

琉球大学学術リポジトリ

double-talk状態でのエコーキャンセリングを行なう 相関LMSアルゴリズムの提案

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2007-08-23 キーワード (Ja): キーワード (En): Signal processing, Echo canceling, Adaptive filter, LMS 作成者: 林, 隆広, アシャリフ, モハマッド レザー メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1486

double-talk 状態でのエコーキャンセリングを 行なう相関LMSアルゴリズムの提案

林 隆広* アシャリフ・モハマッド・レザー・*

Echo-Canceling in Double-Talk Condition by Defining Correlation LMS Algorithm

Takahiro HAYASHI* Mohammad Reza ASHARIF*

Abstract

The conventional algorithms in the echo canceling system for hand-free set mobile radio telephone have drawback when they are faced with double-talk conditions. This condition could mislead the effective algorithm in finding the echo path replica. In this paper, we have defined a new algorithm for tap adaptations in the echo canceler based on correlation function (CLMS), where the near-end signal is existing. In this approach, the gradient search algorithm is obtained from the correlation function of the input signal. That is, the tap adaptation process is performed in a newly defined correlation path, and then copied into the echo path replica digital filter. The computer simulation shows the robustness of the proposed algorithm in the presence of double-talk signal.

Key Words: Signal processing, Echo canceling, Adaptive filter, LMS

1. まえがき

スピーカとマイクの間には音響的フィードバックのある hand-free 移動体電話やテレビ会議システム等では通信音声の質がひどく劣化してしまう。これは、ある空間内においてスピーカから出力された音声信号が壁などに反射したエコー成分により引き起こされる [1],[2]。このエコー成分をキャンセルするために適応 FIR フィルタによって疑似エコーを作成する方法が用いられるがエコー成分のインパルス応答長が大きいとフィルタの多くのタップ更新を必要とし、計算量、計算時間ともに大きくなってしまふことが現状である。

これまでの LMS(Least-Mean-Square),BLMS(Block-LMS)[3],[4],FBAF (Frequency-Bin-Adaptive-Filter) (参考文献 [3],[4] の筆者によって提唱されたアルゴリズム) といったアルゴリズムはエコーキャンセラのタップ係数更新に幅広く利用されている。しかしながらこれらのアルゴリズムは、far-end からの入力のみがある状態 (single-talk 状態) ではスムーズなエコーキャンセリングを行なうが、near-end と far-end の両方に信号が存在する場合 (double-talk 状態) では、理想的な収束結果を得ることは困難である。従来法では、double-talk 状態においては係数更新を行わず、double-talk 前の係数を保持する方法をとっている。

タップ係数の更新の停止は、更新スピードを遅らせるという結果をまねく上に、double-talk 問題の解決としては消極的である。参考文献 [5],[6],[8] では、double-talk 問題の解決方法を提案しているが、計算方法が非常に複雑である。

本論文では、double-talk の状況下であるにもかかわらず、タップを固定することなく更新を続けていく新しいアルゴリズム (Correlation-LMS アルゴリズム:以下 CLMS) を提案する。この提案法は single-talk 状態においては従来の LMS とほぼかわりないものであるが、double-talk 状態でのエコーパス推定には独自の収束結果を得られた [9],[10],[11],[12],[13]。

従来法では、入力信号そのものを用いて演算を行なう代りに、提案法では、信号の相関関数を利用して演算を行なう点に大きな特徴がある。入力信号の自己相関関数とはその信号のもつ power そのものであり、いままでのアルゴリズムが信号そのものを適応フィルタに通していたことからすると、大きく異なる処理方法である。本理論の背景には、far-end 信号と near-end 信号とが相互関係を持たないということ为前提としており、仮にタップの係数更新が相関関数を基礎とした演算による導出であっても、従来法以下の収束精度になることはない。CLMS の生命線ともいえる相関関数を求めるにあたり、ここでは忘却係数を用いて相関をとる演算法を用いる。

本アルゴリズムの本質は、従来の double-talk 問題を解決するアルゴリズムに比べ、複雑さと計算量が非常に少ないことである。この点でいえば、提案法は LMS アル

受理: 1998 年 11 月 31 日

電気情報通信学会において平成 10 年 12 月発表済

*工学部情報工学科

(Dept. of information Engineering, Fac. of Eng.)

ゴリズムに最も近いことが言える。5章でのコンピュータシミュレーションでは、今回定義した CLMS アルゴリズムが double-talk の環境にある場合でもロバストな収束を残しているのに対し、Normalized-LMS が同条件下において発散している様子をいくつか示している。本論文では、以下より2章では echo-canceling の背景、3章では LMS の目的と構成と double-talk のシステムと問題点を説明し、4章では本文で提案する correlation-LMS アルゴリズムの説明を行なう。5章では本アルゴリズムの有効性をシミュレーションで確認、最後に6章でまとめと今後の研究課題を述べる。

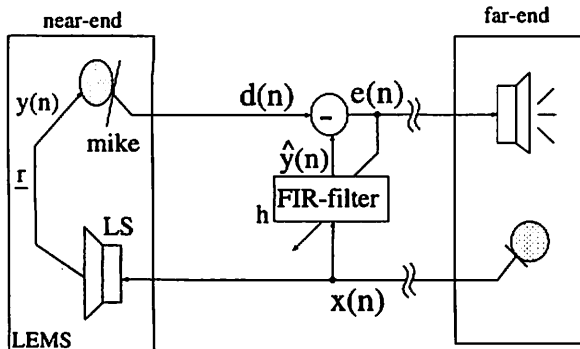
2 Echo-canceling background

2.1 Echo-canceling system

図1に echo-canceling のシステム図を示す。x(n):入力信号,d(n):所望信号,y(n):フィルタ出力信号,e(n):エラー信号とする。このとき、 $e(n) = d(n) - \hat{y}(n)$ を最小にすることが、echo-canceling の目的である。以下に式を示す。:

$$\begin{aligned}
 J &= E[e^2(n)] \\
 &= \sum_{k=0}^n e^2(k) \\
 &= \sum_{k=0}^n [d(k) - \hat{y}(k)]^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

・Jは平均自乗誤差,Eは期待値演算を示す。



LS:Loud Speaker

LEMS:Loudspeaker-Enclosure-Microphone-system

Fig. 1. echo-canceling system

2.2 LMS アルゴリズム

2.1で述べた平均自乗誤差 J(以下 MSE) を求めるために現在では、LMS アルゴリズムが幅広く利用されている。フィルタ係数を h_k とおくと出力 \hat{y} は:

$$\hat{y}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k x(n-k) \tag{2}$$

求める MSE は:

$$MSE = E[d(n) - \hat{y}(n)]^2 \tag{3}$$

ここで MSE の勾配を求めると

$$\nabla_k MSE = -2e(n)x(n-k) \tag{4}$$

とし、係数更新式を以下に示す:

$$\begin{aligned}
 h_k(n+1) &= h_k(n) - \mu \nabla_k MSE \\
 &= h_k(n) + 2\mu e(n)x(n-k)
 \end{aligned} \tag{5}$$

μ =ステップサイズ

この過程が LMS アルゴリズムである。

しかし、従来の LMS を用いると double-talk 状態になった場合に MSE の収束に対して悪影響を持つという性質がある。

2.3 double-talk とその問題点

これまでは far-end からの入力 x のみ (single-talk 状態) であったが、実際問題としては near-end からの入力がある場合が多い [5],[6],[8],[15]。この near-end 信号と far-end 信号の両方が同時に存在する場合は double-talk 状態である。Fig.2 でいえば s(n) が near-end 信号であり、この s(n) が存在すると所望信号 d(n) が $y(n)+s(n)$ となってしまふ。この状態になってしまふと従来の LMS や NLMS では収束スピードが遅くなるだけでなく、収束精度も悪くなってしまふという大きな問題が生じる。提案法ではこの double-talk 時の収束精度を従来法よりも向上させることに成功した。3章では提案法である CLMS の理論について説明する。

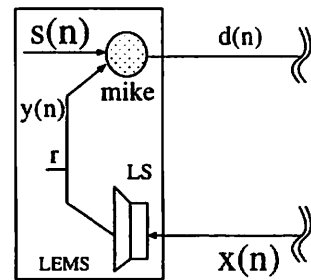


Fig. 2. double-talk 状態

3 Correlation-LMS アルゴリズム

3.1 CLMS の説明

入力データ x(n) の自己相関関数を次式で定義する:

$$\begin{aligned}
 \phi_{xx}(n, k) &= \sum_{j=0}^n x(j)x(j-k) \\
 x(j-k) &= 0; j < k
 \end{aligned} \tag{6}$$

所望応答 d(n) と入力信号 x(n) 間の相関関数もまた次式のように表せる:

$$\phi_{dx}(n, k) = \sum_{j=0}^n d(j)x(j-k) \tag{7}$$

しかし、double-talk 時において $d(n)$ は echo-signal, $y(n)$ と near-end signal, $s(n)$ の二つによって構成されているため以下の式になる。

$$d(n) = y(n) + s(n) \quad (8)$$

よってこれを (7) に代入すると

$$\begin{aligned} \phi_{dx}(n, k) &= \sum_{j=0}^n [s(j) + y(j)]x(j-k) \\ &= \phi_{sx}(n, k) + \sum_{j=0}^n y(n)x(j-k) \end{aligned} \quad (9)$$

$\phi_{sx}(n, k)$ は far-end signal, $x(n)$ と double-talk signal, $s(n)$ との相関関係である。また echo signal, $y(n)$ は以下の式で表せる。

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} r_i x(n-i) \quad (10)$$

Loudspeaker-Enclosure-Microphone-System(LEMS) のインパルス応答を r_i とする。式 (10) を用いて式 (9) を以下のように表す。

$$\phi_{dx}(n, k) = \phi_{sx}(n, k) + \sum_{i=0}^{N-1} r_i \phi_{xx}(n, |k-i|) \quad (11)$$

式 (11) で $k=0$ とすると、同式は以下のようになる。

$$\phi_{dx}(n, 0) = \phi_{sx}(n, 0) + \sum_{i=0}^{N-1} r_i \phi_{xx}(n, i) \quad (12)$$

ここで、 $\phi_{sx}(n, 0) \approx 0$ を定義する。このことは、 $x(n)$ と $s(n)$ が互いに独立した speech signal であることから容易に定義できる [14]。よって:

$$\phi_{dx}(n, 0) \approx \sum_{i=0}^{N-1} r_i \phi_{xx}(n, i) \quad (13)$$

ここで相関 LMS 適応フィルタのタップ係数を $h_i(n)$ とし定義すると次式のように書ける:

$$\hat{\phi}_{dx}(n, 0) = \sum_{i=0}^{N-1} h_i \phi_{xx}(n, i) \quad (14)$$

このことより相関 LMS 適応フィルタが順応したタップ $h_i(n)$ によって応答 $r_i(n)$ を計算していることはある意味従来の LMS アルゴリズムと同じであると言える。

また、相関関数の誤差の総和を以下のように定義する。:

$$e(n) = \phi_{dx}(n, 0) - \hat{\phi}_{dx}(n, 0) \quad (15)$$

となる。ここで適応フィルタ内のタップ係数を計算するために相関関数の最小平均 2 乗法を用いる。以下に double-talk の評価関数となる MSE を求める式を示す。:

$$MSE = E[|\phi_{dx}(n, 0) - \hat{\phi}_{dx}(n, 0)|^2] \quad (16)$$

ここで式 (13), (14), (15) を利用して式 (16) を以下のように変形する:

$$MSE = E[|e(n)|^2]$$

$$= E[|\phi_{dx}(n, 0) - \sum_{i=0}^{N-1} h_i \phi_{xx}(n, i)|^2] \quad (17)$$

MSE の勾配は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \nabla_j MSE &\doteq \frac{\partial MSE}{\partial h_j(n)} \\ &= 2E[e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial h_j(n)}] \\ &= -2E[e(n) \phi_{xx}(n, j)] \end{aligned} \quad (18)$$

それゆえに適応アルゴリズムは以下のように表せる:

$$\begin{aligned} h_j(n+1) &= h_j(n) - \mu \nabla_j [MSE] \\ h_j(n+1) &= h_j(n) + 2\mu E[e(n) \phi_{xx}(n, j)] \end{aligned} \quad (19)$$

$$0 \leq j \leq N-1$$

ここで LMS アルゴリズムと同じように、統計的な期待値演算を除いた勾配 $\nabla_j MSE$ を用いて式 (19) を以下のように表す。

$$\begin{aligned} h_j(n+1) &= h_j(n) + 2\mu e(n) \phi_{xx}(n, j) \\ 0 \leq j \leq N-1 \end{aligned} \quad (20)$$

これより $\phi_{xx}(n, i)$ と $\phi_{dx}(n, 0)$ を計算する。まず、式 (6) より:

$$\begin{aligned} \phi_{xx}(n, i) &= \sum_{l=0}^n x(l)x(l-i) \\ &= \sum_{l=0}^{n-1} x(l)x(l-i) + x(n)x(n-i) \end{aligned} \quad (21)$$

$$0 \leq i \leq N-1$$

よって

$$\begin{aligned} \phi_{xx}(n, i) &= (1-\alpha)\phi_{xx}(n-1, i) + \alpha x(n)x(n-i); \\ 0 < \alpha < 1 \end{aligned} \quad (22)$$

同様に式 (7) より

$$\begin{aligned} \phi_{dx}(n, 0) &= (1-\beta)\phi_{dx}(n-1, 0) + \beta d(n)x(n); \\ 0 < \beta < 1 \end{aligned} \quad (23)$$

式 (22)、式 (23) の係数 α 、 β は忘却係数とする。

3.2 CLMS の安定性

これより、提案法の安定性を検証する [9]。まず、以下の式を定義する。:

$$\underline{\varepsilon}(n+1) = \underline{h}(n+1) - \underline{r} \quad (24)$$

\underline{h} : 提案法が推定したエコーパスのインパルス応答列

\underline{r} : エコーパスのインパルス応答列

$\underline{\varepsilon}$: \underline{h} と \underline{r} の誤差信号

式 (24) の $\underline{\varepsilon}$ が収束すれば提案法の安定性を示せる。よつ

て、式 (20) より:

$$\begin{aligned}\underline{\varepsilon}(n+1) &= \underline{h}(n) + 2\mu e(n)\underline{\phi}_{xx}(n) - \underline{r} \\ &= \underline{\varepsilon}(n) + 2\mu e(n)\underline{\phi}_{xx}(n)\end{aligned}\quad (25)$$

$$(\underline{\phi}_{xx}(n) = [\phi_{xx}(n,0), \phi_{xx}(n,1), \dots, \phi_{xx}(n, N-1)])$$

とする。

式 (13)、式 (14)、式 (15) より、:

$$\begin{aligned}e(n) &= \sum_{i=0}^{N-1} (r_i - h_i(n))\phi_{xx}(n,i) \\ &= -\sum_{i=0}^{N-1} \varepsilon_i \phi_{xx}(n,i) \\ &= -\underline{\varepsilon}^T(n)\underline{\phi}_{xx}(n)\end{aligned}\quad (26)$$

式 (25) に式 (26) を代入する。

$$\begin{aligned}\underline{\varepsilon}(n+1) &= \underline{\varepsilon}(n) - 2\mu[\underline{\varepsilon}^T(n)\underline{\phi}_{xx}(n)]\underline{\phi}_{xx}(n) \\ &= \underline{\varepsilon}(n) - 2\mu\underline{\phi}_{xx}(n)[\underline{\phi}_{xx}^T(n)\underline{\varepsilon}(n)]\end{aligned}\quad (27)$$

よって、式 (27) は以下の式で示せる。:

$$\underline{\varepsilon}(n+1) = [\mathbf{I} - 2\mu\underline{\phi}_{xx}(n)\underline{\phi}_{xx}^T(n)]\underline{\varepsilon}(n)\quad (28)$$

ここで、以下の式を定義する。:

$$\Phi_{xx}(n) \doteq \underline{\phi}_{xx}(n)\underline{\phi}_{xx}^T(n)\quad (29)$$

式 (28)、式 (29) より、以下の式を示す。:

$$\underline{\varepsilon}(n+1) = [\mathbf{I} - 2\mu\Phi_{xx}(n)]\underline{\varepsilon}(n)\quad (30)$$

よって、 $\underline{\varepsilon}$ が収束するためには、式 (30) の Φ の固有値の最大値 λ_{max} と μ の間に以下の関係が成り立てば良い:

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{max}}\quad (31)$$

さらに、

$$\begin{aligned}\lambda_{max} &< \text{tr}\Phi_{xx}(n) \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} \phi_{xx}^2(n,j)\end{aligned}\quad (32)$$

・ tr はトレース演算を表す。

式 (32) より、 $\underline{\varepsilon}$ が収束するための条件は、以下のようになる。:

$$\mu \leq \frac{1}{1 + \|\underline{\phi}_{xx}(n)\|^2}\quad (33)$$

ill condition を防ぐために、分母に 1 を加える。

以上のことより、提案法の適応フィルタのタップ係数更新を以下に示す。

$$\begin{aligned}h_j(n+1) &= h_j(n) + \frac{2\mu_0}{1 + \|\underline{\phi}_{xx}\|^2} e(n)\phi_{xx}(n,j) \\ 0 < \mu_0 < 1\end{aligned}\quad (34)$$

上式は NLMS(Normalized-LMS) アルゴリズムに非常によく似ている。その式を以下に示す。:

$$h_j(n+1) = h_j(n) + \frac{2\mu_0}{1 + \|\underline{x}\|^2} e(n)x(n-j)\quad (35)$$

$$(\mathbf{X} = [x(n,0), x(n,1), \dots, x(n, N-1)]^T)$$

提案法が CLMS と呼ばれるのは参考文献 [9],[10],[11],[12] および [13] を参照している。

図 3 よりエコーキャンセラの出力は以下の式で求められる

$$\hat{s}(n) = d(n) - \hat{y}(n)$$

$$\hat{s}(n) = d(n) - \sum_{j=0}^{N-1} h_j(n)x(n-j)\quad (36)$$

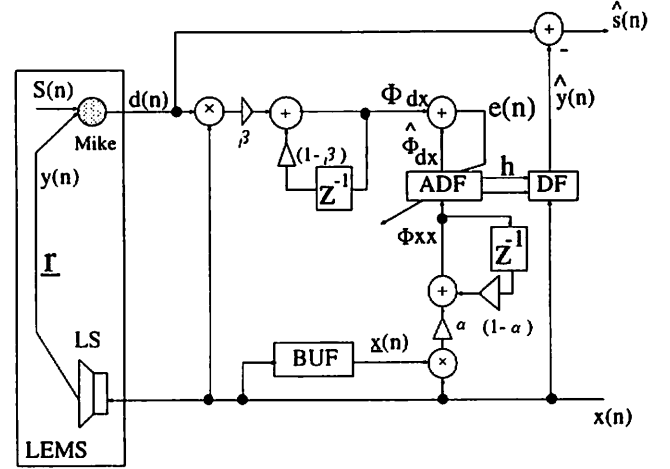


Fig. 3. CLMS system

4 シミュレーション結果

4.1 各数値の設定

エコーのインパルス応答 r_i を以下のように定義する:

$$r_i = v_i[\exp(-8i/N)]\quad (37)$$

・ v_i は白色信号

式 (37) でエコーパスを有色化する。今回のシミュレーションでは、入力信号と double-talk 信号も有色信号を用いる。また、本アルゴリズムの収束の測定は以下の式により評価する。:

$$D(n) = 10\log_{10}\left[\frac{\sum_{i=0}^{N-1} |r_i - h_i(n)|^2}{\sum_{i=0}^{N-1} |r_i|^2}\right]\quad (38)$$

4.2 シミュレーション結果

これより、CLMS アルゴリズムの収束精度の優位性を確認するために行なったシミュレーション結果を 3 つ示す。

Correlation-LMS と Normalized-LMS を double-talk の状態で起動させたときの収束精度について比較した結果を図 4 に示す。CLMS 起動時は忘却係数の値を 0.1, NLMS 起動時には同係数値を 1 として比較を行なった。その結果、NLMS ではまったく収束していなかった $D(n)$ が CLMS では約 -9dB の収束結果を残している。このことから CLMS が従来法より優位性があることがわかる。

図 3 では single-talk 状態から double-talk 状態へ移り、さ

らに single-talk 状態へ戻ったときの CLMS と NLMS との比較を行なった。この図は $n=800$ で double-talk 状態になり、 $n=1500$ でまた single-talk 状態へ戻ったという場合のシミュレーション結果である。図から CLMS は、double-talk 状態になったときでさえも $-20\text{dB} \sim -15\text{dB}$ ほどの収束を保っているが、NLMS では収束精度をまったく失っているのが確認できる。このシミュレーションでは CLMS の忘却係数 α 、 β の値を double-talk 状態のときは 0.1 、single-talk 状態では 1 と変化させて実験している。

さらに図 6 では double-talk 状態になった場合に、エコーパスも変化させるという実験の結果を示している。この状態は、echo-canceller にとって最も厳しい状況であるといえるというのはこれまでの説明から容易に推測できる。この状態にあっても CLMS アルゴリズムは $-15\text{dB} \sim -10\text{dB}$ の収束精度を誇っていることが、このシミュレーションから確認できる。

5 まとめ

本論文では、エコーキャンセリングシステムにおいて、double-talk 状態でもタップ係数更新を行なう新しいアルゴリズム (CLMS) を提案した。提案法では、入力信号そのものを用いる代わりに、入力信号の自己相関関数を持ちいてエコーパスの推定を行なった。それゆえに、double-talk 状態でもタップ係数を固定することなく、エコーパスの推定を行なうことが可能となり、スムーズなエラー信号の収束が得られた。さらにコンピュータシミュレーションでは、理想的な結果を得ることができ、提案法の優位性を示した。今後の課題としては、CLMS を用いた周波数領域でのエコーパス推定や、実時間での処理などが挙げられる。

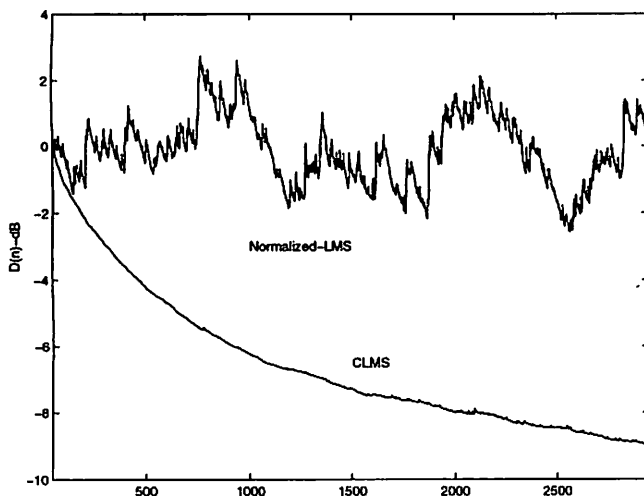


Fig. 4. Normalized-LMS と CLMS の比較

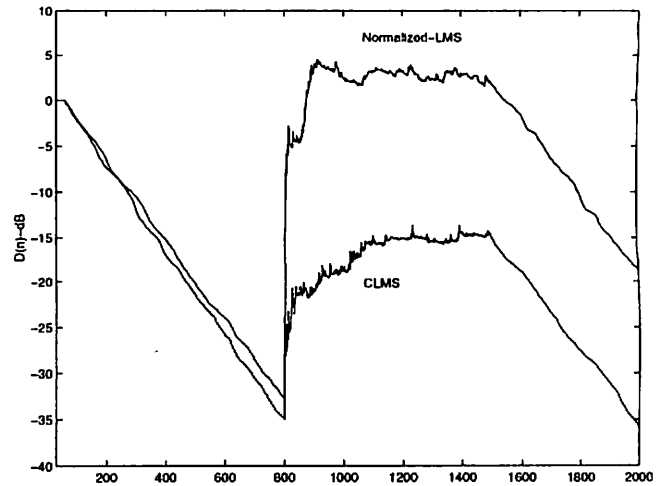


Fig. 5. アルゴリズム起動中に double-talk 状態になった場合の両アルゴリズムの動作

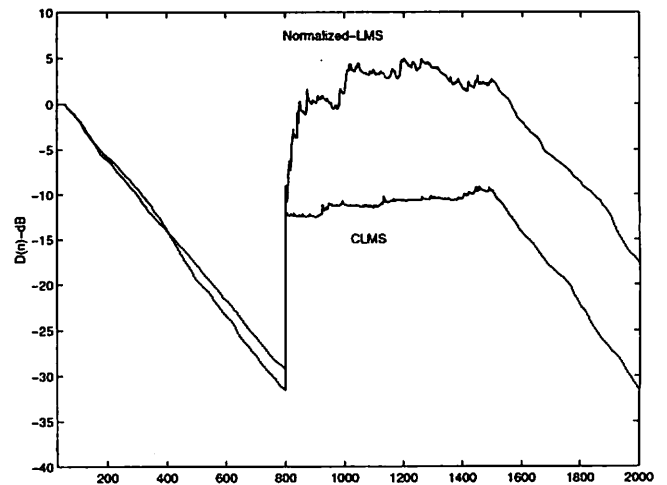


Fig. 6. double-talk 状態になると同時にエコーパスも変化した場合の両アルゴリズムの動作

参考文献

- [1] Hansler.E, "The hand-free telephone problem: An annotated bibliography update," Signal Process, vol 27, no.3, pp.259-271, June 1992.
- [2] K.Murano, s.Unagami, F.Amano, " Echo Cancellation and Application," IEEE Communication magazine, June.1990.
- [3] M.R.Asharif, F.Amano "Acoustic echo canceler using FBAF algorithm," IEEE Transaction on Communications, Vol.42, No12, pp.3090-3094, Dec.1994.
- [4] M.R.Asharif, F.Amano "Hardware implementation of acoustic echo canceler based FBAF algorithm," in Book of IEEE Workshop on VLSI Signal Processing, San-Diego, California, pp.191-200, vol.1990.
- [5] P.Heitkamper, "An adaptation control for acoustic echo cancellers," IEEE Signal Processing Letters, Vol4, No6 pp.170-172, june 1997.
- [6] T.Gansler, "A double-talk resistant subband echo canceller," Elsevier Signal Processing 65, pp.89-101, 1998.
- [7] M.R.asharif and F.amano, "Frequency Bin Adaptive Filtering(FBAF) Algorithm and its application toAcoustic Echo

- Cancelling,"IEICE Trans.on Com.vol.E74(NO.8), pp.2276-2283, Aug.1991.
- [8] H.Ezzaidi, I.Bourmeyster, J.Rouat,"A new algorithm for double talk detection and separation in the context of digital mobile radio telephone," in the Processings IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing ICASSP Vol.3, pp.1897-1990, April 1997.
 - [9] A.Rezapour, M.R.Asharif,"Introduction of CLMS algorithm for adaptive FIR filter based on correlation functions," in Journal of Engineering of the Engineering Faculty, University of Tehran, Vol.30, No1, pp.1-8, June 1997.
 - [10] M.R.Asharif, A.rezapour,"Double-talk echo canceling based on correlation LMS algorithm," in the Proceedings 50-th Joint Conference of Electrical and Electronics Engineers of Kyusyu, in the University of the RyuKyus, Okinawa, Japan, 811, p.361, Oct 1997.
 - [11] M.R.asharif, A.Rezapour, H.ochi,"Correlation LMS algorithm for double-talk echo canceller,"in the Proceedings of IEICE National Conference, Japan, A-4-13 p.122, March 1998.
 - [12] M.R.Asharif,"Double-Talk Echo Canceller with non-freezing Taps," patents, FujithuLabf.Japan, March.1990.
 - [13] A.A.Rezapour, M.R.Ashari, "CLMS Algorithm for Adaptive FIR Filter based on Correlation Functions,"Fifth Iranian Conference on Electrical Engineering ICEE, May, 1997.
 - [14] A.Paponlis,"probability, random variables, and stochastic processes,"M.C.Grow-Hill International Editions. Third Edition, 1991.
 - [15] A.Rezapour, M.R.Asharif,"Double-Talk Echo Cancelling using Adaptive Digital Filters: performance study of Conventional Algorithm and Introducing an Effective Algorithm," Fourth Iranian conference on Electrical Engineering ICEE May,1996.