

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560381

研究課題名 (和文) 回り込み経路の同定と情報量に基づく適応フィルタアルゴリズム

研究課題名 (英文) Studies on Feedback Path Identification and Adaptive Filter Algorithms
Based on Information Quantity

研究代表者 酒井 英昭 (SAKAI HIDEAKI)

京都大学大学院・情報学研究科・教授

研究者番号：70093862

研究成果の概要：補聴器や同一周波数での同時送受信法においては回り込み経路を推定し、この影響をキャンセルする必要がある。前者に対しては入力信号を正弦波の和でモデル化しそれを遮断する適応ノッチフィルタを用いる手法を、後者に対してはアンテナアレーを用いる手法を開発した。また、独立成分分析を用いたシステム同定のための新しいロバスト適応アルゴリズムを導出し、その際、現れたスケールパラメータの意味を明確にするとともに伝達関数の推定誤差をかなり低減できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2007年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 2008年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：信号処理

科研費の分科・細目：電気電子工学 通信・ネットワーク工学

キーワード：回り込みキャンセラ, 適応フィルタ, ノッチ特性, Kullback-Leibler 情報量, エコーキャンセラ, 独立成分分析, ロバスト推定, 拘束条件付き LMS アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

(1) 補聴器においてはスピーカからマイクロフォンに回り込み経路が生じ、ハウリング、ホィスリングを引き起こすため、これらの影響を適応的に打ち消す回り込みキャンセラが必要となるが、通常の適応アルゴリズムではバイアスが生じるため、バイアスのない新しいアルゴリズムの開発が必要となっていた。同一周波数による無線通信での同時送受信においても中継局での送信アンテナから受信アンテナに回り込み経路が生じるとい

う同じ問題の構造であるため前者の知見が利用できる。

(2) エコーキャンセラにおいてダブルトーク時には適応フィルタの追従特性が著しく劣化する。このため、従来はダブルトークを検出して適応フィルタの係数更新を停止する方法が用いられている。しかし、ダブルトークの検出には誤りが生じるため、これによらない手法として、遠端話者と近端話者の信号は通常、統計的に独立であることに基づき、独立成分分析(ICA)の手法を用いる新しい適

応フィルタアルゴリズムの開発を思い立った。

2. 研究の目的

(1) 補聴器や同一周波数による無線通信での同時送受信に用いる回り込みキャンセラのためのバイアスのない新しいアルゴリズムを開発を目的とする。従来の適応フィルタ理論はフィードフォワード経路の影響をキャンセルする適応フィルタを対象としており、フィードバック（回り込み）経路を対象とするためには新たな理論展開が必要である。

(2) エコーキャンセラにおいては遠端話者のエコーに比べ大きな近端話者の信号が加法雑音として加わるダブルトーク時には適応フィルタの性能が著しく劣化する。通常のLMS アルゴリズムなどは平均二乗誤差を最小にする手法であり非ガウス性雑音、とくに裾の長い分布に脆弱であることが知られている。このような状況に対処するために統計学の分野ではロバスト推定法が研究されてきているが、やや発見的なアプローチによっている。本研究では、適応フィルタの入力信号と観測雑音の推定値の独立性を最大にするアルゴリズムを独立成分分析(ICA)の手法を用いて導出し、その統計的性質の解明を目的とする。

3. 研究の方法

(1) フィードバック系に対する適応フィルタの解析ではフィードフォワード系に対する場合に比べ、より慎重な取り扱いが必要となる。すなわち、平均化法を用いてLMS アルゴリズムの停留点を求める際に、適応フィルタが因果的であることを考慮する必要がある。入力信号が自己回帰(AR)過程の場合にWiener-Hopf 方程式の解法に現れる因果性の抽出演算子を用いてバイアスが生じる原因を調べ、そのバイアスを除去する信号の白色化による方法が酒井、藤永（電子情報通信学会技術報告 SIP2005-157）により提案されている。本研究ではこの方法を入力信号が正弦波の和である場合や無線通信における同一周波数での同時送受信の問題に適用する。

(2) フィードフォワード経路の同定に対する従来の適応フィルタアルゴリズムでは平均二乗誤差基準に基づき、観測雑音の推定値の分散が最小となるようパラメータ推定がなされる。一方、独立成分分析(ICA)では独立性の尺度として相互情報量がしばしば用いられる。そこで、本研究では入力信号と観測雑音の推定値との間の相互情報量が最小となるような適応アルゴリズムを導出し、所望の停留点近傍でそのアルゴリズムが安定である条件を求める。通常のICAでは分離行列のすべての要素が出力の各成分が互いに独

立になるように調節されるが、ここでは、一部のみが調節可能で残りは特定の値に固定されている場合を扱う点が大きな違いとなる。また、パラメータ推定値の推定誤差共分散行列の理論式を Benveniste らの方法（Adaptive Algorithms and Stochastic Approximations, Springer-Verlag, 1990）を用いて求める。

4. 研究成果

(1) 補聴器や無線通信における同一周波数での同時送受信法では回り込み経路を推定し、この影響をキャンセルする必要がある。これらの問題に対し、それぞれ以下の成果を得た。

① 図1で補聴器への入力信号 $d(n)$ が音声の場合は自己回帰(AR)過程とモデル化することが適切であるが、音楽信号の場合は正弦波の和プラス白色雑音というモデルがより適しているとされる。そこで、このモデルに対する回り込みキャンセラのアルゴリズムを開発し、その収束性の解析を行った。補聴器のフォワードパスにある増幅器 $G(z)$ に q 次の遅延を施すとすると、回り込み経路の同定のための適応フィルタ $W(z)$ ではその入力信号と誤差信号を適当な有限インパルス応答(FIR)フィルタ $\hat{P}(z)$ でフィルタリングする必要があることがわかった。さらに、その次数は $q-1$ となり、それは正弦波の個数 K 以上にとる必要があること、そして、正弦波を遮断するノッチ特性をもつ必要があることを見出した。これらの結果は AR モデルに対する Spriet et al. (IEEE Trans. SP, 2005) の結果を拡張したものである。また、ノッチ特性は誤差信号 $e(n)$ に線形予測法を適用してこれを近似的に実現したが、次数 $q-1$ を K よりかなり大きくとる必要がある遅延の増大を招くため、これを回避する方法が必要であることもわかった。

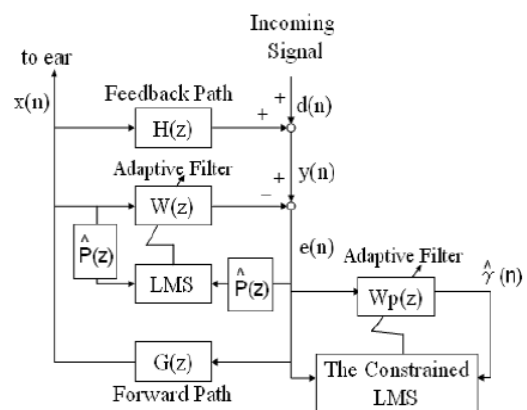


図1 適応回り込みキャンセラのブロック図

② そこで、入力信号ベクトルの共分散行列

の最小固有値に対応する固有ベクトルに基づく Pisarenko 法を適応フィルタ用に実装した拘束条件付き LMS アルゴリズム (Reddy et al., IEEE Trans. ASSP, 1982) に注目し、これを用いてノッチ特性を形成するアルゴリズムを検討した。この場合は $q=1=K$ であり遅延は最小である。また、これまでは、入力信号のモデル化の適応フィルタが収束したとの前提で回り込み経路の同定用の適応フィルタの収束解析が行われたが、両者が同時に動作している場合の局所的安定性解析を行い、入力信号が AR 過程の場合も含め、二つの適応フィルタの安定性を示すことができた。

③ 中継局における同一周波数での同時送受信に関しては、Sakai et al. (EUSIPCO 2006) において上述の補聴器に対するのと同様なアルゴリズムが回り込み経路の伝達関数の推定法として提案されている。ここでは、親局から OFDM 信号が送信されているとし、中継局までの通信路の最大遅延の情報のみが用いられている。本研究では受信側にアンテナアレイを用い、事前情報として通信路のインパルス応答ベクトルの中でノルムが最大となる遅延に対応するパスは既知とする。アンテナアレイのウェイトはこのパスからの信号をそのまま通過させ、アレイ出力の分散が最小となるよう制御する。これは MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) ビームフォーミング法と呼ばれる手法であるが、回り込み経路キャンセラにも有効であり、シミュレーションにより増幅器のゲインを大幅に増大できることがわかった。

(2) 独立成分分析 (ICA) の手法を用いた新しい適応フィルタアルゴリズムに関し以下の成果を得た。

① 情報量を用いた適応フィルタに関しては入力信号と推定した観測雑音になるべく独立となるよう相互情報量を規範に用い、独立成分分析 (ICA) の手法を援用して新しい適応アルゴリズムとその所望の停留点近傍での収束条件を導出した。従来の非ガウス性雑音に対するロバスト適応アルゴリズムでは、誤差信号に作用する非線形関数が発見的なものを用いていたが、本アルゴリズムではそれが統計学における影響関数であり、付随するスケールパラメータの調整も自動的に行えることがわかった。しかし、この影響関数は事前には未知であり実際の応用においてはデータから推定する必要がある。そこで、確率密度関数をガウス関数の和で近似するカーネル手法を援用してオンラインで影響関数と推定し、適応アルゴリズムに用いる手法を開発し、エコーキャンセラに応用し良好な結果を得た。

② 独立成分分析 (ICA) の手法に基づく新しいロバスト適応フィルタアルゴリズムにおいて、通常の平均二乗誤差基準の適応フィルタには現れないスケールパラメータの意味を詳しく考察し、観測雑音の真の確率密度関数と仮定した密度関数の Kullback-Leibler 情報量が最小となるようこのスケールパラメータが調節されていることを示した。また、未知システムのインパルス応答の推定値の誤差共分散行列を導出し、スケールパラメータを導入せず 1 と固定した場合との比較を行い、導入により推定誤差をかなり低減できることを示した。図 2 にエコーキャンセラでの性能の尺度である ERLE (Echo Return Loss Enhancement) を用いてスケールパラメータ導入の効果を示す。

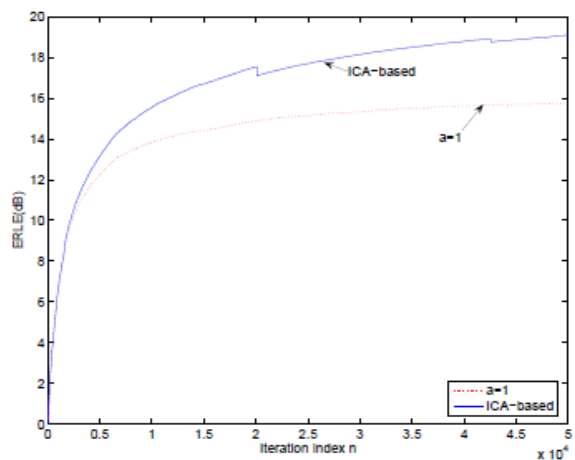


図 2 ERLE へのスケールパラメータの影響

③ 観測雑音に関する情報を付加して推定精度の向上をはかることを検討し、AR モデルに従う場合の独立成分分析に基づく適応フィルタアルゴリズムを、上述の手法を拡張し状態空間表現を用いて導出した。シミュレーションにより推定精度が向上することを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 酒井英昭, 独立成分分析に基づく適応フィルタ, システム/制御/情報, 53 巻, pp. 172-177, 2009, 査読無
- ② Jun-Mei Yang, Hideaki Sakai, A Robust ICA-Based Adaptive Filter Algorithm for System Identification, IEEE Trans. on Circuits and Systems- II, vol. 55, pp. 1259-1263, 2008, 査読有

- ③ Jun-Mei Yang, Hideaki Sakai, A New Adaptive Filter Algorithm for System Identification Using Independent Component Analysis, IEICE Trans. Fundamentals, vol. E90-A, pp. 549-1554, 2007, 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① Hideaki Sakai, Recent Topics in Adaptive Filtering (invited paper), IEEE TENCON 2008, November 19, 2008, Hyderabad, India
- ② Jun-Mei Yang, Hideaki Sakai, An ICA-Based Adaptive Filter Algorithm for System Identification Using a State Space Approach, 9th International Conference on Signal Processing, October 26, 2008, Beijing, China
- ③ 酒井英昭, 福園隼人, 正弦波信号に対する適応回り込みキャンセラシステムとその解析, 電子情報通信学会信号処理研究会, 2008年6月26日, 北海道大学
- ④ Jun-Mei Yang, Hideaki Sakai, A Robust ICA-Based Adaptive Filter Algorithm for System Identification, 電子情報通信学会 2008年総合大会信号処理研究専門委員会シンポジウム“ICAを超える”, 2008年3月20日, 北九州市立大学
- ⑤ Hideaki Sakai, Analysis of an Adaptive Algorithm for Feedback Cancellation in Hearing Aids for Sinusoidal Signals, 2007 European Conference on Circuit Theory and Design, August 28, 2007, Sevilla, Spain

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 英昭 (SAKAI HIDEAKI)
京都大学大学院・情報学研究科・教授
研究者番号: 70093862

(2) 研究分担者

林 和則 (HAYASHI KAZUNORI)
京都大学大学院・情報学研究科・助教
研究者番号: 50346102

(3) 連携研究者

なし

研究協力者

Jun-Mei Yang
京都大学大学院・情報学研究科・博士後期課程学生(2008年9月まで), 現在, 華南理工大学講師