

Howling을 억제하기 위한 준직선 위상 적응 Notch 필터

최 태 호*, 박 병 옥*, 김 학 윤*

*청주대학교 전자공학과

Quasi-linear phase adaptive notch filter for Howling suppression

Choi Tae-Ho*, Park Byoung-Uk*, Kim Hack-Yoon*

*Dept, Electronic Eng, Chongju Univ

mario@chongju.ac.kr, afatpup@orgio.net, hykim@chongju.ac.kr

"본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것입니다."

요 약

Howling을 억제하기 위하여 Howling의 원인인 피드백 신호를 적응 필터로 소거하는 방법이 연구되어왔다. 이 방법은 적응 필터로 피드백 경로의 전달함수를 추정하고, 입력 신호에서 피드백 신호를 소거하는 것이다. 그러나, Open-loop 이득이 평탄하고 시스템의 Group-delay가 짧은 Howling의 경우에는, 현재 다른 분야에서 사용되고 있는 Howling 억제 기법을 이용하는 것은 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 적응 Notch 필터를 이용하여 Howling을 억제하는 방법을 제안, 평가하고, 또한, 이득 여유를 증가시키기 위한, Notch 필터의 설계 방법에 관해서 검토한 후, 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 입증하고자 한다.

1. 서 론

보청기에 있어서 Howling은 사용상 큰 문제점 중의 하나이다. 그러나 보청기 시스템은 Open-loop 이득이 평탄하고, 시스템의 Group-delay가 짧기 때문에, 다른 분야에서 사용되고 있는 Howling 억압 기법을 사용하는 것은 어렵다. 이와 같은 Howling을 억압하기 위해서 Howling의 원인이 되는 피드백 신호를 적응필터로 소거하는 방법에 관한 연구가 행하여 왔다[1-4].

이론적으로 피드백 신호를 소거하면, 무한대의 이득여유가 얻어지지만, 여러 가지 물리적인 제한 때문에, 이득 여유의 증가량에는 한계가 있음이 밝혀졌다[1].

따라서, 더욱 이득 여유를 증가시키기 위해서는 상기의 방법에 Notch 필터링을 병행하는 것을 생각할 수

있다. 이 방법은, 적응 피드백 캔슬러를 학습시켜, 시스템의 Open-loop 전달함수를 어느 정도 낮추어, 발진 주파수의 수를 적게 하여, Howling을 방지한 후, 적응 Notch 필터를 가해, 적응 피드백 캔슬러가 제어할 수 없었던 발진 주파수에 Notch를 형성하여, 이 주파수에서의 이득을 낮춘다. Notch에 의해, 그 부분의 정보는 왜곡되지만, 청감상 영향은 적은 것으로 생각된다.

그러므로, 본 연구에서는, Howling 억압수법으로서, 적응 Notch 필터링을 하기 위한 Notch 필터의 설계 방법에 관해서 검토하고, 이를 입증하고자 한다.

2. 적응 Notch 필터를 사용한 Howling 억제 기법

보청기의 Howling 억제에 적응 Notch 필터링을 이용하는 방법으로서, 그림 1과 같은 시스템을 고려한다. 그림 2에 제시한, howl detector-identifier는, 보청기 처리의 블록에 들어오는 신호를 관측하여, Howling이 발생하고 있는 것을 판단하는 것이다. Howling이 발생하였다고 판단되면, 적응 Notch 필터의 계수에서 발진 주파수의 정보를 산출하여, 이 정보를 다중 Notch 블록에 보내고, 거기서 발진 주파수에 대한 고정 Notch 필터를 하나씩 형성하여 Howling을 억제한다.

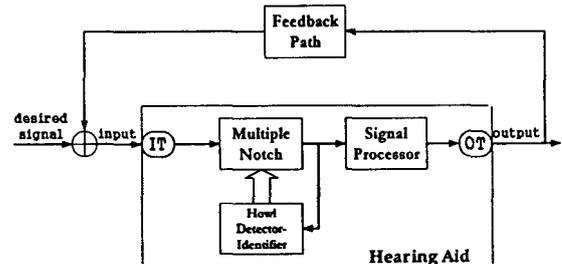


Fig. 1 Howling suppression by adaptive notch filter

본 연구에서, 사용하고 있는 Howl Detector-Identifier는 그림 2에 제시한 것과 같이 적응 Notch 필터를 사용하고, 입력 신호의 제일 큰 성분의 주파수를 추적한다. 이 성분의 파워를 적응 Notch 필터의 입출력의 파워에서 추정하여, 어느 레벨 값을 넘게 되면 Howling이 발생한 것으로 판단한다.

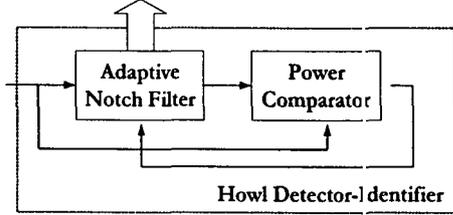


Fig. 2 Howl Detector - Identifier block diagram

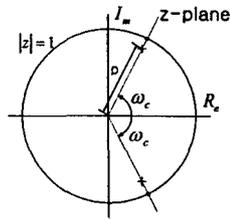


Fig. 3 Pole-zero location of notch filter model

3. 적응 Notch 필터

3.1 Notch 필터 모델

적응 Notch 필터에 이용되는 Notch 필터에 관하여는 여러 가지 모델이 제안되어 있다[2, 3, 4]. 본 연구에서는 모델이 제일 단순하고 폭이 좁고 깊은 Notch를 갖는 2극 2영점의 모델[4]를 이용하였다. 이 Notch 필터의 극점과 영점을 z 평면상의 배치도를 그림 3에 나타내었다. 이 모델은 발진 주파수 ω_c 에서 이득이 "0"이 되도록 z 평면상에서 전달함수의 영점을 위상이 $e^{\pm j\omega_c}$ 가 되도록 단위원상에 배치한다. 인과성을 갖기 위해서는 적어도 영점과 같은 수의 극이 필요하고, 발진 주파수에서 Notch의 특성을 대칭으로 하기 위하여 극과 영점을 연결하는 선상의, 영점보다 약간 원점에 가까운 $\rho e^{\pm j\omega_c}$ ($0 < \rho < 1$)에 놓는다. 그러면, 극이 항상 단위원 내에 있게되고, 시스템이 안정하게 된다. 이때의 Notch 필터의 전달함수는 다음 식과 같이 표현된다.

$$h(z) = \frac{(z - e^{j\omega_c})(z - e^{-j\omega_c})}{(z - \rho e^{j\omega_c})(z - \rho e^{-j\omega_c})} \quad (1)$$

$$= \frac{A(z^{-1})}{A(\rho z^{-1})} \quad (2)$$

여기서, $A(z) = 1 + az + z^2$. 파라미터 ρ 는 Notch 필터의 폭을 결정하는 정수이다. 위 식에서 Notch 필터의 계수가 한 개인 것을 알 수 있다. 그 계수 a 와 Notch 필터의 중심 주파수와의 관계는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\omega_c = \cos^{-1}(-a/2) \quad (3)$$

이와 같이 중심 주파수를 필터 계수 a 에서 쉽게 계산되기 때문에 2극 2영점 Notch 필터의 모델은, Howl Detector-Identifier에 적합하다고 할 수 있다.

3.2 적응 알고리즘

적응 Notch 필터의 알고리즘으로는 Nehorai가 제안한 것[4]을 이용하였다. 여기서, 이 알고리즘을 간단히 논한다.

오차 신호 $e(t)$ 로 Notch 필터의 출력 신호를 이용할 경우, 오차 신호는 다음 식과 같이 차분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$e(t) = \frac{A(q^{-1})}{A(\rho q^{-1})} x(t) \quad (4)$$

$$= x(t) + x(t-2) - a\rho e(t-2) - a\rho x(t) \quad (5)$$

$$\phi(t) = -x(t-1) + \rho a e(t-1) \quad (6)$$

여기서, q^{-1} 은 시간 영역의 단위 지연 소자이고, $\phi(t)$ 는 지연 입력력 신호이다. 적응 알고리즘은, 필터 계수 a 를 조정하여, 코스트 함수 V_N 을 최소로 한다. 이때의 코스트 함수는 다음 식과 같이 정의한다

$$V_N = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N e^2(t) \quad (7)$$

적응 알고리즘은 이 코스트 함수가 최소로 되도록 필터 계수를 조정하기 위하여, 또한 필터가 Notch 필터이기 때문에 입력 신호의 제일 큰 주파수 성분이 제거되도록 동작한다.

Gradient $\phi(t)$ 는 다음 식과 같이 정의하고, 식 (4)에서 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi(t) = -\frac{d}{da} e(t) \quad (8)$$

$$= \frac{\phi(t)}{A(\rho q^{-1})} \quad (9)$$

적응 알고리즘으로는 RML (Recursive Maximum Likelihood)을 이용하여 필터 계수 a 의 갱신은 다음 식과 같이 행한다.

$$a(t) = a(t-1) + P(t)\phi(t)e(t) \quad (10)$$

여기서, $P(t)$ 는 $[V^n(t)]^{-1}$ 의 추정 값으로 다음 식으로 갱신한다.

$$P(t) = \frac{1}{\lambda} \left[P(t-1) - \frac{P(t-1) \phi^T(t) P(t-1)}{\lambda + \phi^T(t) P(t-1) \phi(t)} \right] \quad (11)$$

λ 는 $P(t)$ 의 갱신에 이용하는 계수이다. 여기서 비정상적인 시스템을 모의하는 경우는 필터의 과도 응답을 개선하기 위해 λ 를 다음 식으로 갱신한다.

$$\lambda_{t+1} = \lambda_0 \lambda_t + (1 - \lambda_0) \lambda_\infty \quad (12)$$

이에 의해, λ 는 지수 함수적으로 최종값 λ_∞ (보통 1.0)에 접근한다. 정상 상태인 경우는 λ 를 1.0에 가까운 일정한 값으로 한다($\lambda_0 = 1$).

처음부터 좁은 Notch를 이용하면, 정현파의 존재를 무시할 경우가 있다. Notch의 폭은 ρ 에 의해 결정되기 때문에 이 문제를 방지하기 위해서는 ρ 을 λ 와 같이 시변으로 하는 것이 요망된다.

$$\rho_{t+1} = \rho_0 \rho_t + (1 - \rho_0) \rho_\infty \quad (13)$$

또한, 수렴을 개선하기 위해, $P(t)$ 을 계산한 후, 오차 신호 $e(t)$ 을 다시 계산한다. 이 사후 예측 오차를 다음 반복의 ϕ 와 ψ 와의 계산에 이용한다.

4. Howling 억제에 이용할 Notch 필터의 설계

보청기의 Howling 억제에 사용하는 Notch 필터의 설계에 관해서는, 다음의 조건이 필요하다. 먼저, 정보 손실을 적게 하기 위해, Notch의 폭을 좁게 할 필요가 있다. 또, 그 Notch의 깊이가 그 주파수에서의 이득 여유의 증가량이 되기 위해서, Notch를 깊게 할 필요도 있다. 본 연구에서는, 2극 2영점, 준직선 위상의 두 종류의 Notch 필터에 관하여 검토한다.

4.1 2극 2영점 Notch 필터

먼저, howl detector-identifier에서 사용하고 있는 2극 2영점 Notch 필터를 다중 Notch에 사용하는 것에 관하여 검토한다. 이 Notch 필터는, 주파수 특성을 좁고 깊게 하며, 또한 Notch 필터의 중심 주파수를 정확하게 설정할 수 있다는 장점이 있다. 더욱이, howl detector-identifier의 적응 Notch 필터의 계수를 그대로 사용할 수 있으므로, 쉽게 Howling을 억제하기 위한 Notch 필터를 형성할 수 있다.

그러나, 2극 2영점 Notch 필터의 위상 특성은 완전한 직선이 아니기 때문에, 한번의 Notch를 가하면, Open-loop 전달특성이 변화한, 새로운 발진 주파수가 생겨 버린다. 이와 같은 현상을 그림 4에 제시하였다. 이것은 한번의 Notch를 가한 경우의 Open-loop 전달특

성의 변화를 나타내고 있다. 이 그림으로부터, Notch 필터의 위상 특성에 따라서 새로운 위상 "0"의 주파수가 생기는 것이 알게 된다. 이들의 주파수에서의 이득이 0dB 이상으로 되면, Howling이 다시 발생해 버린다.

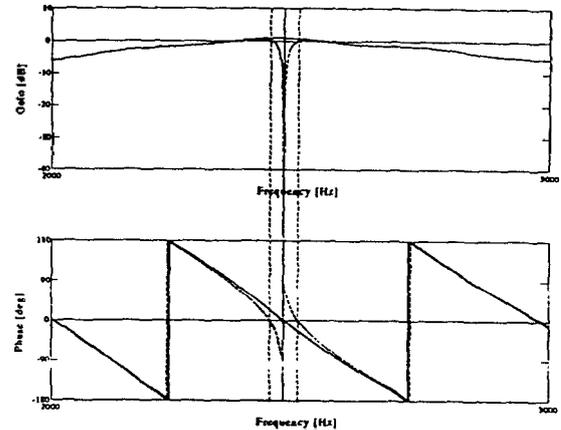


Fig. 4 Sample open-loop frequency response before (solid) and for (dashed) addition of first notch filter

해석의 결과, 새로운 위상 "0"점이 생겨나지 않도록 하기 위해서는, 발진 주파수에서의 위상의 기울기를 Group-delay 보다 작게 할 필요가 있다. 이것을 식으로 나타내면, 다음과 같은 관계식이 된다.

$$\frac{\tau(\omega_c)}{t} \geq \frac{d}{d\omega} \arg[H(\omega)] \Big|_{\omega=\omega_c} \quad (14)$$

$$\tau_g(\omega_c) \geq \frac{(\gamma - \rho)}{(1 - \gamma)(1 - \rho)} T \quad (15)$$

여기에서, τ_g 는 Open-loop의 Group-delay, $H(\omega)$ 는 Notch 필터의 주파수 특성, T 는 샘플링 간격을 나타낸다. 또한, Notch 필터의 설계의 편의성을 높이기 위해서는, 영점이 단위원상에 있다는 제한을 없애고, 영점의 위치를 변수 γ 로 표시한다.

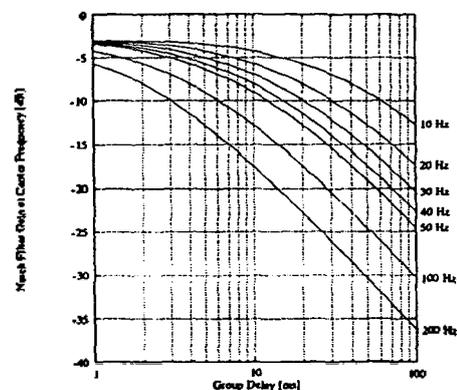


Fig. 4 Notch filter depth as a function of the system group delay for different notch filter band-widths

이 조건을 만족시키기에는 Notch 필터의 특성을 그림5에 보여준다. 가로축은 Open-loop의 Group-delay를, 세로축은 Notch의 깊이를 표시한다. 그림 안의 등고선은 각각의 밴드 폭을 나타내고 있다. 상기의 조건을 만족하게, Notch 필터를 설계하고 있기 때문에, 발진주파수의 이동은 일어나지 않지만, 그로 인해, Notch가 넓고, 알게된다.

4.2 준 직선 위상 Notch 필터

Notch 필터의 설계 조건을 전부 만족하는 것이 곤란하기 때문에 이것을 조금 완화하여 위상 특성의 변이에 의해, 새로운 위상 "0"의 주파수가 생겨도 그 주파수에서의 Notch의 감쇄량은 클수록 좋다는 것을 조건으로 하고, 약간의 위상 변이를 허용한 준직선 위상 Notch 필터를 이용하였다.

우선, 어떤 비직선 위상의 무한 임펄스 응답(IIR) 필터 $H_1(z)$ 을 가정한다. 이 필터의 주파수 특성은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$H_1(z) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n z^{-n} \quad (16)$$

$$H_1(\omega) = H_1(z) |_{z=e^{j\omega}} \quad (17)$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} c_n e^{-jn\omega} \quad (18)$$

그 다음, 다른 하나의 필터 $H_2(z)$ 을 가정하고, 이 필터의 임펄스 응답은 앞의 필터와 대칭인 것으로 하면, 2번째의 필터의 주파수 특성은 필터 1의 위상을 반전시키는 것이 된다.

$$H_2(z) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n z^n \quad (19)$$

$$H_2(\omega) = H_2(z) |_{z=e^{j\omega}} \quad (20)$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} c_n e^{jn\omega} \quad (21)$$

$$= H_1^*(\omega) \quad (22)$$

필터 1과 필터 2를 조합시킴으로써 직선 위상 필터를 실현할 수 있다. 조합은 Cascade 효과 병렬형을 생각할 수 있다. Cascade의 경우에는 주파수 특성이 필터 1의 이득의 제곱이 되고, 위상이 "0"이 된다.

$$H_c(\omega) = H_1(\omega) H_2(\omega) \quad (23)$$

$$= |H_1(\omega)|^2 \quad (24)$$

반면, 병렬의 경우에는 주파수 특성이 필터 1의 주파수 특성의 실수 부분의 2배가 된다.

$$H_p(\omega) = H_1(\omega) + H_2(\omega) \quad (25)$$

$$= 2 \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cos(n\omega) \quad (26)$$

$$= 2 |H_1(\omega)| \cos(\phi_1(\omega)) \quad (27)$$

이와 같은 방법에 의해, 완전한 직선 위상 필터를 설

계 가능하지만, 필터 2는 인과성을 만족시키지 않으므로 이를 실현할 수 없다. 따라서, 조합한 필터를 실현시키기 위해서는 임펄스 응답에 길이 N_2 의 지연을 주어, Main lobe의 왼쪽 부분에 window를 거는 것을 고안하였다. 즉, 이 N_2 가 필터의 군 지연이 되고, 이 조작에 의해 준 직선 위상 IIR 필터를 형성할 가능성이 있다고 생각한다. 또한, Main lobe의 오른쪽 부분에도 window 함수를 걸게되면, 준직선 위상 FIR 필터도 실현할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 적응 Notch 필터를 이용하여 Howling을 억제하는 방법을 제안하고, 그 동작을 평가하였다. 그 결과, 그림 1의 시스템에서 Notch 필터를 이용함으로써 Howling 억제가 가능함을 보였다. 그러나, Notch 필터의 위상 특성에 의해 새로운 위상이 "0"인 점이 발생하고, 그 이득이 1.0 이상의 경우, 그 주파수에 새로운 Howling이 발생하게 된다. 이 시스템에서는 Howling 주파수에 Notch의 형성을 계속하기 때문에 Notch가 상당히 많이 필요하게 되고, 이에 의해 정보 손실이 많이 발생하게 된다.

또한, Howling을 억제하고 또한 정보 손실을 없애기 위해, 본 연구에서는 두 종류의 Notch 필터에 관하여 검토하였다. 그 결과, Notch 필터를 설계할 때의 조건을 완화하여 Notch 필터로서 준직선 위상 Notch 필터를 이용함으로써 높은 이득 여유가 얻어지고 있음을 명백히 하였다.

참고 문헌

- [1] H.A.L. Josen, F. Asano, Y. Suzuki, and T. Sone, "Adaptive Feedback Cancellation with Frequency Compression for Hearing Aids," J. Acous. Soc Am., vol.94(6), pp. 3248-3254, December 1993.
- [2] B. Friedlander and J. O. Smith, "Analysis and Performance Evaluation of an Adaptive Notch Filter," IEEE Trans. Info. Theory, vol. IT-30, pp. 283-295, 1984
- [3] B. D. Rao and S.-Y. Kung, "Adaptive Notch Filter for the Retrieval of Sinusoid in Noise," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Proc., vol. ASSP-32, pp. 791-802, 1984.
- [4] A. Nehorai, "A Minimal Parameter Adaptive Notch Filter With Constrained Poles and Zeros," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Proc., vol. ASSP-33, pp. 983-996, 1985
- [5] L. Ljung and T. Soderstrom, Theory and Practice of Recursive Identification, MIT press, Cambridge, MA, 1983