

능동 소음 제어를 위한 새로운 가변 수렴 상수 Gradient Adaptive Lattice Algorithm

Novel Variable Step-Size Gradient Adaptive Lattice Algorithm for Active Noise Control

이근상, 김성우,* 임재풍, 서영수,** 박영철†

(Keunsang Lee, Seong-woo Kim,* Jaepoong Im, Young-soo Seo,** and Youngcheol Park†)

연세대학교 컴퓨터정보통신공학부, *연세대학교 전자전기 공학과, **국방과학연구소
(접수일자: 2014년 5월 28일; 채택일자: 2014년 6월 27일)

초 록: 본 논문은 능동 소음 제어 시스템에 적합한 새로운 가변 수렴 상수 filtered-x gradient adaptive lattice (NVSS-FxGAL) 알고리즘을 제안한다. Gradient adaptive lattice(GAL) 알고리즘은 협대역 특성을 가지는 소음을 효과적으로 제어할 수 있다. GAL 알고리즘의 수렴 성능을 개선하기 위한 가변 격자 필터의 각 단계에 동일하게 적용하면 입력 신호의 특성 변화에 강인하게 대처하지 못한다. 제안 알고리즘은 격자 필터의 각 단계에 적합한 로컬 가변 수렴 상수를 이용하여 안정적이고 일관성 있는 수렴 성능을 보장한다. 실험을 통해 제안 알고리즘은 빠른 수렴 속도와 낮은 정상 상태를 보임을 확인하였다.

핵심용어: 능동 소음 제어(ANC), 적응 필터, Gradient adaptive lattice(GAL) 알고리즘, 가변 수렴 상수

ABSTRACT: In this paper, a novel variable step-size filtered-x gradient adaptive lattice (NVSS-FxGAL) algorithm for active noise control system is proposed. The gradient adaptive lattice (GAL) algorithm is capable of controlling the narrow band noise effectively. The GAL algorithm can achieve both fast convergence rate and low steady-state level using the variable step-size. However, it suffers from the convergence performance for varying signal characteristic since the global variable step-size is equally applied to all lattice stages. Therefore, the proposed algorithm guarantees the stable and consistency convergence performance by using the local variable step-size for the suitable each lattice stage. Simulation results confirm that the proposed algorithm can obtain the fast convergence rate and low steady-state level compared to the conventional algorithms.

Keywords: Active noise control (ANC), Adaptive filter, Gradient adaptive lattice (GAL) algorithm, Variable step-size
PACS numbers: 43.50.Ki, 43.60.Mn

1. 서 론

능동 소음 제어(active noise control)는 같은 크기와 반대 위상을 갖는 2차적인 소음 즉 제어 신호를 생성하여 초기의 소음과 결합하여 소음들이 제거되는 중첩의 원리를 이용한다.^[1] 능동 소음 제어를 위한 기존의 적응 알고리즘들은 시스템 지연 및 음향 경로를 포함한 2차 경로에 의한 시간 지연으로 인해 시스

템의 불안정성을 야기 시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 2차 경로에 의한 시간 지연을 보상 하는 filtered-x 구조가 능동 소음 제어 시스템에 적합하다.^[2]

대표적으로 FxLMS(Filtered-x least Mean Square) 알고리즘은 비교적 간단한 구조로 안정적인 수렴 성능을 보장하기 때문에 널리 사용되고 있다.^[3] 하지만, 유색 잡음 특성을 갖는 신호의 입력은 수렴 성능 저하의 요인이 된다.^[4] 수렴 성능 향상을 위해 유색 입력 신호에도 빠른 수렴 속도를 갖는 FxAP(Filtered-x Affine Projection) 알고리즘이 제안되었다.^[5,6] 능동 소음

†Corresponding author: Youngcheol Park (young00@yonsei.ac.kr)
Changjo, Room 269, Division of Computer and Telecommunication Engineering, Yonsei University Wonju Campus 1, Yonseidae-Gil, Wonju 220-710, Republic of Korea
(Tel: 82-33-760-2756, Fax: 82-33-763-4323)

제어 환경에서 대부분의 소음 신호는 하모닉 성분으로 구성된 협대역 신호이다. 이러한 소음 신호를 제어하기 위해 FxAP를 사용하면 제어 알고리즘의 빠른 수렴 속도를 보장할 수 없다.

이론적으로 LMS와 AP와 같이 TDL(Tapped Delay Line)구조를 가지는 알고리즘에 비해 격자 구조를 가지는 GAL(Gradient Adaptive Lattice) 알고리즘이 협대역 신호 제거에 적합하다.^[7-9] 이에 협대역 소음 신호 제어를 위한 FxGAL(Filtered-x GAL) 알고리즘이 제안되었다.^[10] 하지만 FxGAL 알고리즘의 수렴 성능은 참조 신호의 통계적 특성과 무관한 특성을 보이며 또한, FxAP에 비해 느린 초기 수렴 속도를 가지므로 최근 수렴 속도를 가변적으로 조절하는 가변 수렴 상수 FxGAL(VSS-FxGAL) 알고리즘이 제안되었다.^[11]

이때 VSS-FxGAL 알고리즘에서는 격자 필터의 단일 단계의 정보만을 이용하여 가변 수렴 상수(variable step-size)를 결정하기 때문에 입력 신호의 특성에 따라서 수렴 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 각 격자 단계에 적합한 로컬 가변 수렴 상수를 이용하여 수렴 성능을 개선한다.

본 논문의 구성은 2장에서 기존 가변 수렴 상수 기반의 VSS-FxGAL에 대해서 설명하고, 3장에서 제안하는 Novel VSS-FxGAL(NVSS-FxGAL) 알고리즘을 보인다. 4장에서 실험을 통해 제안 알고리즘의 성능을 평가하고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 가변 수렴 상수 FxGAL 알고리즘

2.1 FxGAL 알고리즘

Fig. 1은 능동 소음 제어를 위한 N 차의 FxGAL 알고리즘 블록선도를 보이고 있다.^[10,11] 이때, 추정된 2차 경로로 컨벌루션된 참조 신호 $r(n) = x(n) \otimes \hat{h}(n)$ 에 대한 전방 선형 예측 오차(forward prediction error)와 후방 선형 예측 오차(backward prediction error)는 다음과 같다.^[7]

$$f_m^r(n) = f_{m-1}^r(n) + \kappa_m b_{m-1}^r(n-1), \quad (1)$$

$$b_m^r(n) = b_{m-1}^r(n-1) + \kappa_m f_{m-1}^r(n). \quad (2)$$

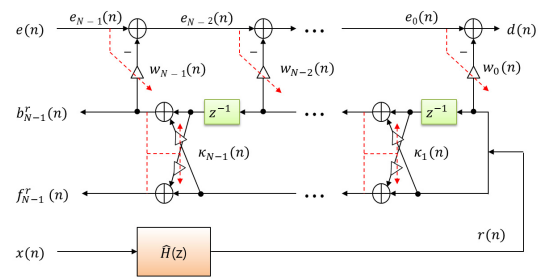


Fig. 1. Block diagram of filtered-x gradient adaptive lattice.

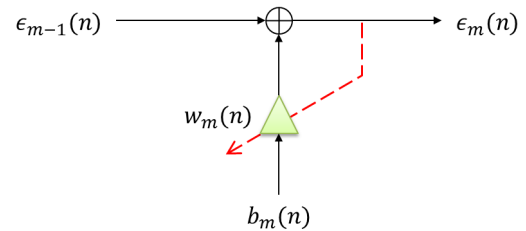


Fig. 2. Block diagram of 1st order m stage adaptive filter.

n 과 m 은 각각 시간 인덱스와 단계 인덱스이며, $f_m^r(n)$ 와 $b_m^r(n)$ 은 각각 전방과 후방 선형 예측 오차이고, 각 단계에 대한 후방 선형 예측 오차들은 서로 직교(orthogonal)하다.^[7]

$$E[b_i^r(n)b_j^r(n)] = 0, \quad i \neq j. \quad (3)$$

능동 소음 제어를 위한 FxGAL 알고리즘에서 반사 계수 $\kappa_i(n)$ 는 다음과 같은 갱신 식을 갖는다.^[10]

$$\kappa_m(n) = \kappa_m(n-1) - \frac{\mu_\kappa}{\xi_m(n)} \Lambda(n), \quad (4)$$

$$\Lambda(n) = [f_{m+1}^r(n)b_m^r(n-1) + b_{m+1}^r(n)f_m^r(n)]. \quad (5)$$

μ_κ 는 반사 계수를 갱신하기 위한 수렴 상수이고, $\xi_m(n)$ 은 전방 선형 예측 오차와 지연 후방 선형 예측 오차의 파워이며 다음과 같다.

$$\xi_m(n) = \beta \xi_m(n-1) + (1-\beta)\Psi(n), \quad (6)$$

$$\Psi(n) = [(f_m^r(n))^2 + (b_m^r(n))^2]. \quad (7)$$

β 는 스무딩 인자이다. FxGAL 알고리즘의 m 단계에 대한 적응 필터 계수 $w_m(n)$ 은 m 단계에서 추정된 로컬 오차의 제곱이 최소화하도록 갱신되며 다음과 같다.

$$w_m(n+1) = w_m(n) - \frac{\mu}{\sigma_{b_m}^2(n)} \epsilon_m(n) b_m^r(n). \quad (8)$$

μ 는 적응 필터를 위한 수렴 상수 이고, $\sigma_{b_m}^2(n)$ 는 후방 예측 오차의 파워로 Eq.(6)과 같이 1차 IIR 필터로부터 얻을 수 있다. 이때, m 단계의 로컬 오차 $\epsilon_m(n)$ 는 다음과 같다.

$$\epsilon_m(n) = \epsilon_{m-1}(n) + h(n) \otimes [w_m(n) b_m^r(n)]. \quad (9)$$

$h(n)$ 은 2차 경로이며, $b_m^r(n)$ 는 참조 신호 $x(n)$ 에 대한 격자 필터의 m 단계 후방 예측 오차이고, $\epsilon_{-1}(n)$ 은 주 소음 신호 $d(n)$ 과 같다. 이때, m 단계의 로컬 오차를 얻기 위해서는 주 소음 신호 $d(n)$ 을 측정해야 한다. 하지만 실제 능동 소음 제어 시스템에서는 주 소음 신호 $d(n)$ 의 측정이 불가능하며, 예러 센서로부터 잔여 소음 신호 $e(n)$ 만 측정할 수 있다. 이때 격자 필터의 $\epsilon_{N-1}(n)$ 이 $e(n)$ 과 같다는 사실을 바탕으로 Eq.(9)를 다음과 같이 다시 정리하여 m 단계에 대한 오차 신호를 추정할 수 있다.^[10]

$$\epsilon_{N-m-1}(n) = \epsilon_{N-m}(n) - w_{N-m-1}(n) b_{N-m-1}^r(n). \quad (10)$$

Eq.(10)을 살펴보면 m 단계에 출력 신호를 보상함으로써 로컬 오차 신호를 재 생성할 수 있을 뿐만 아니라 주 소음 신호 $d(n)$ 또한 추정할 수 있다.

2.2 가변 수렴 상수 FxGAL 알고리즘

FxGAL 알고리즘은 입력 신호의 통계적 특성에 관계없이 TDL 구조의 알고리즘보다 우수한 성능을 보이는 반면, AP 알고리즘에 비해 초기에 느린 수렴 속도를 갖는 단점이 있다. 따라서 초기에 빠른 수렴 속도를 갖고 낮은 정상 상태를 갖도록 수렴 상수를 조절 하는 방법인 가변 수렴 상수 기술을 GAL 알고리

즘에 적용하는 방법이 제시되었다.^[11]

$b_m^r(n) \epsilon_m(n) \approx b_m^r(n) \epsilon_{N-1}(n)$ 로 가정 하면, Eq.(8)은 다음과 같이 벡터 형식으로 다시 정리 된다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu(n) \mathbf{P}^{-1}(n) \mathbf{b}_r(n) \epsilon_{N-1}(n). \quad (11)$$

후방 선형 예측 오차의 파워 매트릭스 $\mathbf{P}(n) = \text{diag}[\sigma_{b_0}^2(n), \sigma_{b_1}^2(n), \dots, \sigma_{b_{N-1}}^2(n)]$ 로 정의 되고, $\mu(n)$ 은 시간 n 에서의 가변 수렴 상수이다. 이때, 귀납적(*a posteriori*) 오차는 다음 식으로 정의 된다.

$$e(n) = d(n) + \mathbf{w}^T(n+1) \mathbf{b}_r(n). \quad (12)$$

$\epsilon_{N-1}(n)$ 은 $e(n)$ 이라는 사실을 바탕으로 Eq.(12)을 Eq.(11)에 적용하여 다시 정리 하면 귀납적 오차는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$e(n) = [1 - \mu(n) \mathbf{b}_r^T(n) \mathbf{P}^{-1}(n) \mathbf{b}_r(n)] \epsilon_{N-1}(n). \quad (13)$$

시스템 잡음 $s(n)$ 과 참조 신호 $x(n)$ 이 상호간에 상관성이 없다면, 이상적인 능동 소음 제어 시스템은 소음 $d(n)$ 중에서 $s(n)$ 만을 남기게 된다. 그러므로 이상적인 가변 수렴 상수 인자 $\mu(n)$ 은 다음 조건을 만족해야 한다.^[11]

$$\sigma_e^2(n) = \sigma_s^2(n), \quad \forall n, \quad (14)$$

$\sigma_e^2(n) = E[e^2(n)]$ 은 귀납적 오차의 파워 이고, $\sigma_s^2(n) = E[s^2(n)]$ 은 시스템 잡음의 파워이다. Eq.(13)의 양변을 제곱한 뒤에 통계 기댓값을 취한 뒤에 전개 하면 다음 식을 얻는다.

$$[1 - \mu(n) M]^2 \sigma_{\epsilon_{N-1}}^2(n) = \sigma_s^2(n). \quad (15)$$

$\sigma_{\epsilon_{N-1}}^2(n) = E[\epsilon_{N-1}^2(n)]$ 는 $(N-1)$ 번째 단계의 로컬 오차의 파워이다. 이때, 가변 수렴 상수를 얻기 위해서는 입력 신호로부터 직접적으로 추정이 불가능한 $\sigma_s^2(n)$ 이 필요하므로 간접적인 추정이 요구된다. 따라서 적응 필터가 충분히 정상 상태에 도달 했다는

가정과 2차 경로가 정확히 추정되었다고 가정 한다면, $(N-2)$ 단계에서의 로컬 오차 $\epsilon_{N-2}(n)$ 은 시스템 잡음 $s(n)$ 과 $(N-1)$ 번째 단계에서의 출력 신호 $y_{N-1}(n)$ 의 합으로 표현이 가능하므로 다음과 같이 간접적으로 $\sigma_s^2(n)$ 을 추정할 수 있다.

$$\sigma_s^2(n) \approx \sigma_{\epsilon_{N-2}}^2(n) - \sigma_{y_{N-1}}^2(n). \quad (16)$$

Eqs.(17)과 (18)을 이용하여 가변 수렴 상수를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\mu_{vss}(n) = \frac{1}{N} \left| 1 - \sqrt{\frac{|\hat{\sigma}_{\epsilon_{N-2}}^2(n) - \hat{\sigma}_{y_{N-1}}^2(n)|}{\hat{\sigma}_{\epsilon_{N-1}}^2(n)}} \right|. \quad (17)$$

$\hat{\sigma}_{\epsilon_{N-1}}^2(n)$, $\hat{\sigma}_{\epsilon_{N-2}}^2(n)$ 그리고 $\hat{\sigma}_{y_{N-1}}^2(n)$ 은 모두 Eq.(6)과 같이 1차의 IIR 필터를 이용하여 추정하였다. 적응 필터가 충분히 수렴하였다는 가정 하에는 $\hat{\sigma}_{\epsilon_{N-2}}^2(n) \geq \hat{\sigma}_{y_{N-1}}^2(n)$ 의 조건을 만족하지만 파워 추정 과정에서 가끔씩 위의 조건을 만족하지 못하는 경우가 발생하기 때문에 Eq.(17)에 절대 값을 적용하여 가변 수렴 상수는 $0 \leq \mu_{vss}(n) \leq 1/N$ 을 만족하도록 하였다.

III. 제안 가변 수렴 상수 FxGAL 알고리즘

VSS-FxGAL 알고리즘에서 가변 수렴 상수는 Eq.(17)와 같이 $(N-2)$ 단계의 로컬 오차와 필터 출력 신호만을 이용하여 추정한다. 추정된 가변 수렴 상수는 격자 필터의 각 단계에 동일하게 적용되기 때문에 각 단계에 적합한 수렴 상수를 결정할 수 없다. 따라서 입력 신호의 특성 및 격자 차수에 대해서 일관성 있는 수렴 성능을 갖지 못하며 또한 수렴 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 각 단계에 적절한 수렴 상수를 적용할 수 있도록 로컬 가변 수렴 상수 기법을 이용하여 수렴 성능을 향상 시킨다.

FxGAL 알고리즘의 후방 예측 오차는 서로 직교 특성을 가지므로 각 단계는 단일 차수를 갖는 적응 필터

로 표현할 수 있다. 이때, $(m-1)$ 단계에서의 오차 신호는 m 단계에서의 주 입력 신호가 되어 참조 신호 $b_m(n)$ 과 적응 필터 계수 $w_m(n)$ 을 이용하여 m 단계의 오차 신호 $\epsilon_m(n)$ 를 얻는다. 이때 귀납적 오차를 다시 정의 하면 다음과 같다.

$$\epsilon_m(n) = \epsilon_{m-1}(n) + w_m(n+1)b_m^r(n). \quad (18)$$

위의 식에 Eq.(8)을 적용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon_m(n) = \epsilon_m(n) - \mu_m(n) \frac{b_m^r(n)}{\sigma_{b_m}^2(n)} b_m^r(n) \epsilon_m(n). \quad (19)$$

Eq.(8)과 (13)을 이용하여 Eq.(19)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon_m(n) = \left(1 - \mu_m(n) \frac{b_m^r(n)}{\sigma_{b_m}^2(n)} b_m^r(n) \right) \epsilon_m(n). \quad (20)$$

Eq.(20)의 양변을 제곱 한 뒤 통계 기댓값을 취하면 다음과 같다.

$$\sigma_{\epsilon_m}^2(n) = \left(1 - \mu_m(n) \frac{E[(b_m^r)^2]}{\sigma_{b_m}^2} \right)^2 \sigma_{\epsilon_m}^2(n). \quad (21)$$

$\sigma_{\epsilon_m}^2(n) = E[\epsilon_m(n)]$, $\sigma_{\epsilon_m}^2(n) = E[\epsilon_m(n)]$ 이다. 이때 수렴 상수 $\mu_m(n)$ 에 대해서 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\mu_m(n) = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{\epsilon_m}^2(n)}{\sigma_{\epsilon_m}^2(n)}}. \quad (22)$$

적응 필터가 충분히 수렴 하면 m 단계에서 얻어지는 귀납적 오차는 시스템 잡음 $s_m(n)$ 와 같아지므로 $\sigma_{\epsilon_m}^2(n) = \sigma_{s_m}^2(n)$ 조건을 만족하는 가변 수렴 상수 $\mu_m(n)$ 을 추정해야 한다. 하지만 실제 실험 환경에서는 입력 신호로부터 $\sigma_{s_m}^2(n)$ 을 정확히 얻을 수 없다. 이때 m 단계에서의 주 입력 신호 $\epsilon_{m-1}(n)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{m-1}(n) = w_m^o b_m^r(n) + s_m(n). \quad (23)$$

w_m^o 과 $s_m(n)$ 은 각각 m 단계에서의 최적 계수와 시스템 잡음이다. 이때, $w_m^o b_m^r(n)$ 과 $s_m(n)$ 이 상호간에 상관성이 없다면, m 단계에서의 시스템 잡음은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\sigma_{\epsilon_{m-1}}^2(n) - \sigma_{y_m}^2(n) \approx \sigma_{s_m}^2(n). \quad (24)$$

Eq.(24)를 Eq.(22)에 적용하여 로컬 가변 수렴 상수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\mu_m(n) = \frac{1}{N} \left| 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{\epsilon_{m-1}}^2(n) - \sigma_{y_m}^2(n)}{\sigma_{\epsilon_m}^2(n)}} \right|. \quad (25)$$

이때, 로컬 가변 수렴 상수가 양수 값을 갖도록 절대 값을 이용하였으며, VSS-FxGAL의 가변 수렴 상수와 같이 로컬 가변 수렴 상수의 범위는 $0 \leq \mu_m(n) \leq 1/N$ 을 갖도록 하였다.

IV. 실험 및 결과

실험을 위한 소음 신호는 기본 주파수의 하모닉 성분을 갖도록 다음과 같이 모델링하였다.

$$d(n) = \sum_{i=1}^P A_i \sin(2\pi i f + \theta_i) + v(n). \quad (26)$$

P 는 하모닉의 개수이며, f 는 기본 주파수이고, A_i 와 θ_i 는 각각 i th 하모닉의 크기와 위상이다. 그리고 $v(n)$ 은 2차의 AR 계수로 모델링된 배경 잡음이다. Fig 3은 실험에 사용된 음향 경로와 2차 경로를 보이고 있다.

제안 알고리즘의 성능을 평가를 위해 FxGAL 알고리즘과 VSS-FxGAL 알고리즘을 비교하였으며, 실험을 위한 주 소음 신호 $d(n)$ 은 $P=4$ 로 하여 기본 주파수는 240, 200 그리고 275 Hz로 2s 간격으로 변경하였으며, 위상은 랜덤하게 발생하였다. 배경 잡음 20 dB SNR을 갖도록 생성하였고, 필터 차수 N 은 8로 하여

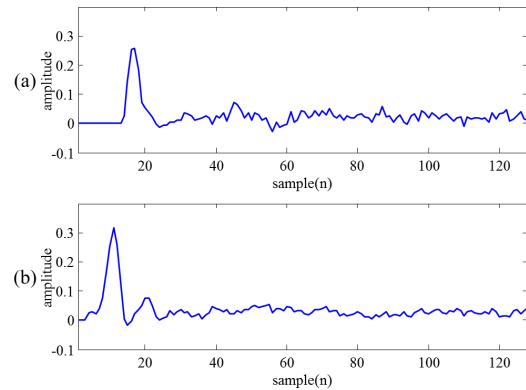


Fig. 3. Impulse response of (a) the primary path, and (b) the secondary path.

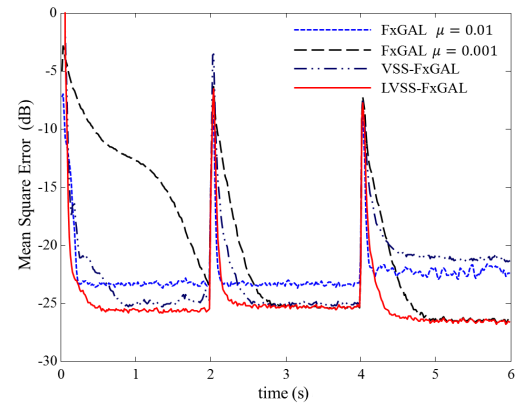


Fig. 4. MSE of the FxGAL algorithms $\mu=0.01$, $\mu=0.001$ VSS-FxGAL and the proposed algorithm.

실험을 실시하였다.

각 알고리즘에 대한 MSE(Mean Square Error) 결과를 보이고 있는 Fig 4로부터 제안 알고리즘은 고정 수렴 상수를 가지는 FxGAL 알고리즘과 비교함으로써 빠른 수렴 속도와 낮은 정상 상태를 가지는 것을 관찰할 수 있다. 특히 단일 가변 수렴 상수인 VSS-FxGAL 알고리즘은 신호의 특성이 변하는 2s와 4s에서 서로 상이한 수렴 성능을 가지는 것을 관찰할 수 있다. 하지만 제안 알고리즘은 로컬 가변 수렴 상수를 사용하여 신호의 특성 변화에 관계없이 안정적으로 일관성 있는 수렴 성능을 보인다. Fig 5는 VSS-FxGAL 알고리즘과 제안 알고리즘의 가변 수렴 상수를 보이고 있다. 이때, VSS-FxGAL 알고리즘에 대한 단일 수렴 상수에 대해서 보이며, 제안 알고리즘은 각 단계에 적용되는 수렴 상수를 겹쳐서 보이고 있다.

Fig 5(a)로부터 VSS-FxGAL 알고리즘의 가변 수렴

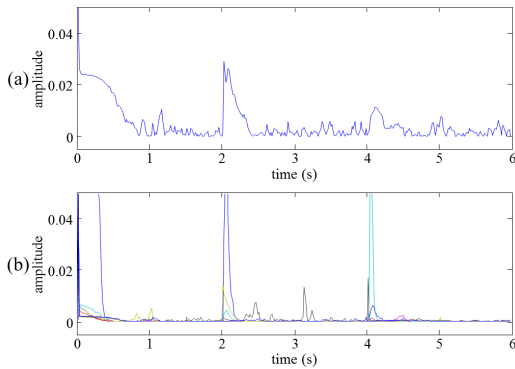


Fig. 5. Variable step-size of (a) VSS-FxGAL and (b) the proposed algorithm.

상수는 신호의 특성이 변화하는 전이 구간에서 빠르게 수렴 상수를 조절하지 못하고 정상 상태에서의 수렴 상수 변화가 크게 나타나는 것으로부터 초기 수렴 속도 및 정상 상태 레벨(steady-state level)에 어려움이 있음을 간접적으로 확인할 수 있다. 반면, Fig. 5(b)로부터 제안 알고리즘은 로컬 가변 수렴 상수를 전이 구간에서는 큰 수렴 상수로 결정되며 정상 상태에서는 낮은 수렴 상수를 가지도록 효과적으로 조절함으로써 빠르고 안정적인 수렴 성능 보장한다.

V. 결론

본 논문은 능동 소음 제어에 적합한 NVSS-FxGAL 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘은 각 단계에 적합한 가변 수렴 상수를 적용함으로써 신호의 특성 변화에 관계없이 안정적으로 일관성 있는 수렴 성능을 가지는 것을 실험을 통해 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다(계약번호 UD120021JD).

References

1. S. J. Elliott and P. A. Nelson, "Active noise control," *IEEE Signal Process. Mag.* **10**, 12-35 (1993).

2. S. M. Kuo and D. R. Morgan, "Active noise control: a tutorial review," *Proc. of the IEEE*, **87**, 943-973 (1999).
3. P. A. Nelson and S. J. Elliott, *Active Control of Sound* (Academic Press, New York, 1992), pp. 195-203.
4. S. Haykin, *Adaptive Filter Theory, 4th ed.* (Prentice-Hall, New Jersey, 1996), pp. 332-340.
5. S. C. Douglas, "The fast affine projection algorithm for active noise control," in *Proc. 29th Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers* **2**, 1245-1249 (1995).
6. A. Carini and G. Sicuranza, "Transient and steady-state analysis of filtered-x affine projection algorithm," *IEEE Trans. on Signal Process.* **54**, 665-678 (2006).
7. L. J. Griffiths, "An adaptive lattice structure for noise-cancelling applications," in *Proc. IEEE Int. Conf. on ASSP*, **3**, 37-90 (1978).
8. E. H. Satorius, J. D. Smith, and P. M. Reeves, "Adaptive noise cancelling of a sinusoidal interference using a lattice structure," in *Proc. IEEE Int. Conf. on ICASSP*, **4**, 929-932 (1979).
9. R. C. North, J. R. Zeidler, T. R. Albert, and W. H. Ku, "Comparison of adaptive lattice filters to LMS transversal filters for sinusoidal cancellation," in *Proc. IEEE Int. Conf. on ASSP*, **4**, 33-36 (1992).
10. Y. C. Park and S. D. Sommerfeldt, "A fast adaptive noise control algorithm based on the lattice structure," *Applied Acoust.* **47**, 1-25 (1996).
11. S. W. Kim, Y. C. Park, and D. H. Youn, "A variable step-size filtered-x gradient adaptive lattice algorithm for active noise control," in *Proc. IEEE Int. Conf. on ICASSP*, 189-192 (2012).

저자 약력

▶ 이 근 상(Keunsang Lee)



2006년: 연세대학교 정보기술학부(학사)
2010년: 연세대학교 전산학과(석사)
2010년 ~ 현재: 연세대학교 전산학과(박사 과정)
<관심분야> 디지털 신호처리, 적응 신호처리, 음성 신호처리

▶ 김 성 우(Seong-woo Kim)



2008년: 연세대학교 공과대학 전기전자공학과(학사)
2008년 ~ 현재: 연세대학교 공과대학 전기전자공학과(통합과정)
<관심분야> 디지털 신호처리, 오디오 신호처리

▶ 임 재 풍(Jaepoong Im)



2013년: 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부(학사)
2013년~현재: 연세대학교 전산학과(석사과정)
<관심분야> 디지털 신호처리, 적응 신호처리

▶ 서 영 수(Young-soo Seo)



1999년 2월: 부산대학교 기계공학부(학사)
2001년 2월: 부산대학교 기계설계공학과(석사)
2005년 8월: 부산대학교 기계설계공학과(박사)
2006년 1월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원

▶ 박 영 철(Youngcheol Park)



1986년: 전기전자공학과(학사)
1988년: 전기전자공학과(석사)
1993년: 전기전자공학과(박사)
2002년~현재: 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수
<관심분야> 디지털 신호처리, 오디오 신호처리, 음성 신호처리, 적응 신호처리