

## FxLMS-CF알고리즘과 보상알고리즘에 기초한 ANC레시바성능제고방법

정철, 김진혁, 김정철

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《첨단과학기술분야에서 세계적경쟁력을 가진 기술들을 개발하기 위한 투쟁을 힘있게 벌려야 합니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 39페이지)

능동소음조종은 저주파대역의 소음을 효과적으로 제거하는 첨단기술분야의 하나이다. 능동소음조종의 기본알고리즘은 FxLMS이다. 그러나 이 알고리즘은 외부소음의 특징에 따라 수렴속도가 상대적으로 느리고 소음제거성능이 떨어진다. 또한 능동소음조종에 리용되고있는 대부분의 소자들은 Floating-point DSP소자에 기초하고있다.[1, 2] Fixed-point DSP소자를 리용하기 위하여 Leaky FxLMS알고리즘, ADF알고리즘 등을 제안[3]하였으나 반소음신호의 세기를 떨구는것으로 하여 총체적으로 능동소음조종체계의 소음제거성능을 감소시킨다.

이로부터 우리는 Fixed-point DSP장치에서 수렴속도를 훨씬 개선하면서도 소음제거성능을 더욱 높이기 위한 방법을 제안하였다.

### 1. 보상된 FxLMS-CF알고리즘

#### 1) 교환오차와 Feedback효과를 고려한 FxLMS알고리즘 FxLMS-CF

ANC기본조종알고리즘인 FxLMS알고리즘에서는 음향학적인 경로를 고려하기 위하여 LMS러파기의 입구에 소음신호  $x(n)$ 을 그대로 입력하는것이 아니라

$$x'(n) = h_{\hat{S}(Z)}(n) * x(n) \quad (1)$$

을 입력한다. 결국 2차경로  $S(Z)$ 가 반소음고성기와 오차마이크사이에 있으나 FxLMS알고리즘에서는 2차경로가 앞에 있는것으로 근사화된다.

이제

$$e_C(n) = y''(n) - y'(n) \quad (2)$$

을 교환오차라고 하면 교환오차를 고려하여 줄여야 할 총오차신호는

$$e_T(n) = e(n) + e_C(n) \quad (3)$$

이다. 여기서  $y'(n) = h_{S(Z)}(n) * [w^T(n) \cdot x(n)]$ ,  $y''(n) = w^T(n) \cdot [h_{S(Z)}(n) * x(n)] = w^T(n) \cdot x'(n)$ 이다.

총체적인 오차  $e_T(n) = d(n) + y''(n)$ 을 받아들이면 식 (3)은

$$e(n) = e_T(n) - e_C(n) \quad (4)$$

으로 표시된다.

이제 원가함수(cost function)를  $J(n) = [e_T(n)]^2$ 으로 정의하고 원가함수의 최소화를 위한

무계백트로그래임을 위한 LMS적응알고리즘을 유도하면

$$w(n+1) = w(n) - \mu e_T(n) \cdot x'(n) \quad (5)$$

이 얻어진다.  $e_C(n)$ 이 일정할 때  $e_T(n)$ 의 최소화는 곧  $e(n)$ 의 최소화와 등가이므로 무계백트로그래임 식 (5)는 ANC체계에서 오차신호를 최소로 하는 알고리즘으로도 된다.

한편 능동소음조종형레시바에서 반소음신호가 참조마이크로 귀환되어 능동소음조종의 성능을 저하시키는 feedback효과를 무시할수 없다.

그러므로 우리는 위에서 제기한 교환오차와 feedback효과를 고려한 FxLMS알고리즘 즉 FxLMS-CF를 다음과 같이 제안하였다.

① 준백색소음을 반소음고성기로 내보내어 LMS알고리즘에 의한 2차경로모형화와 feedback경로모형화를 진행하여 그 임펄스응답특성  $h_{\hat{s}(Z)}(n)$ ,  $h_{\hat{p}_b(Z)}(n)$ 을 추정한다.

② 참조마이크와 오차마이크를 리용하여 소음신호  $r(n)$ 과 오차신호  $e(n)$ 을 입력한다.

③ Feedback효과를 고려한 소음신호  $\tilde{x}(n)$ 을 다음식에 의하여 계산한다.

$$\tilde{x}(n) = r(n) - \tilde{f}(n) = r(n) - h_{\hat{p}_b(Z)}(n) * y(n) \quad (6)$$

④ 반소음신호  $y(n)$ 을 계산하고 반소음고성기로 출력한다.

$$y(n) = w^T(n) \cdot \tilde{x}(n) = \sum_{k=0}^N w^k(n) \tilde{x}(n-k) \quad (7)$$

⑤ 식 (2)-(5)를 리용하여 교환오차와 총체적인 오차를 계산한다.

⑥ 무계결수를 갱신한다.

$$w(n+1) = w(n) - \mu e_T(n) \cdot \tilde{x}'(n) \quad (8)$$

실시간적으로 단계 ②부터 ⑥까지를 반복한다.

## 2) Fixed-point형DSP소자에서 보상알고리즘

본문에서는 비실시간모의방법에 의한 진폭, 위상보상인자추정방법을 제기하고 FxLMS-CF알고리즘에 적용하였다.

리상적인 반소음은 비실시간모의를 통하여 추정할수 있다. 이때 feedback효과가 무시되며 반소음신호가 반소음고성기를 통하여 출력되지 않으므로 총체적인 오차신호는

$$e_T(n) = d(n) + y''(n) \quad (9)$$

으로 된다. 이러한 비실시간모의를 통하여 얻어진 리상적인 반소음을  $y_{ideal}(n)$ , ANC조종의 무계결수를  $w_{ideal}(n)$ 이라고 하자.

실제적인 반소음은 실지 동작하는 ANC조종을 비실시간적으로 근사하게 모방하는 방법으로 얻을수 있다.

이때 얻어지는 실지 반소음신호를  $y_{real}(n)$ , ANC조종의 무계결수를  $w_{real}(n)$ 이라고 하자. 실제적인 반소음을 리상적인 반소음으로 만들기 위하여서는 실제적인 반소음의 위상과 진폭을 추가적으로 보상하든가 아니면 반소음을 생성하는 조종을 변경시켜야 한다. 전자는 잡음의 영향을 크게 받지만 후자는 적게 받는다. 이로부터 본문에서는 리상적인 반소음조종기와 실제적인 반소음을 출력하는 조종의 주파수응답특성을 대비하는 방

법으로 보상인자들을 유도하였다. 유도결과는 다음과 같다.

$$\alpha(\omega) \cdot H(\omega) = \alpha(\omega) \cdot e^{j\Delta\theta(\omega)} = \frac{W_{\text{ideal}}(j\omega)}{W_{\text{real}}(j\omega)} = \frac{I_{\text{ideal}}^w(\omega)}{I_{\text{real}}^w(\omega)} e^{j[\theta_{\text{ideal}}^w(\omega) - \theta_{\text{real}}^w(\omega)]} \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} W_{\text{real}}(j\omega) &= F\{w_{\text{real}}(n)\} = I_{\text{real}}^w(\omega) (= \text{Re}W_{\text{real}}(j\omega)) \cdot e^{j\theta_{\text{real}}^w(\omega)}, \\ W_{\text{ideal}}(j\omega) &= F\{w_{\text{ideal}}(n)\} = I_{\text{ideal}}^w(\omega) (= \text{Re}W_{\text{ideal}}(j\omega)) \cdot e^{j\theta_{\text{ideal}}^w(\omega)}. \end{aligned} \quad (11)$$

이제  $\alpha(\omega)$  는 각주파수  $\omega$  에서의 진폭보정인자,  $\Delta\theta(\omega)$  는 각주파수  $\omega$  에서의 위상차라고 하자. 그러면 위상차로부터 위상보정인자를 추정할수 있는데 그 과정을 보면 다음과 같다.

평균값정리를 리용하면 평균진폭보정인자라고 불리우는 근사적인 진폭보정인자  $\bar{\alpha}$  는

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\Delta f} \int_{-\Delta f/2}^{\Delta f/2} \alpha(2\pi f) df = \frac{1}{\Delta f} \sum_{\omega_{\text{start}}=2\pi f_{\text{start}}}^{\omega_{\text{stop}}=2\pi f_{\text{stop}}} \frac{I_{\text{real}}^w(\omega)}{I_{\text{ideal}}^w(\omega)}, \quad \Delta f = f_{\text{stop}} - f_{\text{start}} \quad (12)$$

로 정할수 있다. 만약 소음과 반소음이 리상적인 단색파에 가까와간다면  $\Delta f \rightarrow 0$  으로 되며  $\bar{\alpha} = \alpha(\omega_0)$  이 된다는것을 쉽게 알수 있다.

위상보정은 실제조종기의 구조에 약간의 시간지연을 추가하는 방법으로 다음과 같이 간단하게 하려고 한다.

$$p'_0 = \arg \max_m [w_{\text{ideal}}(k+m) \tilde{w}_{\text{real}}^*(k)] - N \approx \arg \max_m [w_{\text{ideal}}(k+m) w_{\text{real}}^*(k)] - N \quad (13)$$

여기서  $N$  은 무게결수벡토르의 길이 즉 ANC조종기의 차수,  $[\cdot]$  는 교차상관함수이다.

추정되는 위상보정인자  $p'_0$  는 상관함수의 성질로부터 리상적인 조종기와 실제적인 조종기의 상관관계가 최대로 되도록 추정되고 결국 모든 각주파수에 대한 평균위상보정인자라고 말할수 있다.

결과 식 (12)와 식 (13)을 고려하여 실지 반소음의 위상을 식 (7)대신에

$$\tilde{y}_{\text{real}}(n) = \bar{\alpha} \cdot \sum_{k=0}^{N-p'_0} w_{k+p'_0}(n) \tilde{x}(n-k) \quad (14)$$

에 따라 위상과 진폭을 보정하면  $\tilde{y}_{\text{real}}(n)$  은 리상적인 반소음에 보다 가깝게 되며 소음제거성능이 높아지게 된다.

## 2. 실험 결과

실험에 리용된 DSP소자는 TMS320C6416T이다.

### 1) FxLMS-CF알고리즘의 성능평가

논문에서는 FxLMS-CF알고리즘의 성능을 다른 알고리즘[3, 4]과 비교평가하였다. 실험에서는 표본화주파수를 2kHz로 하였으며 FxLMS레파기들의 차수는 20으로 하였다.

그림 1에 각종 알고리즘들의 오차신호그래프를 보여주었다.

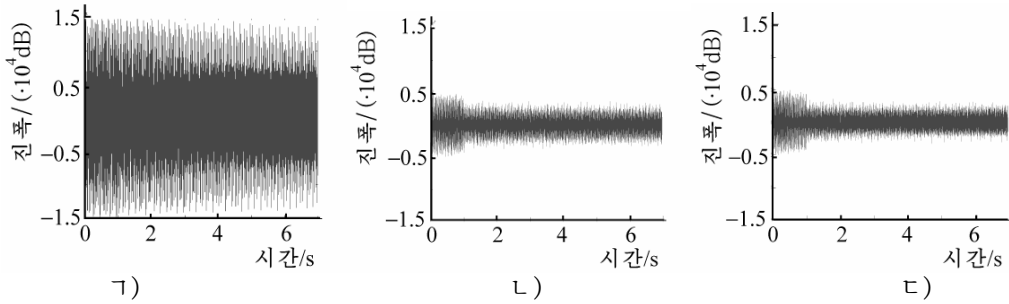


그림 1. 각종 알고리즘들의 오차신호그래프

ㄱ) FxLMS,  $\mu = 3.2 \cdot 10^{-10}$ , ㄴ) FxLMS-CE,  $\mu = 7.45 \cdot 10^{-9}$ , ㄷ) FxLMS-CF,  $\mu = 7.45 \cdot 10^{-9}$

그림 1에서 보는바와 같이 FxLMS-CF알고리즘은 다른 알고리즘들에 비하여 수렴속도가 빠르며 소음제거성능도 가장 좋다.

## 2) 진폭, 위상보상인자추정과 보상알고리즘의 성능평가

FxLMS알고리즘에 대하여 비실시간모의에 의한 진폭 및 위상보상인자추정을 진행하고 그것을 실시간실험을 통하여 검증하였다.

그림 2에 각이한 위상보상에 따르는 FxLMS알고리즘에 의한 실시간실험결과를 주었다.

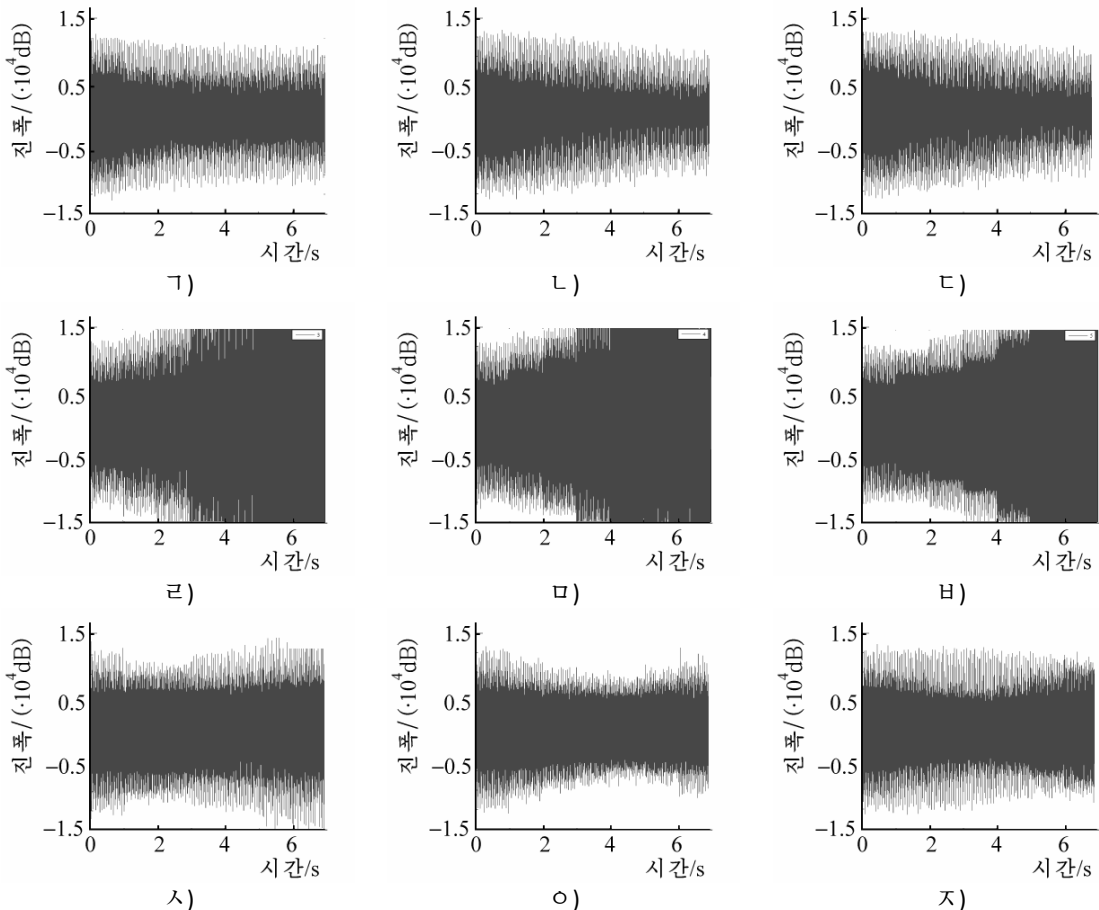


그림 2. FxLMS알고리즘에서 위상보상인자의 실험적 검증

ㄱ)~ㄱ)는  $p'$ 가 각각 0~8까지 변할 때

그림 2의 첫번째 그림은 식 (14)에서  $p'=0$  일 때의 오차신호그림이고 오른쪽으로 가면서  $p'$ 가 증가하며 제일 마지막그림은  $p'=8$ 일 때의 오차신호그래프이다.

그림 2에서 보는바와 같이 위상보상인자  $p'$ 에 따라 소음제거성능이 가장 좋을 때는 그림 2의 ㄴ)와 ㄷ)인 경우이다. ( $p'=1, 7$ ) 나머지경우에는 소음이 전혀 제거되지 않거나 그 성능이 상대적으로 떨어진다. 그러나  $p'=7$ 인 때에도 조종알고리즘이 수렴한다. 이것은 위상보상인자가 일정한 주기성을 가진다는것을 보여주고있다. 파동의 간섭원리에 의하면 간섭의 극대와 극소가 주기적으로 변한다. 다시말하여 간섭의 극대와 극소는 주기성을 가지며 마찬가지로 위상보상인자도 주기성을 가지게 되는것이다.

현재 실험에서 리용된 소음의 기본주파수가 294Hz이고 표본화주파수가 2 000Hz이므로 위상보상인자는 6을 주기로 하여 반복적으로 나타난다는것을 알수 있다.

총체적으로 논문에서 제기한 방법으로 넓은 대역소음에 대하여 23.8dB만큼 소음을 제거할수 있다.

## 맺 는 말

교환오차와 Feedback효과를 다같이 고려한 FxLMS-CF알고리즘을 제안하고 여기에 논문에서 제기한 보상방법도 받아들여 소음제거성능을 보다 높였다.

논문에서는 위상 및 진폭보상인자를 비실시간모의로 추정하기 위한 새로운 방법론을 제기하고 그것을 실험적으로 확증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] E. R. Berstein et al.; International J. of Industrial Ergonomics, 30, 1, 2012.
- [2] Manabi Kubo et al.; Applied Acoustics, 87, 174, 2015.
- [3] S. M. Kuo et al.; Design of Active Noise Control Systems with the TMS320 Family, Texas Instruments, 25~43, 76~95, 1996.
- [4] I. Tabatabaei Ardekani et al.; Signal Process, 91, 1262, 2011.

주체106(2017)년 2월 5일 원고접수

## Performance Enhancement Method of Noise Reduction based on FxLMS-CF Algorithm and Compensation in the ANC Headset

*Jong Chol, Kim Jin Hyok and Kim Jong Chol*

In order to improve the noise reduction performance in the Fixed-point DSP device we proposed the method for estimating phase and amplitude compensation factor of anti-noise signal by non-realtime simulation. By considering the commutation error and feedback effect, this compensation method has been applied to real Fixed-point DSP devices, and as a result both the convergence rate and the total performance of noise reduction have been improved.

Key words: active noise control(ANC), Fixed-point DSP