외부 잡음에 강건한 반향 제거기 개발

이 세 원, 박 호 종
광운대학교 전자공학과

A Robust Echo Canceller for External Noise

Sewon Lee, Hochong Park
Dept. of Electronics Engineering
Kwangwoon University
E-mail : hcpark@mail.gwu.ac.kr

요 약

ES(Exponentially weighted Stepsize) 알고리즘은 연산 과정이 간단하고 수렴 속도가 빠르지만 Stepsize 값을 결정하기 위해 일정한 조건에서 결정된 공간 임펄스 응답들을 이용하기 때문에 외부 잡음이 발생할 경우 음향 반향 제거 성능이 저하된다. 본 논문에서는 기존의 반향 제거기에 Stepsize 생성기를 추가하여 외부 잡음에 대한 ES 알고리즘의 단점을 개선하고 잡음에 대한 강건함을 향상시키는 새로운 반향 제거기를 개발하였다. Stepsize 생성기는 두 개의 이동 평균기를 이용하여 외부 잡음에 크기와는 독립적으로 Stepsize 값을 결정하며, 이로부터 대각선(diagonal) 모양을 가지는 Stepsize 행렬을 생성하여 반향 제거기에 적용한다. 본 논문에서는 NLMS 알고리즘, ES 알고리즘, 제안된 알고리즘의 수렴 특성을 잡음의 크기별로 시뮬레이션 하였으며, 또한 제안된 알고리즘의 잔여 에러의 크기도 다른 두 알고리즘에 비해 5[dB]에서 10[dB]정도 작아지는 것을 확인하였다.

1. 서 론

음향 반향 제거기(Acoustic Echo Canceler)는 마이크로폰과 스피커가 함께 있는 일체형 단말기를 이용해 상대방과 통화하는 과정에서 발생되는 음향 반향 신호를 제거해서 통화 품질을 향상시키는 시스템이다. 음향 반향 제거기에는 불규칙적인 반향 경로(Echo Path)의 전달함수를 예측하기 위해 적응 알고리즘이 사용된다. NLMS (Normalized LMS)알고리즘은 가장 일반적인 적응 알고리즘으로서, 동작이 간단하고 연산량이 작기 때문에 많이 사용되지만, 수렴속도가 매우 느린 단점을 갖는다[1][2]. VS(Variable Stepsize) 알고리즘은 NLMS 알고리즘의 장점을 유지하면서 수렴속도를 향상시키기 위해 수렴 과정에서 사용되는 파라메터인 Stepsize 값을 가변적으로 결정해주는 방법이다[3][4]. 다양한 VS 알고리즘에서도 ES 알고리즘은 음향학적 조건을 고정시켰을 때 측정된 공간 임펄스 응답의 평균 에너지 감쇄율이 일정하다는 특징을 이용해 음향 반향 제거기의 수렴 속도를 향상시킨다[5]. 그러나 동시에 ES 알고리즘은 외부 잡음에 민감한 단점을 갖는다[6]. 본 논문에서는 외부 잡음에도 음향 반향 제거기가 빠르고, 일정한 수렴 성능을 유지할 수 있도록 Stepsize 생성기와 Stepsize 매트릭스 생성기를 제안하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 제안된 음향 반향 알고리즘의 수렴 성능이 기존의 NLMS 알고리즘과 ES 알고리즘에 비해 우수함을 입증하였다.

2. 기존의 음향 반향 제거기 알고리즘

2.1 음향 반향 제거기의 기본 구조

상대방과 통화 과정에서 수신된 신호 $x(k)$의 일부는 마이크로폰을 통해 상대방에게 피드백 된다. 이 때 마이크로폰으로 유입되는 반향 신호 $y(k)$는 $x(k)$가 반향 경로에 의해 변형된 형태이다. 음향 반향 제거기는 적응 알고리즘을 이용해 반향 복사본(Echo Replica) 신호 $\hat{y}(k)$를 생성하고 실제 반향 신호 $y(k)$에서 $\hat{y}(k)$를 감산시켜 음향 반향 현상을 제거해준다.

일반적인 음향 반향 제거기의 구조는 그림 1과 같다.

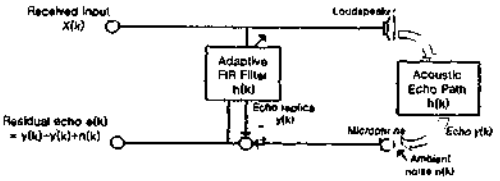

그림 1. 일반적인 음향 반향 제거기의 구조

음향 반향 제거기의 동작은 실시간 처리되기 때문에 적응 알고리즘의 수렴속도가 매우 중요한 성능 요소이다.

2.2 NLMS 알고리즘과 VS 알고리즘

NLMS 알고리즘은 단순한 동작 과정과 적은 연산량으로 가장 많이 사용되는 대표적인 적응 알고리즘이다. NLMS 알고리즘의 필터 탭 계수(Tap Weight)의 업데이트 방법은 식(1)과 같다.

$$\hat{h}(k+1) = \hat{h}(k) + \alpha \frac{e(k)}{\|x(k)\|^2} x(k) \qquad (1)$$

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) + n(k) \qquad (2)$$

식 (1)에서 $\hat{h}(k)$는 제거 필터의 탭 계수 값을, $e(k)$는 잔여 에러 신호를 의미한다. 상수 α는 음향 반향 제거기의 전체 수렴 특성을 결정하는 Stepsize 값이다. 임의의 방법으로 Stepsize 값을 조절하여 수렴 성능을 높여주는 알고리즘을 VS 알고리즘이라고 한다.

2.3 공간 임펄스 응답의 특성과 ES 알고리즘

일반적으로 공간 임펄스 응답들의 형태는 각기 다르지만 측정하는 공간의 음향학적 조건들이 고정되면 공간 임펄스 응답들의 평균 에너지 감쇠율이 일정해지는 특징을 갖는다.

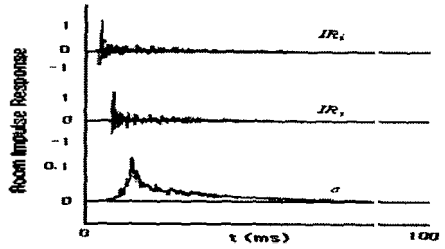

그림 2. Room 임펄스 응답 특성

그림 2는 반향 시간이 $280ms$이고 스피커와 마이크로폰 사이의 거리는 $1m$일 때 공간 임펄스 응답들의 특성을 보여준다. 그림에서, IR_i와 IR_j는 서로 다른 공간 임펄스 응답을 나타내고 σ는 각각의 공간 임펄스 응답들의 평균 에너지 감쇠율을 나타내고 있다[5].

ES 알고리즘은 고정된 음향학적 조건에서 측정된 공간 임펄스 응답들의 특성을 이용해 Stepsize 값들을 결정하는 알고리즘이다. 다음은 ES 알고리즘을 이용한 필터의 탭 계수의 업데이트 식이다.

$$\hat{h}(k+1) = \hat{h}(k) + A \frac{e(k)}{\|x(k)\|^2} x(k) \qquad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 & .. & .. & 0 \\ : & \alpha_2 & .. & : \\ : & : & \alpha_i & : \\ 0 & .. & .. & \alpha_L \end{pmatrix} \qquad (4)$$

A는 Stepsize 매트릭스이고, 식 (4)와 같이 정의된다. α_i $(i=1,2,3,\ldots,L)$는 i번째 Stepsize 값을 의미한다.

3. 제안된 음향 반향 제거기

그림 3은 제안된 음향 반향 제거기의 구조이다.

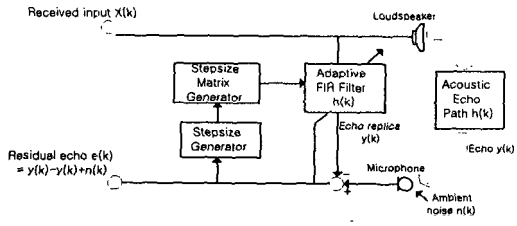

그림 3. 제안된 음향 반향 제거기

빠른 수렴 속도를 갖는 ES 알고리즘도 알고리즘의 특성상 외부 잡음에 영향을 받는 단점을 갖는다[6]. 본 논문에서는 Stepsize 생성기와 Stepsize 매트릭스 생성기를 제안하여 외부 잡음에 대한 음향 반향 제거기의 강건함을 향상시켰다.

3.1 Stepsize 생성기

Stepsize 생성기는 음향 반향 제거기의 수렴 성능을 일정하게 유지하기 위해 외부 잡음 $n(k)$를 제거하고, 잔여 에러 신호 $e(k)$만으로 Stepsize 값을 결정한다[6].

그림 4는 Stepsize 생성기의 동작 구조를 보여준다.

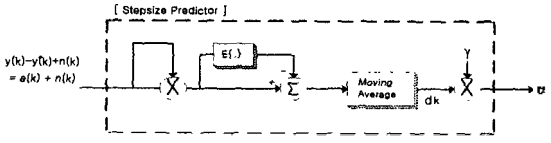

그림 4 Stepsize 생성기의 내부구조

Stepsize 예측기의 동작 과정은 다음과 같다. 두 개의 이동 평균기(Moving Averager)를 이용해 식 (5)와 같이 잔여 에러 신호 $e(k)$와 외부 잡음 $n(k)$에 대한 평균 파워를 측정한다.

$$d_k = \overline{(n(k)+y(k)-\hat{y}(k))^2} - \overline{E[(n(k)+y(k)-\hat{y}(k))^2]} \quad (5)$$

이 때 $\overline{\cdot}$와 $E[]$은 각각 긴 구간(long-term) 이동 평균기와 짧은 구간(short-term) 이동 평균기를 의미한다. 두 개의 이동 평균기는 Stepsize 값을 결정하는데 오차의 원인이 되는 외부 잡음 $n(k)$을 제거하기 위해 사용된다. 식(5)는 평균값 정리에 의해 다시 식(6)와 같이 근사 정리된다

$$\begin{aligned} d_k &\simeq \overline{(n(k)+y(k)-\hat{y}(k))^2 - E[n(k)^2]} \\ &= \overline{n(k)^2 - E[n(k)^2]} + 2\,\overline{n(k)(y(k)-\hat{y}(k))} \\ &\quad + \overline{(y(k)-\hat{y}(k))^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$n(k)$는 백색 잡음(White Noise)이고, $y(k)$나 $\hat{y}(k)$과는 서로 상호 독립적(Mutually Independent)이기 때문에 식(6)의 첫 번째와 두 번째 이동 평균값은 0에 근사하게 된다. 따라서 최종적으로 d_k는 식(7)과 같이 정리된다.

$$d_k \approx \overline{(y(k)-\hat{y}(k))^2} \quad (7)$$

식 (7)과 같이 외부 잡음 $n(k)$의 영향이 완벽하게 제거된 d_k 값에 적절한 Stepsize 값이 되도록 식 (8)처럼 γ를 곱해서 크기조절을 해준다.

$$\alpha = \gamma \cdot d_k \quad (8)$$

3.2 Stepsize 매트릭스 생성기

Stepsize 매트릭스 생성기는 음향 반향 제거기의 수렴 성능이 향상되도록 식 (9)와 같은 사선 형태(Diagonal)의 Stepsize 매트릭스를 생성한다.

$$M = \begin{pmatrix} \alpha_1 & .. & .. & .. & 0 \\ : & \alpha_2 & .. & : & : \\ : & : & \alpha_i & : & : \\ : & : & : & : & : \\ 0 & .. & .. & .. & \alpha_L \end{pmatrix} \quad (9)$$

α_1는 Stepsize 생성기에 의해 결정된 값이며, α_i는 i 번째 Stepsize 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_i = \alpha_1 \cdot \eta^{i-1} \quad (10)$$

$$\eta = \exp\left(-6.9 \times \frac{T_S}{T_R}\right) \quad (11)$$

η는 공간 임펄스 응답의 평균 에너지 감쇄율을 의미한다. 식(11)에서 T_S는 샘플링 간격을 의미하고 T_R는 공간의 반향시간(Reverberation Time)을 나타낸다.

4. 실험 및 결과

실험은 C++ 과 MATLAB을 이용하여 NLMS 알고리즘, ES 알고리즘 그리고 제안된 알고리즘의 수렴 특성을 외부 잡음의 SNR에 따라 비교하였다.

4.1 실험 조건

수신 신호 $y(k)$는 $8kHz$로 샘플링 된 음성 신호를 이용하였고, 음향 반향 시간은 $500ms$로 측정되었다. 외부 잡음은 SNR이 각각 20[dB], 15[dB], 10[dB]인 백색 잡음을 이용하였다. 또한 실험을 통해 본 논문에서 사용된 파라메터들도 최적화 하였다. Stepsize 생성기에서 사용된 긴 구간 이동 평균기의 구간 정도(leakage factor)는 2^{-25}이고, 짧은 구간 이동 평균기의 구간 정도는 2^{-10}로 결정하였다. Stepsize 값 α를 결정하기 위한 상수 γ는 0.08로 지정하였다.

4.2 실험 결과

그림 5는 각기 다른 외부 잡음이 발생했을 경우 제안된 Stepsize 생성기에 의해 결정된 Stepsize 값의 변화를 보여준다. 외부 잡음의 크기에 Stepsize 값의 결정이 전혀 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

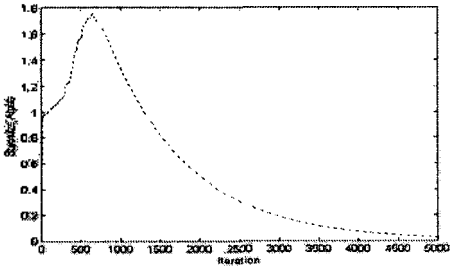

그림 5. 제안된 Stepsize 생성기에 의해 결정된 Stepsize 값의 변화

그림 6, 7, 8은 각각의 외부 잡음에 대한 세 가지 알고리즘의 수렴 특성을 보여준다.

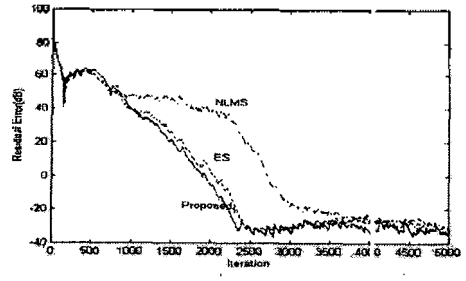

그림 6. NLMS, ES 그리고 제안된 알고리즘의 수렴 특성(20dB)

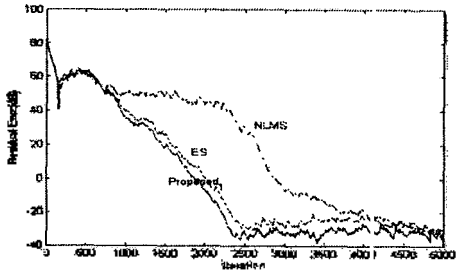

그림 7. NLMS, ES 그리고 제안된 알고리즘의 수렴 특성(15dB)

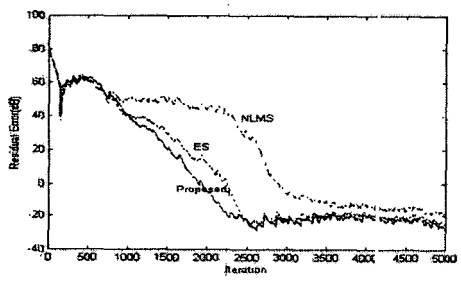

그림 8. NLMS, ES 그리고 제안된 알고리즘의 수렴 특성(10dB)

그림 6, 7, 8은 외부 잡음의 영향이 커질수록 기존의 알고리즘들에 비해 제안된 알고리즘의 수렴 속도가 빠르고 일정하게 유지되었고, 수렴 과정에서 발생하는 조절오차의 정도도 현저하게 감소하였음을 보여준다. 이러한 실험 결과는 제안된 알고리즘의 수렴 속도가 다른 두 알고리즘에 비해 외부 잡음에 대한 강건함이 크게 향상되었음을 의미한다. 실험 결과는 제안된 알고리즘이 음향 반향 제거기에 적용될 경우 상대방과 통화중이 외부 잡음이 발생하여도 반향 현상을 빠르고, 효과적으로 제거해주고 통화품질을 크게 개선시킬 수 있음을 보여준다.

V. 결론

ES 알고리즘은 빠른 수렴 속도에도 불구하고 알고리즘의 특성상 외부 잡음이 발생할 경우 수렴 속도가 느려지거나 조절오차의 정도가 커지는 등, 음향 반향 제거 성능이 크게 저하되는 단점이 발생하였다. 본 논문에서는 음향 반향 제거기가 외부 잡음에 강건하고, 빠른 수렴 속도를 일정하게 유지할 수 있도록 Stepsize 생성기와 Stepsize 매트릭스 생성기를 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘은 외부 잡음의 크기에 관계없이 ES 알고리즘보다 빠른 수렴 속도를 유지하였고, 잔여 에러량의 크기도 5[dB]에서 10[dB]정도 감소시킬 수 있었다. 이러한 실험 결과를 통해 본 논문에서 제안한 알고리즘을 음향 반향 제거기에 적용할 경우, 외부 잡음이 발생해도 원활하고 일정한 성능을 유지하며 상대방과 통화할 수 있을 것이라고 예상된다.

감사의 글

본 연구는 2001년 정보통신부 산업기술개발 사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

[1] B. Widrow and S. D. Steams, *Adaptive Signal Processing*, Prentice Hall, 1st Edition, 1985.

[2] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, 3rd Edition, 1996.

[3] F. Amano, H. P. Meana, A. de Luca and G. Duchen, "A multirate acoustic echo canceler structure", *IEEE Trans. on Communications*, vol. 43, pp. 2172 -2176, July 1995.

[4] Heng-Chou Chen and O. T.-C Chen, "A predictive updating scheme to improve the NLMS algorithm for acoustic echo cancellation", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 3, 1999.

[5] S. Makino, Y. Kaneda and N. Koizumi, "Exponentially weighted stepsize NLMS adaptive filter based on the statistics of a room impulse response", *IEEE Trans. on Speech and Audio Processing*, vol. 11, pp. 101-108, Jan. 1993.

[6] J. F. Doherty and R. Porayath, "A robust echo canceler for acoustic environments", *IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 44 5, pp. 389-396, May 1997.