

改良NLMS (Improved NLMS) アルゴリズムを用いた エコー・キャンセラのシミュレーション例

(有) ケプストラム

<http://www.cepstrum.co.jp/>

シミュレーションの概要

■ 比較対象

- ・ 下記の4種類のアルゴリズムを用いたエコー・キャンセラのシミュレーションをおこなった。
 - (A) 従来のNLMS (Conventional NLMS, Geigelのアルゴリズムを用いたDTD処理を併用)
 - (B) 従来のNLMS (Conventional NLMS, 当社独自のDTD処理を併用)
 - (C) 改良NLMS (Improved NLMS, DTD無し)
 - (D) 改良NLMS (Improved NLMS, DTD処理を併用)
- ・ (A), (B), (D)ではダブルトーク検出処理 (DTD, Double Talk Detector) を使い、ダブルトーク状態と判定された区間では適応フィルタ係数の更新を停止した。
- ・ (B)に用いたDTDは、Geigelのアルゴリズムより演算量が多いが、相互相関を用いた処理法より演算量の少ない当社独自のものである。
- ・ 適応フィルタのステップサイズ・パラメータ μ 、DTDのダブルトーク判定の閾値はそれぞれ最適な値に設定して、シミュレーションをおこなった。
- ・ 信号レベルの設定等は必ずしも現実のアプリケーション例と一致するものではないが、同一条件で各アルゴリズム相互の特性比較をおこなうのには問題は無い。

■ シミュレーション結果

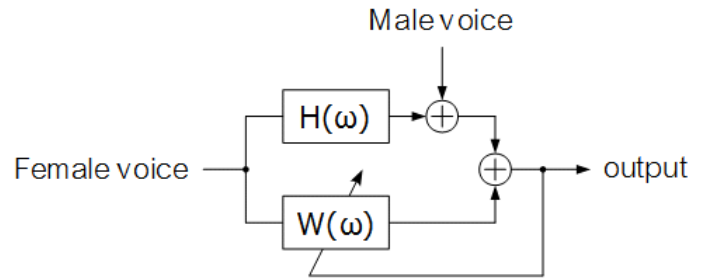
- ・ DTD付き改良NLMSアルゴリズム(D)を用いたエコー・キャンセラがもっともエコー抑圧特性が良い。従来のNLMS(A), (B)と比較して、聴感上検知されにくい $F_s/2$ 近くの高域ではエコー抑圧量が低下するが、低～中音域の抑圧量が大い。 (10dB～20dB近い差)
- ・ DTDを用いない改良NLMSアルゴリズム(C)でも、従来技術(A), (B)より良好なエコー抑圧量が得られる。
- ・ 改良NLMSでも、ダブルトーク状態中にエコー抑圧量が従来技術のNLMS程度まで低下する場合があるがその期間は短く、ダブルトークが無くなればすみやかにエコー抑圧量は回復する。
- ・ 従来のNLMSアルゴリズムを用いた場合でも、当社独自のDTD処理を用いれば、Geigelのアルゴリズムよりもエコー抑圧特性が改善される。

なお、改良NLMSアルゴリズムは、従来のNLMSアルゴリズムの理論的に自然な拡張になっている。ダブルトークに起因する適応フィルタ特性の擾乱に対しては堅牢であるが、音響系のインパルス・レスポンスの急激な変動に追従する収束速度が大幅に向上するわけではない。

本資料中に表記したステップサイズ・パラメータ μ の値は、あくまでも使用したシミュレーションプログラムの実装に依存したもので、値そのものを他と比較することは出来ない。

■ シミュレーション例（１）

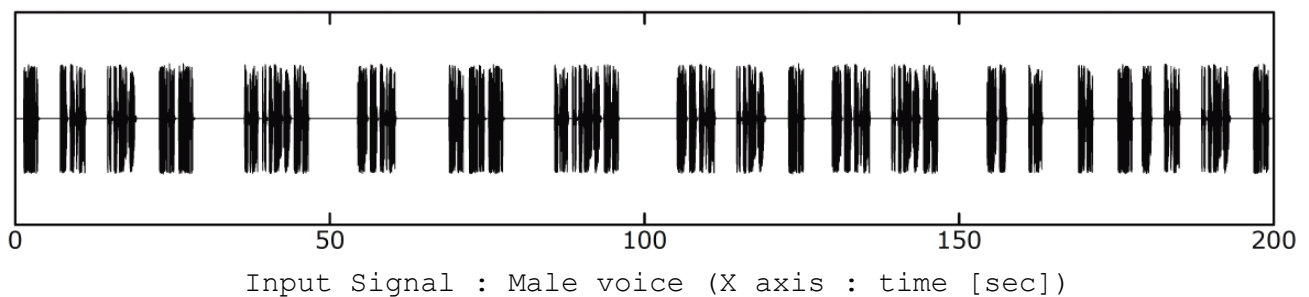
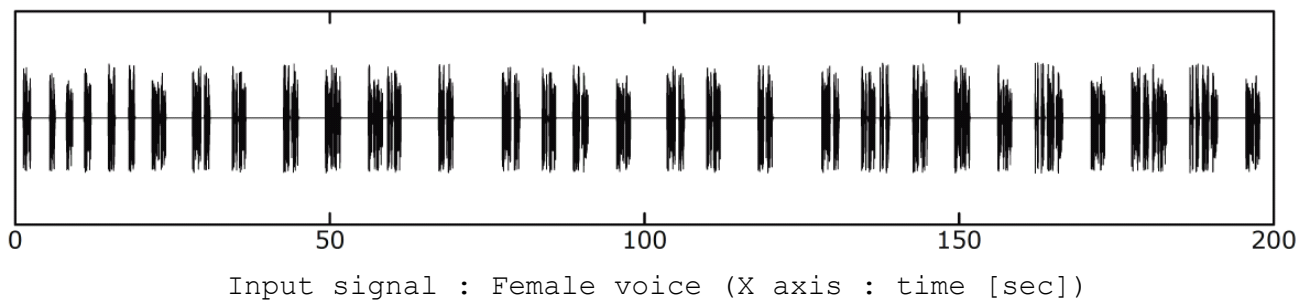
- ・ TSP（Time Stretched Pulse）を音響系 $H(\omega)$ のインパルス・レスポンスとして使用した（128サンプル）
- ・ 50秒ごとに $H(\omega)$ を変化させた（0.5サンプル分の群遅延を追加）
- ・ 適応フィルタ $W(\omega)$ は128tap
- ・ サンプル周波数8kHz
- ・ 下記の４種類のアプローチを比較した



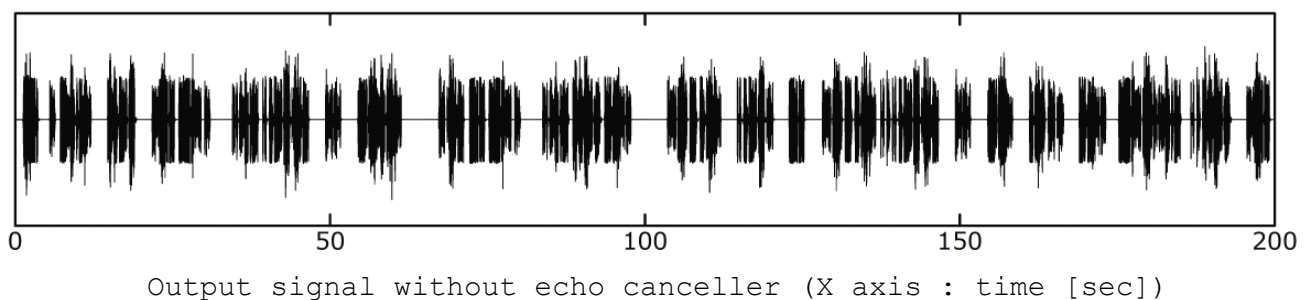
- (A) 従来のNLMS（Conventional NLMS, Geigelのアルゴリズムを用いたDTD処理を併用）
- (B) 従来のNLMS（Conventional NLMS, 当社独自のDTD処理を併用）
- (C) 改良NLMS（Improved NLMS, DTD無し）
- (D) 改良NLMS（Improved NLMS, DTD処理を併用）

注：DTD = Double Talk Detector

◇ 入力信号波形

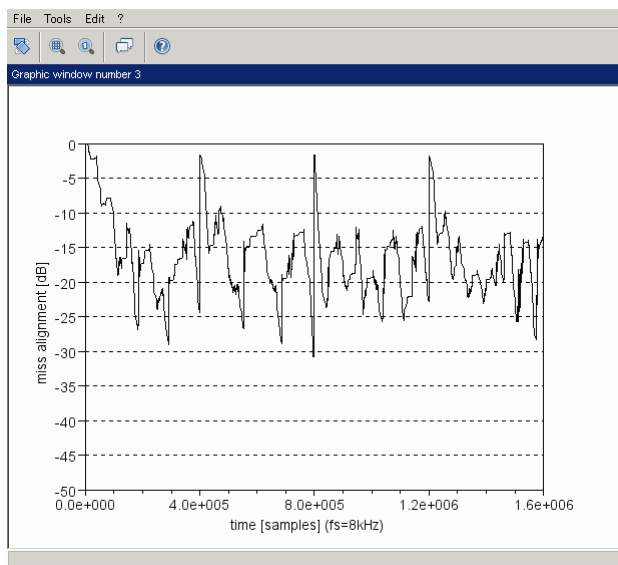


◇ エコーキャンセラ無しの状態 ($w(\omega)=0$) の出力信号波形

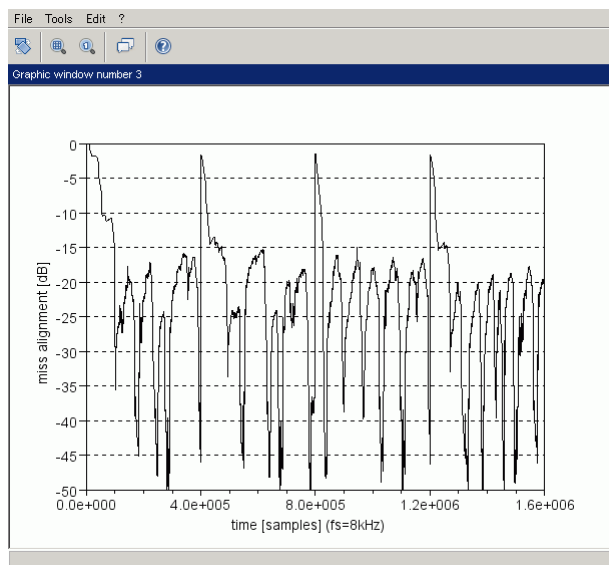


◇ 適応フィルタ係数のミス・アライメント量の変化のグラフ

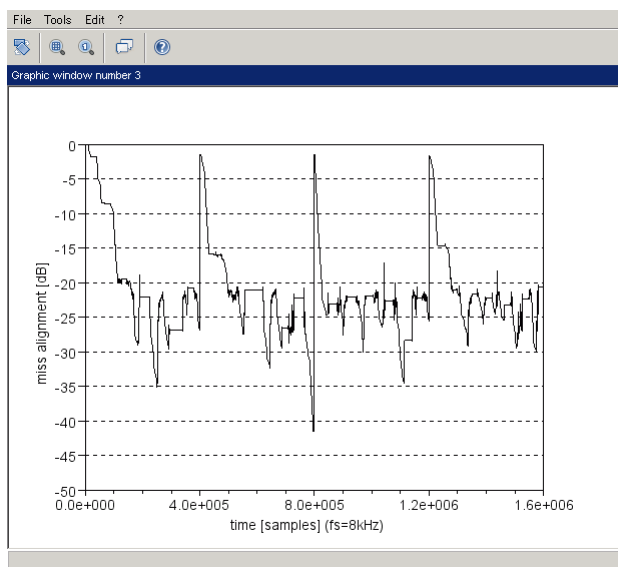
- ・ 横軸は時間（単位：サンプル）、縦軸はdB
- ・ (D)のDTD付き改良NLMS (Improved NLMS) が最も良好な収束特性を有している
- ・ このグラフからはDTD無しの改良NLMS(C)よりも、当社独自のDTD処理を併用した従来技術のNLMS(B)の収束特性の方が良いように見える



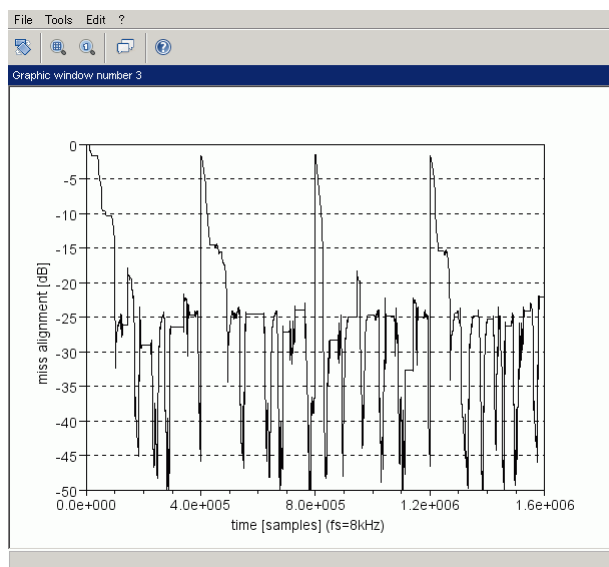
(A) Conventional NLMS
with Geigel's DTD
($\mu=0.00005$)



(C) Improved NLMS without DTD
($\mu=0.00003$)



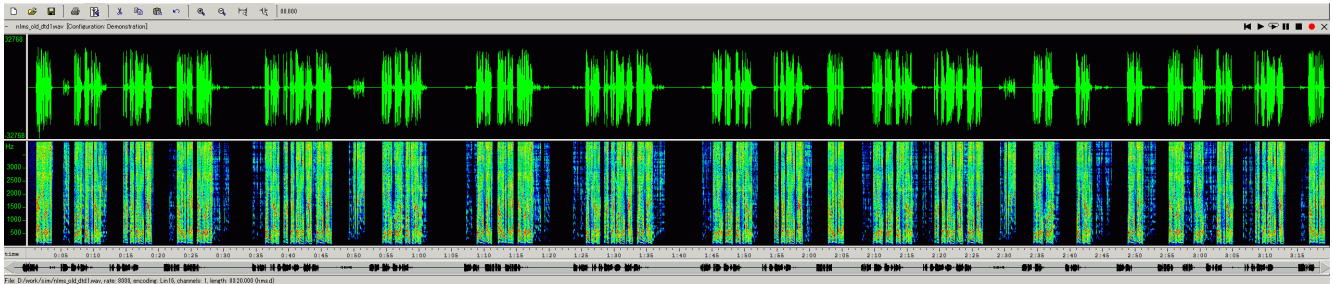
(B) Conventional NLMS
with original DTD
($\mu=0.00005$)



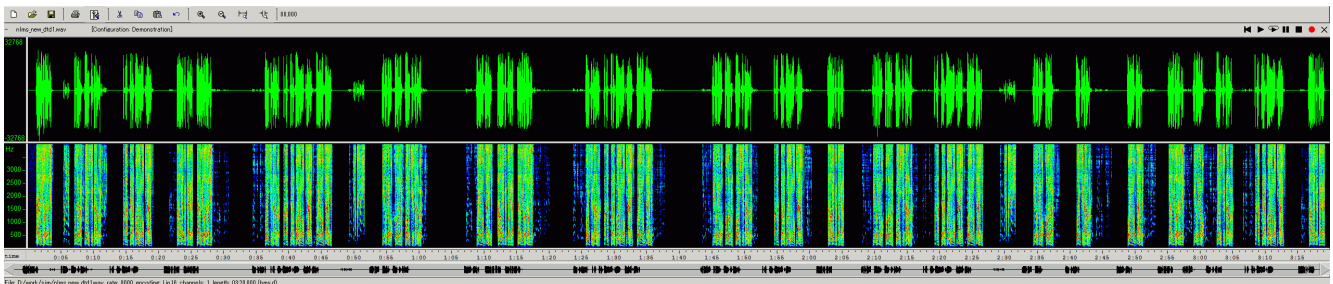
(D) Improved NLMS with DTD
($\mu=0.00003$)

◇ エコーキャンセラーの出力信号の波形とそのスペクトログラム

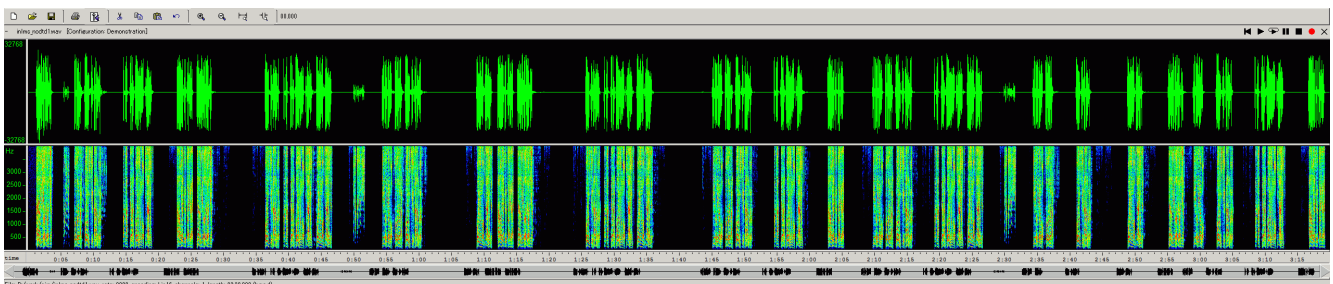
- ・ 横軸は時間（単位：分秒）
- ・ (C), (D)の改良NLMS（Improved NLMS）は従来技術のNLMS(A), (B)よりもダブルトークが無い状態でのエコー・レベルが小さい
- ・ 前ページの適応フィルタ係数のミス・アライメント量のグラフからは従来技術のNLMS(B)の方が改良NLMS(C)より特性が良いように見えるが、ダブルトーク無しの状態でのエコー・レベルは改良NLMS(C)の方が小さい
- ・ このグラフではダブルトーク状態のエコー・キャンセラの挙動の違いを判別することは出来ない



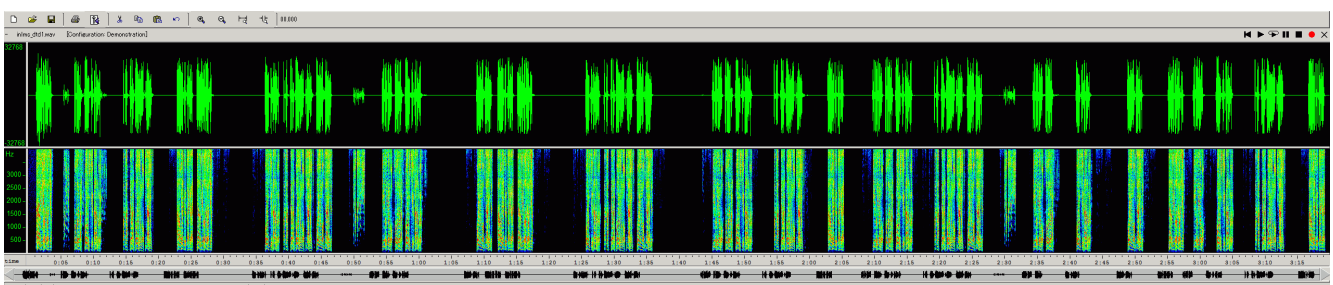
(A) Conventional NLMS with Geigel's DTD ($\mu=0.00005$)



(B) Conventional NLMS with original DTD ($\mu=0.00005$)



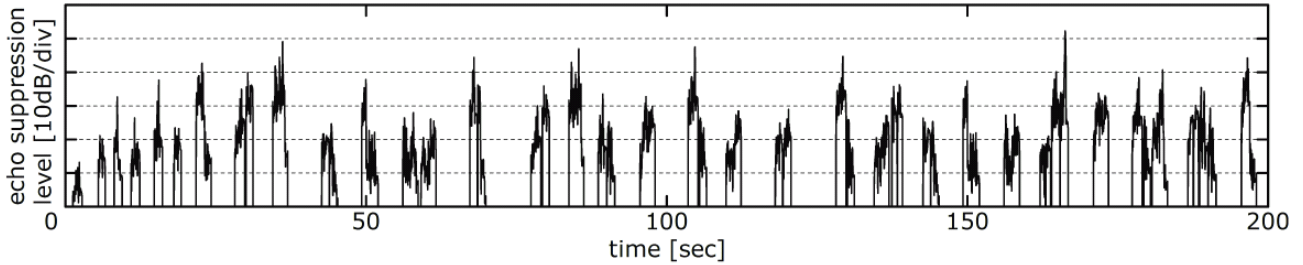
(C) Improved NLMS without DTD ($\mu=0.00003$)



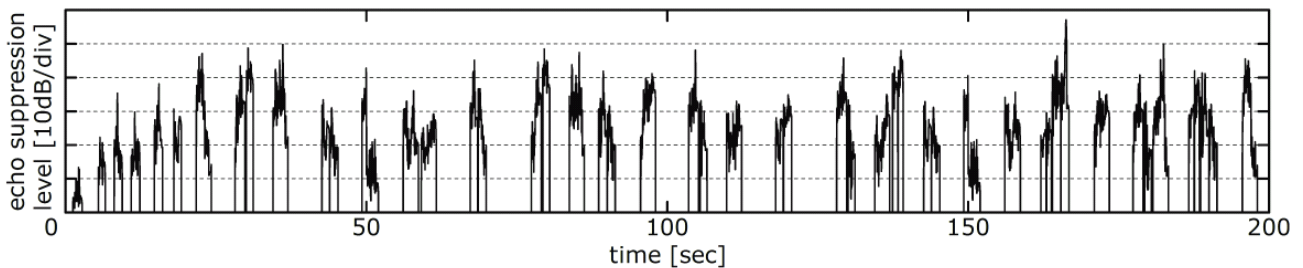
(D) Improved NLMS with DTD ($\mu=0.00003$)

◇ エコー抑圧量のグラフ

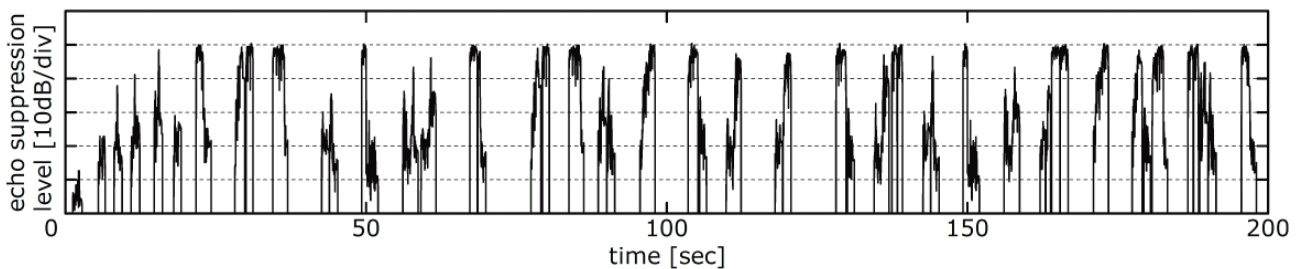
- ・従来のNLMS(A), (B)ではダブルトーク検出処理 (DTD) を併用しても、ダブルトークの悪影響を排除して良好なエコー抑圧量を維持することが出来ない
- ・改良NLMS(C), (D)はダブルトークによる適応フィルタ係数の擾乱でエコー抑圧量が低下しても、ダブルトーク状態が解消されればすみやかにエコー抑圧量が回復する
- ・改良NLMSはDTD無し(C)でもDTD処理を併用した従来のNLMS(A), (B)より特性が良い



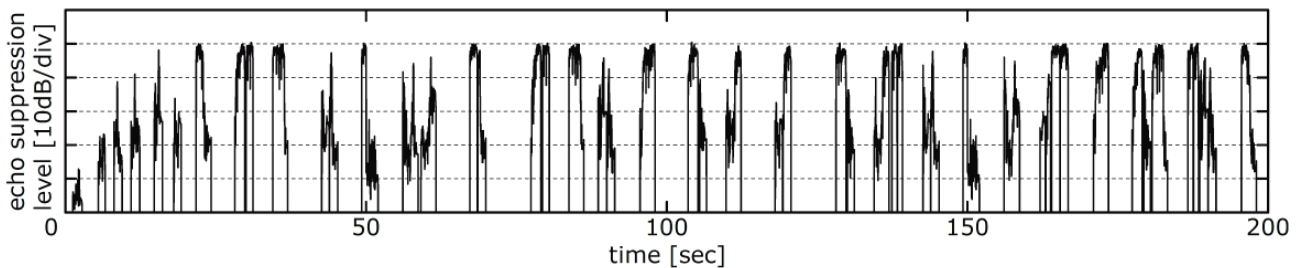
(A) Conventional NLMS with Geigel's DTD ($\mu=0.00005$)



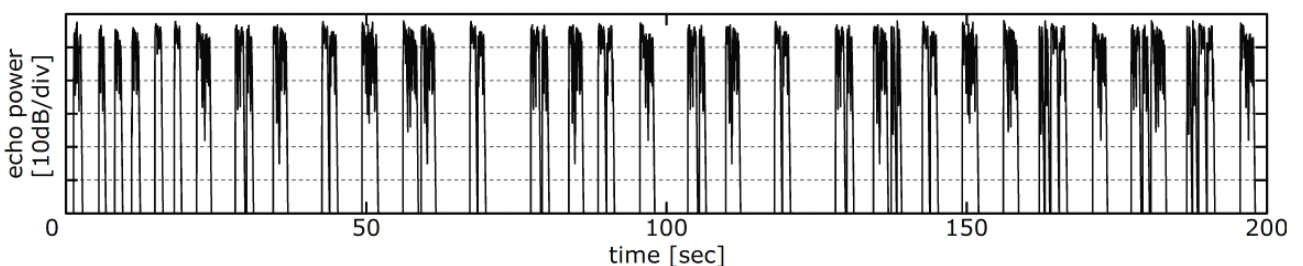
(B) Conventional NLMS with original DTD ($\mu=0.00005$)



(C) Improved NLMS without DTD ($\mu=0.00003$)



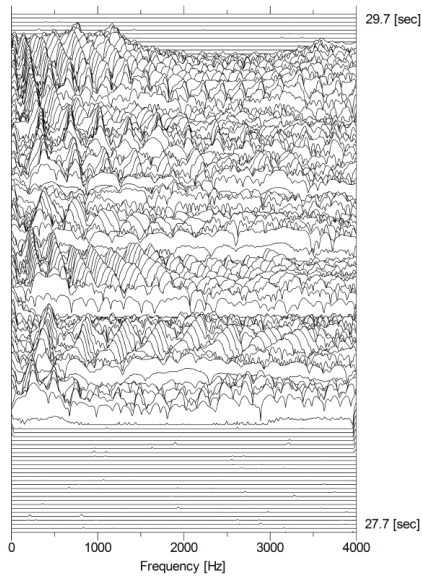
(D) Improved NLMS with DTD ($\mu=0.00003$)



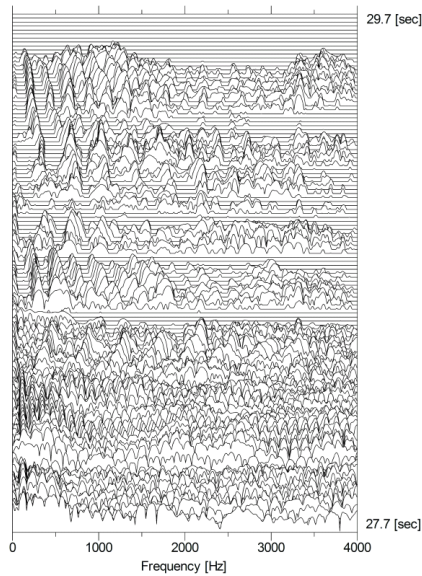
Echo signal level without echo canceller (Output of $H(\omega)$, Female voice)

◇ 入出力信号のスペクトルの3次元表示（部分）

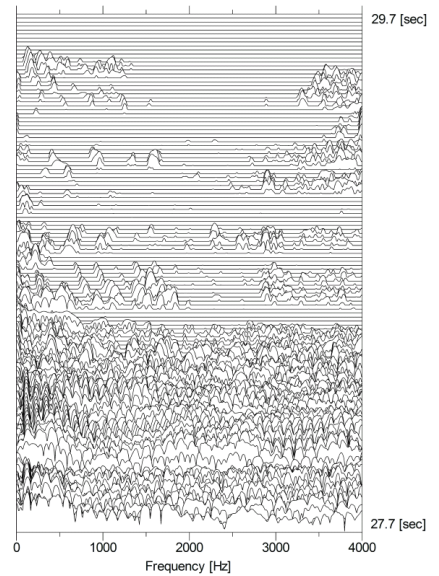
- ・ 27.7秒から29.7秒までの2秒間のデータのスペクトルの3次元表示
- ・ 適応フィルタ係数が乱される女声と男声が重なったダブルトーク状態が終わってからのエコー抑圧特性の相違を確認出来る
- ・ DTDの有無にかかわらず改良NLMS (Improved NLMS) はダブルトーク状態が終わると、すみやかに適応フィルタの収束が回復し、良好なエコー抑圧特性が得られる。 下図では特に聴感的に検知されやすい周期構造を有する有声音の低音域部分が良く抑圧されている様子が分かる。



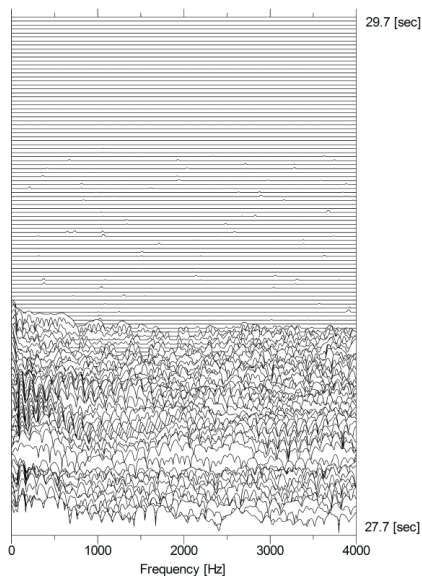
Female voice
(Input signal)



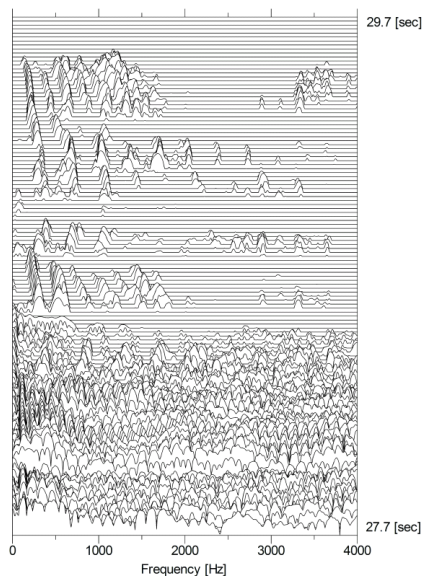
(A) Conventional NLMS
with Geigel's DTD
($\mu=0.00005$)



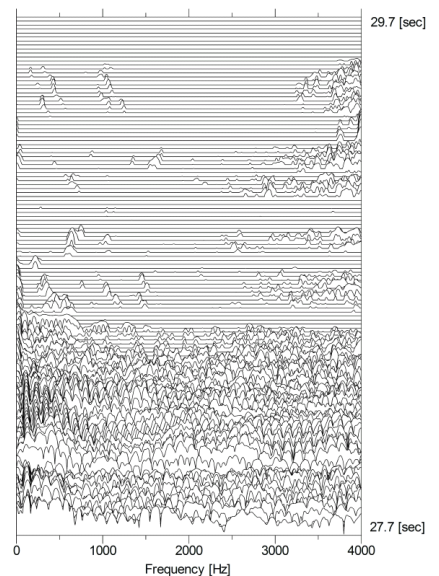
(C) Improved NLMS
without DTD
($\mu=0.00003$)



Male voice
(Input signal)



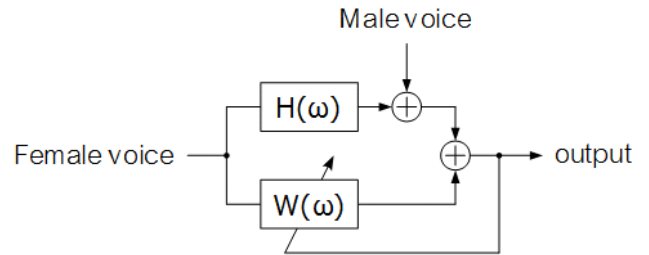
(B) Conventional NLMS
with original DTD
($\mu=0.00005$)



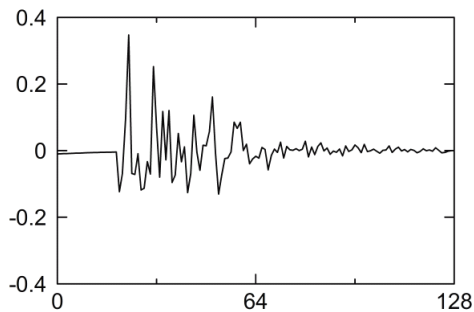
(D) Improved NLMS
with DTD
($\mu=0.00003$)

■ シミュレーション例（２）

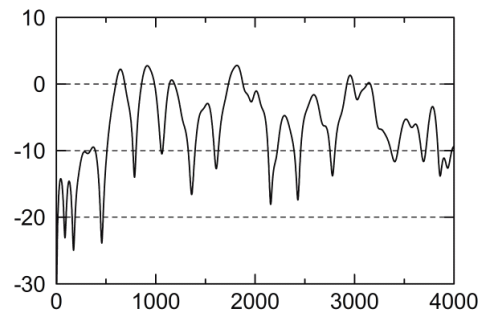
- ・ 音響系 $H(\omega)$ のインパルス・レスポンスには室内のインパルス・レスポンスに近い下図のものを使用した（ただし正確な近似ではない）
- ・ 50秒ごとに $H(\omega)$ のインパルス・レスポンスに0.5サンプル分の群遅延を追加した
- ・ 適応フィルタは128tap
- ・ サンプル周波数8kHz
- ・ 下記の4種類のアプローチを比較した



- (A) 従来のNLMS (Conventional NLMS, Geigelのアルゴリズムを用いたDTD処理を併用)
- (B) 従来のNLMS (Conventional NLMS, 当社独自のDTD処理を併用)
- (C) 改良NLMS (Improved NLMS, DTD無し)
- (D) 改良NLMS (Improved NLMS, DTD処理を併用)



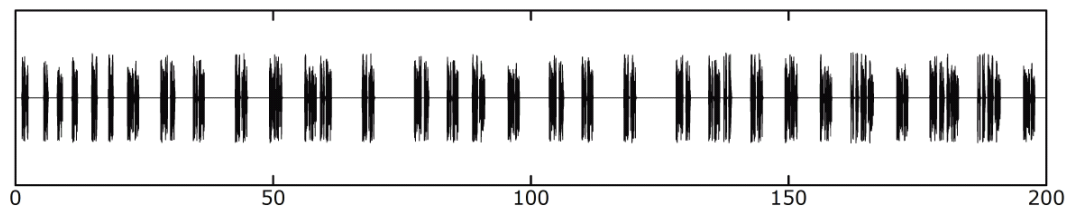
Impulse response of $H(\omega)$



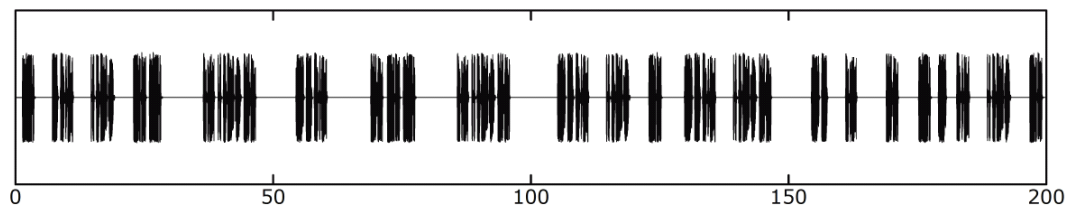
Frequency response of $H(\omega)$

X axis : Frequency [Hz]

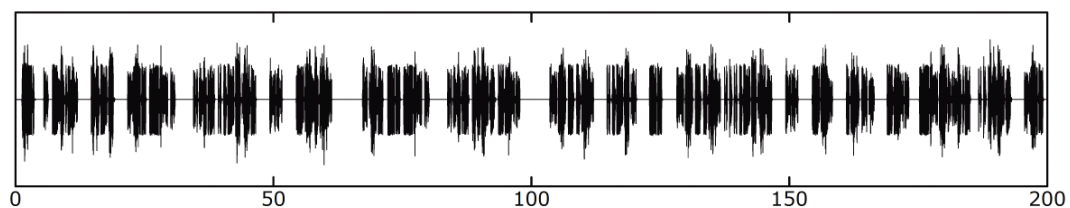
Y axis : Amplitude [dB]



Input signal : Female voice (X axis : time [sec])



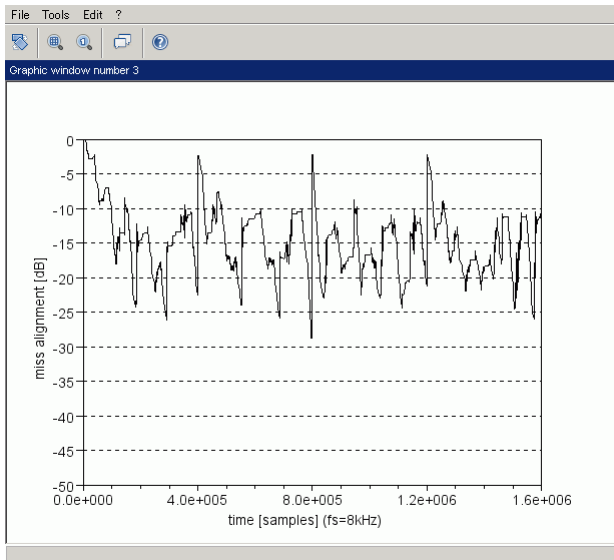
Input signal : Male voice (X axis : time [sec])



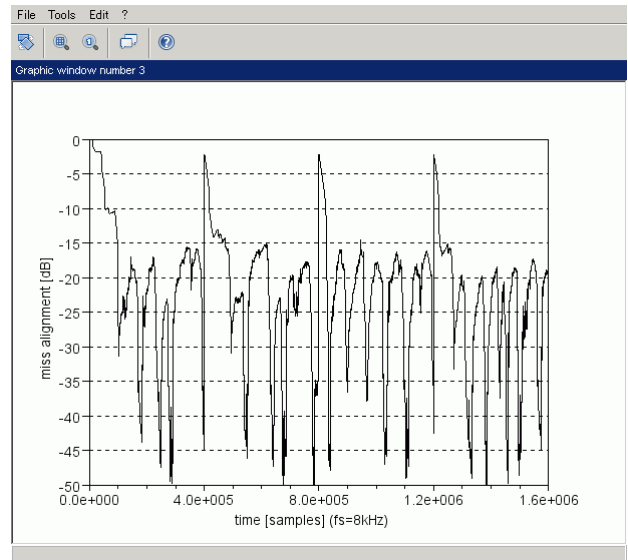
Output signal without echo canceller (X axis : time [sec])

◇ 適応フィルタ係数のミス・アライメント量の変化のグラフ

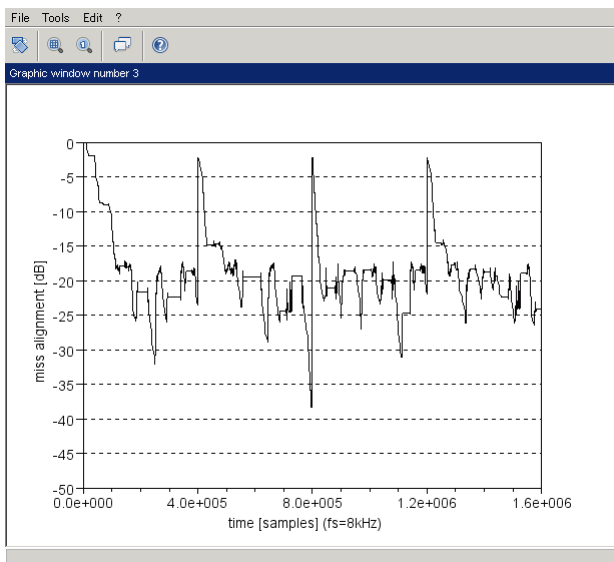
- ・ 横軸は時間（単位：サンプル）、縦軸はdB
- ・ (D)のDTD付き改良NLMS (Improved NLMS) が最も良好な収束特性を有している
- ・ このグラフからはDTD無しの改良NLMS(C)よりも、当社独自のDTD処理を併用した従来技術のNLMS(B)の収束特性の方が良いように見える



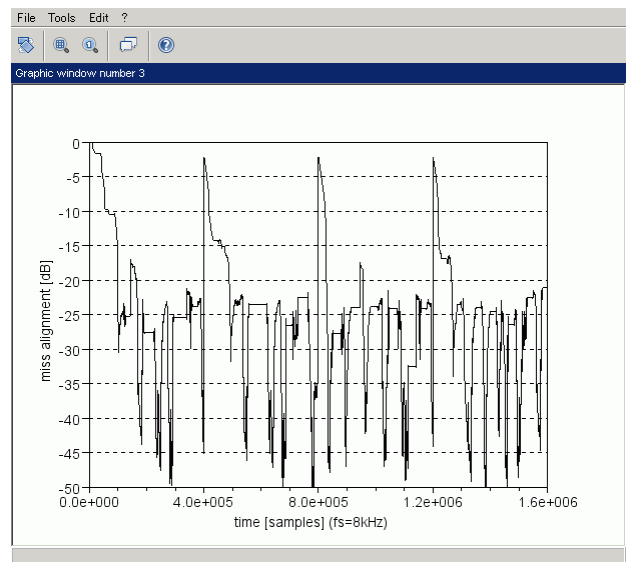
(A) Conventional NLMS
with Geigel's DTD
($\mu=0.00005$)



(C) Improved NLMS without DTD
($\mu=0.00002$)



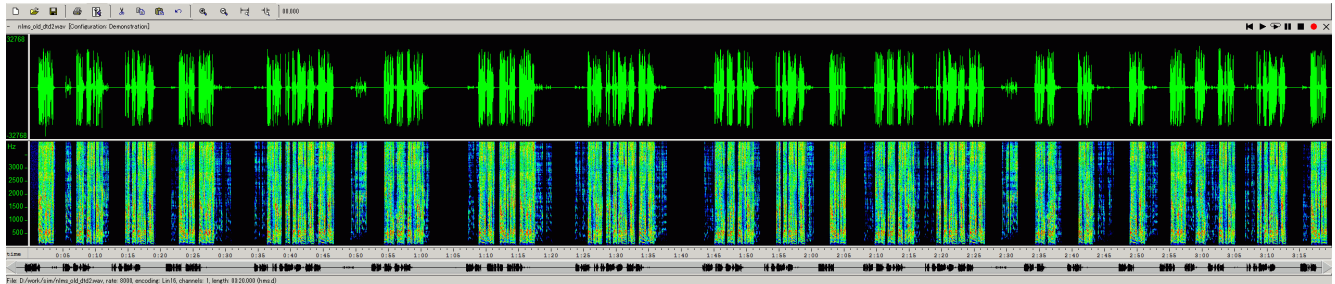
(B) Conventional NLMS
with original DTD
($\mu=0.00005$)



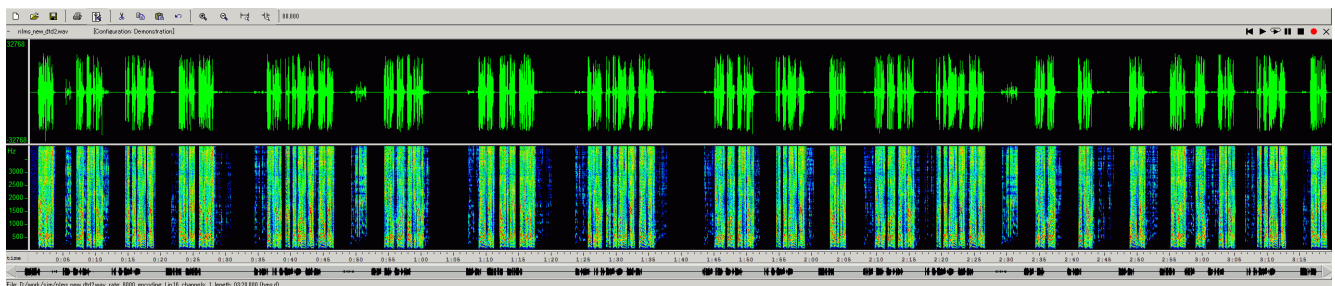
(D) Improved NLMS with DTD
($\mu=0.00002$)

◇ エコーキャンセラーの出力信号の波形とそのスペクトログラム

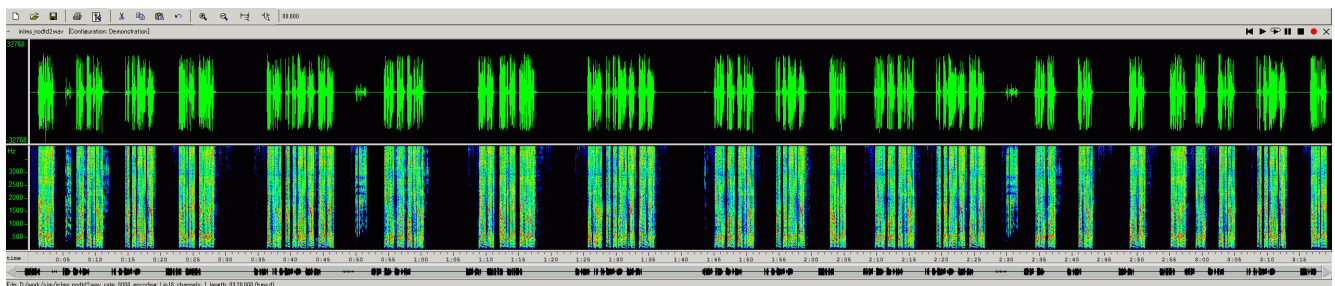
- ・ 横軸は時間（単位：分秒）
- ・ (C), (D)の改良NLMS（Improved NLMS）は従来技術のNLMS(A), (B)よりもダブルトークが無い状態でのエコー・レベルが小さい
- ・ 前ページの適応フィルタ係数のミス・アライメント量のグラフからは従来技術のNLMS(B)の方が改良NLMS(C)より特性が良いように見えるが、ダブルトーク無しの状態でのエコー・レベルは改良NLMS(C)の方が小さい
- ・ このグラフではダブルトーク状態のエコー・キャンセラの挙動の違いを判別することは出来ない



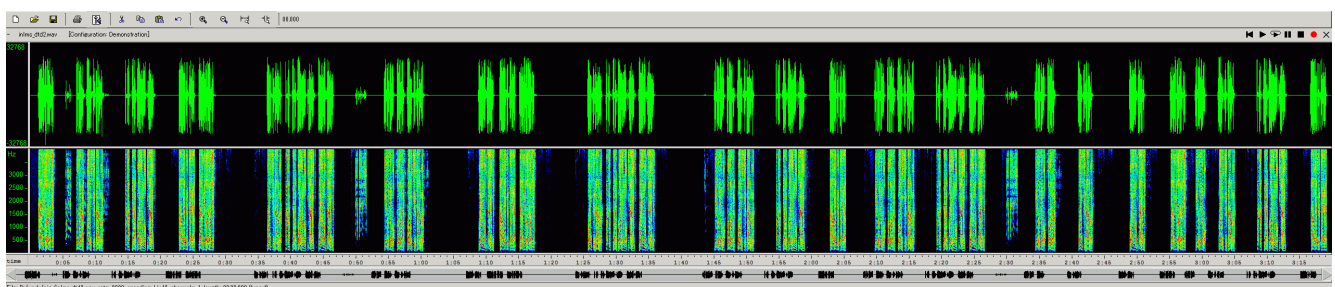
(A) Conventional NLMS with Geigel's DTD ($\mu=0.00005$)



(B) Conventional NLMS with original DTD ($\mu=0.00005$)



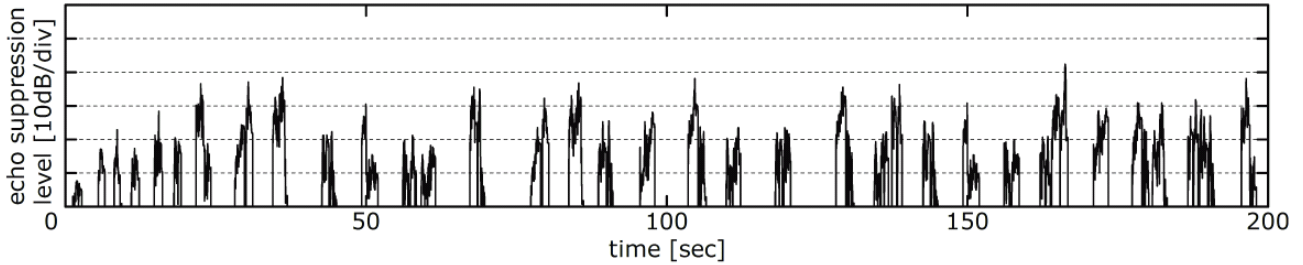
(C) Improved NLMS without DTD ($\mu=0.00002$)



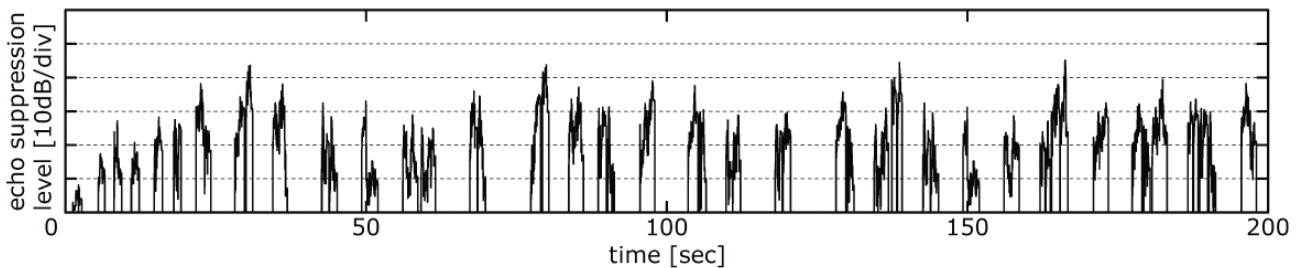
(D) Improved NLMS with DTD ($\mu=0.00002$)

◇ エコー抑圧量のグラフ

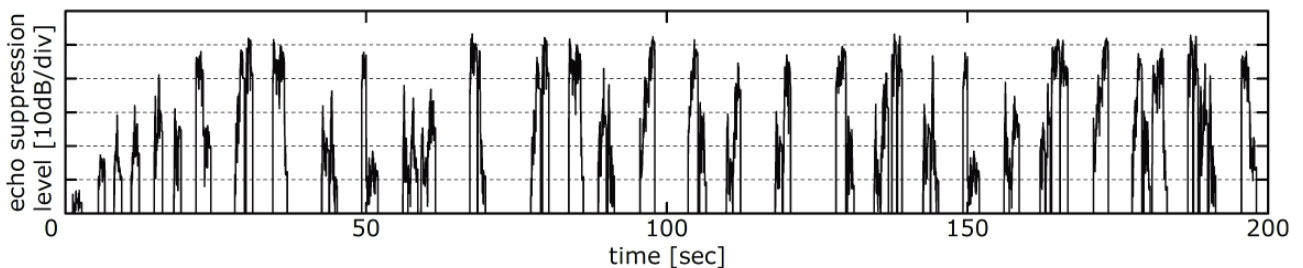
- ・従来のNLMS(A), (B)ではダブルトーク検出処理 (DTD) を併用しても、ダブルトークの悪影響を排除して良好なエコー抑圧量を維持することが出来ない
- ・改良NLMS(C), (D)はダブルトークによる適応フィルタ係数の擾乱でエコー抑圧量が低下しても、ダブルトーク状態が解消されればすみやかにエコー抑圧量が回復する
- ・改良NLMSはDTD無し(C)でもDTD処理を併用した従来のNLMS(A), (B)より特性が良い



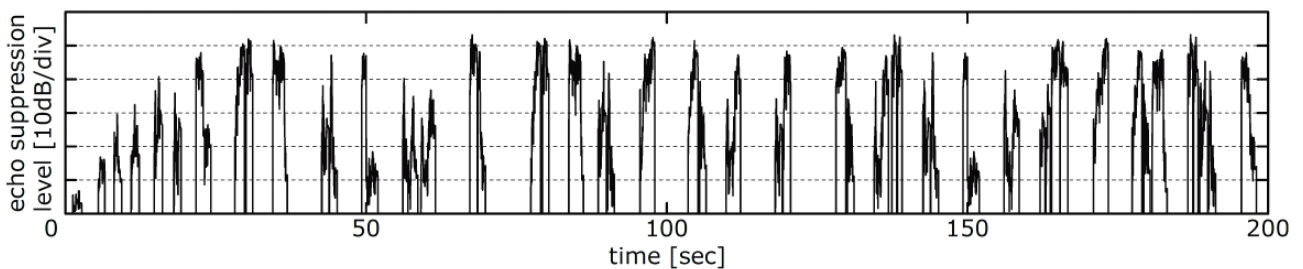
(A) Conventional NLMS with Geigel's DTD ($\mu=0.00005$)



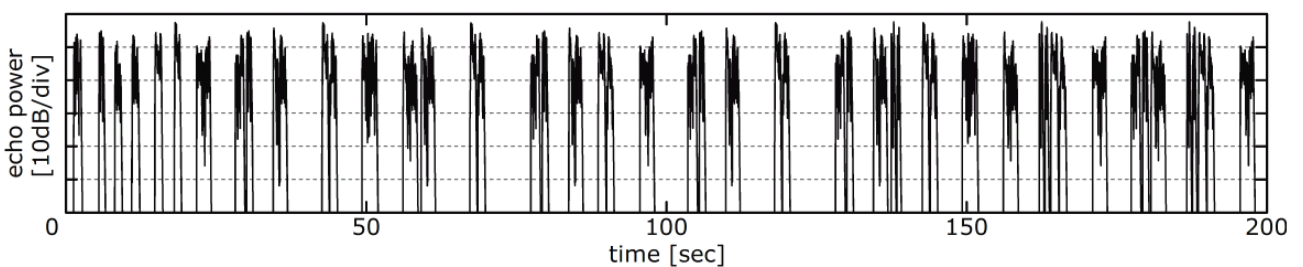
(B) Conventional NLMS with original DTD ($\mu=0.00005$)



(C) Improved NLMS without DTD ($\mu=0.00002$)



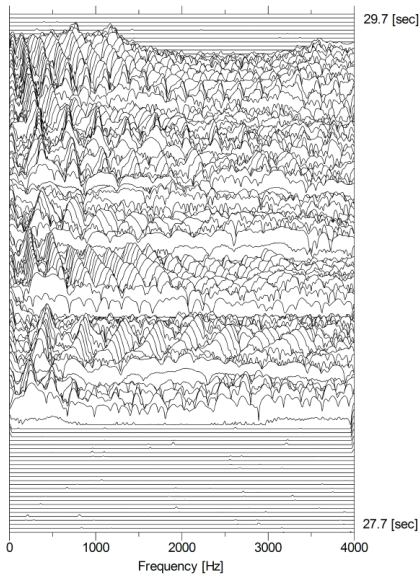
(D) Improved NLMS with DTD ($\mu=0.00002$)



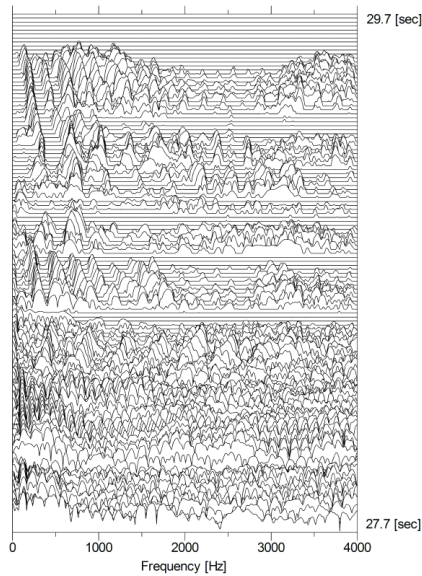
Echo signal level without echo canceller (Output of $H(\omega)$, Female voice)

◇ 入出力信号のスペクトルの3次元表示（部分）

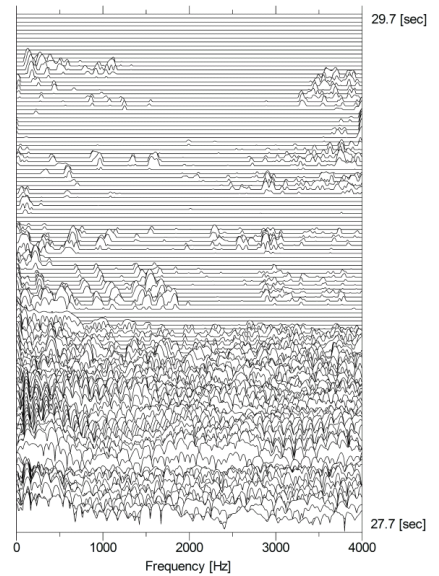
- ・ 27.7秒から29.7秒までの2秒間のデータのスペクトルの3次元表示.
- ・ DTDの有無にかかわらず改良NLMS (Improved NLMS) はダブルトーク状態が終わると、すみやかに適応フィルタの収束が回復し、良好なエコー抑圧特性が得られる。 下図では特に聴感的に検知されやすい周期構造を有する有声音の低音域部分が良く抑圧されている様子が分かる。
- ・ 適応フィルタ係数のミス・アライメント量のグラフでは、(B)の従来技術のNLMSも比較的良好な収束特性を有しているように見えるが、ダブルトーク無しの状態でのエコー抑圧量は改良NLMS (Improved NLMS) の方が大きい。



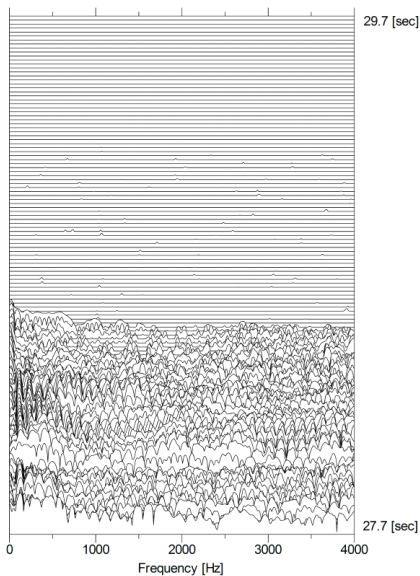
Female voice
(Input signal)



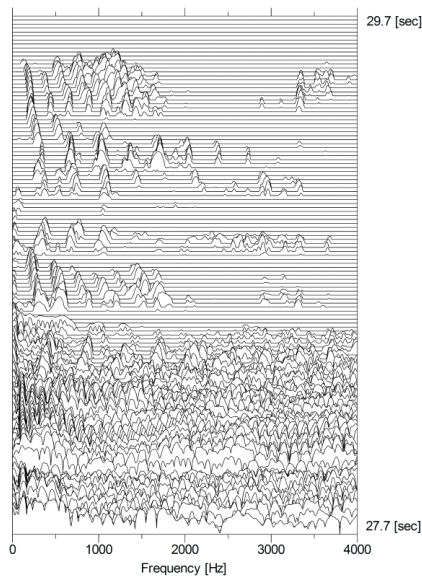
(A) Conventional NLMS
with Geigel's DTD
($\mu=0.00005$)



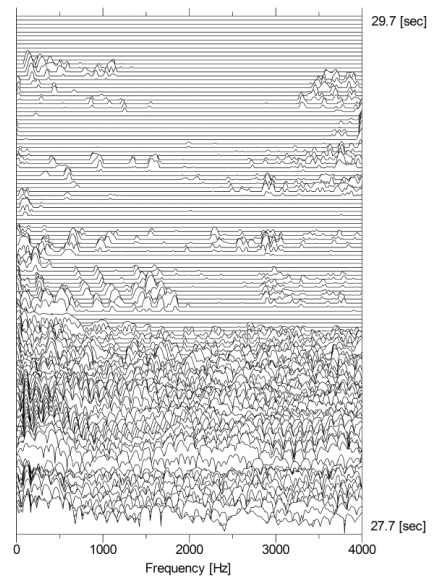
(C) Improved NLMS
without DTD
($\mu=0.00002$)



Male voice
(Input signal)

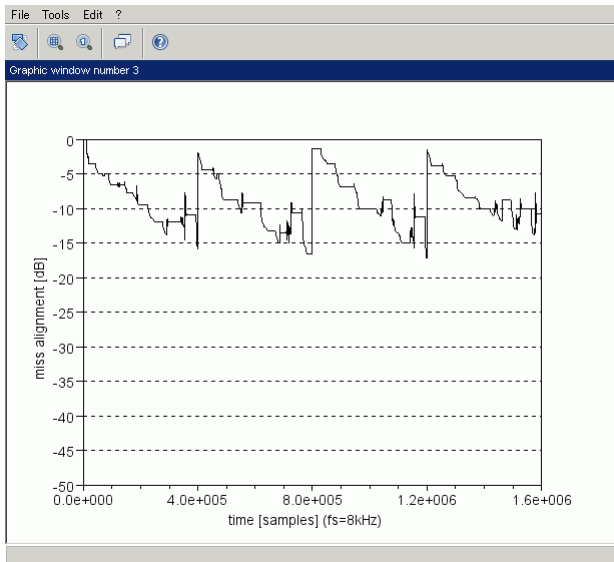


(B) Conventional NLMS
with original DTD
($\mu=0.00005$)

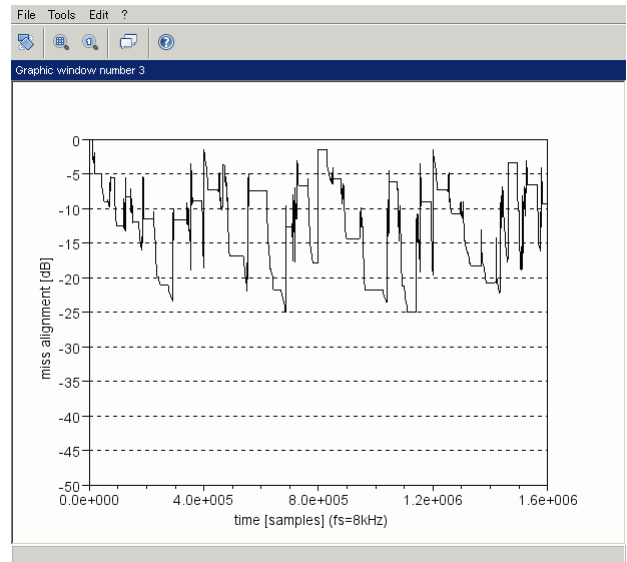


(D) Improved NLMS
with DTD
($\mu=0.00002$)

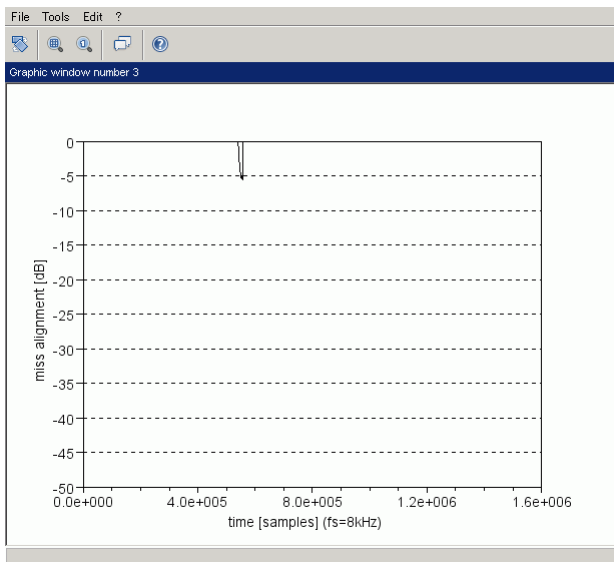
- LMSアルゴリズムと従来のNLMSアルゴリズムのダブルトーク検出処理（DTD）無しでの収束特性
 - ・ LMSアルゴリズムと従来のNLMSアルゴリズムを用いたハウリング・キャンセラのダブルトーク検出処理（DTD）無しの状態での適応フィルタ係数のミス・アライメント量の変化を下図に示す。他のシミュレーション条件は「シミュレーション例（１）」と同一である。
 - ・ 横軸は時間（単位：サンプル）、縦軸はdB
 - ・ LMSはDTD無しでも一応の収束はするが、収束特性は改良NLMSよりも大幅に劣る
 - ・ 従来技術のNLMSはDTD無しでは実用になりうる収束特性が得られない



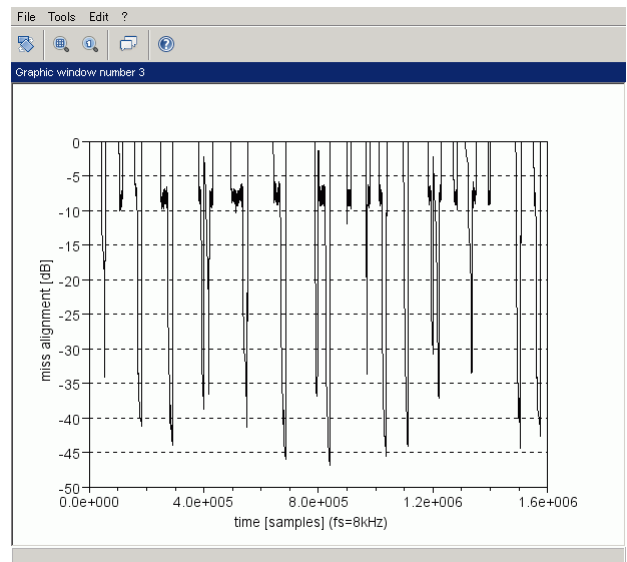
LMS without DTD ($\mu=0.003$)



LMS without DTD ($\mu=0.01$)



NLMS without DTD ($\mu=0.00005$)



NLMS without DTD ($\mu=0.0005$)