

통신망의 반향제거를 위한 강인한 오차적응 NLMS 알고리즘

김민수*, 정찬수**

*세종-록히드마틴 우주항공연구소, **숭실대 전기제어시스템공학부

A Robust Error Adaptive NLMS Algorithm for Echo Cancellations of Communication Systems

*Min-Soo Kim and **Chan-Soo Chung

*Sejong-Lockheed Martin Aerospace Research Center

Abstract - 통신망에서 최적 적응 반향제거기(Echo Canceller; EC)는 반향성분이 길게 존재하는 환경에서도 실시간으로 동작할 수 있도록 알고리즘이 간결하여야 하며, 시간에 따라 빠르게 변하는 동특성의 반향경로에서도 동작을 보장할 수 있도록 빠른 수렴특성을 갖아야 한다. 또한, 전화망에서 수십 [ms] 이상의 지연이 발생할 경우에도 반향제거 성능이 우수해야 한다. 본 논문에서는 이러한 조건을 만족시키기 위해 오차의 크기에 따라 수렴속도를 가변시키는 오차적응 NLMS (Error-Adaptive NLMS) 알고리즘을 제안하였으며, 시뮬레이션을 통해 일반적으로 사용되는 LMS(Least Mean Square) 알고리즘과 이를 개선한 NLMS(Normalized LMS) 알고리즘과 성능을 비교하였다.

1. 서 론

반향(Echo)이란 통신망을 통해 전달되는 통화음성이 되돌아와서 송화자에게 다시 들리거나 동일한 내용이 시차를 두고 수화자에게 겹쳐서 전달되는 현상이다. 반향은 송화자반향(Talker Echo)과 수화자반향(Listener Echo)으로 나눌 수 있는데, 송화자반향은 송화자 자신의 음성을 반향으로 인해 다시 듣게 되는 것이며, 수화자 반향은 수화자가 동일한 내용을 약간의 시차를 갖고 반복하여 듣게 되는 것을 말한다. 일반적으로 송화자반향은 통화 서비스품질에 나쁜 영향을 미치게 된다[1].

하이브리드(Hybrid) 회로는 교환기에 위치하여 2선 사용자 전송회선으로부터 전달된 신호를 4선 전송회선의 송신단으로 전달하거나, 4선 전송회선의 수신단 신호를 근단의 2선 사용자 전송회선으로 전달하는 장치이다. 그러나 하이브리드에서 임피던스를 정확하게 정합시켜 주지 못하기 때문에 4선 전송회선에 전달된 음성신호 에너지의 일부는 4선 전송회선의 송신단으로 전달되어 반향이 발생하게 된다[1]. 일반적으로 EC는 지연문제 등의 이유로 반향 발생지점의 하이브리드 근처에 위치하게 된다.

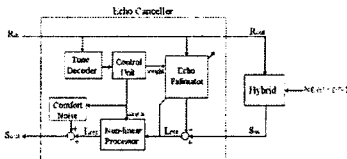


그림 1 반향제거기의 구조

그림 1은 전화망에서의 EC의 구조를 나타낸다. EC는 전화망과 하이브리드 사이에 존재하며 하이브리드는 FIR 필터와 부가적인 감쇄 특성을 갖는다. 톤 해독기(Tone Decoder)에 의해 톤 신호가 감지되면 반향제거 알고리즘의 반향추정기(Echo Estimator)는 가중치 갱신을 중지한다. 이때 반향추정기는 적응 FIR 필터로서 반향 경로를 예측하는 역할을 담당한다. 비선형처리기

(Non-Linear Processor; NLP)는 하이브리드에 의해 발생된 반향과 예측된 반향추정기의 신호차를 계산하여 사전에 정의된 기준값보다 클 경우에는 기존 신호를 막고 잡음신호(Comfort Noise)를 내보낸다.

동시통화(Double-talk)는 두 화자가 동시에 음성신호를 발생시키는 것으로 근단화자(Near-end)가 먼저 발성을 한 경우와 원단화자(Far-end)가 먼저 발성을 한 경우로 나눌 수 있다. 전자의 경우는 원단과 근단에 설치된 음성구간 검출기(Voice Activity Detector; VAD)로부터 쉽게 판단될 수 있으나, 후자의 경우는 VAD로 판단하기 어렵기 때문에 동시통화 검출기(Double Talk Detector; DTD)를 설치한다[2].

LMS알고리즘은 간단하고 구현이 용이하여 널리 사용되는 적응 알고리즘으로 수렴상수(Step Parameter)의 변경을 통해 수렴속도와 정상상태 성능을 개선하기위한 연구가 널리 진행되고 있다.

교환기내의 하이브리드에서 발생하는 반향을 제거하기 위한 알고리즘은 계산이 간단하면서도 반향제거 성능이 우수하여야 하며, 이의 성능을 개선하기 위해서는 현재 사용되는 NLMS알고리즘에 기초해 구성된 하드웨어의 부가적인 변경 없이도 간단히 적용할 수 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 단일통화 및 동시통화 환경에서 이러한 조건을 만족하도록 쉽게 구현이 가능한 EA-NLMS 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 기존 NLMS의 수렴상수를 오차의 절대 이동평균의 크기에 따라 가변시킴으로써 단일통화환경에서는 수렴속도를 빠르게 하고 동시통화 환경에서는 수렴속도를 느리게 함으로써 반향제거 성능을 개선하도록 하였다.

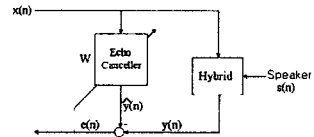


그림 2 적응 반향제거기

2. 반향제거 알고리즘

2.1 LMS 알고리즘

그림 2에 적응 EC를 나타내었다. 여기에서 $x(n)$ 은 원단(Far-end)신호를, $s(n)$ 은 근단(Near-end)신호를 나타내며, $y(n)$ 은 제거하고자하는 반향신호이다. 동시통화인 경우에 $y(n)$ 은 근단신호 $s(n)$ 을 포함하게 된다. $e(n)$ 은 오차신호로서 반향과 근단신호가 포함된 신호인 $y(n)$ 과 필터 출력신호 $\hat{y}(n)$ 의 차로 나타낼 수 있다. 차수가 N인 적응필터의 입력벡터 $X(n)$ 은 현재의 신호샘플 $x(n)$ 부터 N-1만큼 앞선 샘플들로 이루어지며 필터의 출력 $\hat{y}(n)$ 은 필터의 계수벡터 $W(n)$ 와 입력벡터 $X(n)$ 의 내적으로 계산된다.

$$X(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]^T \quad (1)$$

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

$$\hat{y}(n) = X(n)^T W = W^T X(n) \quad (3)$$

희망응답 $y(n)$ 과 필터출력 $\hat{y}(n)$ 과의 차로 정의되는 순간오차($e(n) = y(n) - \hat{y}(n)$)의 오차자승평균(Mean Square Error) $E[e^2(n)]$ 를 계산한 후, 순간오차자승 $e^2(n)$ 에 의한 동작곡면의 구배(Gradient)($\hat{\nabla}(n)$)를 구하면 식 (4)로 주어지는 필터계수 갱신식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} W(n+1) &= W(n) + \mu (-\hat{\nabla}(n)) \\ &= W(n) + \mu_{LMS} e(n)X(n) \end{aligned} \quad (4)$$

LMS알고리즘의 수렴특성과 안정성은 적응상수 μ_{LMS} 에 의해 좌우되는데 일반적으로 LMS알고리즘이 반복수가 증가함에 따라 가중치벡터 값이 최적해로 접근하기 위해서는 μ_{LMS} 가 $0 < \mu_{LMS} < 2/\lambda_{\max}$ 조건을 만족해야 한다[3].

2.2 NLMS 알고리즘

LMS알고리즘에서 적응상수 μ_{LMS} 값은 수렴속도 뿐만 아니라 시스템의 안정도에도 직접적인 영향을 주며, 입력벡터 $X(n)$ 값에 의해서도 시스템이 영향을 받는다. 이러한 시스템의 안정성과 수렴속도 문제를 해결하는 방안으로 입력벡터 $X(n)$ 의 유클리드 노름(Norm)의 제곱, 즉 신호의 파워로 갱신량을 정규화시킨다. 이러한 정규화된 적응상수 μ_{NLMS} 를 갖는 것을 NLMS 알고리즘이라 부른다[3]. 또한, NLMS 알고리즘은 LMS 알고리즘보다 많은 연산량이 필요하지만 계산이 간단하여 실시간처리가 필요한 경우에 널리 사용되고 있다. 식 (5)에는 NLMS 알고리즘의 기본수식을 나타내었다.

$$W(n+1) = W(n) + \mu_{NLMS} e(n)X(n) \quad (5)$$

$$\mu_{NLMS} = \frac{\mu_{LMS}}{X^T(n)X(n)}$$

LMS 알고리즘의 적응상수 μ_{LMS} 는 고정된 값인데 반해 NLMS의 수렴상수 μ_{NLMS} 는 입력신호의 파워로 갱신량을 정규화하고 있으므로 신호의 갑작스런 크기 변화에도 많은 영향을 받지 않는다. 따라서 NLMS 알고리즘은 입력신호의 통계적 성질을 알지 못하더라도 수렴계수를 설정하는 것이 가능하게 된다.

2.3 MNLMS 알고리즘

동시통화인 경우, LMS 및 NLMS 알고리즘의 오차신호 $e(n)$ 은 입력신호 $x(n)$ 과는 상관관계가 없는 근단신호 $s(n)$ 을 포함하고 있으므로, 적응 필터는 $x(n)$ 에 대한 정보만 가지고 있을 뿐 $s(n)$ 에 대한 정보를 가지고 있지 않다. 따라서 동시통화 환경의 적응과정에서 근단신호의 음성신호에 의해 방향제거 성능이 저하되는 단점이 있다. 이러한 동시통화의 경우에는 DTD를 설치하여 근단신호 $s(n)$ 이 감지된 경우에는 적응 EC의 동작을 중지시키거나 수렴속도를 늦추는 방법이 사용된다.

만약, $s(n)$ 의 파워를 측정할 수 있다면, DTD를 설치하지 않고서도 NLMS 알고리즘의 μ_{NLMS} 를 수정하면 간단히 수렴속도를 느리게 할 수 있다[4]. 식 (6)에는 수정된 NLMS 알고리즘(M-NLMS)을 나타내었다.

$$W(n+1) = W(n) + \mu_{MNLMS} e(n)X(n) \quad (6)$$

$$\mu_{MNLMS} = \frac{\sigma_x^2(n)}{\sigma_x^2(n) + \sigma_s^2(n)} \mu_{NLMS}$$

여기에서 μ_{MNLMS} 를 계산하기 위해 사용된 σ_x^2 은 입력

신호 $x(n)$ 의 분산이고, σ_s^2 은 근단신호 $s(n)$ 의 분산을 나타낸다.

3. 오차적응(Error-Adaptive) NLMS 알고리즘

제안하는 오차적응(Error-adaptive) NLMS(EA-NLMS) 알고리즘은 단일 통화 환경에서 NLMS 알고리즘의 수렴특성을 보다 빠르게 하여 방향제거성능을 개선하고 동시통화 환경에서는 수렴속도를 느리게 함으로써 방향제거 성능을 개선하도록 적응 상수를 가변시켰다. 일반적으로 동시통화인 경우에는 수렴속도를 줄이거나 DTD를 설치하여 EC의 동작을 중지시키는 방법이 사용되는데 EA-NLMS 알고리즘은 수렴 속도를 느리게 하는 방법을 사용하였다. 이를 위해 추가로 오차신호의 이동평균 $e_{MA}(n)$ 값을 계산하여 이 값이 클 경우, 보다 큰 수렴속도를 빠르게 가중치를 주고 작을 경우 수렴속도를 줄일 수 있도록 하였다. $e_{MA}(n)$ 의 계산은 식 (7)로 주어지며, 이때 K는 이동평균을 계산하기 위한 오차벡터의 크기이다.

$$e_{MA}(n) = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} |e(n-i)| \quad (7)$$

$e_{MA}(n)$ 값을 기초로 $\eta(n) = \exp(ae_{MA}(n))$ 를 계산하여 이 값을 적응상수(단일통화 시: μ_{NLMS} , 동시통화 시: μ_{MNLMS})에 곱해줌으로써 μ_{EANLMS} 값을 계산할 수 있게 된다.

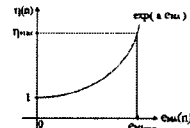


그림 3 $e_{MA}(n)$ 와 $\eta(n)$ 관계 그래프

η 는 그림 3과 같은 그래프에 의해 계산되는데, $e_{MA_{\max}}$ 는 오차의 이동평균값 $e_{MA}(n)$ 들의 최대값이며 이때의 η 값은 η_{\max} 로 주어진다. 일반적으로 오차가 감소하는 경우, 초기의 $e_{MA}(1)$ 값이 $e_{MA_{\max}}$ 가 된다. 또한, $e_{MA}(n)$ 이 0일 경우에는 $\eta=1$ 이 되어 NLMS알고리즘(또는 M-NLMS알고리즘)과 같게 된다.

4. 시뮬레이션 및 결과

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션에 사용된 원단신호 $x(n)$ 와 근단신호 $s(n)$ 를 식 (8)과 식(9)에 나타내었다. 이 신호는 ITU-T규정에 의거하여 G.168에 의해 만들었고, 사람의 음성은 정현파 신호로 표현된다[5]. 모의실험에서 모델링한 정현파신호를 사용함으로써 실제 음성신호보다 성능의 평가가 용이하다.

$$\begin{aligned} x(n) &= x_1(n) + x_2(n) + x_3(n) + x_4(n) + x_5(n) \quad (8) \\ &= \sum_{i=1}^5 a_i \sin(2\pi f_i (\frac{n}{F_s} - \tau)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s(n) &= s_1(n) + s_2(n) + s_3(n) + s_4(n) + s_5(n) \quad (9) \\ &= \sum_{i=1}^5 b_i \sin(2\pi f_i \frac{n}{F_s}) \end{aligned}$$

여기서, a 와 b 는 진폭이며, f 는 주파수를, F_s 는 샘플링율을, τ 는 하이브리드 경로를 통과하는 동안의 시간지연을 각각 의미한다. 시뮬레이션에서는 8K[Hz](0.125[ms])로 샘플링한 1초간의 데이터 8,000개를 사용하였으며, 3000샘플부터는 근단신호 $s(n)$ 이 추가되어 동시통화가 시작되도록 하였다. 그림 4에는 원단신호 $x(n)$ 과 근단신호 $s(n)$ 및 스펙트럼을 각각 나타내었다.

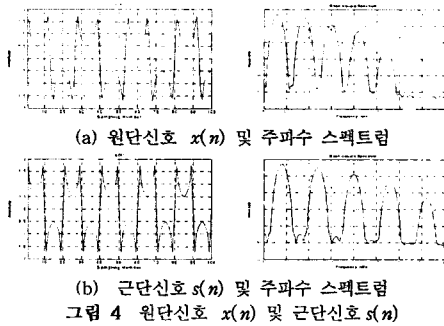


그림 4 원단신호 $x(n)$ 및 근단신호 $s(n)$

그림 4-(b)에서 원단신호 $x(n)$ 의 주파수성분은 300[Hz], 900[Hz], 1500[Hz], 2100[Hz], 2700[Hz]이다. 또한, 반향신호인 $y(n)$ 은 $x(n)$ 이 하이브리드를 통과한 신호로서 반향경로(Echo Path)에 대한 지연시간(τ) 32ms와 9[dB] ERL (Error Return Loss), 그리고 SNR (Signal to Noise Ratio)이 20[dB]인 잡음을 고려하였다. 또한, 성능비교를 위해 LMS 알고리즘의 μ_{LMS} 값을 0.1로 설정하였으며, MNLMS, EA-NLMS 알고리즘에 동일하게 적용하였다. 만약, μ_{LMS} 값을 0.1보다 증가시키면 단일통화 환경에서의 오차 $e(n)$ 은 감소하지만 동시통화 환경에서 오차는 급격히 증가하게 된다. 그리고 반향추정기의 필터차수는 64차를, $e_{MA}(n)$ 을 계산하기 위한 K 값은 64를 각각 사용하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

3000샘플까지는 입력신호 $x(n)$ 만 존재하는 단일통화 환경이고 3001부터 8000 샘플까지는 입력신호 $x(n)$ 와 근단신호 $s(n)$ 이 모두 존재하는 동시통화 환경으로 M-NLMS 알고리즘과 EA-NLMS 알고리즘을 각각 적용하여 비교 평가하였다. 단, 단일통화인 경우에는 NLMS 알고리즘과 M-NLMS 알고리즘은 서로 동일하다.

그림 5에는 시간영역 및 주파수영역에서의 NLMS 및 M-NLMS 알고리즘을 기초로 시뮬레이션한 결과를, 그림 6에는 EA-NLMS 알고리즘을 기초로 시간영역과 주파수영역에서 시뮬레이션한 결과를 각각 나타내었다.

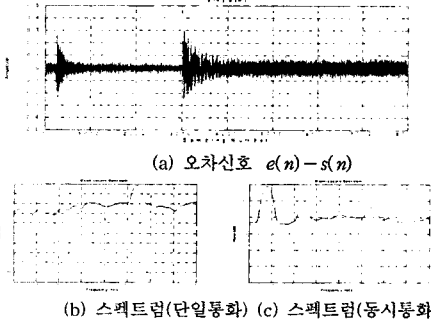


그림 5 M-NLMS 알고리즘의 오차신호 및 주파수 스펙트럼

단일통화인 경우, NLMS 알고리즘(또는 M-NLMS 알고리즘)에 기초한 시뮬레이션 결과로서 $x(n)$ 의 주파수 성분 중에서 300[Hz], 900[Hz], 1500[Hz], 2100[Hz] 주파수 대역의 반향은 -49[dB] 이상 제거되었고, 2700[Hz] 부근의 주파수만이 -41[dB] 정도로 제거되었음을 확인 할 수 있다. 그러나 동시통화인 경우에는 M-NLMS 알고리즘을 사용하였음에도 불구하고 300[Hz] 부근의 주파수를 포함하여 전 영역에 걸쳐 반향제거 성능이 떨어짐을 알 수 있다.

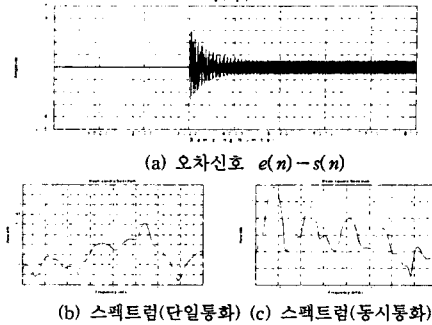


그림 6 EA-NLMS 알고리즘의 오차신호 및 주파수 스펙트럼

그림 6의 결과에서 단일통화 환경인 경우에 제안한 EA-NLMS 알고리즘이 M-NLMS 알고리즘보다 오차신호가 빨리 감소함을 알 수 있다. 특히, 단일통화 환경에서의 주파수 스펙트럼을 살펴보면, $x(n)$ 의 주파수성분이 전체적으로 감소되었으며, 특히 2700[Hz] 부근의 주파수가 M-NLMS 알고리즘의 -41[dB]에 비해 18[dB] 이상 감소된 -59 [dB]를 보여주고 있음을 알 수 있다. 동시통화 환경인 경우, 300[Hz] 부근에서는 M-NLMS 알고리즘과 성능차이가 없으나 고주파영역으로 갈수록 반향제거 성능이 개선되었음을 알 수 있다.

표1. 시간영역에서의 성능비교(절대 오차의 합)

	M-NLMS	EA-NLMS
단일통화($\sum_{i=3001}^{3000} e(i) $)	45.27	4.11
동시통화($\sum_{i=3001}^{8000} e(i) - s(i) $)	155.54	144.75

5. 결론

전화통신망 교환기의 하이브리드에서 발생하는 반향을 제거하기 위한 알고리즘은 계산이 간단하면서도 우수한 반향제거 성능을 가져야 한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 조건을 만족하도록 NLMS 알고리즘의 성능을 개선한 EA-NLMS 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 NLMS의 수렴상수를 오차의 절대 이동평균의 크기에 따라 가변시킴으로서 수렴속도 및 반향제거 성능을 개선하도록 하였다. 제안한 EA-NLMS 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 단일통화 환경에서는 NLMS 알고리즘과, 동시통화 환경에서는 M-NLMS 알고리즘과 각각 비교하였으며 하이브리드 반향경로의 지연시간 τ 를 32[ms]로, 감쇄율 ERL을 9[dB]로, 그리고 잡음을 20[dB]로 시뮬레이션 환경을 설정하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 EA-NLMS 알고리즘이 시간영역 및 주파수 영역에서 수렴속도와 반향제거 성능이 우수함을 알 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] N. Benvenuto and G. Cherubini, Algorithms for Communication Systems and their Applications, WILEY, 2002.
- [2] K. Murano, S. Unagami, and F. Amano, "Echo Cancellation and Applications," IEEE Communications Magazine, vol.28, pp.49-55, Jan. 1990.
- [3] J. E. Greenberg, "Modified LMS Algorithms for Speech Processing with an Adaptive Noise Canceller", IEEE Trans. on SAP, Vol. 6, No. 4, pp. 338-351, July 1998.
- [4] J. S. Park, H. T. Kim, K. S. Son, "Performance Improvement of Acoustic Echo Canceller Using Post-Processor", 한국음향학회, 18권, pp. 35-42, 1999.
- [5] ITU-T Recommendation G.163, General Characteristics of International Telephone Circuits. Echo Cancellers.