを、その他の補助処理も歪を発生する）
- ・ フィードバックがかかった拡声システムの中でdecorrelatorに周波数シフト、変調処理を用いるということは、様々な要因で発生した歪・バイアスを帯域内全体にスペクトラム拡散していることになる。
- ・ 拡散された歪・バイアスとシステム全体の特性変動、位相特性等の要因が複合して、歪・バイアス同士の打ち消し、強めあい・蓄積が生じる。打ち消し／蓄積の理論的に詳細なメカニズムは不明である。
- ・ ディザ信号付加により歪・バイアスの打ち消しの効果を上げることが出来る。逆にディザ信号自身が適応フィルタのバイアス蓄積の要因になることもある。（過大な信号レベルのディザは逆効果になる）
- ・ 実験的に得られた結果として、適応ハウリング・キャンセラ付きの拡声システムの位相特性がある条件を満たせば、歪・バイアスの蓄積は生じず安定を保てることが分かった。
拡声システムとして普通の「穏やかな」使用条件ではディザ信号付加なしでも安定動作できる。
- ・ マイク位置を大きく動かしたり、風が吹き込むような状況で窓・ドアの開け閉めをしたり、大音圧の周期性雑音が入ったりするような状況では、リミッタが動作するほどの一時的なハウリング音が発生する。それでも音響系の伝達特性の変動や周期性雑音が無くなれば拡声システムはすみやかに安定状態に戻るが、非常に長い時定数で歪・バイアスの蓄積が始まり最終的には不安定化する。（時定数は数時間のオーダー）現在のところ歪・バイアスの蓄積が始まるか／始まらないかの限界点ははっきりとは分かっていない。

- ・前記のような「過酷な」条件でも歪・バイアスの蓄積を防ぐためには、適切な特性を有するディザ信号付加が必要となる。ディザ信号レベルは概ね16bit A/D・D/Aコンバータの1/2LSB以下で十分であり、適応フィルタの収束に与える悪影響は無視できると考えられる。
- ・適応ハウリング・キャンセラを安定動作させるためには、その他にも下記に示すような細かい改良・改善が必要となる。
 - ・NLMSアルゴリズムの音声処理向けの修正、最適パラメータ設定
 - ・入力信号の周波数特性補正処理（時変処理）によって生ずる歪の低減
 - ・適応フィルタと時変の各種補助処理の持つ時定数間の適切なスタガ比の設定。または、補助処理からの不要な時定数の排除。
 - ・ディザ信号の信号レベル、周波数特性、相関特性の適切な制御。
- ・フィードバックがかかっているため、微妙な歪、微妙な位相特性・相関特性の違いが適応フィルタの収束、安定性に大きな影響を及ぼす。あまりにも微妙な問題であるので、現在のところ綺麗な数学モデルを元に理論的解析やシミュレーションをしたりすることが出来ない。（実環境での実験結果を評価するしかない）
- ・バイアス蓄積の問題に関して、発生する現象があまりにも不可解であったので、当初は使用している浮動小数点プロセッサの積和演算器、乗算器、加算器の丸めモードの初期設定の誤りを疑ったほどである。適切な位相特性設定とディザ信号付加をおこなったハウリング・キャンセラでは丸めモードが最近接丸めでも、切捨てでも歪・バイアスは蓄積せず安定である。（すべての演算の丸めモードを変更しても、NLMSアルゴリズム部分だけを変更しても安定）
- ・IEEE754準拠のプロセッサ／コンパイラであっても完全に同一の演算結果が得られることが保証されているわけでは無いそうである。しかし、適応ハウリング・キャンセラに関しては位相特性設定とディザ信号が適正であれば、そのような計算結果の相違が安定性に影響するほどでは無いと考えられる。
- ・GNU C コンパイラを用いてIntelプロセッサで適応フィルタのシミュレーションをすると、普通のコードとBLAS (Basic Linear Algebra Subprograms) を用いて高速化したプログラムとでは計算結果に FLT_EPSILON の数倍程度の差が生じる。
- ・数値計算の分野では最近、精度保証付き数値計算などの進歩があるようだが、そのような研究をおこなっている専門家は適応アルゴリズム／適応フィルタに関してどのように思われるだろうか？