

논문 2005-42SC-4-6

시간 지연과 시변 상관성 제거 필터를 이용한 디지털보청기용 궤환제거 알고리즘

(A feedback cancellation algorithm with time delay and time-varying decorrelation filter for digital hearing aid)

이상민*, 박영철**, 정세영***, 김인영****, 김선일****

(Sangmin Lee, Young Park, Se Young Jung, In Young Kim, and Sun I. Kim)

요약

디지털 보청기 시스템에서는 소형화, 고이득 증폭이 요구되는데 이로 인한 문제점 중의 하나가 하울링(howling)이라는 음향의 궤환이다. 본 논문에서는 시간지연과 시변 상관성 제거 필터를 이용하여 보청기에서 사용 가능한 음향 궤환 제거 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 적응형 필터 구조를 기본으로 음향 궤환 신호 제거 효과를 증대시키기 위해 시간 지연과 상관성 제거 필터를 삽입하였다. 상관성 제거 필터로 사용된 전대역 통과 필터는 저주파 변조기를 이용하여 시변 특성을 갖도록 구현하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 알고리즘의 궤환 제거 특성이 우수함을 확인하였다.

Abstract

In digital hearing aid system, one of the main problems is acoustic feedback which is known as howling because of miniaturization and high-gain amplification. In this paper, we proposed a feedback cancellation algorithm for hearing aid using time delay and time-varying decorrelation filter. The proposed algorithm has a kind of adaptive filter structure, which is combined with time delay and time-varying decorrelation filter to improve feedback cancellation. An all pass filter was implemented as the time-varying decorrelation filter using low frequency modulator. From the result of computer simulation, it is verified that the proposed algorithm has good ability to cancel feedback.

Keywords: feedback cancellation, time-varying decorrelation filter, digital hearing aid

I. 서 론

하울링(howling)이라 불리는 음향의 궤환(feedback)은 보청기 사용자들에게 불쾌감을 일으키며 보청기에서 사용 가능한 최대이득을 제한하여 보청기 전체 성능을 떨어뜨린다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 음향 궤환 경로를 추정하여 궤환 신호 성분을 제거하는 적응 궤환 제거(adaptive feedback cancellation) 알고리즘이 개

발되어 왔다^[1-4]. 음향 궤환 제거 방법에는 적응 필터의 적응 방식에 따라 불연속 필터 계수 갱신 방법^[1,2]과 연속 필터 계수 갱신 방법^[2,3]으로 나눌 수 있다. 불연속 필터 계수 갱신 방법은 백색 잡음과 같은 잡음 신호를 주기적으로 인가하면서 적응 필터 계수를 갱신하는 방법이다. 그러나 이 방법은 인가한 잡음 신호로 인해 신호 대 잡음비가 낮아지는 단점이 있다^[4]. Kates^[1]는 불연속 필터 계수 갱신 방법을 음향 궤환이 발생하는 순간에만 적용하고, Maxwell 과 Zurek^[2]은 입력 신호의 레벨이 낮은 경우에 불연속 필터 계수 갱신 방법을 적용하는 것을 제안 하였지만. 제안한 불연속 필터 계수 갱신 방법들은 극히 조용한 환경과 하울링이 발생하는 순간에만 적용되는 단점이 있다.

이에 반해 연속 적응 필터 계수 갱신 방법은 난청인에게 음향 신호를 전달함과 동시에 연속적으로 적응 필터 계수를 갱신하는 방법으로써 잡음을 인가하지 않고도 음향 궤환 제거가 가능하며, 입력 신호의 레벨이 낮거나 하울링이 검출되는 경우에 대해서만 필터 계수의 갱신을 제한하지 않고 입력 신호에 따라서 적응 필터

* 정회원, 전북대학교 생체정보공학부
(Division of Bionics and Bioinformatics, Chonbuk National University)

** 정회원, 연세대학교 컴퓨터 · 정보통신공학부
(Computer · Telecommunicatin Engineering Division)

*** 학생회원, **** 정회원 한양대학교 의공학교실
(Dept. of Biomedical Engineering, Hanyang University)

※ 본 연구는 보건복지부 보건의료기술개발사업 지원
에 의하여 이루어졌다.

(고유번호 :02-PJ3-PG6-EV10-0001)

접수일자: 2005년1월17일, 수정완료일: 2005년6월29일

계수를 연속적으로 생성한다. 그러나 이 방법 또한 디지털 보청기의 입력 신호와 출력 신호의 상관성 (correlation)을 완벽하게 제거하지 못하는 단점이 있다. 적응 케환 제거 필터는 보청기 입력 신호에 따라서 케환 경로를 추정함으로써 케환 신호 성분을 제거하게 되는데, 입력 신호와 출력 신호가 상관성이 있으면 적응 케환 제거 필터가 케환 경로를 정확하게 추정하지 못하게 된다^[4].

따라서 본 연구에서는 입력 신호와 케환 신호의 상관성을 제거하기 위해 순방향 경로 상에 시간 지연과 시변 상관성 제거 필터를 이용한 음향 케환 제거 알고리즘을 제안하였다. 시변 상관성 제거 필터는 저주파 변조기를 사용한 시변 전대역 통과 필터로 구현하였다. 제안한 알고리즘은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 알고리즘의 효율성을 검증하였다.

II. 본 론

1. 시간 지연을 이용한 케환 제거 알고리즘

시간 지연을 이용한 케환 제거 알고리즘은 그림 1과 같으며, 그림 1에서 보는 바와 같이 적응 필터는 입력 신호를 이용하여 연속적으로 적응 필터의 계수를 생성한다.

적응 필터는 입력 신호 $s(n)$ 과 케환 신호 $u(n)$ 으로 합으로 이루어진 신호 $d(n)$ 과 보청기 출력 신호 $x(n)$ 을 이용하여 케환 경로를 추정한다. 그러나 연속 적응 케환 제거 알고리즘의 $F(z)$ 문제점은 입력 신호 $s(n)$ 과 케환 신호 $u(n)$ 의 상관성이 높을 때는 정확한 케환 경로 추정이 어렵다는 것이다.

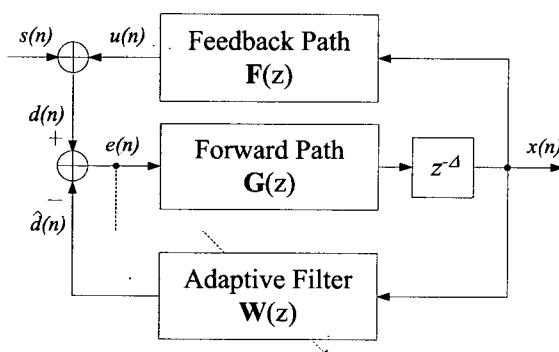


그림 1. 순방향 경로에 시간 지연을 이용한 적응 케환 제거 알고리즘의 블록도

Fig. 1. A block diagram of the adaptive feedback cancellation algorithm with a delay in the forward path.

이런 문제점을 보완하기 위해 $G(z)$ 경로 또는 $W(z)$ 경로에 시간 지연을 주게 되는데 $G(z)$ 경로에 시간 지연을 주는 것이 $W(z)$ 경로보다 상관성 제거에 더 효과적이다^[4]. 따라서 본 논문에서의 케환 제거는 그림 1에서 와 같이 순방향 경로 $G(z)$ 에 시간 지연을 주었다.

그림 1에서 입력 신호 $d(n)$ 은 아래의 식과 같다.

$$d(n) = s(n) + u(n) \quad (1)$$

$$u(n) = f^T x(n) \quad (2)$$

여기서 $f^T = [f_0 f_1 \dots f_{L-1}]$ 는 케환 경로를 디지털적으로 모델링한 L 차수의 필터 계수 벡터이다. $G(z)$ 는 G_0 의 상수 값을 갖는 보청기 이득을 모델링한 것이며, N-tap 적응 필터의 입력 신호는 아래 식(3)과 같다.

$$x(n) = G_0 e(n - \Delta) \quad (3)$$

여기서

$e^T(n - \Delta) = [e(n - \Delta), e(n - \Delta - 1), \dots, e(n - \Delta - N + 1)]$ 이고 적응 필터 계수의 최적화 벡터 식은 식(4)와 같다.

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1} P_{xd} = \frac{1}{G_0} R_{ee}^{\Delta^{-1}} P_{de}^{\Delta} \quad (4)$$

여기서 R 과 P 는 각각 식(5)와 (6)에서 정의된 R_{ee}^{Δ} 와 P_{de}^{Δ} 대응되는 N-차수의 autocorrelation 행렬과 cross-correlation 벡터이다.

$$R_{ee}^{\Delta} = E\{e(n - \Delta) e^T(n - \Delta)\} \quad (5)$$

$$P_{de}^{\Delta} = E\{(s(n) + u(n)) e(n - \Delta)\} = r_{se}^{\Delta} + r_{ue}^{\Delta} \quad (6)$$

여기서 $r_{se}^{\Delta} = E\{s(n) e(n - \Delta)\}$ 는 적응 필터 차수가 케환 경로의 임펄스 응답의 차수와 정확히 일치한다는 가정 하에서 Δ 만큼 시간 지연된 $s(n)$ 의 cross-correlation 벡터를 나타내며, r_{ue}^{Δ} 는 $e(n)$ 의 cross-correlation 벡터를 나타낸다. 또한 식 (2)와 (3)을 이용하여 r_{ue}^{Δ} 는 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} r_{ue}^{\Delta} &= E\{u(n - 1) e(n - \Delta)\} \\ &= G_0 E\{e(n - \Delta) e^T(n - \Delta)\} f \\ &= G_0 R_{ee}^{\Delta} f \end{aligned} \quad (7)$$

식 (8)은 최적화된 적응 필터의 가중치 벡터를 나타

낸다.

$$w_{opt} = f + \frac{1}{G_0} R_{ee}^{\Delta^{-1}} r_{se}^{\Delta} \quad (8)$$

식 (8)의 $\frac{1}{G_0} R_{ee}^{\Delta^{-1}} r_{se}^{\Delta}$ 은 입력 신호와 출력 신호의 상관성으로 인한 바이어스를 나타내며, 궤환 경로의 계수 벡터와 적응 필터의 계수 벡터의 차이를 나타내는 misalignment는 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$\epsilon_0 = \frac{\|f - w_{opt}\|}{\|f\|} = \frac{1}{G_0} \frac{\|R_{ee}^{\Delta^{-1}} r_{se}^{\Delta}\|}{\|f\|} \quad (9)$$

여기서 $\|\cdot\|$ 는 벡터의 norm을 나타낸다. 식 (9)를 통하여 가중치 벡터의 misalignment 값이 Δ 만큼 시간 지연된 $e(n)$ 과 $s(n)$ 의 cross-correlation 값에 비례한다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 순방향 경로에 시간 지연이 늘어남에 따라 입력 신호와 궤환 신호의 상관성은 더욱 줄어든다.

그림 2는 16 KHz로 샘플링한 20초 길이의 음성 data에 대한 시간 지연에 따른 autocorrelation을 나타낸다. 음성 data는 남성 1명과 여성 1명의 음성을 녹음하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 autocorrelation 값이 초기에는 빠르게 감소하다가 5msec 이상에서는 천천히 감소하게 되는데 이 결과를 통해 misalignment 값이 가장 낮은 수치를 얻기 위해서는 시간 지연이 5msec 이상이 되어야 함을 알 수 있다. 그러나 시간 지연이 증가함에 따라 적응 필터의 수렴 속도는 느려지게 되고^[5], 시스템으로 구현하기 위해서는 더 많은 메모리와 이에 따른 하드웨어가 필요하게 된다. 더욱이 보청기를 착용한 귀와 착용하지 않은 귀로부터 들여오는 소리의 지연은 짧

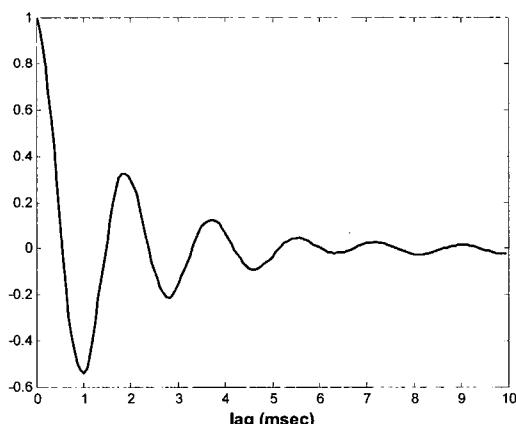


그림 2. 20초 음성 data의 정규화 된 autocorrelation
Fig. 2. Normalized autocorrelation measured from 20 seconds speech.

을수록 좋기 때문에 보청기 시스템에서 상관성 제거를 빠른 시간 내에 할 수 있는 효율적인 방법이 필요하다.

2. 새로운 음향 궤환 제거 알고리즘

본 논문에서 시간 지연과 상관성 제거 필터를 이용한 적응 궤환 제거 알고리즘을 제안하였다. 그럼 3은 제안한 알고리즘의 블록도를 나타낸다. 보청기 입력 신호는 시간 지연과 상관성 제거 필터를 통하여 시간 지연이 이루어진 후 적응 필터에 입력되어 적응 필터의 계수들이 연속적으로 갱신된다.

시변 상관성 제거 필터의 구현은 1차 및 2차 전대역 통과 필터를 이용해 구현 하였다^[7,8]. 아래 식 (10)은 1차 전대역 통과 필터의 전달 함수를 나타낸다.

$$A_1(z, n) = \frac{z^{-1} + c(n)}{1 + c(n)z^{-1}} \quad (10)$$

$$c(n) = \frac{\tan[\pi f_a(n)] - 1}{\tan[\pi f_a(n)] + 1}$$

여기서 $c(n)$ 은 n 시간대의 위상 응답을 조절하는 시변 변수이며, $f_a(n)$ 은 위상 응답에서 통과 영역의 중심 주파수이다.

주파수 $f_a(n)$ 에서 위상 응답은 항상 $\frac{\pi}{2}$ 값을 가지므로

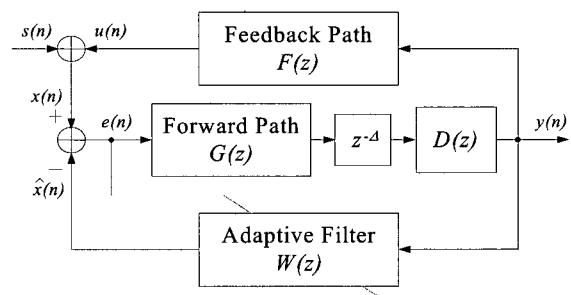


그림 3. 순방향 경로상에 시간 지연과 상관성 제거 필터를 배치한 적응 궤환 제거 알고리즘

Fig. 3. Adaptive feedback cancellation algorithm with time delay and decorrelation filter in the forward path.

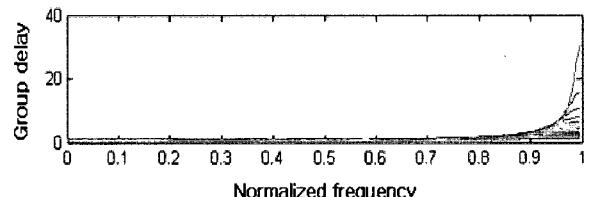


그림 4. 1차 전대역 통과 필터의 주파수 대역 범위 지연

Fig. 4. The group delay of the 1st-order all pass filter.

시변성은 $f_a(n)$ 을 생신함으로써 쉽게 구현 할 수 있다. 그러나 1차 전대역 통과 필터를 이용하는 것은 고주파 또는 저주파 대역의 위상 응답만을 조절하는 파라미터 $f_a(n)$ 에 의해서만 이루어지므로 신호의 상관성의 제거는 저주파 또는 고주파 대역에서만 제한된다. 아래 그림 4는 1차 전대역 통과 필터를 이용했을 때 주파수 대역별 그룹 지연(group delay)을 나타낸다. 그림 4에서 보는 바와 같이 $f_a(n)$ 이 0에서 1까지 변할 때 그룹 지연은 고주파 대역에서만 발생됨을 알 수 있다. 반면에 2차 전대역 통과 필터는 1차 전대역 통과 필터와는 달리 주파수 대역별로 고르게 그룹 지연이 생기게 되는데 아래 식(11)은 2차 전대역 통과 필터의 전달 함수를 나타낸다.

$$A_2(z, n) = \frac{-\beta + d(n)(1-\beta)z^{-1} + z^{-2}}{1 + d(n)(1-\beta)z^{-1} - \beta z^{-2}}$$

$$\beta = \frac{\tan[\pi f_a] - 1}{\tan[\pi f_a] + 1}$$

$$d(n) = -\cos[2\pi f_a(n)]$$
(11)

여기서 $-f_a(n)$ 은 위상의 변화가 제일 클 때 주파수이며, f_b 는 위상 응답의 통과영역 대역폭을 조절하는 변수이다. 결과적으로 $f_a(n)$ 과 f_b 를 조절함으로써 주파수별로 그룹 지연을 조절 할 수 있게 된다. 아래 그림 5는 f_b 는 0.15로 고정 시키고 $f_a(n)$ 은 0.25에서 1까지 변화시키며 주파수 대역별 그룹 지연을 나타낸다.

1차, 2차 전대역 통과 필터의 시변성은 아래 식 (12)와 같은 저주파 변조식을 이용하여 $f_a(n)$ 을 생신함으로써 구현 하였다.

$$f_a(n) = A \cos(2\pi n \phi) + B$$
(12)

여기서 A 와 B 는 $f_a(n)$ 의 폭을 결정하는 상수이고, ϕ 는 변조 주파수인데, 위와 같은 파라미터들의 값은 음향의 왜곡이 발생하지 않도록 선택되어져야 한다. 청력 실험을 통하여 변조 주파수는 음향의 왜곡이 발생하지 않도록 $0.0002 f_s$ (sampling frequency) 보다 낮아야 한다는 것을 확인 하였다. 또한 $f_a(n)$ 의 값이 주어졌을 때, 2차 전대역 필터의 f_s 값은 실험적인 방법을 통하여 가장 낮은 상관성 값을 갖도록 선택한다. 그림 6은 입력 신호가 백색 가우시안 잡음 일때 입력 신호와 2차 전대역 통과 필터의 출력 신호의 주파수 분석 시 일치성(coherence)을 나타낸다. 본 논문에서는 실험시

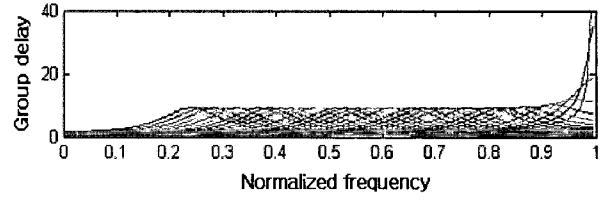


그림 5. 2차 전대역 통과 필터의 주파수 대역별 그룹 지연

Fig. 5. The group delay of the 2nd-order all pass filter.

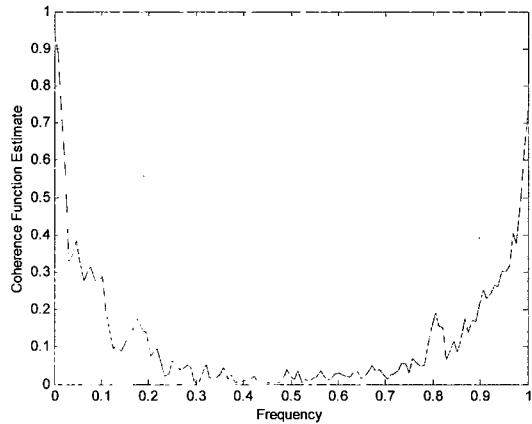


그림 6. 입력 신호와 2차 전대역 통과 필터의 출력 신호의 coherence spectrum

Fig. 6. Coherence spectrum of the input and output signal of the time-varying the second order all pass filter.

$\phi = 0.0001 \times f_s$, $A = 0.48$, $B = 0.52$, $f_b = 0.3$ 의 변수 값을 사용 하였다. 이와 같이 입력 신호와 출력 신호의 일치성을 보는 것은 적응 필터 계수와 케환 경로 계수의 기중치 벡터들의 차이를 나타내는 misalignment 값을 결정하므로 중요하다. 왜냐하면 전대역 주파수대에서 두 신호의 일치성이 낮은 것이 misalignment 값을 최소화하기 때문이다. 그림 6의 결과를 토대로 전대역 통과 필터를 이용하는 것은 입력 신호와 케환 신호의 일치성을 상당 부분 낮춰 주며, 또한 적응 필터 계수와 케환 경로 계수의 misalignment 값을 감소시킬 수 있다.

III. 실 험

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능 평가를 위해 입력 신호는 백색 가우시안 잡음을 16차 AR 모델을 통과시켜 만들었으며, 전달 함수는 그림 7에서 보는 바와 같이 음성 신호와 스펙트럼이 비슷하다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 케환 경로의 임펄스 응답을 추정하는 N-LMS(normalized least mean square) 알고리즘의 성

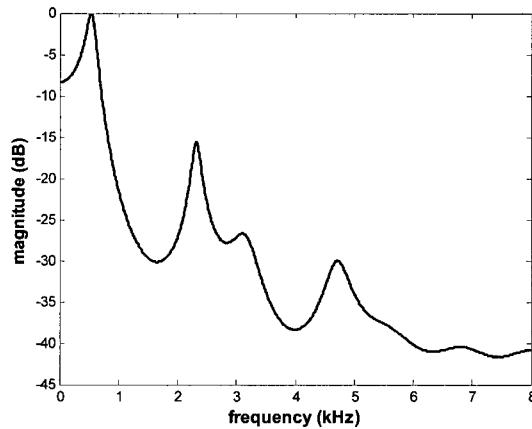


그림 7. 16차 AR 필터의 전달 함수
Fig. 7. Transfer function of the 16th-order AR filter.

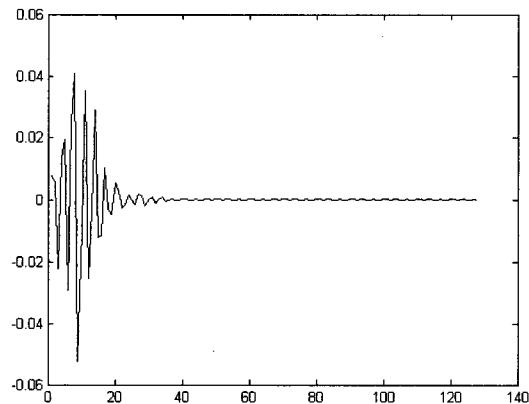


그림 8. 궤환 경로의 임펄스 응답
Fig. 8. Impulse response of the feedback path.

능을 평가 하였으며 시뮬레이션에는 궤환 경로 계수가 그림 8과 같은 128탭의 FIR필터를 사용하였으며, 샘플링 주파수는 16KHz로 하였다. 그리고 N-LMS 알고리즘을 이용한 64탭의 적응 필터 계수 벡터들은 아래 식 (13)과 같이 개신된다.

$$w(n+1) = w_n(n) + \frac{\mu}{G_0 \| e(n-\Delta) \|^2} \epsilon(n) e(n-\Delta) \quad (13)$$

여기서 μ 는 적응 필터의 수렴 변수이고, δ 는 식 (13)이 불안정하게 되는 것을 막기 위해 아주 작은 양수 값으로 고정한다. $e(n-\Delta)$ 는 기준 입력 신호 벡터이고, $\epsilon(n)$ 은 궤환 경로의 출력 벡터와 적응 필터의 출력 벡터와의 차이를 나타낸다. 이러한 적응필터의 성능을 평가하는 방법 중 하나가 misalignment를 구하는 것이다. misalignment라는 것은 궤환 경로의 특성에 적응 필터의 특성이 얼마나 일치하는지를 나타내는 지표이다. 필터 계수들의 misalignment계산은 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

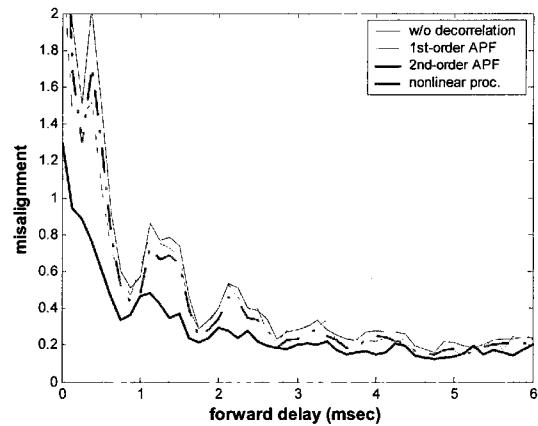


그림 9. 시간 지연에 따른 상관성 제거 필터 이용 유무에 따른 misalignment
Fig. 9. Steady-state misalignment with and without decorrelation filter when different time delay are used in the forward path.

$$\epsilon_{\Delta} = \frac{\| f - w_{\Delta}(n) \|}{\| f \|} \quad (14)$$

컴퓨터 시뮬레이션은 순방향 경로에 시간 지연을 0부터 6msec 까지 달리 하면서 이루어 졌고 수렴 속도 μ 와 보청기 이득 G_0 은 각각 0.03과 20dB로 정하여 실험 하였다. 그림 9에서 보는 바와 같이 상관성 제거 필터 없이 시간 지연만을 이용했을 때는 misalignment 값이 수렴과 발산을 반복하다 약 0.3에 수렴하였으나 2차 전대역 통과 필터를 이용한 경우에는 misalignment 값이 일정하게 줄어들면서 0.2에 수렴하였다. 하지만 1차 전대역 필터를 이용하여 상관성을 제거한 경우와 비선형 연산을 이용해 상관성을 제거한 경우는 시간 지연만을 이용해 상관성을 제거한 경우와 비교 했을 때 결과 값에 별반 차이가 없었다.

IV. 결 론

보청기에서 음향 궤환 제거는 갖추어야 할 매우 중요한 성능이지만 이 제거 기능을 위해 소리전달의 과도한 지연이 생기면 방향성 정보의 혼란, 음질의 저하 등을 일으킬 수 있다. 본 논문에서는 순방향 경로에 시간 지연과 상관성 제거 필터를 이용한 효과적인 음향 궤환 제거 알고리즘을 제안 하였다. 입력 신호와 궤환 신호의 상관성을 제거하기 위해 시변 주파수 매개 변수를 이용한 전대역 통과 필터를 이용하였으며 전대역 통과 필터의 시변 특성의 구현은 저주파 변조기를 이용하였다. 실험 결과를 통하여 2차 전대역 통과 필터를 이용

하여 상관성을 제거한 것이 짧은 시간 지연으로 misalignment의 수렴 값과 수렴 속도 모두 향상됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Kates, "Feedback cancellation in hearing aids: Results from a computer simulation," IEEE Trans. Signal Process, vol.39, no. 9, pp. 553-562, March 1991.
- [2] J. A. Maxwell and P. M. Zurek, "Reducing acoustic feedback in hearing aids," IEEE Trans. Speech Audio Processing, vol. 3, no. 4, pp. 304-313, July 1995.
- [3] D. K. Bustamante, T. L. Worrall, and M. J. Williamson, "Measurement and adaptive suppression of acoustic feedback in hearing aids," pros. ICASSP-89, pp. 2017-2020, April 1989.
- [4] M. G. Siqueira, and 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.
- [5] G. Long, F. Ling, and J. G. Proakis, "The LMS algorithm with delayed coefficient adaptation," IEEE Trans. Acoust., Speech Signal Processing , vol. 37, pp. 1397-1405, Sept. 1985.
- [6] G. S. Kendall, "The decorrelation of audio signals and its impact on spatial imagery," Computer Music Journal, vol. 19, no. 4, pp. 72-87, Winter 1995.
- [7] M. Ali, "Stereophonic acoustic echo cancellation system using time-varying allpassfiltering for signal decorrelation," in proc. ICASSP-98, pp. 3689-3692, April 1998.
- [8] U. Zolzer, DAFX: Digital Audio Effects, John Wiley & Sons, Ltd, New York, 2002.

저 자 소 개



이상민(정회원)
 1987년 인하대학교 전자공학과
 공학사
 1989년 인하대학교 전자공학과
 공학석사
 2000년 인하대학교 전자공학과
 공학박사

1989년 ~ 1994년 LG이노텍 중앙연구소
 선임연구원

1995년 ~ 2002년 삼성전자 종합기술원 책임연구원
 2002년 ~ 2004년 한양대학교 의공학교실 연구교수
 2005년 ~ 현재 전북대학교 생체정보공학부 조교수
 <주관심분야: 생체신호처리, 청각 및 보청기>



정세영(학생회원)
 2004년 홍익대학교
 전기전자공학부 공학사
 2005년 한양대학교
 의공학교실 석사과정
 <주관심분야: 보청기, 생체신호처리>



김인영(정회원)
 1989년 서울대학교 의과대학 졸업
 1991년 서울대학교 의공학교실
 석사 졸업
 1994년 서울대학교 의공학교실
 박사 졸업
 1995년 ~ 2000년 삼성종합기술원
 책임연구원

2000년 ~ 한양대학교 의공학교실 부교수
 <주관심분야: 생체신호처리, 무구속계측>



박영철(정회원)
 1986년 연세대학교 전자공학과
 공학사
 1988년 연세대학교 전자공학과
 공학석사
 1993년 연세대학교 전자공학과
 공학박사

2002년 ~ 연세대학교 컴퓨터 · 정보통신공학부
 교수

<주관심분야: 디지털오디오, 음성처리, 적응필터>



김선일(정회원)
 1976년 서울대학교 전기공학과
 공학사
 1978년 서울대학교 전기공학과
 공학석사
 1987년 DREXEL 대학교 의공학
 과 공학박사

1988년 ~ 한양대학교 의공학교실 교수
 <주관심분야: 생체신호처리, 가상현실, 의료영
 상>