

음향 피드백 경로를 가진 2차 볼테라 시스템의 능동소음제어

이정재 · 김경재 · 서재범 · 남상원  
한양대학교 대학원 전자통신컴퓨터 공학과

Active noise control of a second-order Volterra system with an acoustic feedback path

Jung-Jae Lee · Kyoung-Jae Kim · Jae-Bum Seo · Sang-Won Nam  
Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University

**Abstract** - In this paper, active noise control (ANC) of a Volterra system with a nonlinear secondary path is proposed in the presence of a linear acoustic feedback, whereby the conventional ANC of a linear system with online acoustic feedback-path modeling is further extended to ANC of a Volterra system with a linear acoustic feedback path. In particular, the proposed ANC system consists of two adaptive Volterra filters (for nonlinear noise control and nonlinear adaptive noise cancellation) and one feedback-path modeling filter. Simulation results show that the proposed approach yields more effective reduction of disturbances arising from the acoustic feedback, in addition to high nonlinear ANC performance.

1. 서 론

능동소음제어(Active noise control: ANC)는 소음 신호를 입력 받아 반대의 위상을 가지는 신호를 발생시켜 소음을 제거하는 방식이다[1]. 특히 filtered-x least mean square(FXLMS) 알고리즘은 단순한 구조와 적은 연산량을 가지는 능동소음 제거 방식으로 널리 알려져 있다. 하지만 강한 음향 피드백이 발생할 경우 수렴속도가 느려지거나 시스템의 불안정성이 발생하게 된다[1,6]. 이를 위해 피드백 부분의 모델링과 선형 적응 필터 알고리즘을 이용한 방법이 제안되었다. 최근에 선형 능동소음제어 시스템의 온라인 음향 피드백 경로 모델링 방식이 제안되었다 [6]. 이외에도 실제 시스템에서는 1차 경로나 2차 경로의 비선형적인 특성으로 비선형 왜곡이 발생하여 기존의 선형 능동소음제어 방식으로는 소음 제거에 한계가 있다[2-5]. 이러한 비선형성을 보상해 주기 위하여 비선형 1차 경로를 다중채널 구조를 가지는 Volterra FXLMS (VFXLMS) 알고리즘이 제안되었다 [2], 그리고 비선형 2차 경로는 가상 2차 경로 필터 개념을 사용하여 보상해주는 방법이 최근에 제안 되었다[3].

본 논문에서는 기존의 선형 능동소음제어 시스템의 온라인 음향 피드백 경로 모델링 방식[6]을 음향 피드백 경로를 가진 2차 볼테라 시스템의 비선형 능동소음제어로 확장 적용한 방식을 제안한다. 제안된 방식은 음향 피드백 경로 모델링(feedback path modeling : FBPM) 필터와 2개의 적응 볼테라 필터로 구성되어 있다. 음향 피드백 경로가 존재하지 않는 기존의 비선형 능동소음제어 시스템보다 많은 계산량을 가지지만 제안된 비선형 능동소음제어 시스템은 음향 피드백으로부터 발생하는 방해효과를 효과적으로 줄여 줄 수 있다.

2. 본 론

2.1 비선형 1차/2차 경로를 가지는 볼테라 시스템의 능동소음제어

비선형성을 가지는 1차/2차 경로는 2차 볼테라 필터로 모델링 할 수 있다[2-5]. 이때, 볼테라 커널의 대칭적 성질에 의한 N개의 유한한 메모리를 가지는 2차 볼테라 필터는 다음과 같이 표현된다.

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} w_1(m)x(n-m) + \sum_{m_1=0}^{N-1} \sum_{m_2=m_1}^{N-1} w_2(m_1, m_2)x(n-m_1)x(n-m_2) \quad (1)$$

식 (1)에서  $w_1(m)$ 과  $w_2(m_1, m_2)$ 는 각각 1차(linear), 2차(quadratic) 볼테라 커널을 나타낸다. 이때, 볼테라 커널의 출력은 다음과 같이 벡터 형태로 쓸 수 있다.

$$y(n) = \bar{w}^T(n)\bar{x}(n) \quad (2)$$

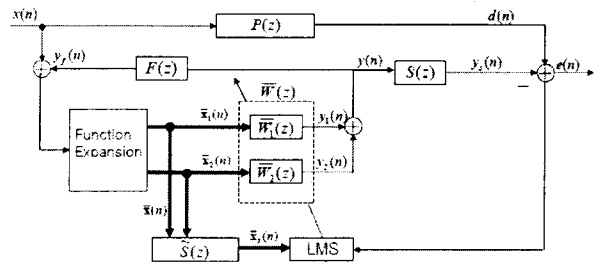
$$\bar{w}^T(n) = [\bar{w}_1(n) \ \bar{w}_2(n)], \quad \bar{x}^T(n) = [\bar{x}_1(n) \ \bar{x}_2(n)] \quad (3)$$

$$\bar{w}_1(n) = [w_1(0), \dots, w_1(N-1)] \quad (4)$$

$$\bar{w}_2(n) = [w_2(0,0), \dots, w_2(0, N-1), w_2(1,1), \dots, w_2(1, N-1), w_2(2,2), \dots, w_2(2, N-1), \dots, w_2(N-2, N-2), \dots, w_2(N-2, N-1), w_2(N-1, N-1)] \quad (5)$$

$$\bar{x}_1(n) = [x(n), \dots, x(n-N+1)] \quad (6)$$

$$\bar{x}_2(n) = [x^2(n), \dots, x(n)x(n-N+1), x^2(n-1), \dots, x(n-1)x(n-N+1), x^2(n-2), \dots, x(n-2)x(n-N+1), \dots, x(n-N+2)x(n-N+1), x^2(n-N+1)] \quad (7)$$



<그림 1> 음향 피드백 경로  $F(z)$ 를 가지는 2차 볼테라 시스템의 능동소음제어

그림 1은 음향 피드백 경로  $F(z)$ 를 가지는 2차 볼테라 시스템의 비선형 능동소음제어 시스템이다. 1차 경로  $P(z)$ 와 2차 경로  $S(z)$ 는 식(1)에 의해 비선형 시스템으로 모델링 되었다.  $d(n)$ 는 제거하려는 소음 신호로 비선형 1차 경로를 통과한 소음 신호이다.  $e(n)$ 는 오차 신호를 나타내며  $e(n) = d(n) - y_s(n)$ 이다.  $y_s(n)$ 는 2차 경로  $S(z)$ 의 출력 신호이며 2차 경로를 추정한 2차 경로  $\hat{S}(z)$ 는 다음과 같이 표현 가능하다[4].

$$\hat{s}(n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_s(n)}{\partial y(n)} & \frac{\partial y_s(n)}{\partial y(n-1)} & \dots & \frac{\partial y_s(n)}{\partial y(n-M)} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

또한,  $\hat{S}(z)$ 를 지난  $\bar{x}_s(n)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{x}_s^T(n) = [\bar{x}_{s1}(n) \ \bar{x}_{s2}(n)] \quad (9)$$

적용 필터  $\bar{w}(z)$ 는 기존의 VFXLMS[2]에 의해 다음과 같은 갱신 식으로 표현된다.

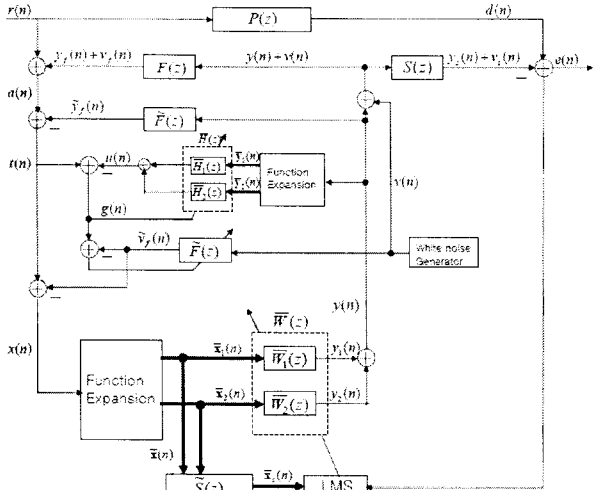
$$\bar{w}_1(n+1) = \bar{w}_1(n) + \mu_{w1}e(n)\bar{x}_{s1}(n) \quad (10)$$

$$\bar{w}_2(n+1) = \bar{w}_2(n) + \mu_{w2}e(n)\bar{x}_{s2}(n) \quad (11)$$

식 (10),(11)에서  $\mu_{w1}$ 과  $\mu_{w2}$ 는 적응 필터 알고리즘의 step-size 로 VFXLMS의 수렴속도와 안정성을 제어하는 요소이다. 하지만 그림 1에서 음향 피드백  $F(z)$ 를 통해 적응 필터의 출력이 입력 reference microphone으로 들어오게 되면 VFXLMS 알고리즘은 수렴 속도가 늦어지고 불안정성을 갖게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 음향 피드백 감쇠 효과를 가지는 비선형 능동소음제어가 필요하다. 다음 절에서 음향 피드백 감쇠효과를 가지는 비선형 능동소음 제거 방식을 설명하였다.

2.2 온라인 음향 피드백 경로 모델링을 가지는 2차 볼테라 시스템의 능동소음제어

그림 2는 온라인 음향 피드백 경로 모델링을 가지는 2차 볼테라 시스템의 비선형 능동소음제어 시스템을 나타낸다. 그림 2에서  $v(n)$ 는 음향 피드백 경로  $F(z)$ 를 모델링하기 위한 레퍼런스 신호  $r(n)$ 과 상호 관련 없는 랜덤 모델링 신호이다.  $v(n)$ 과 볼테라 필터 출력  $y(n)$ 은 [6]에서와 같이



〈그림 2〉 온라인 피드백 경로 모델링을 가지는 2차 볼테라 시스템의 능동소음제어

$S(z)$ 를 통과해 error microphone 으로 전해질 뿐만 아니라  $F(z)$ 를 통과해 reference microphone으로도 전해지게 된다. 오차 신호  $e(n)$ 는  $S(z)$ 의 출력 신호  $y_s(n) + v_s(n)$ 과 1차 경로를 통과한 잡음 신호  $d(n)$ 의 차이로  $e(n) = d(n) - y_s(n) - v_s(n)$ 이 된다. 여기서  $y_s(n)$ 과  $v_s(n)$ 는 각각 반대 잡음 신호와 랜덤 신호이다. 또한 그림 2에서  $a(n)$ 는 다음과 같다.

$$a(n) = r(n) + y_f(n) + v_f(n) \quad (12)$$

식 (12)에서  $r(n)$ ,  $y_f(n)$ 과  $v_f(n)$ 는 각각 시스템 잡음 소스로부터 발생된 레퍼런스 노이즈,  $y(n)$ 의 피드백 신호 그리고  $v(n)$ 의 피드백 신호이다. 그림 2에서 비선형 적응 잡음 제거(adaptive noise cancellation: ADNC) 필터  $\bar{H}(z)$ 의 바라는 응답은  $t(n) = r(n) + y_f(n) + v_f(n) - \tilde{y}_f(n)$ 으로 표현된다. 여기서  $\tilde{y}_f(n)$ 는 적응 FBPM 필터  $\tilde{F}(z)$ 를 통과한  $y_f(n)$ 의 추정치이다.  $\tilde{F}(z)$ 를 모델링 하기 위해서는  $v_f(n)$ 만이 필요한 것을 그림2에서 볼 수 있다. 그러므로  $r(n)$ ,  $y_f(n)$ 과  $\tilde{y}_f(n)$ 은 방해 요소로 작용하게 되고 이런 방해 요소가 클 경우  $\tilde{F}(z)$ 의 수렴 속도는 느려 질 수 있다. 그러므로  $\tilde{F}(z)$ 의 수렴 속도를 상승시키기 위해 선형 ADNC 필터가 제안되었다 [6]. 그러나 제안된 비선형 능동소음제어 시스템에서는  $\bar{H}(z)$ 와  $\bar{W}(z)$ 가 그림 2와 같이 역관계이기 때문에  $t(n)$ 과  $y(n)$  사이에 비선형성이 존재한다. 따라서 선형 ADNC 필터를 적용하는 것은 음향 피드백으로부터 발생하는 방해효과를 줄여주기에는 한계가 있다. 그러므로 본 논문에서는 그림 2와 같이 2차 볼테라 필터를 사용한 비선형 ADNC 필터를 제안하였다.  $\bar{H}(z)$ 의 입력신호는  $y(n)$ 이며 출력신호는  $u(n)$ 이고  $t(n)$ 과  $y(n)$ 의 오차신호는  $g(n)$ 으로 다음과 같이 표현된다.

$$g(n) = t(n) - u(n), \quad u(n) = \bar{h}^T(n) \bar{y}(n) \quad (13)$$

$$\bar{h}^T(n) = [\bar{h}_1(n) \ \bar{h}_2(n)], \quad \bar{y}^T(n) = [\bar{y}_1(n) \ \bar{y}_2(n)] \quad (14)$$

그리고  $\bar{h}(n)$ 는 기존의 VFXLMS에 의해 다음과 같이 갱신된다.

$$\bar{h}_1(n+1) = \bar{h}_1(n) + \mu_{h1} g(n) \bar{y}_1(n) \quad (15)$$

$$\bar{h}_2(n+1) = \bar{h}_2(n) + \mu_{h2} g(n) \bar{y}_2(n) \quad (16)$$

식 (15)와 (16)에서  $\mu_{h1}$ 과  $\mu_{h2}$ 는  $\bar{H}(z)$ 의 step size이다.  $v(n)$ 이  $\tilde{F}(z)$ 에 적용되면 그것의 출력은  $\tilde{v}_f(n) = \tilde{f}^T(n)v(n)$ 로 주어진다.  $\tilde{F}(z)$ 의 바라는 응답은  $g(n)$ 이기 때문에  $\tilde{f}(n)$ 는 다음과 같이 갱신된다.

$$\tilde{f}(n+1) = \tilde{f}(n) + \mu_f [g(n) - \tilde{v}_f(n)]v(n) \quad (17)$$

여기서  $\mu_f$ 는  $\tilde{F}(z)$ 의 step size이다.  $\tilde{F}(z)$ 가 추정되면  $x(n)$ 는  $t(n)$ 에서  $v_f(n)$ 을 빼줘서 얻어진다. 즉  $x(n) = r(n) + y_f(n) - \tilde{y}_f(n) + v_f(n) - \tilde{v}_f(n)$ 이다.  $\tilde{F}(z)$ 가  $F(z)$ 와 같게 되면  $x(n) \approx r(n)$ 이 되게 되고  $x(n)$ 는  $y(n)$ 의 음향 피드백에 더 이상 영향을 받지 않게 된다.

### 2.3 모의 실험

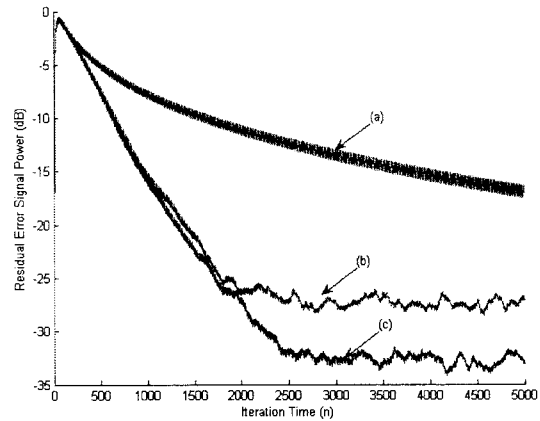
모의 실험을 위해 1차 경로 잡음 신호  $d(n)$ 는 2차 다항식 모델로부터 발생하는 신호로 다음과 같다 [3].

$$d(n) = c(n-2) + 0.08 \cdot c^2(n-2), \quad c(n) = r(n) * q(n) \quad (18)$$

$q(n)$ 는  $Q(z) = 0.071z^{-5} - 0.59z^{-6} + 0.9z^{-7}$ 인 FIR 필터이고 레퍼런스 잡음  $r(n)$ 는  $r(n) = 2 \cdot \sin(2\pi \times 500 \times n/8000)$ 이다. 랜덤 신호  $v(n)$ 는 평균이 0이고 분산이 0.05인 백색가우시안 신호이다. 그리고  $y(n)$ 과  $S(z)$ 를 통과한  $y_s(n)$ 의 관계는  $y_s(n) = y(n) + 0.35y(n-1) + 0.09y(n-2) - 0.5y(n)y(n-1) + 0.4y(n)y(n-2)$ 이다. 음향 피드백 경로는  $F(z) = 1 + 0.5z^{-1} - 0.5z^{-2} - z^{-3} - z^{-4}$ 인 FIR 필터와 같이 구성되어 있다.

step size는  $\mu_f = 1 \times 10^{-1}$ ,  $\mu_{h1} = 5 \times 10^{-2}$ ,  $\mu_{h2} = 1 \times 10^{-2}$ ,

$\mu_{w1} = 1 \times 10^{-4}$ , 그리고  $\mu_{w2} = 5 \times 10^{-5}$ 으로 빠르고 안정한 수렴을 보장한다. 그림 3은 감소된 오차신호  $e(n)$ 의 파워 신호를 나타낸다. 즉, (a) 음향 피드백 감쇠가 없을 경우, (b) 기존 선형 음향 피드백 감쇠를 가진 경우[6], 그리고 (c) 제안한 음향 피드백 감쇠를 가진 경우 이다. 그림 3의 모의 실험 결과는 음향 피드백의 출현에도 불구하고 제안된 비선형 능동소음제어 시스템이 높은 비선형 능동소음제어 성능을 보여줌을 증명한다.



〈그림 3〉 감소된 오차신호  $e(n)$ 의 파워 신호

- (a) 음향 피드백 감쇠가 없을 경우,
- (b) 기존 선형 음향 피드백 감쇠를 가진 경우[6]
- (c) 제안한 음향 피드백 감쇠를 가진 경우

### 3. 결 론

본 논문에서 우리는 음향 피드백이 존재하고 비선형 1차 경로와 2차 경로를 가지고 있는 새로운 능동소음제어 시스템을 제안하였다. 제안된 비선형 온라인 피드백 경로 모델링을 가지는 능동소음제어시스템은 2차 볼테라 ADNC 필터링과 가상 2차 경로와 함께 구성되어 있다. 제안된 방식은 비선형 능동소음제어에서 높은 성능을 가지며 음향 피드백으로부터 발생하는 방해 효과에 효율적으로 감쇠 시켜 준다.

### [참 고 문 헌]

- [1] S.M. Kuo and D.R. Morgan, "Active noise control: A tutorial review," Proc. IEEE, vol. 87, no. 6, pp. 943-973, Jun. 1999.
- [2] L. Tan and J. Jiang, "Adaptive Volterra filters for active control of n nonlinear noise processes," IEEE Trans. on Signal Process., vol. 49, no. 8, pp.1667-1676, Aug. 2001.
- [3] D. Zhou and V.E. DeBrunner, "Efficient adaptive nonlinear filters for nonlinear active noise control," IEEE Trans. on Circuits and systems, vol. 54, no. 3, pp. 669-681, Mar. 2007.
- [4] P. Strauch and B. Mulgrew, "Active control of nonlinear noise processes in a linear duct," IEEE Trans. on Signal Process., vol. 46, no. 9, p. 2404-2412, Sept. 1998.
- [5] M.H. Costa, J.C.M. Bermudez, and N.J. Bershad, "Stochastic analysis of the filtered-X LMS algorithm in systems with nonlinear secondary paths," IEEE Trans. on Signal Process., vol. 50, no. 6, pp. 1327-1342, Jun. 2002.
- [6] M.T. Akhtar, M. Abe, and M. Kawamata, "On active noise control systems with online acoustic feedback path modeling," IEEE Trans. on Audio Speech Language Processing, vol. 15, no. 2, pp. 593-600, Feb. 2007.