

観測信号の周波数特性に基づく時変計量を用いた ブロックベース適応フィルタ*

☆ 村田佳斗, 松本和樹, 内田蓮, 矢田部浩平 (農工大),
泉悠斗, 高橋祐, 近藤多伸 (ヤマハ株式会社)

1 はじめに

ハウリング抑圧やエコーキャンセレーションなどの音響信号処理において、適応フィルタによる空間伝達系の推定は重要な役割を果たしている。代表的な適応アルゴリズムである NLMS 法はアルゴリズムの単純さや安定性に優れている一方で、観測信号のエネルギーが特定の周波数帯域に偏っている場合、更新方向がその帯域に強く支配され、収束速度や推定性能が低下する可能性がある。この問題に対し、我々は前回、適応射影劣勾配法 (APSM) に対して観測信号の周波数特性に基づいた計量を導入する手法を提案し、NLMS 法と比較して収束性が優れることを示した [1]。しかし、我々が前回提案した計量は、サンプル毎に高速フーリエ変換 (FFT) が必要であり、実行時間が長くなるという課題があった。本稿では、前回提案した手法にブロックベース処理を導入することで計算量を削減する手法を提案し、その有効性を実験により確認した。

2 観測信号の周波数特性に基づく時変計量を導入した APSM

適応フィルタは、時間インデックス t における観測信号を $\mathbf{x}^{[t]} \in \mathbb{R}^L$ 、所望の信号を $d^{[t]} \in \mathbb{R}$ として、残差 $e = d^{[t]} - (\mathbf{w}^{[t]})^T \mathbf{x}^{[t]}$ を最小化することで、フィルタ係数 $\mathbf{w}^{[t]} \in \mathbb{R}^L$ を逐次的に更新する。ただし、 L はフィルタのタップ長、 $(\cdot)^T$ は転置である。この適応的な更新は伝達系の時間変化に対応でき、空間伝達系をリアルタイムに推定する際に有効である。代表的な適応アルゴリズムである NLMS 法は、

$$\mathbf{w}^{[t+1]} = \mathbf{w}^{[t]} - \frac{\lambda}{\|\mathbf{x}^{[t]}\|_2^2 + \beta} \nabla f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]}) \quad (1)$$

に対して、目的関数を $f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]}) = (1/2)e^2$ としたものである。このとき勾配は $\nabla f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]}) = -e \mathbf{x}^{[t]}$ となる。ここで、 $\lambda \in (0, 2)$ はステップサイズ、 $\beta > 0$ はゼロ除算を防ぐための微小な定数である。NLMS 法では、 $-e \mathbf{x}^{[t]}$ がそのまま更新方向として用いられる。しかし、観測信号 $\mathbf{x}$ の周波数成分に偏りがある場合、

エネルギーの大きい帯域はフィルタ係数 $\mathbf{w}$ の更新方向に強く影響を与える。一方、エネルギーの小さい帯域は更新に与える影響が小さくなるため、収束性能に悪影響を及ぼす恐れがある。

更新方向をより柔軟に設計するために、ユークリッド空間に限定されない一般的な枠組みとして APSM が提案されている [2]。APSM では、目的関数 $f^{[t]} \in [0, \infty)$ の更新を正定値対称な計量行列 $\mathbf{Q}^{[t]} \in \mathbb{R}^{L \times L}$ によって歪めた空間で最適化する。APSM の更新式は

$$\mathbf{w}^{[t+1]} = T \left(\mathbf{w}^{[t]} - \lambda^{[t]} \frac{f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]})}{\|\nabla_{\mathbf{Q}^{[t]} f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]})\|_{\mathbf{Q}^{[t]}}} \nabla_{\mathbf{Q}^{[t]} f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]}) \right) \quad (2)$$

と書ける。ただし、 $\|\mathbf{a}\|_{\mathbf{Q}^{[t]}} = \sqrt{\mathbf{a}^T \mathbf{Q}^{[t]} \mathbf{a}}$ ($\mathbf{a} \in \mathbb{R}^L$)、 $\nabla_{\mathbf{Q}^{[t]} f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]})$ は $f^{[t]}$ の $\mathbf{Q}^{[t]}$ -加重内積空間における $\mathbf{Q}^{[t]}$ -勾配、 T は強アトラクト写像である。 $\nabla_{\mathbf{Q}^{[t]} f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]}) = \mathbf{0}$ の場合は $\mathbf{w}^{[t+1]} = T(\mathbf{w}^{[t]})$ と定める。目的関数の $\mathbf{Q}^{[t]}$ -勾配と通常の勾配の関係は $\nabla_{\mathbf{Q}^{[t]} f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]}) = (\mathbf{Q}^{[t]})^{-1} \nabla f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]})$ となる。

前回手法 [1] では、計量行列を $\mathbf{Q}^{[t]}$ として、観測信号のパワースペクトルを用いた勾配の調整を行った。この方法にはサンプル毎に L 点の FFT が必要であり、計算時間が増加するという課題がある。

3 提案手法

本章では、観測信号の周波数特性に基づく時変計量を用いたブロックベース適応射影劣勾配法を提案する。本手法は、前回提案した周波数特性考慮型 APSM をブロックベース処理に拡張することで、推定性能を維持しつつ計算効率の向上を図るものである。

提案するアルゴリズムを **Alg. 1** に示す。ただし、 B はブロックサイズ、 $\mathcal{F}$ 、 $\mathcal{F}^{-1}$ 、及び $\mathcal{F}_L$ はそれぞれフーリエ変換、逆フーリエ変換、及び L 点フーリエ変換を表し、 ρ は忘却係数、 $\oslash$ は要素ごとの除算である。また、 $\phi^{[t]} = f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]})$ は目的関数、 $\mathbf{g}^{[t]} = \nabla f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]})$ はその勾配ベクトルを表す。このアルゴリズムは、1 バッチ分の所望信号を $\mathbf{d}^{[t]} \in \mathbb{R}^B$ としたとき、 $\mathbf{d}^{[t]}$ と $(\mathbf{X}^{[t]})^T \mathbf{w}^{[t]}$ の二乗誤差

$$f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]}) = \frac{1}{2} \left\| \mathbf{d}^{[t]} - (\mathbf{X}^{[t]})^T \mathbf{w}^{[t]} \right\|_2^2 \quad (3)$$

*Block-based adaptive filtering with time-varying metrics based on the spectral characteristics of observations. By Keito MURATA, Kazuki MATSUMOTO, Ren UCHIDA, Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology), Yuto IZUMI, Yu TAKAHASHI and Kazunobu KONDO (Yamaha Corporation).

Algorithm 1 提案手法のアルゴリズム

```

1: Initialize  $\mathbf{w}^{[1]} = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{q}^{[1]} = \mathbf{1} \in \{1\}^L$ 
2: for  $t = 0, B, 2B, \dots$  do
3:    $\tilde{\mathbf{x}}^{[t]} \leftarrow [x[t], x[t-1], \dots, x[t-L-B+2]]^T$ 
4:    $\mathbf{p}^{[t]} \leftarrow |\mathcal{F}_L(\tilde{\mathbf{x}}^{[t]})|^2$ 
5:    $\mathbf{q}^{[t+1]} \leftarrow (1-\rho)\mathbf{q}^{[t]} + \rho\mathbf{p}^{[t]}$ 
6:    $\phi^{[t]} \leftarrow \frac{1}{2} \|\mathbf{d}^{[t]} - (\mathbf{X}^{[t]})^T \mathbf{w}^{[t]}\|_2^2$ 
7:    $\mathbf{g}^{[t]} \leftarrow -\mathbf{X}^{[t]} (\mathbf{d}^{[t]} - (\mathbf{X}^{[t]})^T \mathbf{w}^{[t]})$ 
8:    $\mathbf{r}^{[t]} \leftarrow \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(\mathbf{g}^{[t]}) \odot \mathbf{q}^{[t+1]})$ 
9:    $\mathbf{w}^{[t+1]} \leftarrow \mathbf{w}^{[t]} - \lambda \frac{\phi^{[t]}}{(\mathbf{g}^{[t]})^T \mathbf{r}^{[t]}} \mathbf{r}^{[t]}$ 
10: end for

```

を最小化する。ただし、

$$\mathbf{X}^{[t]} = \begin{bmatrix} x[t] & x[t-1] & \cdots & x[t-B+1] \\ x[t-1] & x[t-2] & \cdots & x[t-B] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x[t-L+1] & x[t-L] & \cdots & x[t-L-B+2] \end{bmatrix}$$

は観測信号から構成される $L \times B$ のテプリッツ行列である。Alg. 1 中の 4 行目では、観測信号の周波数特性を反映した時変計量を構成するため、直近の $L+B-1$ 点の観測信号 $\tilde{\mathbf{x}}^{[t]} \in \mathbb{R}^{L+B-1}$ に対して L 点フーリエ変換を行うことでパワースペクトル $\mathbf{p}^{[t]}$ を算出する。その後、5 行目で指数移動平均により時変計量を平滑化し、周波数特性の急激な変動に対して頑健な計量を得る。8 行目の $\mathbf{r}^{[t]}$ は式 (2) 中の $(\mathbf{Q}^{[t]})^{-1} \mathbf{x}^{[t]}$ に対応している。このとき f の $\mathbf{Q}^{[t]}$ -加重内積空間における勾配は

$$\nabla_{\mathbf{Q}} f^{[t]}(\mathbf{w}^{[t]}) = -(\mathbf{Q}^{[t]})^{-1} \mathbf{X}^{[t]} \mathbf{e}^{[t]} \quad (4)$$

であり、その逆行列演算は周波数領域における要素ごとの除算によって効率的に実装できる。

前回手法と比較すると、提案手法はブロックベースの処理によりフーリエ変換の回数を $1/B$ に削減することで、計算時間が短縮されると期待できる。なお、本手法において $B = 1$ とした場合、前回提案したサンプルバイサンプルで動く APSM と等価となる。

4 実験

提案手法、NLMS 法、及び前回手法のインパルス応答推定性能を検証した。 $\rho = 10^{-5}, 5 \times 10^{-5}, 10^{-4}$, $\lambda = 2$, $B = 2^0, 2^1, \dots, 2^7$ とした。入力音声には EXPRESSO 音声コーパスからランダムに 5 個選んだ 10 秒間の音声 $\hat{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^K$ を使用し $\mathbf{x}^{[t]} = [\hat{\mathbf{x}}_t, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{t+L-1}]^T$, $\mathbf{d}^{[t]} = [\tilde{d}_t, \dots, \tilde{d}_{t+B-1}] \in \mathbb{R}^B$ とし、 $\hat{\mathbf{x}}^{[t]}$ と真のインパルス応答の畳み込み $\tilde{\mathbf{d}}^{[t]} \in \mathbb{R}^{K+L-1}$ を用いた。インパルス応答には約 4 m 四方の吸音材が配置された部屋で、スピーカーから 2.45 m 離れた場所に位置するマイクで収録したものをを用いた。どちらもサンプリング周波数は 48 kHz とした。

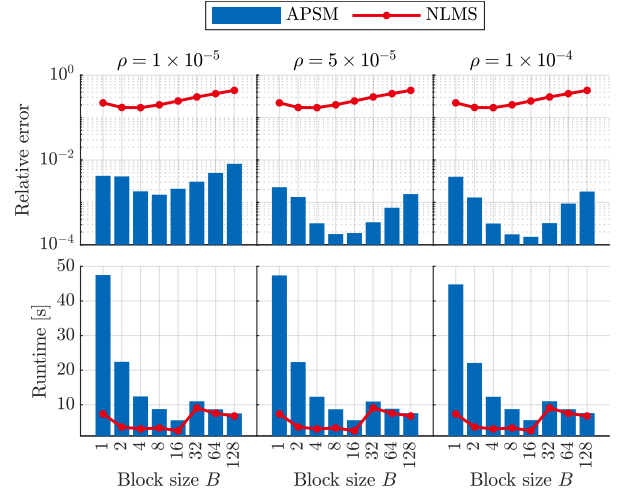


図-1 ブロックサイズごとの相対誤差(上)と計算時間(下)

また、インパルス応答のサンプル数は 5000 とした。初期値は $\mathbf{q}^{[1]} = \mathbf{1}$, $\mathbf{w}^{[1]} = \mathbf{0}$, T は恒等写像とした。ただし、 $\mathbf{1}$ は全要素が 1 のベクトル、 $\mathbf{0}$ はゼロベクトルである。使用した CPU は Intel Core i9-12900K でメモリは 64 GB ある。

ブロックサイズに対する相対誤差及び計算時間を図-1 に示す。上段に示す相対誤差の結果より、いずれの ρ においても提案手法は NLMS 法と比較して小さい相対誤差を示している。特に $\rho = 1 \times 10^{-4}$, $B = 16$ の条件では、前回手法であるサンプルバイサンプルの APSM よりも相対誤差がはるかに小さくなっていることが分かる。これは、ブロック平均化された勾配を用いることで更新方向のばらつきが抑制されたことが要因だと考えられる。下段に示す計算時間より、 B の増加に伴い計算時間が減少していることが確認できる。これらの結果より、提案手法ではブロックサイズを適切に選択することで、高いインパルス応答推定精度を維持しつつ実用的な計算時間での動作が可能であることが分かる。

5 むすび

本研究では、観測信号の周波数特性に基づく時変計量を用いた APSM に対し、ブロックベース処理を適用した適応フィルタを提案した。提案手法により、サンプルバイサンプルで実行していた前回手法をブロック単位で更新可能な形に拡張したことで、効率的な実装が可能となった。今後は、式 (2) の T を工夫したより高精度な手法の検討を行う。

参考文献

- [1] 村田佳斗, 松本和樹, 矢田部浩平, 泉悠斗, 高橋祐, 近藤多伸, “観測信号の周波数特性に基づく時変計量を用いた適応フィルタの実験的検討,” 日本音響学会講演論文集, pp. 267–268 (2025.9).
- [2] M. Yukawa, K. Slavakis and I. Yamada, “Adaptive parallel quadratic-metric projection algorithms,” *IEEE TASLP*, **15**(5), 1665–1680 (2007).