

적응 빔형성기법을 이용한 보청기의 궤환 및 잡음제거 알고리즘

정회원 이 행 우*

A Feedback and Noise Cancellation Algorithm of Hearing Aids Using Adaptive Beamforming Method

Haeng-Woo Lee* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 보청기의 음향궤환 및 잡음을 제거시키기 위한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 2개의 마이크를 사용하여 궤환제거 필터의 계수를 갱신시키는 잔차신호에서 음성신호를 제거함으로써 수렴성능을 향상시킨다. 먼저 궤환제거기가 마이크 신호에서 궤환신호를 제거하고, 이어서 빔포밍 기법을 이용하여 잡음을 제거한다. 본 연구에서 제안한 궤환 및 잡음제거기의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션 프로그램을 작성하고 모의 실험을 수행하였다. 실험 결과, 제안한 적응 알고리즘을 사용하면 궤환제거기와 잡음제거기에서 각각 약 14.43 dB의 SFR 및 10.19 dB의 SNR 지수가 개선되는 것을 확인하였다.

Key Words : 보청기, 궤환제거, 잡음제거, 빔포밍, 음질향상

ABSTRACT

This paper proposes a new adaptive algorithm to cancel the acoustic feedback and noise signals in the digital hearing aids. The proposed algorithm improves its convergence performances by canceling the speech signal from the residual signal using two microphones. The feedback canceller firstly cancels the feedback signal among the mic signal, and then it is reduced the noise using the beamforming method. To verify the performances of the proposed algorithm, the simulations were carried out for some cases. As the results of simulations, it was proved that the feedback canceller and the noise canceller advance about 14.43 dB for SFR, 10.19 dB for SNR respectively during speech, in the case of using the new algorithm.

I. 서 론

난청환자의 청각손실은 언어의 수단, 즉 인간의 음성이 부분적으로 차단되는 것을 의미한다. 난청환자에게 청각손실을 보상해주기 위해 1800년경 최초로 청각보조장치가 개발되었고, 1950년대 이후 트랜지스터의 기술발전에도 따라 소형 보청기가 개발, 대량 보급되기 시작하였다. 전세계적으로 현재 약 5억

명의 난청인구가 존재하며, 유럽에 7천만명, 북미에 3천만명이 있고, 국내 난청인구는 약 4백만명으로 추산된다. 주로 노인성 질환인 난청은 65~74세 노인의 약 20%, 75세 이상의 노인은 35%가 난청환자로 분류된다. 이 중 10% 정도의 환자만이 보청기를 착용하고 있으며, 향후 노령인구의 지속적인 증가로 인해 보청기 수요는 매년 16.5%의 증가가 예상되고 있다.

* 이 논문은 2009년도 남서울대학교의 연구비를 지원받았음.

* 남서울대학교 정보통신공학과(hwlee@nsu.ac.kr)

논문번호: KICS2009-08-356, 접수일자: 2008년 8월 15일, 최종논문접수일자: 2010년 1월 4일

최근까지 아날로그 보청기는 마이크를 통해 입력된 음성신호를 전기신호로 변환한 후, 증폭 및 필터링 과정을 거쳐 리시버에 부분적으로 증폭된 음을 공급한다. 이때 시스템에 포함되는 잡음피크제한기, 자동이득조정기 등이 아날로그 신호로 처리되기 때문에 이로 인해 발생하는 원음의 험(hum), 이득 및 위상오차, 누화(crosstalk) 등의 문제가 항상 존재하게 된다. 반면 반도체 및 DSP 기술의 발달에 의해 개발된 디지털 보청기는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한 후, 각 음색의 최적 파라미터 값을 효율적으로 적용하여 보청기의 기능을 매우 정밀하게 제어할 수 있다. 즉 각 환자의 청각특성에 따라 주파수 대역별로 이득조정을 달리 함으로서 보다 정확하게 청각손실을 보정해줄 수 있다. 감음성 난청환자의 청각특성에 따라 보청기를 보정하기 위해서는 청력검사기를 사용하여 청각능력을 정확히 진단하고, 그 결과인 오디오그램(audiogram)을 바탕으로 손실된 각 대역의 이득을 개별적으로 산출하여 보정해 주어야 한다.^[1] 오디오그램은 개인의 청력손실역치곡선을 나타낸 것으로 각 주파수마다 인지할 수 있는 이득으로 표시된다. 여기서 이득이 20 dB 이하이면 정상적인 청각으로 판정하고, 그 이상일 경우 손실된 청각으로 간주하여 이를 보상해주게 된다.

디지털 보청기를 사용함에 있어 청력손실뿐만 아니라 잡음 및 음향케환(acoustic feedback) 신호가 보청기 사용자들에게 불편감을 주고 음성인식을 어렵게하는 요인이 되고 있다. 음향케환은 보청기 외벽과 귀 사이의 좁은 틈(vent)을 통하여 리시버 신호의 일부가 마이크로 케환되는 신호이다.^[2] 이 신호는 감쇄가 적은 공진 주파수에 해당하는 신호가 증폭기에 의해 공진함으로써 귀에 거슬리는 소리를 발생한다. 일반적으로 케환경로를 통과하면서 40~50 dB 감쇄되지만 약 7 kHz 부근의 높은 주파수 영역에서는 20 dB 정도로 감쇄가 적은 반면, 보청기에 필요한 증폭이득은 15~50 dB가 요구된다. 따라서 이 주파수 영역에서 케환되는 음향신호는 입력신호와 비슷한 크기가 되어 쉽게 공진이 발생하게 된다.^{[3], [4]}

이와 같이 보청기의 성능을 저하시키는 문제를 해결하기 위하여 음향 케환경로를 적응적으로 추정하여 케환성분을 제거하는 적응 음향 케환제거기가 사용되고 있다. 이러한 방법은 보청기 사용자에게 음향신호를 전달함과 동시에 연속적으로 적응필터 계수를 갱신하는 것으로, 잔차신호에 보청기 입력신

호가 포함되어 케환신호를 제거하는데 장애물로 작용하게 된다. 즉 적응필터는 리시버 출력신호에 따라 케환경로를 추정하여 케환신호 성분을 제거하게 되는데, 잔차신호에 입력신호가 존재하면 적응필터가 케환경로를 추정하는데 어려움이 있다.

또한 보청기의 마이크로 유입되는 신호는 주변 잡음신호가 포함되며, 증폭기에서 음성신호와 함께 증폭되어 음질을 저하시키고 케환제거기의 수렴을 방해하게 된다. 따라서 본 연구에서는 2개의 마이크 입력신호와 적응 빔형성(beamforming) 기법을 이용하여 케환 및 잡음신호를 제거하는 방법을 제안하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 잡음 및 케환제거 성능을 평가하였다. 논문의 내용은 II절에서 빔형성 기법을 이용한 기존의 케환 및 잡음제거 알고리즘을 설명하였고, III절에서는 2개의 마이크를 사용한 새로운 케환 및 잡음제거 알고리즘을 제안하였다. IV절에서는 이 알고리즘에 대한 시뮬레이션 및 그 결과에 대하여 기술하였으며, 마지막으로 V절에서 결론을 도출하였다.

II. 적응 빔형성기법을 이용한 케환 및 잡음제거 알고리즘

마이크를 통해서 유입된 음향은 음성 및 잡음뿐만 아니라 케환신호도 포함하고 있으며 ADC(Analog-to-Digital Converter)에 의해 디지털 신호로 변환된다. 리시버에서 증폭된 음성출력은 귀 내부와 외부의 공기압을 조절해주는 통풍구 또는 보청기 외벽과 귀 사이의 좁은 틈을 통하여 외부로 유출되고, 이 신호가 다시 마이크를 통하여 유입됨으로서 음향케환이 발생하게 된다. 통풍구의 주파수 특성에 있어서 감쇄가 적은 공진 주파수에 해당하는 신호가 증폭기에 의해 공진함으로써 귀에 거슬리는 소리를 낸다. 즉 케환신호의 주파수 성분이 입력 음향신호와 동위상이고 크기가 같거나 크면 공진이 발생하게 된다. 원활한 음성청취를 위해서는 입력된 디지털 신호에서 음성을 제외한 케환 및 잡음신호는 적절히 제거되어야 한다. 그리고 출력신호는 대역필터에 의해 8개 주파수 대역별로 분리되어 약 40 dB 증폭된 후, DAC (Digital-to-Analog Converter)에 의해 다시 아날로그 신호로 변환되어 리시버를 통해 출력된다. 그림 1은 일반적인 케환 및 잡음제거 시스템의 구조를 보여주고 있다.^[5]

케환제거기는 리시버에서 마이크에 이르는 음향 케환 경로를 특성화하여 리시버신호에 의한 케환신

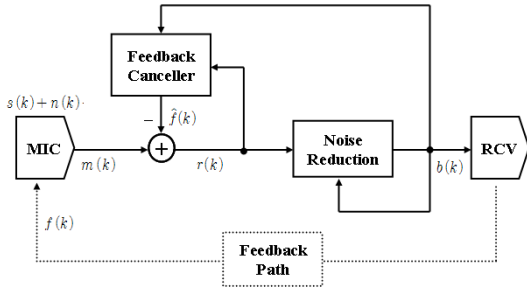


그림 1. 일반적인 케환 및 잡음제거 시스템
Fig. 1 Normal feedback and noise canceller

호의 복제를 구하고, 이를 마이크 출력신호로부터 감산함으로써 음향케환효과를 제거할 수 있다. 케환 경로의 특성은 시간 및 주위환경, 즉 귓속 내부공간의 크기나 형태, 보청기와 피부 접촉면의 상태, 리시버와 마이크의 상대적 위치, 또는 음의 크기 등에 따라 다양하게 나타나기 때문에 적응적으로 동작하는 구조를 갖게 된다. 리시버신호에 의한 케환신호의 경로는 샘플된 임펄스응답 h_n 의 선형 시스템으로 모델링되므로, 마이크로 입력되는 케환신호는 적응 FIR 필터를 사용하여 제거할 수 있다. 음성신호를 $s(k)$, 잡음을 $n(k)$, 케환신호 $f(k)$ 라 하면 마이크 입력신호는

$$m(k) = s(k) + n(k) + f(k) \quad (1)$$

리시버로 출력되는 음성신호를 $b(k)$ 라 하면 케환신호는 다음과 같이 표현된다.

$$f(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h_n b(k-n) \quad (2)$$

여기서, N 은 리시버에서 마이크에 이르는 음향 케환경로에 대한 임펄스 응답의 길이를 나타낸다. 위 식은 FIR 필터로서 케환신호의 복제를 구하여 마이크의 출력으로부터 감산하게 되는데, FIR 필터의 계수값이 음향케환경로의 임펄스 응답과 같게 되면 케환신호가 완전히 제거된다. FIR 필터의 출력은 케환복제신호로서 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{f}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n(k)b(k-n) \quad (3)$$

여기서, c_n 는 FIR 필터의 계수로서 마이크신호와 케환복제신호 간 오차인 잔차신호 $r(k)$ ($= m(k) - \hat{f}(k)$)를 이용하여 케환경로의 임펄스 응답에 적응적으로 수렴하게 되며 다음 식으로 계산된다.

$$c_n(k+1) = c_n(k) + \alpha r(k) \frac{b(k-n)}{\sigma_b^2(k) + \epsilon} \quad (4)$$

여기서, α 는 필터의 계수가 조정되는 양을 나타내는데 입력신호 전력의 평균치 $\sigma_b^2(k)$ 로 정규화시킴으로서 입력신호의 평균치가 변하더라도 조정되는 양의 평균치는 일정하게 유지되도록 한다. 또한, ϵ 는 입력신호가 매우 작을 때 조정값이 과도하게 커지는 것을 방지한다. 이 적응 알고리즘을 NLMS (Normalized Least Mean Square) 알고리즘이라 하며, 간단하고 구현이 용이하기 때문에 광범위하게 사용되고 있다.

본 논문에서 보청기 시스템은 보청기 착용자가 대담자 정면에서 음성을 청취하고 측면에서 잡음이 발생한다고 가정한다. 대담자의 방향과 수직으로 청취자의 두 귀에 마이크가 부착되므로 음성 발생지점으로부터 동일한 크기의 음성이 동시에 두 마이크에 도달하게 된다. 반면 약간 측면에서 비스듬하게 들어오는 잡음은 감쇄된 크기와 지연시간을 가지고 두 귀에 도달한다.¹⁶⁾ 좌측마이크의 입력신호를 $m_l(k)$, 우측마이크의 입력신호를 $m_r(k)$ 라 하고 이러한 동작을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$m_l(k) = s_l(k) + n_l(k) = \sum_{n=0}^{L-1} h_s(n) s_n(k) + \sum_{n=0}^{J-1} h_l(n) n_n(k) \quad (5)$$

$$m_r(k) = s_r(k) + n_r(k) = \sum_{n=0}^{L-1} h_s(n) s_n(k) + \sum_{n=0}^{J-1} h_r(n) n_n(k) \quad (6)$$

여기서 $h_s(n)$ 는 음원으로부터 마이크까지의 전달함수이고, $h_l(n)$ 와 $h_r(n)$ 는 각각 잡음원으로부터 좌측 귀 및 우측 귀까지의 전달함수이다. 따라서 좌측 마이크신호에서 우측 마이크신호를 감산하면 음성신호는 제거되고 잡음의 차만 존재한다. 즉,

$$m_l(k) - m_r(k) = \sum_{n=0}^{J-1} (h_l(n) - h_r(n)) n_n(k) \quad (7)$$

이 신호가 빔포밍(beamforming) 기법을 이용하여 잡음을 제거하기 위한 입력신호로 사용된다. 만일 잡음원이 좌측에 위치한다면 우측 잡음의 전달함수 $h_r(n)$ 는 $h_l(n)$ 의 크기가 감소되고 시간이 지연된 버전이 된다. 즉 $h_r(n) = g(n)h_l(n)$ 과 같이 좌측 잡음과 빔포밍될 수 있다. 빔포밍기법은 적응필터를 사용하여 좌측 마이크신호의 잡음이 제거되도록 그림 2와 같이 수렴해 나가는 것이다.

빔포밍 필터의 입력은

$$d(k) = r(k) - m_r(k) \quad (8)$$

빔포밍 필터의 계수를 $w_n(k)$ 라 하면 잡음추정치는

$$\hat{n}(k) = \sum_{n=0}^{P-1} w_n(k) d(k-n) \quad (9)$$

잡음제거기의 출력은 $b(k) = r(k-D) - \hat{n}(k)$ 이므로 빔포밍 필터의 계수 갱신은

$$w_p(k+1) = w_p(k) + \beta b(k) \frac{d(k-p)}{\sigma_d^2(k) + \epsilon} \quad (10)$$

여기서, α 는 계수가 갱신되는 양을 조정하는 상수이고, ϵ 는 매우 작은 상수값이다.

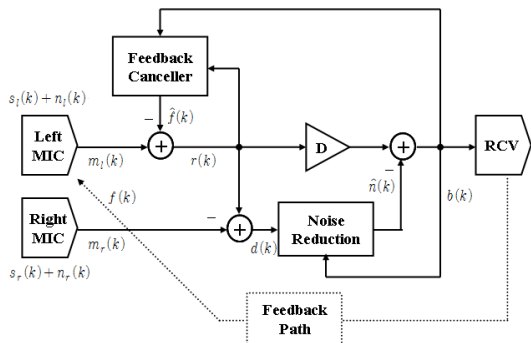


그림 2. 빔포밍 기법을 이용한 케환 및 잡음제거 시스템
Fig. 2 Feedback and noise canceller using beamforming method

III. 제안하는 케환 및 잡음제거 알고리즘

케환제거기에서 만들어진 케환복제신호는 마이크 입력신호로부터 차감되어 잔차신호가 된다. 이 잔차신호는 케환제거기의 필터 계수값을 갱신하는데 사용된다. 그러나 잔차신호는 대담자의 음성을 포함하고 있어 적응필터가 수렴하는데 장애요인으로 작용한다. 입력음성과 케환신호는 상호상관도가 높기 때문에 필터 계수의 수렴속도가 현저하게 저하된다. 따라서 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 그림 3과 같이 우측 마이크 신호를 사용하여 잔차신호로부터 음성신호를 제거한 후 계수를 갱신함으로써 안정된 수렴특성 확보와 수렴속도 증가 및 수렴성능 향상을 도모하였다.

케환제거기의 잔차신호 대신 식 (8)의 빔포밍필터 입력을 케환제거기의 기준신호로 사용하므로 케환제거기의 계수 갱신은

$$c_n(k+1) = c_n(k) + \alpha d(k) \frac{b(k-n)}{\sigma_b^2(k) + \epsilon} \quad (11)$$

케환제거기의 기준신호를 다시 표현하면

$$\begin{aligned} d(k) &= r(k) - m_r(k) \\ &= [s_l(k) + n_l(k) + f(k) - \hat{f}(k)] - [s_r(k) + n_r(k)] \\ &= n_l(k) - n_r(k) + f(k) - \hat{f}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

음성신호와 잡음이 서로 독립적이고 백색잡음이라 하면 계수 갱신을 위한 기준신호는 케환신호와만 관계되므로 케환제거기는 최적값에 수렴하게 된다.

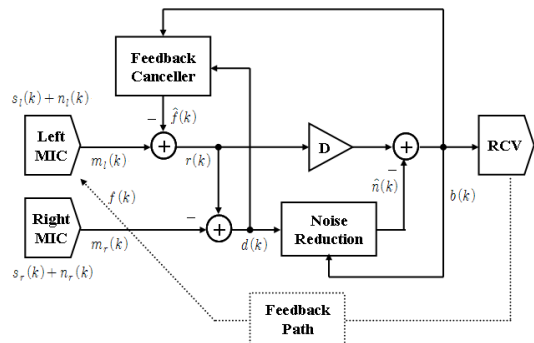


그림 3. 제안하는 케환 및 잡음제거 시스템
Fig. 3 Proposed feedback and noise canceller

$$d(k) = f(k) - \hat{f}(k) \quad (13)$$

IV. 모의실험 및 결과분석

본 논문에서 제안한 2개의 마이크를 이용한 케환 및 잡음제거 알고리즘의 성능을 상위수준에서 검증하기 위해 C 언어를 사용하여 시뮬레이션 프로그램을 작성하고, 기존의 알고리즘과 제안한 알고리즘을 적용한 경우에 대하여 수렴특성을 관찰하였다.

입력신호는 그림 4, 5와 같이 여성이 “실제 원도우즈 프로그램 내에서”라고 발음한 2.18 sec 동안의 녹음신호와 백색잡음을 사용하였다.

음향 케환경로의 임펄스 응답은 Steiglitz-McBride 모델⁷⁾을 이용하였으며, 응답의 길이는 약 8 ms로서 응답곡선을 그림 6에 도시하였다.

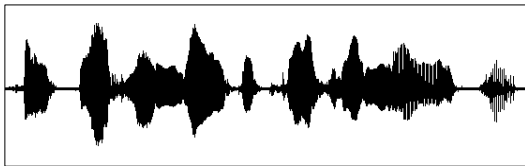


그림 4. 음성신호의 파형
Fig. 4 Wave of speech signal

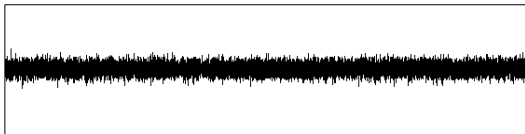


그림 5. 잡음신호의 파형
Fig. 5 Wave of noise signal

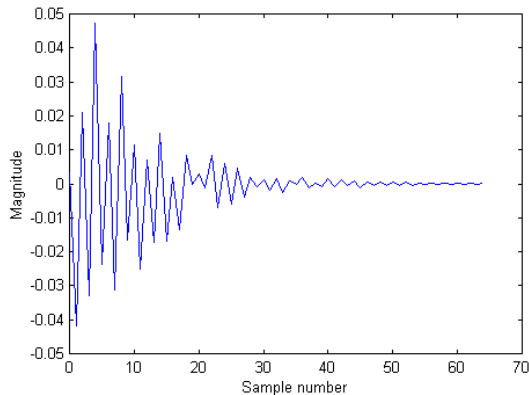


그림 6. 케환경로의 임펄스 응답
Fig. 6 Impulse response of feedback path

8 kHz의 주파수로 샘플링하였으며, 시뮬레이션에 사용된 케환제거기와 잡음제거기는 각각 64-tap, 32-tap FIR 구조이고, 성능평가지수는 각각 신호대 케환비(SFR), 신호대 잡음비(SNR)의 크기를 사용하였다.

$$SFR = 10 \log \frac{E\{s^2(k)\}}{E\{[r(k) - s(k) - n(k)]^2\}} \quad (14)$$

$$SNR = 10 \log \frac{E\{s^2(k)\}}{E\{[b(k) - s(k-D)]^2\}} \quad (15)$$

기존의 알고리즘과 제안한 알고리즘에 대한 수렴 특성을 그림 7과 8에서 비교하였다. 그림 7의 곡선은 케환제거기의 SFR을 나타내고, 그림 8의 곡선은

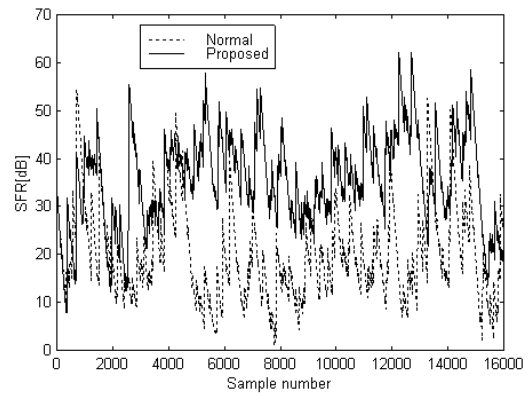


그림 7. 케환제거기의 SFR 비교
Fig. 7 SFR curves for feedback canceller

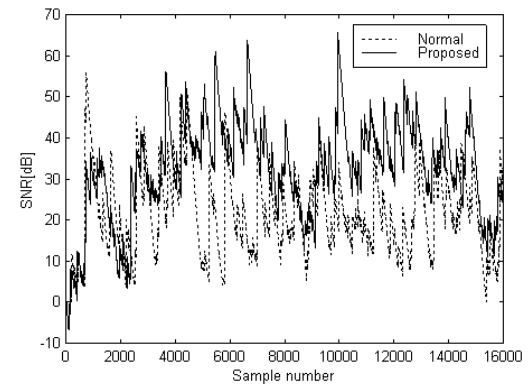


그림 8. 잡음제거기의 SNR 비교
Fig. 8 SNR curves for noise reduction

잡음제거기의 SNR을 나타낸다.

위 두 그림에서 점선(⋯)은 기존의 알고리즘을 사용한 경우이고, 실선(—)은 제안한 알고리즘을 사용한 경우이다. 그림 7의 곡선에서 보는 바와 같이 케환제거기에서 기존 알고리즘을 사용할 경우 평균 20.53 dB, 제안한 알고리즘을 사용할 경우 평균 34.96 dB의 SFR을 나타낸다. 따라서 제안한 알고리즘을 사용하면 기존의 알고리즘을 사용한 경우보다 음성구간에서 평균 14.43 dB의 신호대케환비를 개선하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 8의 곡선으로부터 전단의 케환제거기에서 기존 알고리즘을 사용할 경우 잡음제거기에서 평균 21.54 dB, 제안한 알고리즘을 사용할 경우 평균 31.73 dB의 SNR을 나타낸다. 따라서 제안한 알고리즘은 기존의 알고리즘보다 10.19 dB의 신호대잡음비를 향상시키는 것을 알 수 있다. 이는 전단에서 케환제거의 성능이 이어지는 후단의 잡음제거효과에도 그대로 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

다음 그림 9와 10은 두 알고리즘을 사용한 경우 리시버신호의 파형이다. 기존 알고리즘을 사용하면 음성신호가 약하고 잡음이 많이 포함되어 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 새로운 알고리즘을 사용한 경우 초반부를 제외하고 원래의 음성에 근접하게 복원되었고 잡음은 크게 감소하였음을 보여준다.

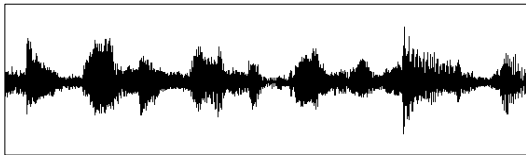


그림 9. 기존 알고리즘 사용시 리시버 신호
Fig. 9 Receiver signal for normal algorithm

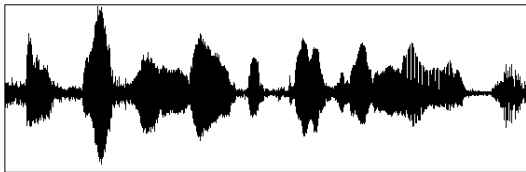


그림 10. 제안한 알고리즘 사용시 리시버 신호
Fig. 10 Receiver signal for proposed algorithm

V. 결 론

본 논문은 보청기에서 케환제거기의 수렴특성을 향상시키기 위한 새로운 적응 알고리즘을 제안하고

있다. 이 알고리즘은 2개의 마이크를 사용하여 케환 제거 후 잔차신호에 포함된 음성신호를 제거하고 이 신호를 사용하여 필터의 계수를 갱신함으로써 케환제거 필터의 수렴성을 향상시킨다.

케환제거기는 64-tap, 잡음제거기는 32-tap 적응 FIR 필터구조로서 NLMS 알고리즘을 사용하였다. 음성 및 잡음, 케환신호를 포함하는 마이크 입력신호에서 먼저 케환신호를 제거하고 그 후에 잡음을 제거한다. 여기서 잡음원은 좌측 또는 우측방향에서 발생한다고 가정하며 잡음제거기는 빔포밍 기법을 이용한다.

본 연구에서 제안한 케환 및 잡음제거기의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션 프로그램을 작성하고 모의실험을 수행하였다. 실험 결과, 제안한 알고리즘을 사용하면 기존의 알고리즘을 사용하는 경우에 비해 음성구간에서 케환제거기는 평균 14.43 dB의 SFR 개선, 그리고 잡음제거기는 평균 10.19 dB의 SNR 개선효과가 있음을 확인하였다. 이는 백색 잡음이 유입되는 경우의 결과로서 향후 백색잡음이 아닌 잡음성 음향신호 등이 유입되는 경우에 대해서도 추가 연구를 수행해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] D. K. Bustamante, T. L. Worrall, M. J. Williamson, "Measurement and adaptive suppression of acoustic feedback in hearing aids", *Proc. ICASSP-89*, pp.2017-2020, April 1989.
- [2] J. M. Kates, "Feedback cancellation in hearing aids : results from a computer simulation", *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.39, No.3, pp.553-562, March 1991.
- [3] J. A. Maxwell, P. M. Zurek, "Reducing acoustic feedback in hearing aids", *IEEE Trans., Speech Audio Processing*, Vol.3, No.4, pp.304-313, July 1995.
- [4] 김대경, 허중, 박장식, 손경식, "보청기에서의 적응케환제거의 성능 향상", *한국음향학회지*, Vol.18, No.4, pp.38-46, 1999.
- [5] W. Herbordt, S. Nakamura, W. Kellermann, "Joint optimization of LCMV beamforming and acoustic echo cancellation for automatic speech recognition", *Proc. ICASSP*, pp.III77-80, 2005.

- [6] Farassopoulos A., "Speech enhancement for hearing aids using adaptive beamformers", *Proc. ICASSP-89*, pp.1322-1325, 1989.
- [7] M. G. Siqueira, A. Alwan, "Steady-state analysis of continuous adaptation in acoustic feedback reduction system for hearing-aids", *IEEE Trans. Speech Audio Processing*, Vol.8, No.4, pp.443-453, July 2000.

이 행 우 (Haeng-Woo Lee)

정회원



1985 광주대학교 전자공학 학사
1987 서강대학교 전자공학 석사
2001 전북대학교 전자공학 박사
1987~1998 한국전자통신연구원
2001~현재 남서울대학교 교수
<관심분야> 적응 알고리즘,
VLSI 설계