

변환영역에서의 능동소음제어 온라인 2차 경로 모델링

남구형*, 남상원**

*한양대학교 정보통신대학원

**한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

Transform-Domain On-Line Secondary-Path Modeling of An Active Noise Control System

Koo-Hyeong Nam* and Sang-Won Nam**

*The Graduate School of Information and Communications, Hanyang University

**Division of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University

email: swnam@hanyang.ac.kr

Abstract

능동소음제어 시스템에서 많이 사용되어온 적응 알고리즘은 filtered-X LMS (FXLMS) 알고리즘으로, 이 알고리즘에서의 수렴속도는 필터링된 신호에 의해서 좌우되기 때문에 FXLMS 적용시 실제 수렴성능이 저하되거나 수렴이 안 되는 경우도 발생할 수 있다. 본 논문의 목적은 변환영역에서 능동소음제어 시스템의 2차 경로 모델링을 행함으로써 전체 능동소음제어 시스템 동작의 수렴성능을 향상시키려는 것이다.

I. 서론

최근 적응 필터링의 주요 응용 분야 중 하나로 능동소음제어(ANC: active noise control) 기법이 활발히 연구되어 왔다[1,2,6]. 능동소음제어를 위해 많이 적용되어온 알고리즘은 filtered-x LMS (FXLMS: 그림 1 참조)이다. 그러나 이 알고리즘에서는 오차 경로에서의 고유치 분포 (eigenvalue spread)에 대한 민감성 때문에 수렴성능이 저하될 수 있다[1,2,6]. 즉, FXLMS 가 잘 동작하기 위해서는 능동소음제어 시스템의 구동과 동시에 먼저 2차 경로 모델을 예측해야 하는데, 2차 경로 시스템이 시변 시스템일 경우에는 시스템 식별 적응 알고리즘을 이용하여 다시 모델링하게 된다. 따라서, 2차 경로 시스템 식별의 수렴속도에 따라 전체 능동소음제어 시스템의

구동 속도가 영향을 받게 된다. 그림 1, 2 에서와 같이 2차 경로 전달함수 $S(z)$ 는 D/A 변환기, smoothing 필터, 파워 앰프, 스피커, 스피커에서 에러 마이크까지의 음향 경로, 에러 마이크, 전처증폭기, anti-aliasing 필터, 그리고 A/D 변환기로 이루어지며, 일반적으로 $S(z)$ 는 추정되어야 할 저속시변 함수이다. 특히, 열 잡음, 소자의 노화, 그리고 흐름상의 변화 등으로 인하여 $S(z)$ 가 시변 특성을 갖게 된다. 따라서, 전체 능동소음제어 시스템이 정확하고 빠른 수렴 성능을 보이기 위해서는 2차 경로 시스템 식별에 적용되어온 기존의 LMS 알고리즘은 보완되어야 한다.

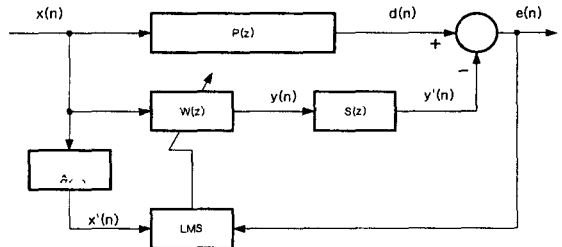


그림 1. 능동소음제어를 위한 Filtered-X LMS

특히 2차 경로 전달함수 $S(z)$ 는 1차 잡음이 없을 때 혹은 시스템을 동작시키기 전에, 오프라인 모델링을 취하여 얻을 수 있다. 그러나, 오프라인 모델링 도중에도 소음이 발생할 수도 있다. 또한, 2차 경로 모델이 시

변일 수도 있기 때문에, ANC 시스템의 안정성과 수렴 성능 향상을 위해서는 2 차 경로 모델 $S(z)$ 를 온라인상에서 적응적으로 추정하는 것이 전체 시스템의 수렴 성능에 큰 영향을 미치게 된다 (그림 2 참조). 따라서, 전체 시스템의 수렴 성능 향상을 위해 본 논문에서는 변환 영역에서의 온라인 2 차 경로 모델링을 수행하여 수렴 성능 향상을 보였고 모의실험을 통해 이를 입증하려 한다.

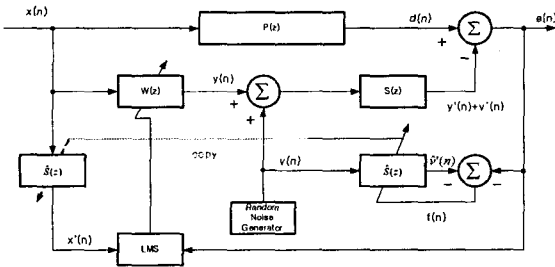


그림 2. 능동소음제어의 온라인 2 차 경로 모델링

II. FXLMS 알고리즘과 2 차 경로 모델링

그림 2에서 제시된 바와 같이, 능동소음제어의 2 차 경로 전달함수 $S(z)$ 가 온라인에서 빠른 수렴 속도를 보이면서 적응적으로 추정되도록, 기존의 LMS 알고리즘은 보완되어야 한다. 구체적으로, $S(z)$ 추정 방법 중에는 Morgan 이 제시한 2 가지 방법이 있다[1,2,13]. 첫 번째 방법은 역함수 $1/S(z)$ 를 $S(z)$ 에 직렬로 하는 것이고, 두 번째 방법은 reference 신호 경로와 LMS 알고리즘의 weight 업데이트 사이에 $S(z)$ 와 같은 필터를 삽입하는 방법인데 이를 소위 filtered-x LMS (FXLMS) 알고리즘이라 한다.

2.1 FXLMS 알고리즘

능동소음제어의 2 차 경로 전달함수의 위치는 LMS 알고리즘에 의해 갱신되는 디지털 적응 필터 $W(z)$ 다음에 직렬로 연결되어 있다 (그림 1 참조). 적응 필터 $W(z)$ 갱신을 위한 오차 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - y'(n) \\ &= d(n) - s(n) * y(n) \\ &= d(n) - s(n) * [w^T(n)x(n)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $s(n)$ 는 2 차 경로 $S(z)$ 의 임펄스 응답이고, *는 선형 컨벌루션이다.

$w(n)$ 는 적응 필터 $W(z)$ 의 계수 벡터로 다음과 같다

$$w(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{L-1}(n)]^T \quad (2)$$

$x(n)$ 는 입력신호 벡터, L 은 필터 $W(z)$ 의 차수이다.

$$x(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]^T \quad (3)$$

$w(n)$ 는 적응 필터 계수 벡터의 갱신식은 다음과 같다

$$w(n+1) = w(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{\xi}(n) \quad (4)$$

여기서 $\nabla \hat{\xi}(n)$ 는 시간 n 에서의 최소자승오차(MSE)의 순간 추정치이고, 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla \hat{\xi}(n) = \nabla e^2(n) = 2[\nabla e(n)]e(n) \quad (5)$$

식 (1)로부터,

$$\nabla e(n) = -s(n) * x(n) = -x'(n) \quad (6)$$

여기서

$$x'(n) = s(n) * x(n) \quad (7)$$

따라서, gradient 추정은

$$\nabla \hat{\xi}(n) = -2x'(n)e(n) \quad (8)$$

이 된다. 식 (8)를 식 (4)에 대입하면,

$$w(n+1) = w(n) + \mu x'(n)e(n) \quad (9)$$

가 된다. 이 결과는 전달함수 $S(z)$ 가 적응 필터 $W(z)$ 에 직렬로 연결되고, 이 $S(z)$ 가 필터 계수의 업데이트 경로에 위치되는 것을 보여준다. 입력 벡터 $x(n)$ 가 $S(z)$ 에 의해 필터링이 되기 때문에 이 알고리즘의 이름은 필터링된 X의 LMS 알고리즘, 즉, FXLMS 알고리즘이라 한다.

실제 능동소음제어 시스템에서는 $S(z)$ 는 미리 알 수 없으므로 추가로 이를 추정해야 한다. 그러므로, 다음의 필터링된 신호가 LMS 필터 입력으로 인가된다.

$$x'(n) = \hat{s}(n) * x(n) \quad (10)$$

여기서, $\hat{s}(n)$ 는 2 차 경로 필터로 $\hat{S}(z)$ 의 추정 임펄스 응답이다.

2.2 온라인 2 차 경로 모델링

FXLMS 알고리즘을 사용하는 일반적인 능동소음제어 시스템의 온라인 2 차 경로 모델링은 그림 2와 같이 구성된다. 적응 필터 $W(z)$ 는 2 차 소음 $y(n)$ 을 발생시키고, 이것은 다시 2 차 경로 $S(z)$ 로 들어가게 된다. 여기서, 2 차 경로 $S(z)$ 식별을 위해 2 차 소음 $y(n)$ 과 상관도가 없는 가우시안 분포를 갖는 백색잡음이 입력으로 인

가되고, 능동소음제어 필터 $W(z)$ 가 동작하는 동안 적응 필터 $\hat{S}(z)$ 는 2 차 경로와 병렬로 연결되어 합성된 2 차 소음 $y(n)+v(n)$ 을 입력으로 사용하여 온라인으로 2 차 경로 $S(z)$ 를 모델링한다. 이 경우 오차 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$e(n) = d(n) - s(n) * y(n) - s(n) * v(n) = d(n) - y'(n) - v'(n) \quad (11)$$

식(11)에서 두 번째 항인

$$y'(n) = s(n) * y(n) \quad (12)$$

는 기존의 1 차 소음에 의해 발생한 2 차 소음 성분이고

$$v'(n) = s(n) * v(n) \quad (13)$$

는 추가된 백색잡음에 의해 발생한 2 차 소음성분이다.

따라서, 적응 필터 $\hat{S}(z)$ 는 LMS 알고리즘에 의해 갱신되고 $f(n)$ 는 $e(n)$ 와 $\hat{v}(n)$ 간의 간섭이며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{s}(n+1) &= \hat{s}(n) + \mu v(n) f(n) \\ &= \hat{s}(n) + \mu v(n) [-\hat{v}'(n) - e(n)] \\ &= \hat{s}(n) - \mu v(n) v'(n) - \mu v(n) e(n) \end{aligned} \quad (14)$$

III. 변환 영역 적응 알고리즘

변환 영역 적응 알고리즘은 입력 신호가 유색 신호 일 경우에도 필터 계수의 빠른 수렴을 목적으로 한다 (그림 3 참조) [3-5,7-12]. 이것은 입력 신호에 적절한 유니타리 변환(unitary transform)을 적용하여 상관관계를 낮추고, 추정된 전력값으로 정규화 (power normalization) 하는 선행처리 과정으로 구성된다[7-10]. 즉, 평균자승오차 곡면을 하이퍼 타원에서 하이퍼 원으로 바꾸어 유색 신호를 백색화(whitening)시키는 효과를 이용하는 것이다. 변환 영역 적응 알고리즘의 성능은 전적으로 데이터 독립 유니타리 변환의 상관도 저하, 또는 직교화(orthogonalization) 특성에 영향을 받는다. 그러나, 어떠한 변환이 가장 좋은 성능을 내는지에 대한 일반적인 이론 증명은 보고되지 않고 있다[8-9].

특히, 변환 영역 적응 필터링에서 변환된 입력벡터 (transformed vector) $x[n]$ 의 상관행렬은 다음과 같다.

$$R_x = E[x[n] x^H[n]] \quad (15)$$

특히, 적절한 유니타리 변환을 적용하였을 경우, 변환 후 입력벡터(transformed vector)의 상관행렬 R_T 는 대각

행렬에 근접한다. 그러나 유니타리 변환만으로는 오차 곡면의 회전이나 대칭효과밖에 가져오지 못하는 경우 변환영역에서의 전력추정을 통하여 전력 정규화하여 오차곡면을 하이퍼 원으로 변환할 수 있고, 이것은 신호를 백색화를 통해 수렴속도 향상을 얻게 된다[8,10-12].

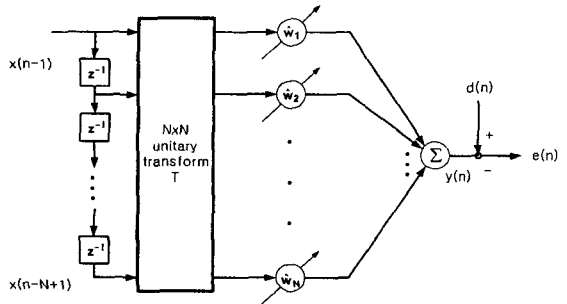


그림 3. 변환영역 적응필터

IV. 컴퓨터 모의 실험

모의 실험에서는 본 논문에서 제안한 변환 영역에서의 능동소음제어 온라인 2 차 경로 모델링의 수렴 성능과 기존의 방식의 성능을 비교 분석하였고, 이를 위해 수행한 변환영역 적응 알고리즘은 DCT-FXLMS 알고리즘을 사용하였다 (그림 4 참조).

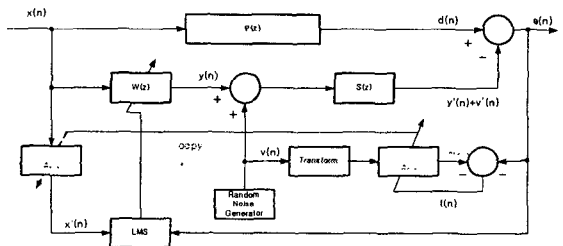


그림 4. DCT 변환영역 적응필터를 이용한 능동소음제어 시스템의 온라인 2 차 경로 모델링

전체 시스템의 입력 신호로 사용된 1 차 소음은 자동차 내부 소음을 2048Hz 샘플링으로 녹음한 음향신호를 사용하였고, 신호의 ergodic 특성을 이용하여 시간상 평균을 취하여 분석하였다. 특히, 이산 코사인 변환에 의해 2 차 경로 모델의 입력신호의 상관도를 줄여 자기 상관행렬의 고유치 분포율을 감소시킴으로써 그 유용성을 보였다. 모의 실험을 통해 제안된 알고리즘이 기존의 알고리즘보다 수렴성능이 현저히 향상되었음을 확인

할 수 있었다 (그림 5, 그림 6 참고).

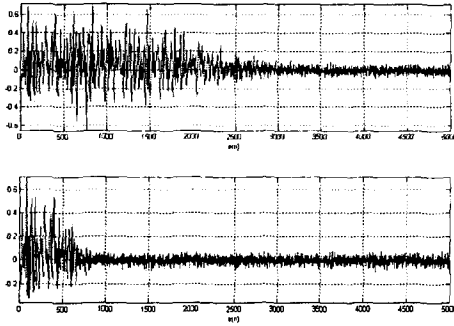


그림 5. 일반 능동소음제어(위 그림)와 DCT 변환영역 능동소음제어(아래 그림)와 의 오차신호 비교

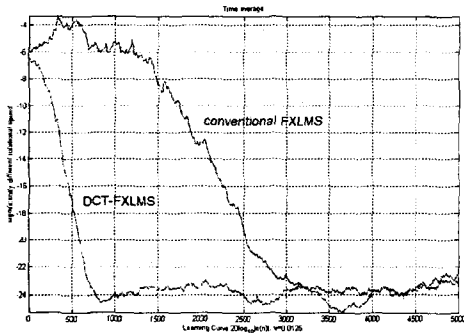


그림 6. 일반 능동소음제어와 DCT 변환영역 능동소음 제어의 성능 비교

V. 결론

본 논문에서는 능동소음제어의 온라인 2 차 경로 모델링의 수렴성능을 향상시켜 전체 시스템 수렴성능을 향상시키기 위해 변환영역 적응 알고리즘을 적용하였다.

앞으로 여러 다양한 유니터리 변환들에 따른 수렴 특성 분석 및 신호에 따른 시변 변환에 대한 연구가 요구된다.

참고문헌

- [1] S. M. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems-Algorithms and DSP Implementations*, New York: Wiley, 1996.
- [2] S. M. Kuo and D. R. Morgan, "Active noise control: A tutorial review," *Proc. IEEE*, vol. 87, pp. 943-972, June 1999.
- [3] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 3rd ed., Prentice Hall, 1996.
- [4] F. Beaufays, " Transform-domain adaptive filters: an analytical approach," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 43, pp. 422-431, Feb. 1995.
- [5] S. Liu, X. Li, and J. Tian, " Transform domain adaptive filter in active noise control," *2002 6th International Conference on Signal Processing*, vol. 1, pp. 272-275, Aug. 2002.
- [6] S. M. Kuo and D. Vijayan, "A secondary path estimate techniques for active noise control systems," *IEEE Trans. Speech Audio Processing*, vol. 5, pp. 374-377, July 1997.
- [7] D. F. Marshall, W. K. Jenkins, and J. J. Murphy, "The Use of Orthogonal Transforms for Improving Performance of Adaptive Filter," *IEEE Trans. On Circuits and Systems*, vol. 36, no. 4, pp. 474-484, Apr. 1989.
- [8] François Beaufays, "Transform-domain adaptive filters: an analytical approach," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 43, pp. 422-431, Feb. 1995.
- [9] G. Glens, K. Berberidis, and S. Theodoridis, "Efficient least squares adaptive algorithms for FIR transversal filtering," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 16, no. 4, pp. 13-41, Jul. 1999.
- [10] B. W. Kim, Y. M. Lee, S. K. Park, and S. W. Nam, "Adaptive Volterra Filtering using M-band Wavelet Transform," *International Symposium on Signal Processing and its Applications*, vol. 2, pp. 959-963, Aug. 1999.
- [11] B.W. Kim, Y.M. Lee, and S.W. Nam, " Adaptive Volterra filtering using M-band wavelet transform," *Electronics Letters*, vol. 36, no. 1, pp. 94-96, Jan. 6, 2000.
- [12] D.J. Kang, D.O. Hwang, S.W. Nam, and E.J. Powers, "Adaptive Volterra filtering using M-band wavelet transform and Gram-Schmidt orthogonalization," *Electronics Letters*, vol. 38, no. 6, pp. 291-292, Mar. 14, 2002.
- [13] D. R. Morgan, "An analysis of multiple correlation cancellation loops with a filter in the auxiliary path," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-28, 454-467, Aug. 1980.