

3차 볼테라 필터링과 VSSGS-PAP 알고리즘을 이용한 배경잡음 변화에 강인한 비선형 능동소음제어 시스템

Nonlinear ANC system robust to background noise variation by using 3rd-order Volterra filtering with a VSSGS-PAP algorithm

서재범*, 김경재**, 남상원***

Jae-Beom Seo, Kyoung-Jae Kim and Sang-Won Nam

Abstract - In this paper, nonlinear active noise control (ANC) of a 3rd-order Volterra system, which is robust to background noise variation, is proposed along with a variable step-size Gauss-Seidel pseudo affine projection (VSSGS-PAP) algorithm. Simulation results demonstrate that the proposed approach yields better nonlinear ANC performance in a background noise variation environment, compared with the conventional methods for the nonlinear ANC .

Key Words : ANC, adaptive filter, VSSGS-PAP, Volterra filtering, variable step-size, background noise variation

1. 서론

적용 필터 알고리즘에 기반한 능동 소음 제어 시스템은 수동 소음 제어 방식에 비해 저주파의 소음 감쇠 성능이 우수하고 소형화가 가능하여, 최근 휴대폰, 자동차, 비행기 등에 적용되고 있다 [1-2]. 특히, 구조가 간단하고 연산량이 적은 least mean square (LMS) 알고리즘을 이용한 능동 소음 제어 시스템이 많이 제안되어 왔으나, LMS 알고리즘은 수렴속도가 느린 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 적은 연산량과 빠른 수렴성을 갖는 적용 필터 알고리즘에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다 [1]. 특히, affine projection (AP) 알고리즘은 LMS 알고리즘 보다 빠른 수렴 성능을 보이면서도 recursive least square (RLS) 알고리즘 보다 적은 연산량이 요구되는 특징이 있다. 그러나 AP 알고리즘은 projection order가 증가할수록 연산량이 지수승으로 증가하고, matrix inversion으로 인한 안정성 문제가 있었다 [3]. 이를 해결하기 위해 Gauss-Seidel 알고리즘을 적용하여 기존 AP 알고리즘의 연산량을 줄인 Gauss-Seidel pseudo affine projection (GS-PAP) 알고리즘[4] 및 variable step-size를 갖는 GS-PAP 알고리즘[5]도 보고되었다. 또한, step-size를 배경잡음의 변화 따라 적응적으로 변화시켜 배경 잡음에 강인한 VSSGS-PAP 알고리즘도 최근 제안되었다 [6]. 특히, 실제 외부환경에서 발생하는 소음은 다양하고 비선형적인 특성도 갖고 있어서 다양한 배경잡음 변화에 대한 고려가 필요하다 [7-8].

본 논문에서는 3차 볼테라 필터링과 variable step-size Gauss-Seidel pseudo affine projection (VSSGS-PAP) 알고

리즘을 적용하여 배경잡음이 변하는 환경에서도 강인한 특성을 보이는 비선형 능동 소음 제어 시스템을 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 3차 볼테라 필터링을 이용한 VSSGS-PAP 알고리즘을 설명하고, 3절에서는 제안된 방법과 기존의 방법의 수렴 특성을 비교한 모의실험 결과를 보이며, 끝으로 4절에서 결론을 맺는다.

2. 3차 볼테라 필터링을 이용한 VSSGS-PAP 알고리즘

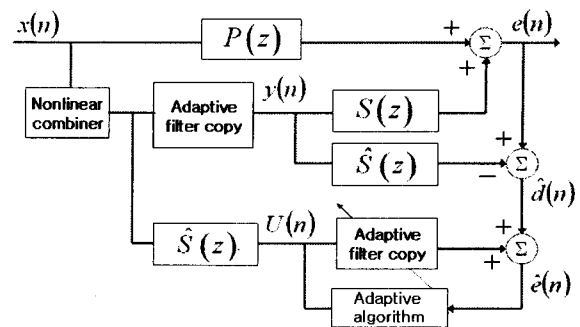


그림 1. 비선형 능동 소음 제어 시스템

그림 1은 비선형 능동 소음 제어 시스템의 블록 다이어그램이다. 구체적으로 $x(n)$ 은 reference microphone을 통한 소음 입력신호, $P(z)$ 는 primary path의 전달특성, 그리고 $y(n)$ 은 적용 필터 출력으로 다음과 같이 표현된다 [7].

$$y[n] = \mathbf{h}_v^T[n] \mathbf{x}_v[n] \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_v[n] = [x[n], \dots, x[n-L+1], x^2[n], x[n]x[n-1], \dots, x[n]x[n-L+1], x^2[n-1], x[n-1]x[n-L+1], x[n-2]x[n-2], \dots, x^2[n-L+1], x^3[n], \dots, x^2[n]x[n-L+1], \dots, x^3[n-L+1]]^T \quad (2)$$

저자 소개

- * 서재범: 漢陽大學校 電子컴퓨터통신工學科 博士課程
- ** 김경재: 漢陽大學校 電子컴퓨터통신工學科 博士課程
- *** 남상원: 漢陽大學校 電子通信工學部 教授 · 工博

$$\mathbf{h}_v[n] = [h_1[0], \dots, h_1[L-1], h_2[0,0], h_2[0,1], \dots, h_2[0,L-1], h_2[1,1], h_2[1,L-1], h_2[2,2], \dots, h_2[L-1,L-1], h_3[0,0,0], \dots, h_3[0,0,L-1], \dots, h_3[L-1,L-1,L-1]]^T \quad (3)$$

식 (2)-(3)에서 $\mathbf{x}_v[n]$ 은 볼테라 입력 벡터이고, $\mathbf{h}_v[n]$ 은 볼테라 커널 계수 벡터이다. 여기서 L 은 primary path의 임펄스 응답의 길이를 나타낸다. 또한, primary path를 통과한 신호 $d[n]$ 을 추정된 신호인 $\hat{d}[n]$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{d}[n] = e[n] - \hat{\mathbf{s}}^T \mathbf{y}[n] \quad (4)$$

식 (4)에서 $e[n]$ 은 error signal로 적응 필터 출력 $y[n]$ 이 Secondary path 통과하고 소음이 제거된 후 남은 잔여 신호이다. 또한, $\hat{\mathbf{s}}$ 은 $\hat{S}(z)$ 의 임펄스 응답벡터를 나타내며 secondary path $S(z)$ 의 임펄스 응답을 추정된 것이다. 또한, $\mathbf{u}_v[n]$ 은 $\hat{S}(z)$ 을 통과한 볼테라 입력 벡터로 구성된 다음의 $U_v[n]$ 을 고려하자 (특히, M 은 affine projection order임).

$$U_v[n] = [\mathbf{u}_v[n] \ \mathbf{u}_v[n-1] \ \dots \ \mathbf{u}_v[n-M+1]] \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_v[n] = U_v^T[n] U_v[n] + \delta \mathbf{I} \quad (6)$$

식 (6)에서의 $\mathbf{R}_v[n]$ 은 $U_v[n]$ 의 autocorrelation matrix를 나타내며, δ 는 regularization factor, \mathbf{I} 는 identity matrix이다. 또한, 선형 예측 계수 벡터 $\mathbf{p}[n]$ 은 선형 예측 계수 벡터로서 다음 식을 이용하여 추정될 수 있다.

$$\mathbf{R}_v[n] \mathbf{p}[n] = \mathbf{b} \quad (7)$$

$$\mathbf{z}_v[n] = \frac{1}{P_0} \sum_{i=0}^{M-1} P_i[n] \mathbf{u}_v[n-i] \quad (8)$$

$$\varepsilon_v[n] = \frac{1}{P_0} P[n] \hat{e}[n] \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{e}}[n] = [\hat{e}[n] \ \hat{e}[n-1] \ \dots \ \hat{e}[n-M+1]] \quad (10)$$

$$\mathbf{h}_v[n+1] = \mathbf{h}_v[n] + \mu[n] \frac{\varepsilon_v[n]}{\|\mathbf{z}_v[n]\|_2 + \delta} \mathbf{z}_v[n] \quad (11)$$

$$\mu[n] = \left| 1 - \frac{\sqrt{\sigma_e^2 - \sigma_y^2}}{\delta + \sqrt{\sigma_e^2}} \right| \quad (12)$$

식 (7)에서 $\mathbf{p}[n]$ 은 Gauss-Seidel method를 적용하여 추정할 수 있다 [4]. 특히, \mathbf{b} 는 첫 번째 원소만 1이고 나머지는 0인 벡터이고, $\mathbf{z}_v[n]$ 은 approximated decorrelation 벡터로 적응 필터 알고리즘을 업데이트하는데 이용된다. $\varepsilon_v[n]$ 은 filtered error 신호로 선형 예측 계수 벡터와 M 개의 error 벡터로부터 구한 것이다. 식 (12)은 variable step-size $\mu[n]$ 을 구하는 식으로, σ_d^2 는 $\hat{d}[n]$ 신호의 power를 나타내며, σ_y^2 과 σ_e^2 은 각각 적응 필터의 출력과 error 신호의 파워이다 [6].

3. 모의 실험

본 모의 실험에서는 제안한 방법의 비선형 능동 소음 제어 수렴 성능 평가를 위해 다음과 같이 primary path를 3차 비

선형으로 모델링하였다 [7].

$$d[n] = f[n] + 0.08 \times f^2[n] - 0.04 \times f^3[n] \quad (13)$$

$$f[n] = \mathbf{a}^T \mathbf{x}[n] \quad (14)$$

식 (14)에서 \mathbf{a} 는 primary path의 임펄스 응답으로 $f[n]$ 은 primary path 출력 신호를 나타낸다. 정량적인 성능평가를 위해 다음의 normalized mean square error (NMSE)를 사용하였으며 결과는 그림 2에 나타내었다.

$$NMSE = 10 \log_{10} \frac{E\{e^2[n]\}}{\sigma_d^2} \quad (15)$$

실험에서의 affine projection order는 5이며, variance가 1인 white gaussian noise를 비선형 능동 소음 제어 시스템의 입력 신호로 사용하였다. 또한, 배경잡음은 입력신호와 independent한 white gaussian noise 신호로서 SNR이 10dB인 잡음 신호이다. 특히, 배경잡음의 변화에 대한 적응 필터 알고리즘의 수렴 성능을 비교하기 위해 10000 - 20000 구간에서 10dB 소음 신호를 발생시켰다.

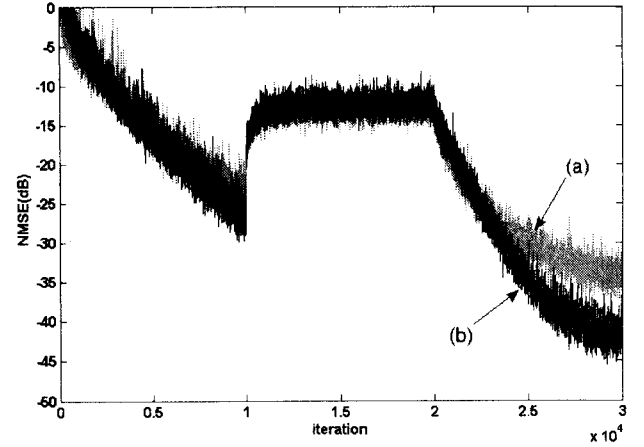


그림 2. NMSE curves

- (a) 기존의 variable step-size를 이용한 VSS-PAP,
(b) 제안한 VSSGS-PAP 방법

그림 2(a)는 기존의 variable step-size를 이용한 VSS-PAP 알고리즘의 NMSE curve이고 그림 2(b)는 제안한 VSSGS-PAP 방법의 NMSE curve를 나타낸다. 두 알고리즘 모두 처음에는 비슷한 수렴 성능을 보이다가 배경 잡음 발생 이후(즉, iteration number=2000) 기존 방법보다 제안한 방법이 더 빠른 수렴특성을 확인할 수 있다. 즉, 제안한 방법이 배경잡음이 변하는 환경에서 비선형 능동 소음 제어 성능이 강인함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 3차 볼테라 필터링과 VSSGS-PAP 알고리즘을 이용한 비선형 능동 소음 제어 시스템을 제안하였다. 실험을 통해 제안한 방법이 기존의 variable step-size를 갖는 VSS-PAP 알고리즘보다 배경잡음의 변화가 발생하는 환경에

서 비선형 능동 소음 제어 성능이 더 좋음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice - Hall Information and System Sciences. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986.
- [2] S.M. Kuo and D.R Morgan, "Active noise control: a tutorial review," *Proc. IEEE*, vol. 87, pp. 934-972, Jun. 1999.
- [3] K. Oseki and T. Umeda, "An adaptive algorithm using an orthogonal projection to an affine subspace and its properties," *Electronics and Communications in Japan*, vol. 67-A, no. 5, pp. 19-27, 1984.
- [4] F. Albu and A. Fagan, "The Gauss-Seidel pseudo affine projection algorithm and its application for echo cancellation," *Proc. of Asilomar Conf. Asilomar Grove, CA, U.S.A.*, pp. 1303-1306, Nov. 2003.
- [5] J. Lee, Y.C. Par and D.H. Youn, "Robust pseudo affine projection algorithm with variable step-size," *IEE Electronics Lett.*, vol. 44, no. 3, pp. 250-251, Jan. 2008.
- [6] C. Paleologu, J. Benesty, and S. Ciochina, "A variable step-size affine projection algorithm designed for acoustic echo cancellation," *IEEE Trans. on Audio, Speech, Language Processing*, vol. 16, no. 8, pp. 1466-1478, Nov. 2008.
- [7] L. Tan and J. Jing, "Adaptive Volterra filters for active control of nonlinear noise processes," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 49, no. 8, pp. 1667-1676, Aug. 2001.
- [8] A. Carini and G.L. Sicuranza, "Filtered-x affine projection algorithms for active noise control using Volterra filters," *EURASIP J. on Applied Signal Processing*, pp. 1841-1848, Dec. 2004.