

음향반향제거기에서 암묵신호분리를 이용한 동시통화처리*

이 행 우**

Double Talk Processing using Blind Signal Separation in Acoustic Echo Canceller

Lee Haengwoo

〈Abstract〉

This paper is on an acoustic echo canceller solving the double-talk problem by using the blind signal separation technology. The acoustic echo canceller may be deteriorated or diverged during the double-talk period. So we use the blind signal separation to detect the double talking by separating the near-end speech signal from the mixed microphone signal. The blind signal separation extracts the near-end signal from dual microphones by the iterative computations using the 2nd order statistical character in the closed reverberation environment. By this method, the acoustic echo canceller operates irrespective of the double-talking. We verified performances of the proposed acoustic echo canceller in the computer simulations. The results show that the acoustic echo canceller with this algorithm detects the double-talk periods well, and then operates stably without diverging of the coefficients after ending the double-talking. The merits are in the simplicity and stability.

Key Words : Blind Signal Separation, Acoustic Echo Canceller, Double Talk, Hands-free

I. 서론

핸즈프리 등 스피커-폰 시스템의 사용이 증가함에 따라서 음향반향제거기술이 중요한 문제로 대두하게 되었다. 음향반향신호는 원단화자로부터의 수신신호가 스피커를 통해 방사된 후 벽면 등에 반사되어 마이크에서 근단화자의 송신신호와 결합되므로서 원단에서 근단화자의 음성청취를 방해받게 된다. 반향신

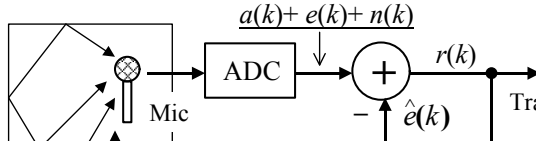
호를 제거하기 위하여 적응 필터를 이용한 음향반향제거기를 사용하게 되는데 이 회로는 원단화자신호만 존재하는 일방통화 때에만 정상적으로 동작하고 근단화자신호도 존재하는 동시통화 구간에서는 반향신호를 제거하는 능력이 갑자기 저하되는 현상이 발생한다. 따라서 이 동시통화문제를 처리할 수 있는 기능이 포함되어야 한다[1-2].

일반적으로 동시통화상태를 검출하여 반향제거기의 계수 갱신을 중지시킴으로써 계수의 발산을 방지하는 방법[3]이 있다. 그러나 종래 이 방법은 검출시간이 비교적 길어 검출이 되기 전에 반향제거기의 계

* 이 논문은 2015년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

** 남서울대학교 정보통신공학과 교수

수가 발산하는 경우가 있다. 따라서 본 논문에서는 신속하게 동시통화상태를 검출하기 위하여 새로운 음원분리기술을 사용한다.



<그림 1> 음향반향제거기

일반적으로 동시통화상태를 검출하여 반향제거기의 계수 갱신을 중지시킴으로서 계수의 발산을 방지하는 방법[3]이 있다. 그러나 종래 이 방법은 검출시간이 비교적 길어 검출이 되기 전에 반향제거기의 계수가 발산하는 경우가 있다. 따라서 본 논문에서는 신속하게 동시통화상태를 검출하기 위하여 새로운 음원분리기술을 사용한다.

음원분리기술은 관찰된 혼합음으로부터 각 음원신호를 분리해낼 수 있다. 특히 입력신호의 통계적인 특성 등 사전 정보를 알지 못하는 상태에서 신호들을 분리하는 블라인드 음원분리(BSS) 방법이 있다. 이것은 음성간의 통계적 특성이 독립이라는 가정하에 여러 음원을 분리하는 방법이다[4]. Jutten과 Herault가 제안한 BSS 알고리즘은 선형 혼합된 신호를 간단히 분리할 수 있다고 발표하였으며 이후 여러 후속 연구가 이루어졌다[5]. Jutten과 Herault는 시간영역에서 잡음과 신호를 분리하는 BSS 알고리즘을 제안하였다. 그러나 이 알고리즘은 수천 개의 많은 탭을 사용하므로 큰 메모리가 필요하고 계산량도 많아진다. Bell과 Sejnowski는 독립성분분석(ICA)을 통하여 지연을 추정하는 방법을 제안하였다[6-8]. 그러나 음성신호는 주기적인 특성 때문에 지연을 추정하는데 있어 초기값에 따라서는 최적해로 수렴하지 못하는 경우도 있다. 이를 해결하기 위해 Torkko는 정보량 최대화 알

고리즘을 이용하여 지연을 추정하였다[9]. 그러나 계산량이 많고 주변잡음이 있으면 정확하게 지연을 추정하지 못한다. 따라서 최근에는 주파수영역에서 블라인드 음원분리를 하는 연구가 많이 이루어지고 있다[10]. 또한 폐쇄된 공간에서 반향신호가 존재하는 다채널 환경에서 신호를 분리하는 문제는 다차원의 많은 계산량을 요구한다[11-12].

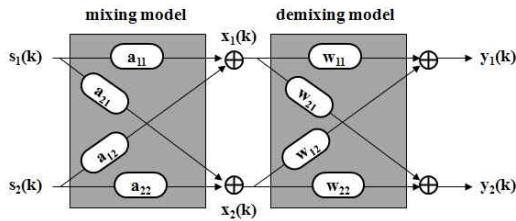
제안하는 음원분리기술은 마이크 간에 신호의 크기와 도달시간의 차이를 이용한다. 다시 말해서 이 알고리즘은 여러 비선형 수학적 계산식을 구현한다. 복수의 음향신호는 3가지 차원에서 중첩됨으로 인하여 서로 혼합되고 간섭된다. 세 차원은 시간, 주파수, 그리고 도착 방향을 말한다. 지금까지 시간영역에서 중첩하는 신호는 주파수 스펙트럼이나 도착 방향을 이용하여 구별하였다. 그러나 본 기술은 시간, 스펙트럼, 도착 방향이 동시에 중첩된 신호들도 구분할 수 있다. 즉 2개의 음원으로부터 발생된 혼합음이 존재하는 환경에서 이중 마이크를 사용하여 각 음원을 분리해낸다. 이는 각 마이크에 유입되는 신호의 크기와 도달시간이 다르기 때문에 이러한 특성을 활용하여 반복적인 계산을 통해 음원을 구하게 된다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. II장에서 암묵신호분리 알고리즘의 개념을 논하였고, III장에서는 음향반향제거기에서 암묵신호분리 알고리즘을 이용한 동시통화방법에 대하여 살펴보았다. 그리고 모의 실험 결과를 IV장에서 기술하였고, V장에서 결론을 도출하였다.

II. 암묵신호분리 알고리즘

폐쇄된 공간에서 핸드프리 통화는 음향반향을 발생시킨다. 그래서 원하지 않는 반향신호를 제거하기 위한 회로를 사용한다. 그런데 원단화자와 근단화자

가 동시에 말을 하는 동시통화의 경우에는 마이크로 유입되는 근단화자신호로 인하여 반향제거기의 계수가 발산할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 BSS에서 분리된 근단화자신호를 이용하여 동시통화 구간에는 필터계수의 갱신을 보류하고자 한다. 마이크로 유입되는 반향신호와 근단화자신호는 암묵신호분리를 통하여 근단화자신호를 구할 수 있다. 동시통화시 dual 마이크를 사용한 암묵신호분리는 <그림 2>와 같은 구조로 이루어진다.



<그림 2> 이중 마이크를 사용한 암묵신호분리 모델

각 음원으로부터 발생된 음향신호는 크기와 시간을 달리하여 마이크로 유입된다. 따라서 음원을 $s(k)$, 마이크 입력신호를 $x(k)$ 라 하면 각 마이크로 유입되는 신호의 혼합모델은 식 (1), (2)과 같이 표현된다.

$$x_1(k) = a_{11}(k)s_1(k) + a_{12}(k)s_2(k-d_2) \quad (1)$$

$$x_2(k) = a_{21}(k)s_1(k-d_1) + a_{22}(k)s_2(k) \quad (2)$$

여기서 $a(k)$ 는 각 음원으로부터 마이크까지의 거리에 반비례하는 혼합계수이다. 샘플링 주파수가 8kHz인 경우 두 마이크 간의 거리가 약 4cm 이내이면 지연시간은 무시할 수 있다. 그리고 반향신호는 다채널 신호의 합이다. 즉

$$s_2(k) = \sum_{n=1}^N c_n(k)s_2(k-n) \quad (3)$$

여기서 $c_n(k)$ 는 계산하지 않고 반향제거기의 계수를 복사하여 사용한다. BSS 출력에서 분리된 음향의 크기는 음원의 크기와 같지 않으므로 각 음원을 $s'_1(k) = s_1(k)/a_{11}(k)$, $s'_2(k) = s_2(k)/a_{22}(k)$ 로 정규화하면 수식이 간략화된다. 따라서

$$x_1(k) = s'_1(k) + a_{12}(k)s'_2(k) \quad (4)$$

$$x_2(k) = a_{21}(k)s'_1(k) + s'_2(k) \quad (5)$$

두 입력신호를 구하는 형태로 수식을 정리하면

$$\tilde{s}_1(k) = x_1(k) - \tilde{a}_{12}(k)\tilde{s}_2(k) \quad (6)$$

$$\tilde{s}_2(k) = x_2(k) - \tilde{a}_{21}(k)\tilde{s}_1(k) \quad (7)$$

여기서 미지수 $\tilde{a}_{12}(k)$ 및 $\tilde{a}_{21}(k)$ 는 반복적인 계산에 의하여 해를 구할 수 있다. 즉 음향신호 $s_1(k)$, $s_2(k)$ 가 서로 독립이라 할 때 각 신호의 2차 통계적 특성을 이용하여 steepest descent method로 구한다. 한편 출력신호는 음원의 추정치 $y_1(k) = \tilde{s}_1(k)$, $y_2(k) = \tilde{s}_2(k)$ 이므로 식 (6), (7)로부터 출력신호의 분리모델은

$$y_1(k) = x_1(k) - \tilde{a}_{12}(k)y_2(k) = \frac{x_1(k) - \tilde{a}_{12}(k)x_2(k)}{1 - \tilde{a}_{12}(k)\tilde{a}_{21}(k)} \quad (8)$$

$$y_2(k) = x_2(k) - \tilde{a}_{21}(k)y_1(k) = \frac{-\tilde{a}_{21}(k)x_1(k) + x_2(k)}{1 - \tilde{a}_{12}(k)\tilde{a}_{21}(k)} \quad (9)$$

여기서 분리모델의 계수 행렬은

$$\mathbf{w}(k) = \frac{1}{1 - \tilde{a}_{12}(k)\tilde{a}_{21}(k)} \begin{bmatrix} 1 & -\tilde{a}_{12}(k) \\ -\tilde{a}_{21}(k) & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

분리계수를 구하는 대신 식 (4), (5)로부터 혼합계

수를 직접 구할 수 있다. 오차신호를 비용함수로 사용하여 혼합모델을 다시 표현하면 식적으로 보여주고 있다.

$$x_1(k) - y_1(k) - \tilde{a}_{12}(k)y_2(k) = \varepsilon_1(k) \quad (11)$$

$$x_2(k) - \tilde{a}_{21}(k)y_1(k) - y_2(k) = \varepsilon_2(k) \quad (12)$$

따라서 LMS 알고리즘을 이용한 갱신값은

$$\begin{aligned} \nabla \rho_1(k) &= \frac{\partial \{\delta_1(k)\}^2}{\partial a_{12}(k)} \\ &= -2[x_1(k) - y_1(k) - \tilde{a}_{12}(k)y_2(k)]y_2(k) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \nabla \rho_2(k) &= \frac{\partial \{\delta_2(k)\}^2}{\partial a_{21}(k)} \\ &= -2[x_2(k) - y_2(k) - \tilde{a}_{21}(k)y_1(k)]y_1(k) \end{aligned} \quad (14)$$

그리고 새로운 계수의 갱신식은

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{12}(k+1) &= \tilde{a}_{12}(k) - \mu_1 \nabla \rho_1(k) \\ &= a_{12}(k) + 2\mu[x_1(k) - \tilde{s}_1(k) - a_{12}(k)\tilde{s}_2(k)]\tilde{s}_2(k) \end{aligned} \quad (15)$$

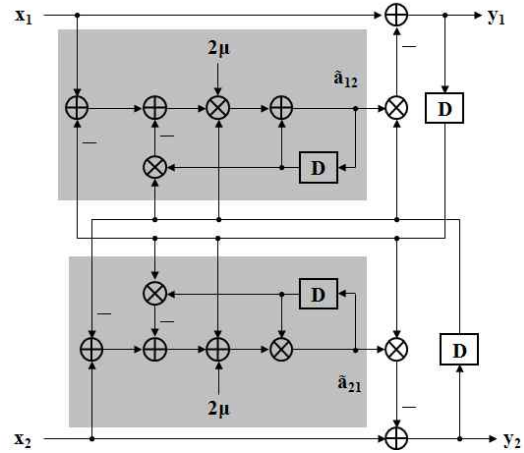
$$\begin{aligned} \tilde{a}_{21}(k+1) &= \tilde{a}_{21}(k) - \mu_2 \nabla \rho_2(k) \\ &= a_{21}(k) + 2\mu[x_2(k) - \tilde{s}_2(k) - a_{21}(k)\tilde{s}_1(k)]\tilde{s}_1(k) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 μ 는 수렴속도를 결정하는 스텝 크기를 나타낸다. BSS 출력을 사용하여 식 (6), (7)을 다시 표현하면

$$y_1(k+1) = x_1(k) - \tilde{a}_{12}(k)y_2(k) \quad (17)$$

$$y_2(k+1) = x_2(k) - \tilde{a}_{21}(k)y_1(k) \quad (18)$$

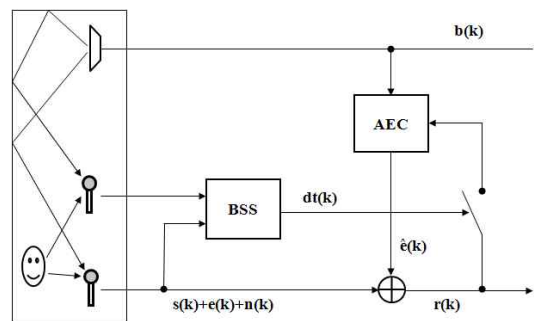
따라서 식 (15), (16)과 식 (17), (18)을 각 샘플마다 반복적으로 계산하면 분리하고자 하는 음원을 구할 수 있다. 이러한 순환적 연산과정을 <그림 3>에서도



<그림 3> 신호분리과정

III. 동시통화 음향반향제거기

핸즈프리에서 발생하는 동시통화 문제를 해결하기 위하여 이중 마이크를 사용한 BSS 방법을 제안하고자 한다. 앞서 발표된 연구[13]에서 반향제거기의 잔차신호로부터 근단화자신호를 제거하였으나, 본 논문에서는 동시통화구간에서 간단하게 필터의 계수갱신을 중지하는 방식으로 보다 안정적이다.



<그림 4> BSS를 이용한 음향반향제거기

<그림 4>에서 제안하는 BSS를 이용한 음향반향제거기의 구조를 보여주고 있다. 동시통화 구간에서 음향반향제거기의 계수는 잔차신호에 포함된 근단신호로 인하여 수렴상태에서 이탈하여 발산하고 수렴상태로 복귀하지 못할 수도 있다. 따라서 근단화자 및 반향신호 등이 포함된 두 마이크 입력신호에 대하여 BSS를 사용하여 근단화자신호와 반향신호를 분리하고, 추출된 근단화자신호의 유무에 따라 AEC의 잔차신호를 이용하여 적응필터의 계수를 갱신할지 여부를 정한다. 이렇게 함으로써 동시통화상태에서는 필터의 계수가 발산하는 것을 방지하기 위하여 계수의 갱신작업을 일시 중지할 수 있도록 한다. 이때 암묵신호분리작업이 늦어지면 AEC 계수들이 발산할 수 있으므로 근단화자신호가 나타날 때 신속하게 BSS가 수렴하도록 한다.

스피커에서 발생한 음향반향신호는 다채널의 반향 경로를 거쳐 마이크로 유입된다. 이 마이크 입력신호는 BSS 혼합모델의 출력신호이다.

$$x_1(k) = e_1(k) + s'_1(k) + n_1(k) \quad (19)$$

$$x_2(k) = e_2(k) + s'_2(k) + n_2(k) \quad (20)$$

잡음의 영향을 무시하고 스피커신호의 행렬을 $S_1(k)$, 근단화자신호를 $s_2(k)$, 그리고 반향신호에 대한 혼합계수의 행렬을 $A_{11}(k)$ 및 $A_{21}(k)$ 라 하면 혼합모델은 식 (21)과 (22)로 표현된다.

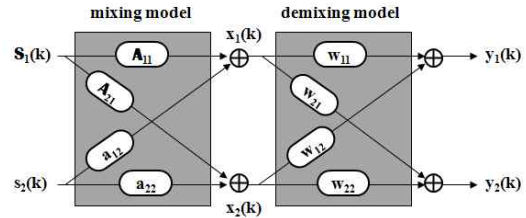
$$x_1(k) = \mathbf{A}_{11}^T(k)S_1(k) + a_{12}(k)s_2(k) \quad (21)$$

$$x_2(k) = \mathbf{A}_{21}^T(k)S_1(k) + a_{22}(k)s_2(k) \quad (22)$$

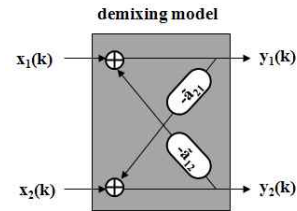
앞에서 설명한 암묵신호분리가 본 응용에서는 <그림 5>와 같은 방법으로 이루어진다.

음원분리는 식 (17), (18)을 이용하여 각 샘플마다 반복적으로 계산하면 결과를 얻을 수 있다. <그림 6>

은 이러한 연산과정을 보여주고 있다.



<그림 5> 암묵신호분리의 순방향 모델



<그림 6> 암묵신호분리의 분리모델

이 반향제거기는 한 가지 해결해야 할 문제를 갖고 있다. 즉, BSS 출력신호에서 순서의 permutation 문제가 있다. BSS 출력신호의 순서가 항상 일정하게 정해지지 않는 permutation 문제는 BSS의 두 출력신호가 어떻게 구성된다 하더라도 근단화자신호를 감지해낼 수 있도록 설계해야 한다.

한편, NLMS 알고리즘을 이용하는 반향제거기와 관련된 수식은 다음과 같다.

$$\hat{e}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n(k)b(k-n) \quad (23)$$

$$r(k) = s(k) + e(k) - \hat{e}(k) \quad (24)$$

$$c_n(k+1) = c_n(k) + 2\mu \frac{r(k)}{\sigma_e^2} b(k-n) \quad (25)$$

여기서 μ 는 알고리즘의 수렴속도를 결정하는 상수이다.

IV. 모의실험 결과

본 논문에서 제안한 복수의 마이크를 사용한 음원 분리 및 반향제거기의 성능을 상위수준에서 검증하기 위해 C 언어를 사용하여 시스템의 동작을 표현하는 시뮬레이션 프로그램을 작성하고, 이 알고리즘을 적용한 경우 반복된 심볼수에 대한 ERLE의 수렴특성 곡선을 관찰하였다.

입력은 근단화자의 음성신호와 원단의 백색잡음 등 두 음원으로부터 각 마이크에 유입된 혼합신호를 사용하였다. 원단으로부터의 수신신호는 400Hz ~ 4kHz의 주파수 사이에서 무색 성분을 갖는 잡음신호이다. 두 마이크는 최소 4cm 이상 간격을 두어야 하며, 입력신호는 8kHz로 샘플링된다. 그리고 계수 $\tilde{a}_{12}(k)$ 를 적응적으로 산출할 때 갱신 스텝의 크기는 $\mu = 2^{-13}$ 으로 설정하였다.

실험에 사용한 반향제거기는 128-tap FIR 구조로서 NLMS 적응 알고리즘을 사용하였으며 적응스텝의 크기는 $\mu = 0.03$ 으로 설정하였다. 이 실험에서 반향경로는 다음과 같은 수학적 모델[2]을 사용하였다. 반향경로의 응답특성은 시간에 지남에 따라 크기가 지수함수적으로 감소하고 끝부분에서는 상당히 긴 꼬리가 지속되어 진다.

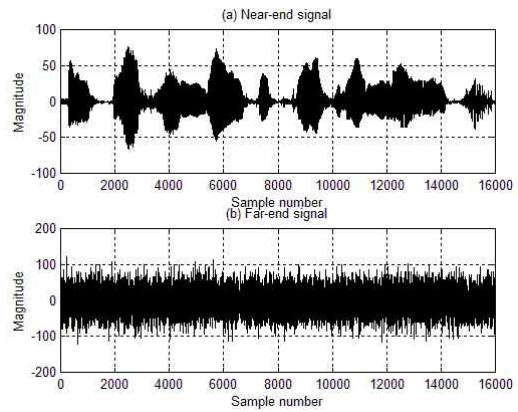
$$h(i) = 0.0914 \text{rand}(i) * (-1.0346)^{-i} \quad (26)$$

for $i = 0, 1, \dots, N-1$

여기서 $\text{rand}(i)$ 는 시간에 따라 불규칙하게 (+1) 또는 (-1)을 갖는 함수이다.

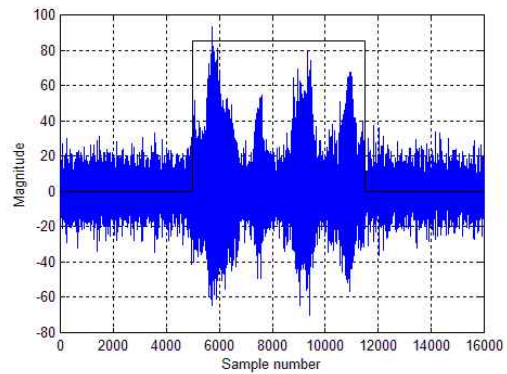
본 기술은 두 음향신호가 혼합되어 유입될 때 둘 중 어느 하나의 신호를 분리해낸다. 먼저 근단화자의 음성신호와 음향반향 잡음신호가 혼합되어 유입될 때 각 신호의 분리 실험을 수행하였다. 사용된 음성은 「실제 윈도우즈 프로그램 내에서」라는 여성의 발

음이다. <그림 7>은 두 음원신호의 파형을 보여주고 있다.



<그림 7> 음성신호 및 잡음의 음원파형

그리고 <그림 8>은 음향 반향된 잡음에 근단화자 신호인 음성신호가 혼합된 마이크 입력신호의 파형을 보여주고 있다. 사용된 음성은 「실제 윈도우즈 프로그램 내에서」라는 여성의 발음이 잡음 샘플수 5,000~11,500 사이에 삽입된 형태이다.



<그림 8> 마이크 입력신호

이번에는 두 신호가 혼합되어 BSS에 유입될 때 각 신호의 분리 결과에 대하여 살펴본다. 두 음원 반향

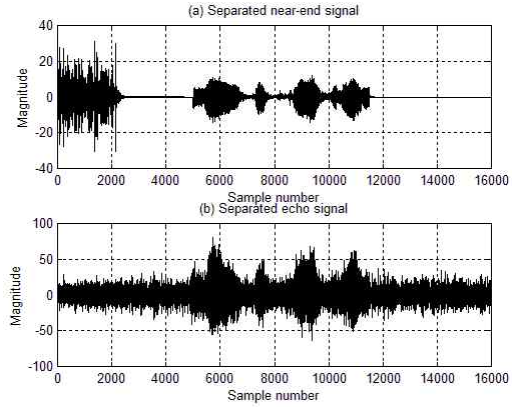
잡음과 음성신호를 분리한 경우의 각 출력신호 파형을 <그림 9>에서 보여주고 있다. 초기 계수가 수렴하지 않았을 때는 이상한 파형이 나타났으나 곧 수렴하여 분리된 음성신호를 보여준다.

<그림 10>은 마이크신호에서 반향추정신호를 제거한 잔차신호와 암목신호분리의 출력인 동시통화구간을 보여준다. 이 그림으로부터 잔차신호는 동시통화구간에서 제거되지 않은 근단화자신호를 포함하고 있는 것을 볼 수 있다. 동시통화는 high 값일 때 발생하며 이 구간에서는 AEC 계수의 갱신을 중지한다.

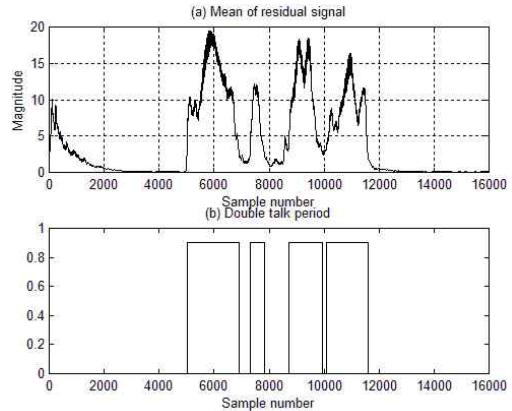
<그림 11>은 음향반향제거기의 성능을 나타내는 ERLE 곡선을 보여준다. 이 그림으로부터 동시통화구간에서는 근단화자신호 때문에 크기가 작아짐을 볼 수 있고, 동시통화가 종료된 직후에도 ERLE 값이 높은 크기를 유지하고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

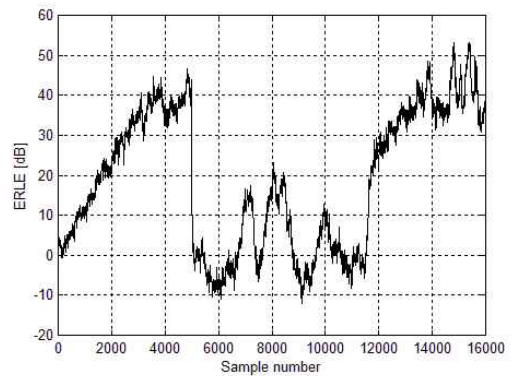
본 논문은 음향반향제거기에서 복수의 마이크를 사용하여 혼합된 신호로부터 반향신호와 근단화자신호를 분리하고, 분리된 근단화자신호를 이용하여 동시통화 구간에는 반향제거기의 계수 갱신을 일시 중지함으로써 동시통화상태에서도 반향제거기가 정상적으로 동작하는 방법에 관한 것이다. 폐쇄된 반향환경에서 암목신호분리의 혼합모델은 다채널이지만 근단화자신호는 단일채널로 볼 수 있기 때문에 이중 마이크를 사용하여 두 입력신호 성분을 잘 분리할 수 있다. 모의실험 결과, 제안된 알고리즘은 암목신호분리과정을 통해 근단화자신호와 반향신호를 분리하고, 동시통화 시에도 발산하지 않고 안정적으로 동작함을 보였다. 제안된 구조는 간단하면서도 안정적으로 동작할 수 있는 장점을 갖고 있다.



<그림 9> 분리된 근단화자 음성 및 반향 잡음신호



<그림 10> 평균 잔차신호 및 동시통화 구간



<그림 11> 제안한 음향반향제거기의 ERLE 곡선

참고문헌

- [1] S. Minami, T. Kawasaki, "A Double Talk Detection Method for an Echo Canceller," ICC'85, 1985, pp. 1492-1497.
- [2] Hua Ye, Bo-Xiu Wu, "A New Double-Talk Detection Algorithm Based on the Orthogonality Theorem," IEEE Trans. on Comm., Vol. 39, No. 11, Nov. 1991, pp. 1542-1545.
- [3] Wenbin Hsu, Frank Chui, David A. Hodges, "An Acoustic Echo Canceler," IEEE J. of Solid-state Circuits, Vol. 24, No. 6, Dec. 1989, pp. 1639-1646.
- [4] Bell A. J., Sejnowski T. J., "An Information Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution," Neural Computation, Vol. 7, 1995, pp. 1129-1159.
- [5] Kari Torkkola, "Blind Separation of Convolved Sources Based on Information Maximization," Neural Networks for Signal Processing, IEEE Signal Processing Society Workshop, 1996.
- [6] H. Saruwatari, T. Kawamura, and K. Shikano, "Blind Source Separation for Speech Based on Fast Convergence Algorithm with ICA and Beamforming," Proceedings of the Eurospeech 2001, Sep. 2001, pp. 2603-2606.
- [7] P. Comon, "Independent component analysis, A new concept," Signal Processing, Vol. 36, 1994, pp. 287-314.
- [8] M. Kawamoto, K. Matsuoka, et al., "A method of blind separation for convolved non-stationary signals," Neuro-computing, Vol. 22, 1998, pp. 157-171.
- [9] L. Parra, C. Spence, "Convolutive blind separation of non-stationary sources," IEEE Trans. Speech Audio Process., Vol. 8, No. 3, 2000, pp. 320-327.
- [10] D. W. E. Schobben, P. Sommen, "A frequency domain blind signal separation method based on decorrelation," IEEE Trans. Signal Process., Vol. 50, No. 8, 200, pp. 1855-1865.
- [11] E. Weinstein, M. Feder, A. V. Oppenheim, "Multi-channel signal separation by decorrelation," IEEE Trans. Speech Audio Process., Vol. 1, No. 4, 1993, pp. 405-413.
- [12] D. Yellin, E. Weinstein, "Multichannel signal separation: methods and analysis," IEEE Trans. Signal Process., Vol. 44, No. 1, 1996, pp. 106-118.
- [13] 이행우, 윤현민, "암묵신호분리를 이용한 동시통화 음향반향제거기," 한국정보통신학회 논문지, 제16권, 2호, 2012, pp. 237-245.

■ 저자소개 ■



이 행 우
Lee Haengwoo

2001년 3월~현재
남서울대학교 정보통신공학과 교수
2001년 2월 전북대학교 전자공학과(공학박사)
1987년 2월 서강대학교 전자공학과(공학석사)
1985년 2월 광운대학교 전자공학과(공학사)
관심분야 : VLSI 설계, 음향 신호처리, 적응 알고리즘
E-mail : hwlee@nsu.ac.kr

논문접수일: 2016년 1월 24일
수정일: 2016년 2월 16일(1차)
2016년 2월 24일(2차)
게재확정일: 2016년 3월 2일