

マルチレート繰返し法によるサブバンド適応フィルタの収束速度の改善

正員 貴家 仁志[†] 正員 西川 清史[†] 准員 芦原 浩司[†]

Improvement of Convergence Speed for Subband Adaptive Digital Filter Using the Multirate Repeating Method

Hitoshi KIYA[†], Kiyoshi NISHIKAWA[†], *Members and*
Koji ASHIHARA[†], *Associate Member*

あらまし 適応フィルタにフィルタバンクを応用したサブバンド適応システムは、高次の適応問題を低次の適応問題に帰着させることができる。適応フィルタ (adaptive digital filter) の次数低減は、帯域分割数と間引き率に密接に関係する。できるだけ大きな帯域分割数を選択し、最大間引きに近い間引き率を選択するほど、ADFの次数は低減するが、時間当りの係数更新回数が低減してしまう。このことは、結果として収束速度を低下させる。本論文では、サブバンド適応システムの間引き処理に伴う収束速度の低下の問題を改善する方法を考察する。提案法は、従来間引き処理によって捨てられていたデータを有効に利用し、収束速度の改善を行うものであり、マルチレート繰返し法と呼ばれる。まず、従来のサブバンド適応システムにマルチレート繰返し法を適用し、その収束速度の改善を行う。次に、更にマルチレート繰返し法をより効果的に適用できるサブバンド適応システムを導入する。その結果、サブバンド適応システムの利点である、ADFの次数の低減効果を保持したまま、より速い収束速度を得ることができる。

キーワード 適応信号処理, サブバンド適応システム, マルチレート繰返し法, 有理数間引き

1. まえがき

適応フィルタを用いてエコーキャンセラなどを実現する場合、極めて高次のシステムを同定しなければならない。フィルタの次数の増加は、フィルタの係数更新に要する演算量を増加させ、また有限語長の影響や収束特性にも悪影響を与える。これらの問題を解決する手段の一つとして、適応フィルタにフィルタバンクを応用したサブバンド適応システムが研究されている^{(1)~(9)}。サブバンド適応システムは、高次のフィルタの適応問題を低レートで動作する複数個の低次のフィルタの適応問題に帰着させることができる。

信号をフィルタバンクによって複数の帯域に分割し、各帯域におけるADF (adaptive digital filter) の次数を低減するという問題は、帯域分割数と間引き率に密接に関係する。できるだけ大きな帯域分割数を選択し、最大間引きに近い、すなわち帯域分割数に近い間引き

率を選択するほど、ADFの次数低減効果を期待できることが知られている。しかし、このように大きな間引き率を選択するほどADFの次数は低減するが、間引き率が大きいために、時間当りの係数更新回数が低減してしまうという問題が指摘されている^{(10), (11)}。このことは、結果として収束特性を低下させ、特に時変状態における追従性を悪化させる。そこで本論文では、サブバンド適応システムの利点であるADFの次数の低減効果を保持したまま、この収束速度の問題を改善する方法を提案する。

具体的な提案法は、従来間引き処理によって捨てられていたデータを有効に利用し、収束速度の改善を行うものである。このような方法をマルチレート繰返し法と呼ぶことにする。このマルチレート繰返し法は、まず、筆者らの1人によってオーバーサンプリングされたA-D変換器の出力信号に対して試みられた^{(12)~(14)}。その後、解析信号に対してもマルチレート繰返し法の効果が確認された⁽¹⁵⁾。また、別の立場から提案された方法である、南雲・野田の繰返し法との比較検討⁽¹⁶⁾、

[†] 東京都立大学工学部電子情報工学科, 八王子市
Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University,
Hachioji-shi, 192-03 Japan

時変な状態でのスペクトルパラメータの推定に用いられている⁽¹⁰⁾。本論文では、このような、筆者らが提案したマルチレート繰返し法が、上述したサブバンド適応システムの問題の改善に有効であることを示す。同時に、マルチレート繰返し法をより有効に利用するためのサブバンド適応システムの構成についても考察する。

本論文では、2.においてまず従来のサブバンド適応システムの動作の説明し、その問題点を明確にする。次に3.では、サブバンド適応システムに対するマルチレート繰返し法の適用法を示す。また、ここでは同時に、従来のサブバンド適応システムではマルチレート繰返し法の適用に限界があることを指摘する。4.において、この限界を排除したサブバンド適応システムの構成を示し、その構成に対するマルチレート繰返し法の適用法を与える。最後に5.ではシステム同定を例にして提案したマルチレート繰返し法の有効性を示す。

2. サブバンド適応システムとその動作

まず準備として、従来のサブバンド適応システムを簡単に説明し、その問題点および本論文の目的を明確にする。

図1にシステム同定を例にした M チャネルサブバンド適応システムを示す。ここで、サブバンド適応システムへの入力信号 $x(n)$ および未知システムの出力信号 $g(n)$ はアナライザフィルタ $H_l(z)$ ($l = 0, 1, \dots, M-1$) により帯域分割された後、 $1/D$ にダウンサンプリングされる。ダウンサンプリングされた各チャネルの信号は適応フィルタの係数更新に用いられる。

p 番目のチャネルの ADF 係数更新は、例えば係数更新のアルゴリズムとして学習同定法 (正規化 LMS)

を想定すると、次式の 2 乗平均誤差 ε_p を最小化するように実行される。

$$\varepsilon_p = E[e_p(m)e_p^*(m)] \quad p = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

但し、 $E[\cdot]$ は期待値演算、 $*$ は複素共役を意味する。式(1)において $e_p(m)$ は、各チャネルの所望信号 $d_p(m)$ と ADF の出力信号 $y_p(m)$ の誤差信号であり

$$\begin{aligned} e_p(m) &= d_p(m) - y_p(m) \\ &= d_p(m) - \mathbf{h}_p^T(m)\mathbf{X}_p^*(m) \end{aligned} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで T はベクトル転置を表している。学習同定法では適応フィルタの係数 $\mathbf{h}_p(m)$ を次式により更新する。

$$\mathbf{h}_p(m+1) = \mathbf{h}_p(m) + \alpha e_p(m)\mathbf{X}_p^*(m) \quad (3)$$

$$\alpha = \beta/|\mathbf{X}_p(m)|^2 \quad 0 < \beta < 2 \quad (4)$$

ここで \mathbf{X}_p は p 番目のチャネルへの入力ベクトル、また $\mathbf{h}_p(m)$ は適応フィルタの係数ベクトルを示し

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_p(m) &= [X_p(m), X_p(m-1), \dots, \\ &\quad X_p(m-L+1)]^T \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathbf{h}_p(m) = [h_{p,0}(m), h_{p,1}(m), \dots, h_{p,L-1}(m)]^T \quad (6)$$

と表される。ここで L は適応フィルタのタップ数を示している。

以上のように、サブバンド適応システムでは、係数更新の回数 D が、間引きなしの場合 ($D = 1$) に比べ時間当たり $1/D$ に減少する。従って、 D として大きい値が選ばれるとき、時間当たりの係数更新回数が少ないため、実時間において十分な収束速度を得ることが困難となる。

そこで、本論文では、サブバンド適応システムの間引き処理による収束速度の低下を改善するための方法を提案する。

3. マルチレート繰返し法の適用

サブバンド適応システムにおいて、間引き率 D の選択は極めて重要である。 D を大きく選んだ場合、各チャネルにおけるサブバンド ADF の次数はそれに伴い低下する。しかし、時間当たりの係数更新の回数は低減してしまう。一方、小さな D の選択は、十分な係数更新の回数の確保を可能とするが、各 ADF の次数も

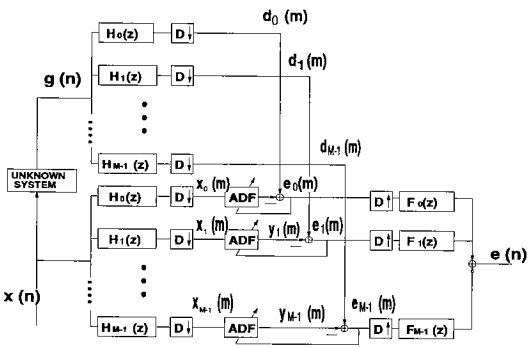


図1 M分割サブバンド適応システム
Fig.1 An M channel subband adaptive system.

増加してしまう。そこで本論文では、まずマルチレート繰返し法を図1のサブバンド適応システムに適用し、この問題を解決する方法を提案する。

3.1 マルチレート繰返し法

従来のサブバンド適応システムでは、間引かれたデータのみを適応フィルタの係数更新に用いていた。それに対し、マルチレート繰返し法は、間引き処理によって取り除かれたデータも適応フィルタの係数更新に用いることにより収束速度改善する方法である^{(12)~(15)}。サブバンド適応システムの各チャンネルにこの方法を適用する。

図2は、 p チャンネルに注目した場合のマルチレート繰返し法の原理図を示している。但し、繰返し回数に相当する N は以下のように D 以下の整数に選ばれる。

$$N \leq D \tag{7}$$

図2の処理を説明しよう。未知システムの出力信号 $g(n)$ と入力信号 $x(n)$ はアナライザフィルタ $H_p(z)$ によって帯域分割された後、それぞれ異なったタイミングで $1/D$ にダウンサンプリングされる。ここで、 N 個のデータ系列 $x_{p,0}(m), x_{p,1}(m), \dots, x_{p,N-1}(m)$ が生成される。また、同様な処理により N 個の所望信号系列 $d_{p,0}(m), d_{p,1}(m), \dots, d_{p,N-1}(m)$ が生成される。図2において誤差信号は以下のように表される。

$$e_{p,l}(m) = d_{p,l}(m) - h_p(m)^T X_{p,l}(m) \tag{8}$$

$$l = 0, 1, \dots, N-1$$

$$p = 0, 1, \dots, M-1$$

ここで $e_{p,l}(m)$ は、適応フィルタの出力 $y_{p,l}(m)$ と所望信号 $d_{p,l}(m)$ との誤差信号である。

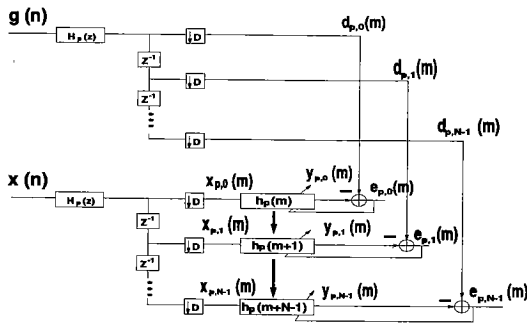


図2 マルチレート繰返し法の原理図
Fig.2 The multirate repeating method.

マルチレート繰返し法では、ダウンサンプリング前のクロックで換算すると、単位時間当りに $h_p(m)$ 更新は次式のように N 回行われる。

for $l = 0$ to $N - 1$

$$h_p(m+l+1) = h_p(m+l) + \alpha e_{p,l}(m) X_{p,l}^*(m) \tag{9}$$

end

ここで、繰返し回数 N は $h_p(m)$ の更新回数のみ依存し、ADF 係数ベクトルのサイズに影響を及ぼさない。すなわち、適応フィルタの次数は N によらず、 $N < D$ と選んだ場合においても、ADF の次数は増加しない。

3.2 データ選択の自由度

以上のマルチレート繰返し法において、繰返し回数 N は D 以下の正の整数である。従って、 $N < D$ のとき、データ系列の選択にいくつかの自由度が生ずる。図2では N 個のデータ系列を引き続く間引きタイミングで選んでいる。しかし、マルチレート繰返し法ではこれに限定されず、他のタイミングでのデータ選択も可能である。例えば、 $D = 4, N = 2$ の場合には、図3に示すように (a) または (b) のようなデータ選択が行える。いずれのデータを選択しても、マルチレート繰返し法の効果を期待できるが、(b) の選択では係数更新の時間間隔が一定となるため、より実現しやすい。

マルチレート繰返し法において、最大繰返し回数は、式(7)から $N = D$ である。また、 D は帯域分割数 M との間に $D \leq M$ が成立しなければならない。従って、帯域分割数の少ないサブバンド適応システムにおいては、大きな N を選択できず、収束速度の改善に

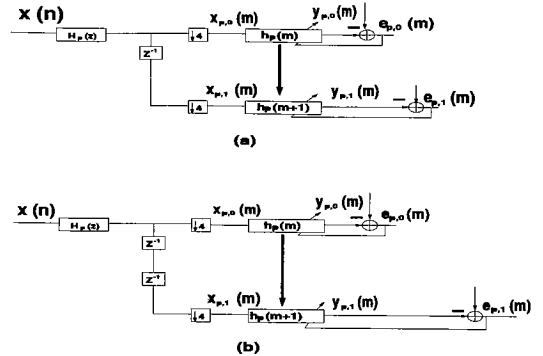


図3 マルチレート繰返し法におけるデータ選択の自由度
Fig.3 Examples of data choice with different timing for the multirate repeating method.

限りがある。

4. マルチレート繰返し法の拡張

帯域分割数の少ないサブバンド適応システムでは、大きな N を選択できず、マルチレート繰返し法の適用において制約を伴う。4. では、この問題を解決するために、新たなサブバンド適応システムを導入する。

4.1 有理数間引き可能なフィルタバンクの構成

図4に有理数間引きをもつ M 分割フィルタバンクの構成図を示す。ここで、同図の U および D は正の整数値とする。この構成は、間引きに伴うエリアジングの影響を最大間引き ($M = D$) に極めて近い間引き率まで回避するために提案されたものである⁽⁸⁾。本論文では、エリアジングの回避のために提案されたこの構成が、マルチレート繰返し法の適用においても有効であることを述べる。

このフィルタバンクは複素フィルタから構成されており、以下のように、その処理手順を説明できる。フィルタバンクへの入力信号は U 倍にアップサンプリングされ、アナライザフィルタ $H_l(z)$ により帯域分割された後、 $1/D$ にダウンサンプリングされる。ダウンサンプリングされた各チャネルの信号は中間処理の後、 D 倍のアップサンプリング、シンセサイザフィルタ $F_l(z)$ とのフィルタリングを経て合成される。最後に、合成された複素信号の実数部分を取り出し、2倍する。そして、 $1/U$ のダウンサンプリング、更にイコライザ $E(z)$ とのフィルタリングにより入力信号を再構成する。

但し図4において、イコライザ $E(z)$ は他のフィルタの設計によっては、必ずしも必要ではない。

4.2 間引き率の定義

有理数間引き可能なフィルタバンクの間引き率を定義する。図4で $1/D$ のダウンサンプリング後の中間

出力信号はフィルタバンクへの入力信号に対して U/D 倍のレートとなっている。しかし、複素フィルタを用いているため中間出力信号は複素数となり、実フィルタを用いたときに比べ2倍のデータ量をもつ。そこで、ここで議論するフィルタバンクでは以下のように間引き率 R を定義する。

$$R = D/2U \tag{10}$$

上式から $D = 2U$ のとき、間引き率 R は1となり、従来のフィルタバンクの間引きなしに相当する。一方 $D = 2MU$ のときには、 $R = M$ となり、従来のフィルタバンクの最大間引きに対応する。また、 $U = 1$ と選べば、整数間引きを保証するフィルタバンクとなる。

ここで述べたフィルタバンクは、以下の範囲の D においてエリアジングが起こらないように設計することができる⁽⁸⁾。

$$2U \leq D < 2MU \tag{11}$$

4.3 繰返し回数の制約の解除

図4のフィルタバンクの D は最大 $2MU - 1$ が選択可能である。従って、3. で述べたような D の上限が帯域分割数 M によって制限されるという問題はない。例えば、 $M = 2$ の場合を考えよう。図1の構成では最大間引きを選択したとしても、 $D = 2$ が上限である。一方、図4の構成では D の最大値として $D = 4U - 1$ を選択可能である。また、 U の値は正整数の範囲で任意に設定できる。このように、有理数間引き可能なサブバンド適応システムでは、 U の設定により、 M 以上の D を選ぶことができる。従って、帯域分割数の少ないサブバンド ADF においても大きな N を選択可能とし、マルチレート繰返し法における繰返し回数の制約を改善することができる。

4.4 演算量の検討

サブバンド適応システムの利点として、高次の ADF の処理を複数個の低次の ADF の処理に帰着できることが挙げられる。このことは、適応処理に伴う演算量を低減し、実現の際の有限語長の影響を軽減する。更に、適応処理の並列処理を可能とする。しかし、マルチレート繰返し法をこのような特徴をもつサブバンド適応システムに組み合わせて使用した場合、演算量に関して注意しなければならない。先に述べたように、マルチレート繰返し法の使用は ADF 次数低減という特徴を保持する。しかし、適応処理に伴う演算量は、

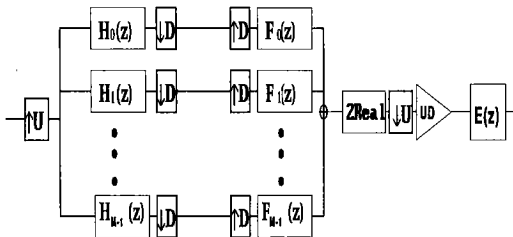


図4 有理数間引きをもつ M 分割フィルタバンク
Fig. 4 An M channel filter bank with rational decimation ratio.

繰返し回数 N の影響を受け増加する。以下で、この演算量について検討する。

今、未知システムのタップ数を L 、帯域分割数 M の処理を考える。まず最初に NLMS アルゴリズムの使用を想定し、各チャンネルの必要な ADF のタップ数は L/M であると仮定する。このとき、全チャンネルにおける適応処理に伴う単位時間当たり（入力信号 $x(n)$ のレートを基準）の乗算回数は、繰返しを用いない従来のサブバンド適応システムにおいて $2L/M$ となる。但し NLMS アルゴリズムの 1 回の係数更新に伴う乗算回数を $2L$ とした⁽¹⁹⁾。一方、繰返し回数を N とすると乗算回数は $2LN/M$ となる。また帯域分割を行わない場合には $2L$ 回となる。このことから、全チャンネルにおける合計の比較において、 $N = M$ の場合の乗算回数は、帯域分割を行わない場合の乗算回数と一致することがわかる。従ってこの場合、有限語長の影響や処理の並列性という利点は保持するが、合計の演算量に関しては利点はない。

次に、RLS (recursive least square) アルゴリズムの使用を考える。係数更新 1 回当たりの乗算回数を $2L^2 + 6L$ とする⁽¹⁹⁾。このとき、帯域分割を行わない場合とマルチレート繰返し法を使用した場合の乗算回数は、それぞれ $2L^2 + 6L$ 、 $\{2(L/M)^2 + 6(L/M)\}N$ となる。従って、NLMS アルゴリズムと比較したとき、繰返し回数 N のより大きな値に選択においても、フィルタバンクの使用における演算量の低減効果を保持できる。

以上のように、マルチレート繰返し法は、演算量の増加を代償として、収束速度の改善を計るものである。従って、フィルタバンクの使用において、帯域分割数の選択と同様に、使用目的に応じて適切に繰返し回数を選択することが重要となる。

5. シミュレーション結果

ここでは、本方法の有効性を確認するため、帯域分割を行わない方式、図 1 および図 5 のシステムに基づきシミュレーションをそれぞれ行った。以下にシミュレーション条件を示す。

- (1) 帯域分割数： $M = 1$ および $M = 4$
- (2) 間引き率： $D = 3$ または $R = 3$
- (3) 入力信号 $x(n)$ ：分散 1.0 の白色信号
- (4) 未知システム：本シミュレーションでは、実行途中で未知システムの変動を想定している。使用する 2 種類の未知システムは、それぞれ 100 次の実 FIR

フィルタである。

(5) 適応アルゴリズム：学習同定法およびマルチレート繰返し法

(6) 誤差尺度：次式で定義される MSE (Mean Squared Error)

$$10 \log_{10} \frac{E[e^2(n)]}{E[g^2(n)]} \tag{12}$$

また、実際の図の値は 30 回の集合平均でこれを近似しており、横軸は入力信号 $x(n)$ のクロックレートを表している。

まず、マルチレート繰返し法の効果を確認するため、帯域分割を行わない方式および図 1 のシステムに基づき、MSE 特性の比較を行った。但し、図 1 ではエリアジングによる収束特性の劣化を抑えるため、間引き率として $D = 3$ を選んだ。ここで、 $D = 3$ を実現する場合、実フィルタバンクでは通過域とエリアジング成分が重なり適応特性に影響を与えてしまうため⁽⁸⁾、アナライザフィルタとして図 6 に示す複素フィルタを

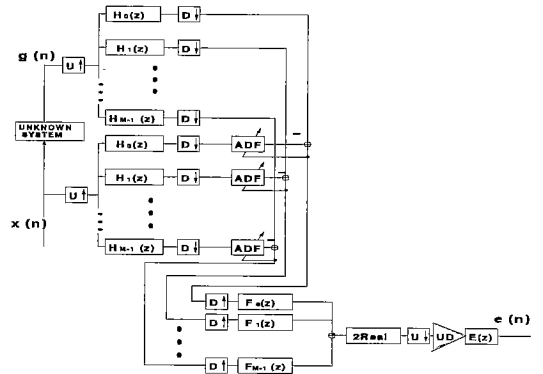


図 5 有理数間引きをもつ M 分割サブバンド適応システム
Fig. 5 An M channel subband adaptive system with rational decimation ratio.

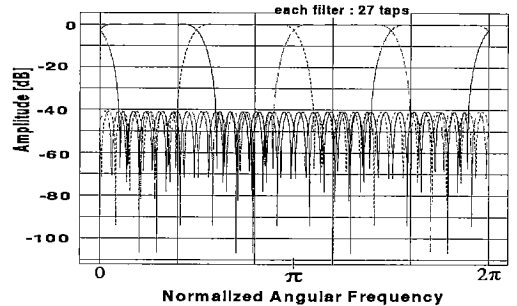


図 6 アナライザフィルタの振幅特性 (4 分割)
Fig. 6 The analysis filters (4 channel).

用いた。

図8において(a)は $M = 1$, すなわち帯域分割を行わない方式の収束特性, (b)および(c)は, $M = 4$ において, 繰返し回数 N を変化させた場合の収束特性である。但し各 ADF は, MSE 特性に影響を及ぼさない十分なタップ数を与えられている。同図(b), (c)から, $N = 3$ のマルチレート繰返し法では, 学習同定法 ($N = 1$) と同一の ADF タップ数にもかかわらず, より速い収束特性を達成しており, マルチレート繰返し法の効果を確認できる。また, 帯域分割を行わない場合の収束特性(a)との比較においても, マルチレート繰返し法に基づく方法の有効性を確認できる。

帯域分割を行わない場合 ($M = 1$) と行った場合 ($N = 1$) は, ほぼ同等の収束特性を示した。これは入力信号が白色であることによる。有色信号の入力に対しては, 帯域分割を行った場合, より高速な収束速度

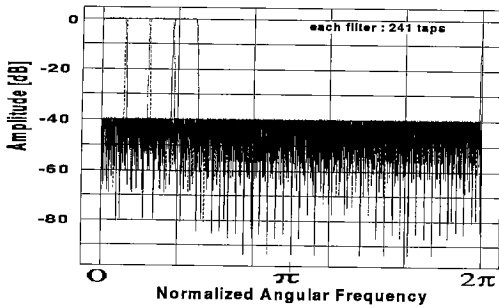


図7 アナライザフィルタの振幅特性 (4分割)
Fig. 7 The analysis filters (4 channel).

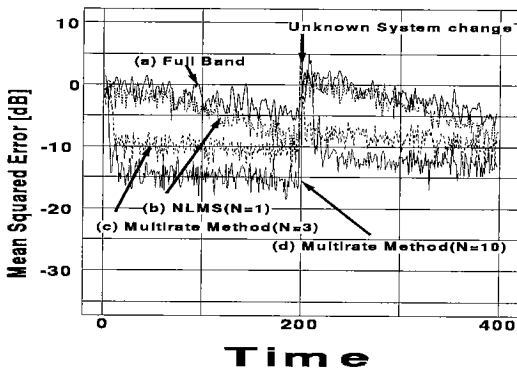


図8 4分割サブバンド ADF の収束特性。(a) ADF: 100 タップ, (b),(c) ADFs: 35 タップ, (d) ADFs: 18 タップ
Fig. 8 The convergence characteristics of the 4 channel sub-band ADF. (a) ADF: 100 taps, (b),(c) ADFs: 35 taps, (d) ADFs: 18 taps.

を示すことが確認されている。しかし, 帯域分割数 M を増加させた場合, 単位時間当りの係数更新回数が低下し, 良好な収束特性を保証できるとは限らない。なお, 帯域分割を行わない方式 ($M = 1$) と従来のサブバンド方式の比較の詳細は文献(1)を参照して欲しい。

次に, 有理数間引き可能なサブバンド適応システムに, マルチレート繰返し法を適用した場合の有効性を確認するために, 図5のシステムに基づき同様なシミュレーションを行った。ここでは, アナライザフィルタとして図7に示す複素フィルタを, イコライザは263次の直線位相フィルタ(その係数の $\frac{3}{4}$ は零値)を使用した^{(17),(18)}。また, 図5のシステムにおいて, $U = 2, D = 12$ と選び間引き率 $R = 3$ を実現した。ここで, 図5のシステムでは, 4.で述べたように, 繰返し回数 N として $D = 12$ 以下の任意の数を選択できる。図8(c)では, $N = 10$ のマルチレート繰返し法の収束特性を示している。ここでは, 図3(a)に示すような, 引き続いた10個のデータ系列を選択し, マルチレート繰返し法を適用した。

図1に示す構成では3.で述べたように, 繰返し回数として $D = 3$ 以上の数を選択できず, 収束速度の改善に制約が生ずる。しかしながら, 図8(c)では, 繰返し回数に対して, より多くの選択の自由度をもつ(この場合 $N \leq 12$)。その結果, マルチレート繰返し法を効果的に使用でき, より速い収束速度を得られることが確認できる。

最後に, 繰返し回数が, 収束速度にどのような影響を与えるかを確認するため, 図5のシステムに基づき, 収束特性の比較を行った。図9では, (a)学習同定法

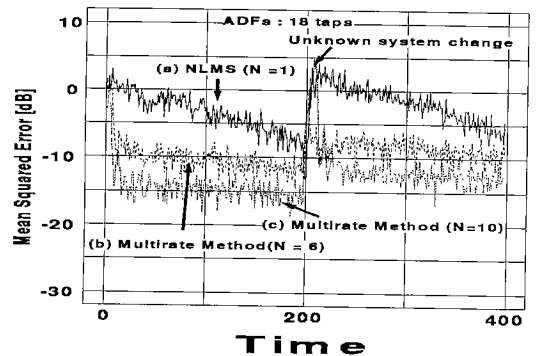


図9 4分割サブバンド ADF の収束特性 (すべての ADF: 18 タップ)
Fig. 9 The convergence characteristics of the 4 channel sub-band ADF (All ADFs: 18 taps).

($N = 1$), (b) $N = 6$ のマルチレート繰返し法および (c) $N = 10$ のマルチレート繰返し法における収束特性の比較を行っている。図 9 から、繰返し回数が増すほど、より速い収束速度が得られることを確認できる。

6. むすび

本論文では、サブバンド適応システムの間引き処理に伴う収束速度の低下に、マルチレート繰返し法が有効であることを示した。このマルチレート繰返し法は、従来間引き処理によって捨てられていたデータを有効に利用し、時間当りの係数更新回数を増加させることにより、収束速度の改善を行う方法である。

まず、従来のサブバンド適応システムに、マルチレート繰返し法の適用法を与えた。更に、マルチレート繰返し法をより有効に利用するため、間引きに、より大きな自由度をもつサブバンド適応システムを考察した。マルチレート繰返し法の適用により、サブバンド適応システムの利点である、ADF の次数低減効果を保持したまま、より速い収束速度を得ることができると確認した。

今後は、マルチレート繰返し法におけるデータ選択の自由度、繰返し回数と収束速度の理論的な考察について、更に研究を進める予定である。

文 献

- (1) Gilloire A. and Vetterli M.: "Adaptive Filtering in Subbands with Critical Sampling: Analysis, Experiments, and Application to Acoustic Echo Cancellation", *IEEE Trans.*, **40**, 8, pp.1862-1875 (Aug. 1992).
- (2) Yasukawa H., Shimada S. and Furukawa I.: "Acoustic echo canceller with high speech quality", *Proc. IEEE ICASSP'87*, Dallas, pp.2125-2128 (April 1987).
- (3) Kellermann W.: "Analysis and Design of Multirate Systems for Cancellation of Acoustic Echoes", *Proc. ICASSP'88*, New York, pp.2570-2573 (April 1988).
- (4) Perez H. and Amano F.: "Acoustic Echo Cancellation Using Multirate Techniques", *IEICE Trans.*, **E74**, 11, pp.3559-3568 (Nov. 1991).
- (5) 尾知 博, 貴家仁志, 山田洋士, 高良吉立, 神林紀嘉: "エリアジングが生じない最大間引き DFT フィルタバンクを用いたシステム同定", *信学論 (A)*, **J76-A**, 6, pp.810-817 (1993-06).
- (6) Kiya H. and Yamazaki H.: "A class of Filter Bank with Alias-Free points: FSF bank", *ECCTD'93-Circuit Theory and Design*, pp.751-756 (Aug. 1993).
- (7) Honma H. and Yamaguchi S.: "Consideration on adaptive system identification based on filter banks", *IEICE Trans.*, **E74**, pp.3935-3938 (Dec. 1991).
- (8) 貴家仁志, 山崎広達, 芦原浩司: "有理数間引きをもつオーバーサンプリング・サブバンド適応フィルタ", *信学論*

(A), **J77-A**, 8, pp.1129-1136 (1994-08).

- (9) 知念 徹, 本間仁志, 佐川雅彦: "フィルタバンクを用いた LMS 適応信号処理", *信学技報*, **CAS89-75** (1989-10).
- (10) Shimizu J., Miyanaga Y. and Tochinali K.: "An Estimation of Time-Varying Parameters using Multi-AR Lattice Models in Subbands", *Proc. ISCAS'94*, **2**, pp.245-248, London (May 1994).
- (11) 本間仁志, 下山正樹, 佐川雅彦: "非定常入力信号に対する適応フィルタの追従性の改善法", 1991 信学秋季全大, A-79.
- (12) 知念 徹, 本間仁志, 佐川雅彦: "マルチレート技法を用いた高速なブロック LMS 適応フィルタ", *信学技報*, **CAS 89-162** (1990-03).
- (13) Chinen T., Kiya H. and Sagawa M.: "A new gradient algorithm for FIR adaptive digital filters using multirate technique," *IEEE 33rd Midwest Symposium on CAS*, pp.13-16 (Aug. 1990).
- (14) Shimoyama M., Kiya H. and Sagawa M.: "Interpolated adaptive digital filter having faster convergence speed in implementation time", *JTC-CSCC '92*, pp.232-237.
- (15) 榎本 剛, 高橋進一: "マルチレート処理による適応フィルタの収束速度の向上", *信学論 (A)*, **J76-A**, 10, pp.1407-1413 (1993-10).
- (16) Nishikawa K. and Kiya H.: "A Technique to Improve Convergence Speed of the LMS Algorithm", *Proc. IS-CAS'94*, **2**, pp.405-408, London (May 1994).
- (17) 本間仁志, 山田正一, 佐川雅彦: "補間されたイコライザを用いた直線位相 FIR デジタルフィルタ", *信学論 (A)*, **J70-A**, 8, pp.1107-1115 (1986-08).
- (18) 本間仁志, 伊藤一広, 佐川雅彦: "イコライザを用いた並列 QMF バンクの設計", *信学論 (A)*, **J74-A**, 3, pp.579-583 (1991-03).
- (19) Kalouptsidis N. and Theodoridis S.: "Adaptive System Identification and Signal Processing Algorithms", Prentice Hall International Editions, UK. (1993).

(平成 6 年 6 月 17 日受付, 8 月 26 日再受付)



貴家 仁志

昭 55 長岡技術科大・工・電気電子システム卒。昭 57 同大大学院修士課程了。同年東京都立大工学部電気工学科助手。現在、同大学電子情報工学科助教授。工博。マルチレート信号処理、適応信号処理および画像処理に関する研究に従事。著書「高速フーリエ変換とその応用」, 「デジタル信号処理技術入門」, 電子画像学会, テレビジョン学会, IEEE 各会員。



西川 清史

平2 東京都立大・工・電気卒。平4 同大大学院修士課程了。同年新日本製鉄（株）エレクトロニクス研究所勤務。平5 東京都立大工学部電子情報工学科助手。現在に至る。適応信号処理および情報源符号化に関する研究に従事。IEEE 会員。



芦原 浩司

平5 東京都立大・工・電気卒。現在、同大大学院修士課程在学中。適応信号処理に関する研究に従事。