

エコーキャンセラにおける 双方向通話を考慮した学習法

牛丸 晋一郎† 平野 晃宏‡ 中山 謙二‡
†金沢大学大学院 自然科学研究科 ‡金沢大学工学部
石川県金沢市小立野 2-40-20
E-mail: hirano@t.kanazawa-u.ac.jp

エコーパス推定用可変ステップサイズ適応フィルタとエコー除去用フィルタを組み合わせた、ダブルトーク時にも安定に動作するエコーキャンセラを提案する。エコーパスの推定には疑似エコーと近端音声の相互相関に基づく可変ステップサイズアルゴリズムを用いる。短時間平均と長時間平均を組み合わせることにより、追従速度と推定精度のトレードオフを解消している。相互相関が低く安定した学習ができる場合にのみ、フィルタ係数をエコーパス推定用フィルタからエコー除去用フィルタにコピーする。計算機シミュレーションにより、従来の相互相関を用いた可変ステップサイズアルゴリズムに見られた検出遅延による性能劣化がほとんどみられないこと、FTFを用いたCFAF法に匹敵する性能が得られることを示す。

キーワード: 双方向通話, 相互相関, ステップサイズ, ダブルフィルタ

Adaptation Algorithm for Echo Cancellers Robust against Double-Talk

Shinichiro Ushimaru† Akihiro Hirano‡ Kenji Nakayama‡
†Graduate School of Natural Science and Technology
‡Faculty of Engineering
Kanazawa University
40-20, Kodatsuno 2-Chome, Kanazawa
E-mail: hirano@t.kanazawa-u.ac.jp

This paper proposes double-talk resistant echo canceller with double filters, one for echo-path estimation and one for echo cancellation. An adaptive step-size algorithm based on the cross-correlation between the echo replica and the near-end speech is used for the echo-path identification. The filter coefficients are copied from the estimation filter to the cancellation filter only when the cross-correlation is small enough. Computer simulation results show that the proposed algorithm reduces the performance degradation caused by the estimation delay, and that the tracking capability of the proposed algorithm for echo path changes is almost comparable to that of a previously proposed double-filter algorithm with fast transversal filter.

Keywords: Double-Talk, Cross-Correlation, Step-Size, Double-Filters

1 まえがき

TV会議やハンズフリー電話において、スピーカで再生された遠端話者の音声再びマイクで収録されて遠端側に送り返される音響エコーが生ずる。音響エコーは快適な会話の妨げとなり、時にはハウリングの原因にもなる。このようなエコーを除去するために、音響エコーキャンセラ[1]が用いられている。遠端話者のみが発言しているシングルトークにおいては、エコーキャンセラで用いられている適応フィルタは比較的容易にエコーパスを同定することができる。しかし、遠端話者と近端話者が同時に発言する双方向通話(ダブルトーク)時には、近端話者の音声とエコーとの相互相関により適応フィルタの収束特性が劣化する[3]-[5]。

適応フィルタの学習を制御するステップサイズを小さくすることにより、相互相関が強い場合における収束特性を改善することはできる。しかし、収束速度が低下するため、収束速度と残留誤差とのトレードオフが問題となる。このようなトレードオフを解決するために、ステップサイズを適応制御する方法[6]-[8]が検討されている。妨害信号パワーの推定[8]などによって耐雑音性能を改善しているが、近端音声とエコーとの相互相関が非常に強い場合には性能劣化が予想される。

これに対して我々は、遠端音声のエコーと近端音声の相互相関を近似的に導出する方法[9]を提案した。また、短時間平均と長時間平均を組み合わせることにより追従速度と推定精度を両立させる方式[10]を開発した。しかし、相互相関が急増する際には追従速度がなおも不十分であり、推定遅延のために収束特性が劣化するという問題がある。

本研究では、エコーパス推定用の可変ステップサイズ適応フィルタとエコー除去用フィルタを組み合わせることにより、相互相関の推定遅延による性能劣化が生じないエコーキャンセラを提案する。相互相関が低く安定した学習ができる場合にのみ、フィルタ係数をエコーパス推定用フィルタからエコー除去用フィルタにコピーする。エコーパス変動の検出を組み合わせることにより、エコーパスの変動にも高速に追従できる。音声信号を用いた計算機シミュレーションによりその有効性を示す。

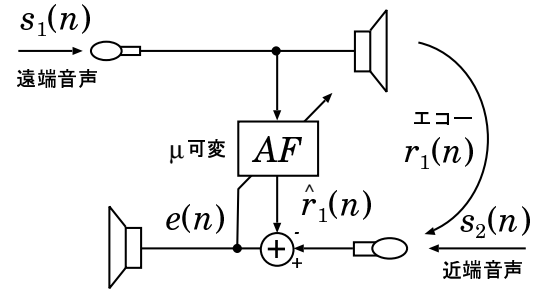


図 1: 音響エコーキャンセラを用いた遠隔会議

2 エコーキャンセラにおける双方向通話

図1に示す音響エコーキャンセラを用いた遠隔会議において、遠端話者の音声 $s_1(n)$ が回線を通り、近端側のスピーカから出力されることによりエコー $r_1(n)$ が発生する。エコー $r_1(n)$ と近端話者の音声 $s_2(n)$ との混成信号から適応フィルタ AF によって生成された疑似エコー $\hat{r}_1(n)$ を差し引くことにより、エコーを除去する。

N タップの FIR 適応フィルタを仮定すると、時刻 n における疑似エコー $\hat{r}_1(n)$ は

$$\hat{r}_1(n) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) \quad (1)$$

で生成される。ここで、 $\mathbf{w}(n)$ は N 次の係数ベクトル、 $\mathbf{x}(n)$ は $s_1(n) \cdots s_1(n-N+1)$ からなる入力信号ベクトル、 $\mathbf{w}^T(n)$ は $\mathbf{w}(n)$ の転置を示す。エコーキャンセラの出力である誤差信号 $e(n)$ は以下の式で与えられる。

$$e(n) = r_1(n) + s_2(n) - \hat{r}_1(n) \quad (2)$$

学習アルゴリズムとして Normalized Least Mean Square (NLMS, 学習同定法)[2]を仮定すると、係数ベクトル $\mathbf{w}(n)$ の更新は、

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{\mu e(n)\mathbf{x}(n)}{\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)} \quad (3)$$

で行われる。ここで、 μ はステップサイズと呼ばれる定数で、学習速度や精度を制御する。

NLMS アルゴリズムにおいては、 $e(n)$ の 2 乗平均 $E[e^2(n)]$ を最小にするように係数を学習する。ダブルトーク時の $E[e^2(n)]$ は次式のように求められる。

$$\begin{aligned}
E[e^2(n)] &= E[(r_1(n) - \hat{r}_1(n))^2 \\
&\quad + 2(r_1(n) - \hat{r}_1(n))s_2(n) \\
&\quad + s_2^2(n)] \\
&= E[(r_1(n) - \hat{r}_1(n))^2] \\
&\quad + 2E[(r_1(n) - \hat{r}_1(n))s_2(n)] \\
&\quad + E[s_2^2(n)] \tag{4}
\end{aligned}$$

上式において、右辺第3項は適応フィルタの特性と独立しているので一定とみなすことができる。右辺第2項は $r_1(n) - \hat{r}_1(n)$ と $s_2(n)$ が互いに無相関であれば0となる。従って $E[e^2(n)]$ を最小にするには右辺第1項の最小化を考えればよい。この場合には、最小二乗規範により適応フィルタはエコーパスの伝達関数を同定できる。

しかし、 $r_1(n) - \hat{r}_1(n)$ と $s_2(n)$ との間に相関がある場合には、第2項は0にはならない。通常は遠端音声 $r_1(n)$ と近端音声 $s_2(n)$ とは独立であるので、両者は独立であると考えられる。しかし、ステップサイズを大きくして学習を行うと期待値を短時間平均で近似することになり、一時的に相互相関が大きくなることが予想される。この状態で $E[e^2(n)]$ の最小化を行なうと、エコーパスの推定値は理想値からずれることは明らかである。従って、ダブルトーク時では、遠端音声と近端音声の相互相関の度合に応じた学習法を考慮する必要がある。

3 相互相関に基づく可変ステップサイズアルゴリズム

ここでは、[9],[10]で提案した相互相関の推定方法とその安定化法を説明する。

3.1 相互相関の推定原理

疑似エコー $\hat{r}_1(n)$ と混在信号 $r_1(n) + s_2(n)$ との相互相関 $\alpha(n)$ を

$$\begin{aligned}
\alpha(n) &= E[\hat{r}_1(n)(r_1(n) + s_2(n))] \\
&= E[\hat{r}_1(n)r_1(n)] + E[\hat{r}_1(n)s_2(n)] \tag{5}
\end{aligned}$$

のように求める。また、疑似エコーパワーの期待値 $\beta(n)$ を

$$\beta(n) = E[\hat{r}_1^2(n)] \tag{6}$$

とする。ここで、適応フィルタの学習が進み、

$$E[\hat{r}_1^2(n)] \simeq E[\hat{r}_1(n)r_1(n)] \tag{7}$$

であると仮定する。このとき、 $\alpha(n)$ と $\beta(n)$ の差 $\gamma(n)$ は、

$$\begin{aligned}
\gamma(n) &= \alpha(n) - \beta(n) \\
&= E[\hat{r}_1(n)r_1(n)] + E[\hat{r}_1(n)s_2(n)] \\
&\quad - E[\hat{r}_1^2(n)] \\
&\simeq E[\hat{r}_1(n)s_2(n)] \tag{8}
\end{aligned}$$

となる。これにより、疑似エコー $\hat{r}_1(n)$ と近端信号 $s_2(n)$ の相互相関が推定できる。これを遠端信号 $s_1(n)$ のパワーで正規化したもの

$$\Gamma(n) = \frac{\gamma(n)}{E[s_1^2(n)]} \tag{9}$$

を用いてステップサイズを制御する。

3.2 短時間平均と長時間平均に基づく安定化

実際に相互相関を推定する際には、期待値の代わりに時間平均値を用いる。平均を取る範囲を選ぶ際に、追従速度と精度にトレードオフが生ずる。短時間平均を用いると追従速度は速くなるが、推定精度は劣化する。長時間平均を用いると推定精度は良いが、追従速度は遅くなる。そこで、短時間平均と長時間平均を組み合わせて、高速な追従と高精度の推定を両立させる。

まず、リーク積分による重み付時間平均を用いて、短時間平均値による相互相関の推定値 $\Gamma_1(n)$ を以下の手順で求める。

$$\begin{aligned}
\alpha(n) &= \delta_1 \alpha(n-1) \\
&\quad + (1 - \delta_1) \hat{r}_1(n)(r_1(n) + s_2(n)) \tag{10}
\end{aligned}$$

$$\beta(n) = \delta_1 \beta(n-1) + (1 - \delta_1) \hat{r}_1^2(n) \tag{11}$$

$$\sigma_{s_1}(n) = \delta_1 \sigma_{s_1}(n-1) + (1 - \delta_1) s_1^2(n) \tag{12}$$

$$\Gamma_1(n) = \frac{\alpha(n) - \beta(n)}{\sigma_{s_1}(n)} \tag{13}$$

ここで、 δ_1 は

$$1 > \delta_1 > 0 \tag{14}$$

なる定数である。次に、長時間平均による推定値 $\Gamma_2(n)$ を

$$\Gamma_2(n) = \delta_2 \Gamma_2(n-1) + (1 - \delta_2) \Gamma_1(n) \tag{15}$$

により計算する。ここで、 δ_2 は

$$1 > \delta_2 > \delta_1 > 0 \tag{16}$$

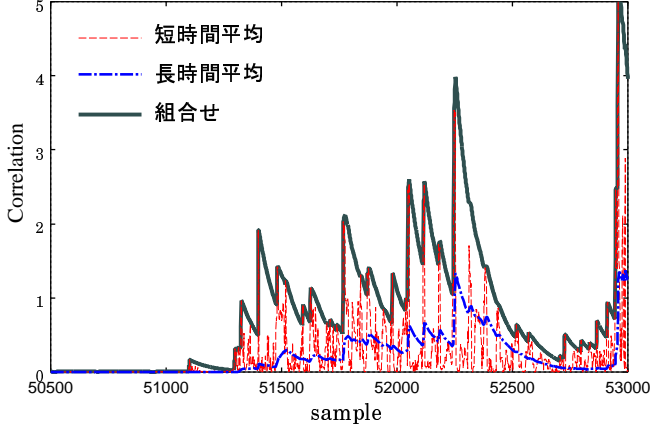


図 2: 相互相関の推定例

なる定数である.

ダブルトーク等により相互相関が急増する際には $|\Gamma_1(n)| > |\Gamma_2(n)|$ となることが考えられる. このような変化に追従するために, $|\Gamma_1(n)| > |\Gamma_2(n)|$ である場合には $\Gamma_2(n)$ を $\Gamma_1(n)$ で置き換える. すなわち,

$$\Gamma_2(n) = \begin{cases} |\Gamma_1(n)| & (|\Gamma_1(n)| > |\Gamma_2(n)|) \\ \Gamma_2(n) & (Other) \end{cases} \quad (17)$$

とする.

長時間平均による相互相関の推定値 $\Gamma_2(n)$ は, 相互相関が小さくなくても時定数 δ_2 で減衰するため, 推定値が大きい状態が続くことになる. このため, 収束速度が低下することが予想される. このような事態を避けるために, $|\Gamma_1(n)| < |\Gamma_2(n)|$ なる状態が T_1 サンプル以上続く場合には, $|\Gamma_2(n)|$ を過去 T_2 サンプルにおける $|\Gamma_1(n)|$ の最大値でリセットする. すなわち,

$$\Gamma_2(n) = \max_{k=n-T_2}^n |\Gamma_1(k)| \quad (18)$$

とする.

図2に相互相関の推定例を示す. 相互相関が急増し, 短時間平均値が長時間平均値を上回った場合には, 短時間平均値を用いることにより追従速度を高めている. また, 長時間平均を用いることにより推定値の振動を抑えて安定した推定値を得ている.

3.3 ステップサイズ制御

前節により求めた相互相関の推定値 $\Gamma_2(n)$ を用いてステップサイズ $\mu(n)$ を制御する. $\mu(n)$ は,

$$1 \geq \mu_H > \mu_L \geq 0 \quad (19)$$

なる μ_H と μ_L のいずれかを取るものとし,

$$\mu(n) = \begin{cases} \mu_H & (\Gamma_2(n) < \theta_1) \\ \mu_L & (Other) \end{cases} \quad (20)$$

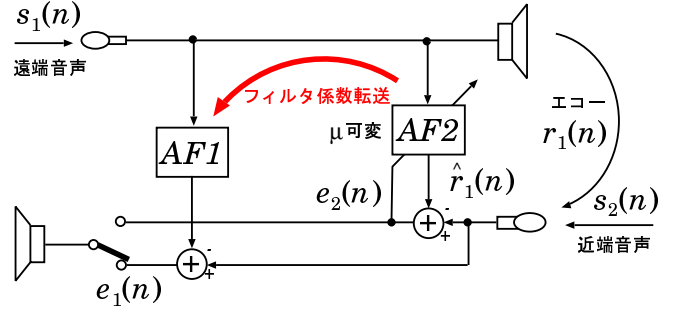


図 3: ダブルフィルタ方式

のように制御する. なお, 離散的な2値を取るのではなく連続的に変化させる方法も検討されているが, 2値と比べて大きな変化は見られなかった. 故に, ここでは簡単な2値を用いる.

4 提案アルゴリズム

短時間平均と長時間平均を組み合わせても, 急激な相関増加への追従は若干遅れるため, 収束特性が劣化するという問題がある. この問題を解決するために, 適応フィルタを2個用いることにより収束特性の劣化を抑える方法を提案する. また, エコーパス変動を検出することにより, エコーパス変動への追従速度を高速化する.

4.1 ダブルフィルタ方式

提案方式の構成を図3に示す. ここでは, 2個の適応フィルタ AF1 と AF2 を用いる. フィルタ係数の更新は AF2 のみで行う. AF2 のステップサイズは, 前述した相互相関 $\Gamma_2(n)$ を利用して制御する. AF1 のフィルタ係数は, AF2 で学習したフィルタ係数をコピーする. エコーキャンセラの出力としては, AF1 の出力 $e_1(n)$ と AF2 の出力 $e_2(n)$ のいずれかを切り替えて用いる.

係数のコピーは,

$$\Gamma_2(n) < \theta_2 \quad (21)$$

$$\frac{1}{T_3} \sum_{i=0}^{T_3-1} s_1^2(n-i) < \theta_3 \quad (22)$$

の両条件を T_4 サンプル以上連続して満たした際に行う. ここで, θ_1 および θ_2 は相互相関の推定値 $\Gamma_2(n)$ に対する閾値で,

$$\theta_1 > \theta_2 \quad (23)$$

となるように選ぶ. すなわち, 係数コピーが行われる条件は, 係数更新に大きなステップサイズ μ_H を用いる条件よりも厳しいものとする.

4.2 エコーパス変動検出

ダブルフィルタ方式では、エコーパスが変動した場合でも、フィルタ係数の転送条件が満たされるまでAF1の係数は更新されない。したがって、エコーパス変動から次に転送条件を満たすまでの間はエコー除去性能が劣化することが予想される。また、ダブルトーク時の安定性を重視してステップサイズ μ_H を低めに設定した場合には、エコーパス変動への追従速度はさらに低下する。ここでは、エコーパス変動を検出し、エコーキャンセラ出力とステップサイズを制御する方法を提案する。

エコーパスが変動してから係数がコピーされるまでの間には、AF2の誤差信号 $e_2(n)$ はAF1の誤差信号 $e_1(n)$ よりも小さくなると考えられる。しかし、単に誤差信号を比較すると、相互相関の影響による目的信号除去が発生した場合と区別ができない。そこで、AF i ($i = 1, 2$)の平均誤差信号パワー $P_i(n)$

$$P_i(n) = \frac{1}{T_5} \sum_{i=0}^{T_5} e_i^2(n-i) \quad (24)$$

を用いてエコーパス変動を検出する。

$$P_1(n) > P_2(n) \quad (25)$$

なる条件が連続して T_6 サンプル以上満たされた場合にエコーパスが変動したと判断する。

シングルトーク中にエコーパスが変動した場合には、ステップサイズを大きくし、また、エコーキャンセラの出力として $e_2(n)$ を用いることが望ましい。一方、ダブルトーク中にエコーパスが変動した場合には、安定性を重視した制御が望まれる。そこで、エコーパス変動を検出した際にシングルトークである、すなわち、

$$\Gamma_2(n) < \theta_1 \quad (26)$$

である場合には、エコーキャンセラの出力として $e_2(n)$ を用いて、かつ、

$$\mu(n) = 1 \quad (27)$$

として収束を高速化する。

$$\Gamma_2(n) \geq \theta_1 \quad (28)$$

になれば、エコーキャンセラの出力を $e_1(n)$ に戻し、ステップサイズ制御も通常のものに戻す。ダブルトーク中にエコーパス変動が生じた場合にも、通常と同じ制御を行う。

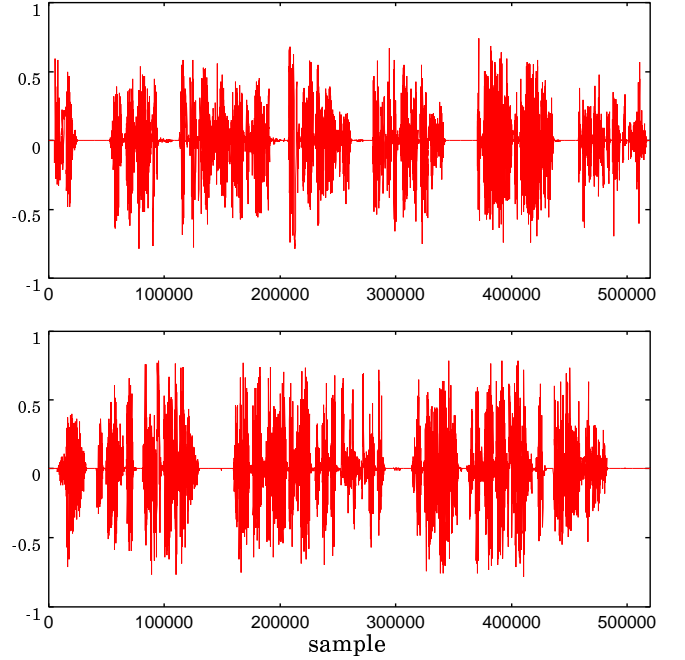


図 4: 遠端信号と近端信号

5 計算機シミュレーション

提案アルゴリズムの性能を評価するために計算機シミュレーションを行った。計算は全て倍精度実数で行っている。従来法としては、固定ステップサイズによるNLMSアルゴリズムと、長時間平均と短時間平均を併用した可変ステップサイズアルゴリズム[10]を用いた。従来の可変ステップサイズアルゴリズムは、提案法のAF2を単独で用いた場合に相当する。また、複数のフィルタを用いた係数コピーを行う方式として、Fast Transversal Filter (FTS) とNLMSを併用したCombined Fast Adaptive Filter (CFAF) Algorithm[12]を用いた。

遠端音声 $s_1(n)$ 、近端音声 $s_2(n)$ としては図4に示す音声を用いた。エコーパスには15次のバターワース低域通過フィルタを用い、正規化カットオフ周波数は0.4とした。適応フィルタAF1およびAF2としてはFIRフィルタを用い、タップ数を64とした。

提案法における適応フィルタAF2および従来の可変ステップ法の学習には短時間、長時間平均を考慮した可変ステップサイズを用いる。リーク積分の時定数を定めるパラメータは $\delta_1 = 0.9$ および $\delta_2 = 0.998$ 、 $\Gamma_3(n)$ をリセットするための時間パラメータは $T_1 = 150$ および $T_2 = 64$ 、相互相関 $|\Gamma_3(n)|$ に対する閾値は $\theta_1 = 0.1$ 、可変ステップサイズの最大値 μ_H を0.3、最小値 μ_L を0.01とした。

ダブルフィルタ方式における係数コピーの閾値は

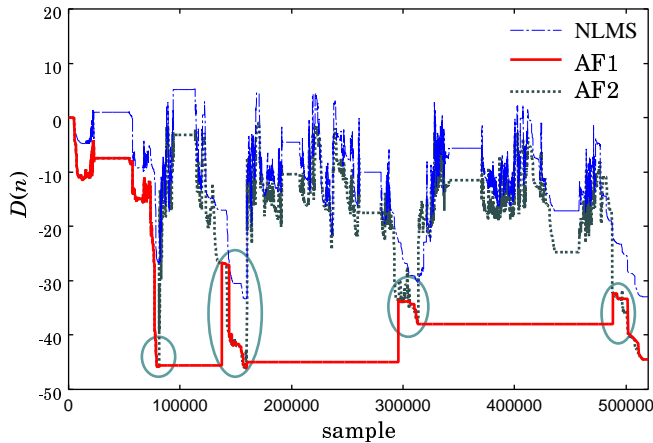
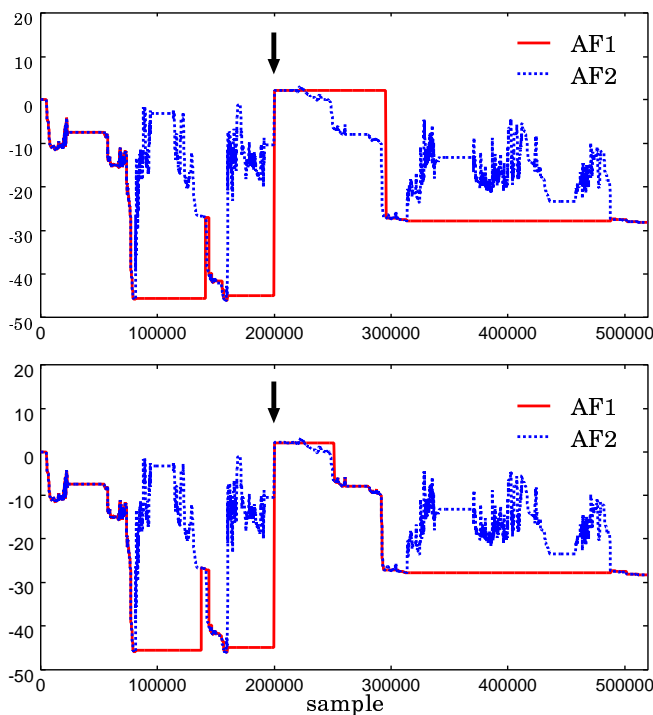


図 5: ダブルトーク時の係数誤差



検出なしの場合 (上) と検出ありの場合 (下)

図 6: エコーパス変動への追従特性

$\theta_2 = 0.002$, 観測時間は $T_3 = 64$ および $T_4 = 100$ とした. エコーパス変動検出の観測時間は $T_5 = 200$ および $T_4 = 4000$, 検出後の相互相関に対する閾値は $\theta_3 = 0.05$ とした.

NLMS のステップサイズ μ は経験的に求めた最良の収束特性となる 0.03 とした. なお, 入力信号パワー $|\mathbf{x}(n)|^2$ が小さい時に適応フィルタの学習を行うと不安定になるので [11], 従来法, 提案法ともに $|\mathbf{x}(n)|^2 < 1000$ の時は学習を停止している.

図 5 に, ダブルトーク時の NLMS, 従来の変ステップ (AF2), 提案法 (AF1) の係数誤差を示す. 係数誤差 $D(n)$ は, エコーパスのインパルス応答ベクトル \mathbf{h} を用いて,

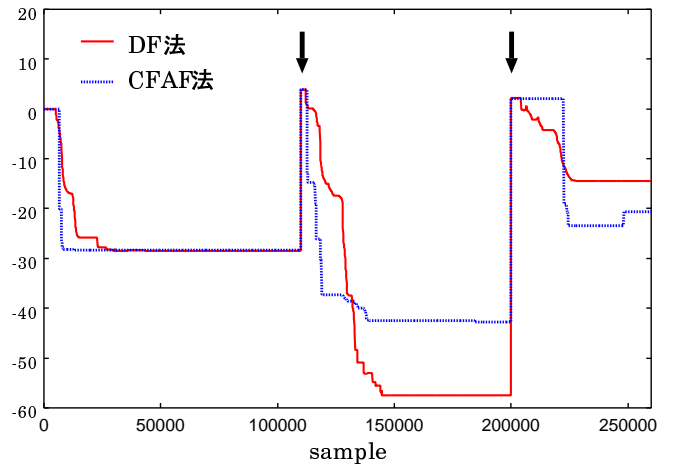


図 7: CFAV との比較

$$D(n) = 10 \log \frac{|\mathbf{h} - \mathbf{w}(n)|^2}{|\mathbf{h}|^2} \quad (29)$$

で計算される. NLMS は不安定で, 従来法 AF2 は図中の円内で係数誤差が増加しているのに対して, 提案法 AF1 は高い推定精度を保っている.

エコーパス変動時の係数誤差を図 6 に示す. 図中に矢印で示した時刻 (200000 サンプル) でエコーパスを変化させた. 提案法は従来法の約 2 倍の速度でエコーパス変動に追従している.

図 7 に, 提案法と CFAF 法のエコーパス変動時の係数誤差を示す. エコーパスを 2 回変動させている. NLMS 法に基づく提案法は, 収束速度の面では FTF を用いた CFAF にはおよばないものの, 150000 ~ 200000 サンプルでの精度は CFAF より約 20dB 高く, また, 2 回目のエコーパス変動に追従を開始するまでの時間は CFAF の約 1/4 となっている. CFAF の演算量が $9N$ のオーダーであることを考えると, $3N$ のオーダーになる提案法は演算量の点で非常に有効であるといえる.

6 むすび

エコーパス推定用の可変ステップサイズ適応フィルタとエコー除去用フィルタを組み合わせた, ダブルトーク時にも安定に動作するエコーキャンセラを提案した. エコーパスの推定には, 疑似エコーと近端音声の相互相関に基づく可変ステップサイズアルゴリズムを用いる. 短時間平均と長時間平均を組み合わせることにより, 追従速度と推定精度のトレードオフを解消している. 相互相関が低く安定した学習ができる場合のみ, フィルタ係数をエコーパス推定用フィルタからエコー除去用フィルタにコピー

する。計算機シミュレーションにより、従来の相互相関を用いた可変ステップサイズアルゴリズムに見られた検出遅延による性能劣化がほとんどみられないこと、FTFを用いたCFAF法に匹敵する性能が得られることを示した。

参考文献

- [1] Simon Haykin, “Adaptive Filter Theory Third Edition,” Prentice Hall, 1996.
- [2] J. Nagumo and A. Noda, “A Learning Method for System Identification,” IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-12, No. 3, pp. 282–287, 1967.
- [3] 佐藤 明, 田村潤三, 来山征士, “相関を利用した重畳通話検出方式,” 信学技報, CS75-136, 1975.
- [4] 来山征士, 田村潤三, 山本誠一, 石上彦一, “共通の適応制御部をもつ多重エコーキャンセラ,” 信学技報, CS78-23, 1978.
- [5] 古川博基, “適応フィルタの実用技術(3), ” 音響誌, Vol. 48, No. 7, pp. 513–516, 1992.
- [6] S. Yamamoto and S. Kitayama, “An Adaptive Echo Canceler with Variable Step Gain Method,” Trans. of IECE Japan, Vol. E65, No. 1, pp. 1–8, 1982.
- [7] A. Sugiyama, “An Interference-Robust Stochastic Gradient Algorithm with a Gradient-Adaptive Step-Size,” Proc. of ICASSP '93, Vol. 3, pp. 539–542 1993.
- [8] Hector Perez Meana, et. al., “A Time Varying Step Size Normalized LMS Echo Canceler Algorithm,” Proc. of ICASSP '94, Vol. 2, pp. 249–252, 1994.
- [9] 牛丸 晋一郎, 中山謙二, 平野晃宏, “音響エコーキャンセラにおける相互相関を考慮した可変ステップ制御法,” 第14回DSPシンポジウム講演論文集, pp.683–687, 1999.
- [10] 牛丸晋一郎, 中山謙二, 平野晃宏, “エコーと近端音声の相互相関に基づく可変ステップサイズ音響エコーキャンセラ,” 第15回DSPシンポジウム講演論文集, pp. 529–533, 2000.
- [11] A. Hirano and A. Sugiyama, “A Modified Normalized LMS Algorithm based on a Long-Term Average of the Reference Signal Power,” IEICE Trans. on Fundamentals, Vol. E78-A, No. 8, pp. 915-920, 1995.
- [12] Y. Wang, K. Nakayama, “A Combined Fast Adaptive Filter Algorithm with an Automatic Switching Method,” IEICE Trans. Vol. E77-A, No.1, pp.247–256, 1994.