

디지털 보청기 벤트 반향제거를 위한 부밴드 성긴 적응필터

배현덕*

Subband Sparse Adaptive Filter for Echo Cancellation in Digital Hearing Aid Vent

Hyeonl-Deok Bae*

요약 디지털보청기 벤트에서 발생하는 반향은 사용자의 불편을 초래한다. 벤트에서 귀환되는 반향을 제거하기 위해서는 귀환경로인 벤트의 임펄스응답의 정확한 추정이 요구된다. 벤트의 임펄스응답은 시간에 따라 변하는 특성과 함께 성긴 특성을 가진다. 이러한 특성의 벤트 임펄스응답 추정에 유용한 적응 알고리즘으로는 IPNLMS가 유용한 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 벤트의 성긴 임펄스응답을 추정하여 벤트에 의한 반향의 제거를 위해 IPNLMS를 부밴드 보청기 구조에 적용하는 부밴드 성긴 적응필터를 제안한다. 제안 기법에서 신호의 부밴드 분해는 각 대역 신호의 사전 백색화가 가능하므로 적응필터의 수렴속도의 개선이 가능하다. 그리고 적응필터의 다위상 분해는 각 다위상 성분 필터에서 성긴도를 증가시키며, 추가 계산 없이 반향제거 성능개선이 가능하다. 제안 적응필터의 계수 갱신 식 유도를 위해 가중 NLMS에 근거한 비용함수를 정의하고 이를 이용 각부밴드에서 적응필터의 계수 갱신 식을 유도한다. 제안한 적응필터의 성능검증을 위해 백색신호를 입력으로 하여 수렴속도와 정상상태오차를, 실제 음성신호를 입력으로 하여 반향제거 결과를 기존 알고리즘과 비교 평가한다.

Abstract Echo generated in digital hearing aid vent give rise to user's discomfort. For cancelling feedback echo in vent, it is required to estimate vent impulse response exactly. The vent impulse response has time varying and sparse characteristics. The IPNLMS has been known a useful adaptive algorithm to estimate vent impulse response with these characteristics. In this paper, subband sparse adaptive filter which applying IPNLMS to subband hearing aid structure is proposed to cancel echo of vent by estimating sparse vent impulse response. In the propose method, the decomposition of input signal to subband can pre-whiten each subband signal, so adaptive filter convergence speed can be improved. And the poly phase component decomposition of adaptive filter increases sparsity of each components, and the better echo cancellation can be possible without additional computation. To derive coefficients update equation of the adaptive filter, by defining the cost function based weight NLMS is defined, and the coefficient update equation of each subband is derived. For verifying performances of the adaptive filter, convergence speed, and steady state error by white signal input, and echo cancelling results by real speech input are evaluated by comparing conventional adaptive filters.

Key Words : DHA, Vent, Echo cancellation, Sparse impulse response, Adaptive filter, Subband filtering

1. 서론

음향신호처리에서 반향제거(혹은 귀환제거)는 매우 중요하므로 이에 대한 다양한 연구가 진행되어 오고 있다. 디지털보청기(digital hearing aids)에서도

리시버(receiver)신호 일부가 음향 귀환경로(feedback path)인 벤트(vent)를 통하여 입력으로 되 돌아오는 음향귀환이 발생한다. 디지털 보청기의 좁은 공간에서 발생하는 이 반향은 사용자에게 많은 불편을

*Corresponding Author : School of Electrical Eng., Chungbuk National University (hdbae@cbnu.ac.kr)

Received September 19, 2018

Revised October 05, 2018

Accepted October 15, 2018

초래한다[1].

벤트에 의한 귀환 경로는 임펄스 응답이 일부 구간에서 만 의미 있는 크기를 가지며 대부분의 구간에서는 크기가 영에 가까운 성긴(sparse) 임펄스응답특성을 가진다. 그리고 귀환경로 특성이 시간에 따라 변하는 주변 환경에 크게 좌우되므로 적응필터로 귀환 경로를 추정하여 반향을 제거하여야한다[2].

최근에 시스템 임펄스응답 성긴 특성을 고려하여 NLMS(Normalized Least Mean Square)의 성능을 향상시킨 잘 알려진 알고리즘으로 PNLMS(Proportional NLMS)가 있다. PNLMS에서는 적응필터의 각계수가 독립된 스텝사이즈로 갱신되므로 초기 수렴속도는 빠르나 이후에는 수렴속도가 현저히 느려지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완한 알고리즘이 IPNLMS (Improved PNLMS)이다[3][4][5]. 그러나 음성 신호와 같이 입력신호의 상관행렬의 고유치 분포가 큰 경우 대부분의 적응필터에서 수렴속도가 저하된다[2]. 입력신호 상관행렬 고유치 분포는 신호를 부밴드로 분해하여 사전 백색화를 하면 줄일 수 있으므로, 성긴 임펄스응답 특성의 음향 귀환경로의 반향 제거에는 신호를 부밴드로 분해한 후 적응 필터링하는 부밴드 적응 필터링 기법이 효율적일 수 있다 [6][7][8][12]. 부밴드 적응 필터링에서는 적응필터에 다위상 분해(polyphase decomposition)와 노블 아이덴티티(noble identity)기법을 적용하면 추가적인 계산 없이 적응알고리즘 수렴속도의 개선이 가능하다 [9][10][11].

본 논문에서는 디지털 보청기의 귀환경로인 벤트에서 발생하는 반향 제거를 위해 입력신호를 부밴드로 분해하여 각 분해된 부밴드 신호에 대하여 적응 필터링하는 부밴드 성긴 적응필터인 SIPNLMS(Subband IPNLMS)를 제안한다. 이를 위해 부밴드 보청기구조에서 적응알고리즘 비용함수를 정의하고 각 부밴드에서의 적응필터의 계수 갱신식을 유도한다. 제안기법의 성능은 백색신호를 입력으로 하여 수렴성능을, 실제 음성신호입력에 대하여는 반향제거 성능을 전 밴드(full band) 적응필터의 성능과 비교 평가 한다.

2. 성긴임펄스응답 시스템을 위한 부밴드 적응필터링

2.1 부밴드 보청기 구조

디지털 보청기에서 귀환경로에서의 반향 제거와 난청보상을 위한 전체 시스템 구조는 그림 1과 같다.

이 구조에서는 벤트를 통해 귀환되는 반향신호 제거를 위한 적응필터도 전 대역에서 신호를 처리하게 된다.

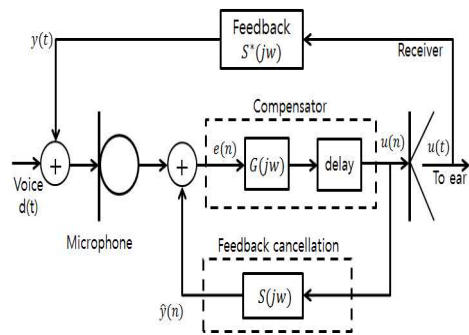


그림 1. 반향제거를 위한 보청기 구조
Fig. 1. Hearing aid structure for echo cancelling

그림 1에서 $S^*(j\omega)$ 는 벤트를 통한 귀환경로이며, $S(j\omega)$ 는 귀환을 제거하는 적응필터이다. 그림 1의 전 대역 구조를 필터뱅크, 다 위상(poly phase) 분해, 노블 아이덴티티(noble identity)를 이용 부밴드(대역 수 $M=2$) 구조로 변환하면 그림 2와 같다.

그림 2에서 H_0, H_1 은 분해필터이며 F_0, F_1 은 합성필터이다. 그리고 $S_i (i = 0, 1)$ 는 적응필터의 다위상 성분이며 $S(z) = \sum_{i=0}^{M-1} z^{-i} S_i(z^M), s_i(n) = s(Mn + i), \downarrow 2, \uparrow 2$ 는 각각 다운 샘플링과 업 샘플링을 의미한다. 이와 같이 보청기 구조를 부밴드 구조로 실현하면 입력인 음향 귀환 신호가 분해필터에 의해 사전 분해되므로 신호의 사전 백색화가 가능하므로 적응필터링 적용 시 각 부밴드 신호의 자기 상관행렬의 고유치 분포가 줄어들게 된다.

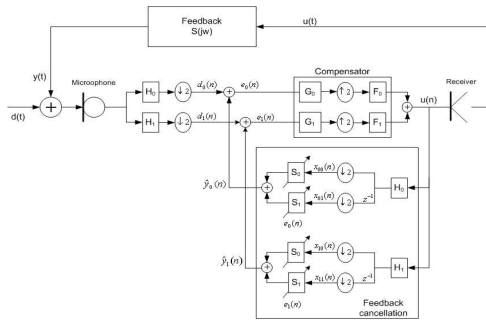


그림 2. 반향제거를 위한 보청기 부밴드 구조(M=2)
Fig. 2. Hearing aid subband structure for echo cancellation

2.2 반향제거를 위한 부밴드 성긴 적응필터

디지털 보청기 귀환제거를 위한 그림 2와 같은 부밴드 구조에서 성긴 임펄스 응답 특성을 가지는 귀환 경로를 추정하여 반향 제거를 위한 부밴드 적응필터가 필요하다. SIPNLMS의 유도를 위한 최적화 조건과 비용함수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \| \mathbf{s}_i(n+1) - \mathbf{s}_i(n) \|^2 K_i^{-1} \\ & \text{subject to } \mathbf{d}_j(n) = \sum_{i=0}^1 \mathbf{X}_{ji}^T(n) \mathbf{s}_i(n+1), \quad j=0,1 \quad (1) \\ & \mathcal{J}(n) = \| \mathbf{s}_0(n+1) - \mathbf{s}_0(n) \|^2 K_0^{-1} \\ & \quad + \| \mathbf{s}_1(n+1) - \mathbf{s}_1(n) \|^2 K_1^{-1} \\ & \quad + [\mathbf{d}_0(n) - \mathbf{x}_{00}^T \mathbf{s}_0(n+1) - \mathbf{x}_{01}^T \mathbf{s}_1(n+1)]^T \lambda_0 \\ & \quad + [\mathbf{d}_1(n) - \mathbf{x}_{10}^T \mathbf{s}_0(n+1) - \mathbf{x}_{11}^T \mathbf{s}_1(n+1)]^T \lambda_1 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 λ_j 는 각 계수 $K_j^{-1} (j=1,2)$ 벡터의 스텝사이즈를 조절하는 대각 행렬이며, $\lambda_i (i=1,2)$ 는 라그랑주 승수(Lagrange multiplier)이다. 비용함수는 계수벡터에 대하여 2차 함수이므로 비용함수 $\mathcal{J}(n)$ 을 계수벡터 $\mathbf{s}_0(n+1)$ 과 $\mathbf{s}_1(n+1)$ 에 대하여 최소화하기 위해 편미분하고 그 결과를 0로 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{J}(n)}{\partial \mathbf{s}_j(n+1)} &= K_j^{-1} 2 [\mathbf{s}_j(n+1) - \mathbf{s}_j(n)] \\ & \quad - \sum_{i=0}^1 \mathbf{x}_{ij} \lambda_i = 0, \quad j=0,1 \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 각 대역의 오차는 다음과 같다.

$$e_j(n) = d_j(n) - \sum_{i=0}^1 \mathbf{x}_{ji}^T \mathbf{s}_i(n), \quad j=0,1 \quad (4)$$

식(3)을 식(1)의 조건에 대입하고 이 결과를 식(4)에 대입한 후 상호상관(cross correlation) 항이 자기상관(auto correlation) 항에 비해 매우 작으므로 영으로 하여 정리하면[8] 라그랑주 승수는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_j = \frac{2e_j}{\sum_{i=0}^1 \mathbf{x}_{ji}^T K_i \mathbf{x}_{ji}}, \quad j=0,1 \quad (5)$$

식(3)과 식(5)을 이용 각 부밴드 적응필터 계수 갱신식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{s}_0(n+1) = \mathbf{s}_0(n) + \mu K_0 [\mathbf{A}_0^{-1} \mathbf{e}_0(n) \mathbf{x}_{00}(n) + [\mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{e}_1(n) \mathbf{x}_{10}(n)]] \quad (6)$$

$$\mathbf{s}_1(n+1) = \mathbf{s}_1(n) + \mu K_1 [\mathbf{A}_0^{-1} \mathbf{e}_0(n) \mathbf{x}_{01}(n) + [\mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{e}_1(n) \mathbf{x}_{11}(n)]] \quad (7)$$

식(6), 식(7)에서 \mathbf{A}_0 , \mathbf{A}_1 와 대각행렬 K 는 다음과 같다.

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{x}_{00}^T(n) K_0 \mathbf{x}_{00}(n) + \mathbf{x}_{01}^T(n) K_1 \mathbf{x}_{01}(n) \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{x}_{10}^T(n) K_0 \mathbf{x}_{10}(n) + \mathbf{x}_{11}^T(n) K_1 \mathbf{x}_{11}(n) \quad (9)$$

$$K_i(n) = \text{diag}\{g_{i0}(n), \dots, g_{iL-1}(n)\} \quad (10)$$

$$g_{il}(n) = \frac{1-\alpha}{2L/M} + (1+\alpha) \frac{|s_{il}(n)|}{2 \| \mathbf{s}_i(n) \|_1} \quad (11)$$

여기서 $i=0,1$, $l=0, \dots, L/M$, L =적용필터 길이 이다.

3. 시뮬레이션

제한한 부밴드 알고리즘인 SIPNLMS의 성능평가를 위하여 삼미음향기술(주)에서 제공한 보청기 벤트의 임펄스 응답을 측정하여 사용하며 측정된 귀환경로인 벤트의 임펄스 응답은 그림 3과 같다. 임펄스 응답의 중요 특성인 성긴 정도(sparseness)는

$$\zeta(s^*) = \frac{N}{N - \sqrt{N}} \left(1 - \frac{\| \mathbf{h} \|_1}{\sqrt{N} \| \mathbf{h} \|_2} \right) \text{으로 정량화가 되며,}$$

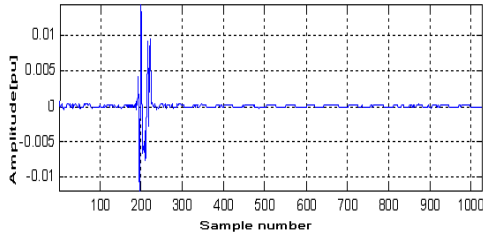


그림 3. 귀환경로의 임펄스 응답(성긴도 0.9217)
Fig. 3. Impulse response of feedback path (sparsity 0.9271)

그림 3의 임펄스응답 성긴도는 0.9217이며 임펄스 응답의 길이는 귀환환경과 동일한 $L=1024$ 를 사용한다. 그리고 관측 잡음(observation noise)으로 원하는 신호에 $SNR=35dB$ 인 백색 잡음을 부과 한다. 실험에 사용된 적응필터 스텝사이즈는 0.3을 사용하였고, 10번의 반복 실험에 대한 앙상블 평균(ensemble average)으로 수렴성능을 비교한다.

성능비교를 위해 사용된 알고리즘으로는 NLMS, PNLMS, IPNLMS와 부밴드 수(M)를 달리한 SNLMS(M=2,4)와 SIPNLMS(M=2,4)를 사용하였다. 그림 4는 그림 3의 귀환경로의 계수조정오차를 나타낸다.

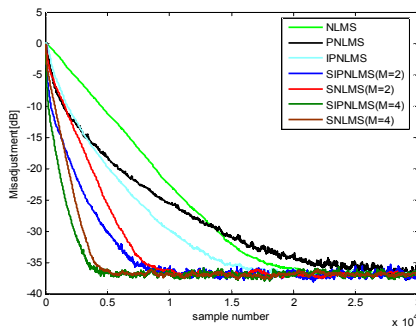


그림 4. 귀환경로(그림 3)에 대한 각 알고리즘의 계수 조정오차
Fig. 4. Coefficients adjustment error of each algorithms to feedback path(Fig.3)

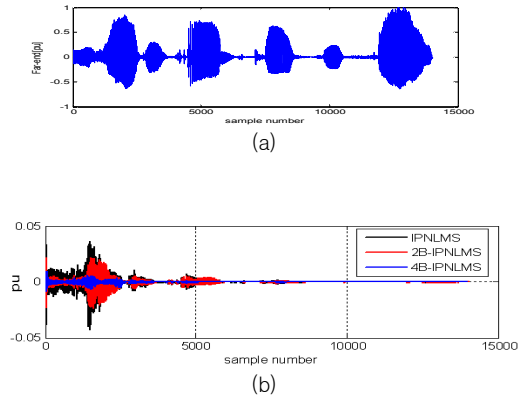


그림 5. 실제음성신호에 대한 귀환 제거 결과 (a) 음성 신호, (b) SIPNLMS
Fig. 5. Feedback signal cancelling results to real speech signal (a) speech signal, (b) SIPNLMS

LMS, PNLMS, IPNLMS만 비교해 볼 경우 귀환경로가 성긴 특성에서 IPNLMS가 나머지 두 알고리즘보다 빠른 수렴성능을 보임을 확인할 수 있다.

그리고 SNLMS와 SIPNLMS는 부밴드 수 가 같을 경우(M=2,4) SIPNLMS의 수렴성능이 SNLMS보다 빠르며, SIPNLMS에서 부밴드 수가 증가 할수록 수렴 속도가 향상됨을 알 수 있다. 그림 5는 실제 음성신호에 대한 SIPNLMS의 IPNLMS에 대한 귀환 제거 결과 비교이다. 실험결과로부터 SIPNLMS가 성긴특성의 귀환경로에서 귀환제거에 효과적이며 M의 값이 증가 할수록 입력신호의 자기상관 행렬의 고유치 분포가 줄어들며, 부밴드에서의 적응필터의 성긴성이 증대되어 귀환제거 성능이 향상됨을 알 수 있다. 이상의 실험으로부터 제안된 SIPNLMS 알고리즘이 성긴특성의 환경에서 NLMS 기반의 알고리즘보다 효과적임을 알 수 있다.

4. 결론

성긴 임펄스 특성을 가지는 보청기 밴트에 의해 발생하는 귀환의 제거를 위해 본 논문에서는 적응 IPNLMS알고리즘을 보청기 부밴드 구조에 적용한 SIPNLMS 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘에서는 신호를 필터뱅크를 이용 분해함으로써 각 부밴

드에서 입력신호의 자기 상관행렬 고유치분포를 줄이고, 적응필터를 다위상 분해하여 사용함으로써 계산량의 증가 없이 각 부밴드에서의 적응필터의 성긴도를 증가시켜 적응알고리즘의 성능을 개선할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보였다. 시뮬레이션 결과 각 알고리즘에서 부밴드 수의 증가에 따라 적응필터 수렴속도가 빨라지며, 아울러 귀환제거 성능 또한 전밴드에 비해 부밴드의 경우가 향상됨을 보였다.

REFERENCES

[1] Aryhur Schaub, Digital Hearing Aid, Thieme, New York, NY, 2008.
 [2] Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentis-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2002.
 [3] Donald L. Duttweiler, "Proportionate Normalized Least Mean Squares Adaptation in Echo Cancellers," IEEE Trans. on Speech Audio Processing, vol. 8, no. 5, pp. 508-518, Sep, 2000.
 [4] Jacob Benesty and Steve L. Gay,, "An Improved PNLMS Algorithm," Proc. IEEE ICASSP, vol. 2, pp. 1881-1884, May, 2002.
 [5] P. Loganathan, Andy W. H. Khong, Patrick A. Naylor, "A class of Sparseness-Controlled Algorithm for Echo Cancellation," IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Processing vol. 17, no. 8, pp.159-160, Nov. 2009.
 [6] A. Gilloire and M. Vetterli, "Adaptive filtering in subbands with circula sampling: analysis, experiments, and application to acoustic echo cancellation," IEEE Trans, Signal Proc., vol. 40, p p. 1862-1875, Aug. 1992.
 [7] Brady N. M. Laska, Rafik A. Goubran, a nd Miodrag Bolic, "Improved Proportionate Subband NLMS for Acoustic Echo Cancellation in Changing Environment," IEEE Letter, vol. 15, pp. 337-340, May, 2008.
 [8] H. Choi and H. D. Bae, "Subband affine projection algorithm for acoustic echo cancellation system," EURASIP Journal on Applied Signal Processing, vol. 2007, Article ID 75621, doi: 10.1155/2007/75621, 2007.
 [9] A.Tedjani, A.Benallal, "Performance Study of three Different Sparse Adaptive Filtering Algorithms for Echo Cancellation in Long Acoustic Impulse Reponses, Proc. IEEE ICCE-B, vol.1, pp. 1-4, Oct. 2017.

[10] Sang-Wook Sohn, Young-Bin Lim, Jae-Jun Youn, Hyeon-Deok Bae, Dong-Gu Ryu, "SIPNLMS Adaptive Filter for Feedback Cancellation in DHA Vent," KIEE 2012 Conferences, vol.1, p p.1-4, July 2012.
 [11] Sang-Wook, Hun-Choi, Hyeon-Deok Bae, "Subband IPNLMS Adaptive Filter for Sparse Impulse Response Systems," The Trans. of KIEE, vol. 60, no. 2, pp. 423-430, Feb. 2011.
 [12] Shin-Hyuk Jeon, You-Na Ji, Young-Cheol Park, "Implementation of Adaptive Feedback Cancellation Algorithm for Multichannel Digital Hearing Aid," The Journal of KIIECT vol.10, no. 1, pp.102-110, Feb. 2017.

저자약력

배 현 덕(Hyeon-Deok Bae)

[중신회원]



- 1977년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
- 1980년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전기공학부 교수

<관심분야>

적응신호처리, 멀티레이트 신호처리, 전력품질 신호처리