

M-채널 서브밴드 QMF 필터뱅크와 적응필터를 이용한 자동차 소음제거

허영대*, 안주원**, 권기룡***, 문광석**

* 포항1대학 전산정보처리과, ** 부경대학교 전자공학과

*** 부산외국어대학교 전자공학과

Car Noise Reduction for Using M-Channel Subband QMF Filter Banks and Adaptive Filters

Yeong-Dae Heo*, Jou-Won Ahn**, Ki-Ryong Kwon***

Kwang-Seok Moon**

* Dept. of Computer and Information Science, Pohang 1 college

** Dept. of Elec. Eng., Pukyong National Univ.

*** Dept. of Elec. Eng., Pusan Univ. of Foreign Studies

요 약

광대역 능동잡음제거는 수 백개의 적응필터 탭 수를 갖는다. 탭 수가 긴 적응필터는 많은 계산량이 요구된다. 본 논문에서는 적응계수 백터가 서브밴드로 계산되는 M-채널 QMF 필터뱅크와 적응필터를 이용한 자동차 소음제거 모델을 제안한다. 분해 필터뱅크와 합성 필터뱅크는 cosine-modulated pseudo QMF 필터를 사용한다. 오차경로의 전달특성을 온라인 인식하기 위한 기준신호는 적응필터의 출력신호와 저주파대역의 서브밴드 출력신호와의 차신호를 사용한다. 따라서 제안한 자동차 소음제거 모델은 계산량이 적고 수렴속도가 빠른 견실한 시스템이 되도록 제안한다.

I. 서 론

적응 필터기법은 적응어레이, 적응잡음제거, 적응모델링, 적응 반향제거 등 광범위한 분야에 적용되고 있다. 많은 임펄스 응답이 요구되는 실내음향, 능동잡음제거, 음향반향제거의 분야 등에서 적응필터와 관련된 계산량은 저가격의 응용에 방해가 된다. 따라서 복잡한 역학적 구조에 대하여 광대역 능동잡음제거는 수 백개의 적응필터 탭수를 갖는다.

능동잡음제거에서는 제거할 소음에 이와 동일한 진폭을 가지면서 역위상인 인위적인 제 2의 음을 라우드스피커로써 인가하여 상호상쇄시켜 소음을 제거 또는 저감시킨다^[1].

멀티레이트 신호처리^[2]는 기본적으로 분해 필터뱅크(analysis filter bank), 합성 필터뱅크(synthesis filter bank)로 이루어지며, 분해 필터뱅크에는 대역필터 및 간축(decimation)으로 구성되어 있고, 합성 필

터뱅크는 보간(interpolation) 및 대역필터로 구성되어 있다. 서브밴드 필터뱅크는 입력신호를 분해필터에 의해 몇 개의 주파수 대역으로 분할하여 각 대역별로 필터링을 수행하여 계산량을 감소시키며, 수렴속도를 향상시키는 방법이다. 일반적으로 분해필터를 대역필터로 사용하여 간축하면 엘리어싱이 발생한다. 이를 제거하고 신호성분만을 추출하기 위하여 QMF(quad-rate mirror filter) 필터^[3]를 사용한다.

서브밴드 신호처리^[4]는 두 가지 장점이 있다. 하나는 계산량이 서브밴드 수에 의해서 줄어든다. 탭 길이와 계수 갱신률은 각 서브밴드 내에서 간축된다. 둘째는 동적 스펙트럼 범위가 각 서브밴드에서 많이 줄어들기 때문에 빠른 수렴속도가 가능하다. 서브밴드 음향반향제거는 다음과 같은 주된 차이 때문에 능동잡음제거에 직접 적용하여 사용할 수 없다. 음향반향제거는 전기적 반향신호를 직접 액세스하도록 제공되지만 능동잡음제거는 필수적으로 제어신호와 제거되는 오차음신호 사이에 전달특성을 포함하고 있다. 따라서 여분의 오차신호는 서브밴드 내에서 제거할 수 없으며 광대역 출력으로 복원된다.

멀티레이트 신호처리에 대한 연구로 Vaidynathan 등^[5]은 합성 필터뱅크를 통하여 신호복원시에 완전복원(perfect reconstruction) 조건을 위하여 초단위(paraunitary) 필터뱅크를 제안하였다. Crochiere 등^[6]은 QMF 필터뱅크를 이용하여 서브밴드 부호화 방법에 대하여 제안하였다. 또한 Koilpillai 등^[7]은 cosine modulated FIR(finite impulse response) 필터뱅크를 이용하여 완전복원이 되도록 제안하였다.

본 논문에서는 M-채널 서브밴드 QMF 필터뱅크와 적응필터를 이용한 온라인 제거가 되는 자동차 소음제거 모델을 제안한다. 제안한 모델은 cosine-modulated

pseudo QMF 필터뱅크를 사용하여 계산량과 수렴속도가 빠른 견실한 적응 시스템이다. 음향플랜트 및 오차경로의 전달특성을 온라인으로 인식하는 필터는 Filtered-X LMS(least mean square) 서브밴드 적응필터를 사용한다. 서브밴드 처리의 온라인 적응 능동잡음제거 방법은 음향플랜트의 전달특성을 인식하기 위하여 M-채널 서브밴드 필터뱅크를 사용하여 서브밴드의 적응필터를 만든다. M-채널 서브밴드 필터뱅크의 입력신호와 오차신호에는 분해 필터뱅크를 사용하여 각 서브밴드의 적응 필터계수를 새롭게 갱신시키며, 각 서브밴드의 적응필터 출력신호를 합성 필터뱅크로서 합성한 후 광대역 적응필터 출력을 만든다. 분해 및 합성필터는 cosine-modulated pseudo QMF 필터를 사용한다. 또한 오차경로의 전달특성을 온라인 인식하기 위하여 적응필터의 출력신호와 저주파대역 서브밴드 출력신호와와의 차신호를 기준신호로 사용하고, 인식필터의 출력신호와 오차경로의 오차신호를 뺀 차신호를 이용한다. 따라서 본 논문의 적응 능동잡음제거기는 계산량이 적으면서도 견실한 시스템이 되도록 제안한다.

II. 제안한 M-채널 서브밴드 QMF 필터뱅크

1. 서브밴드 소음제거 모델의 기본구성
 M-채널 서브밴드 QMF 필터 뱅크와 적응필터를 이용한 제안한 자동차 소음제거 모델은 그림 1에서와 같다. 소음 $x(n)$ 을 소음원으로 부터 입력 마이크로폰 M_1 으로 측정하여 M-채널 서브밴드 QMF 분해 필터뱅크의 입력으로 사용한다. 분해 필터뱅크에는 대역필터 및 간축으로 구성되어 있으며, 분해된 각 서브밴드의 신호는 적응필터의 입력으로 사용된다. 서브밴드 적응필터 W 는 계수벡터로서 서브밴드된 입력신호와 오차신호를 입력으로 사용하여 필터계수를 각각 새롭게 갱신시킨다. 서브밴드 적응필터의 출력신호 $y(n)$ 은 M-채널 QMF 합성 필터뱅크의 대역필터 및 보간으로 구성되며, 이의 출력이 라우드스피커를 구동시켜 소음을 상쇄시킨다. 이 경우 라우드스피커의 출력음은 라우드스피커 위치에서의 소음 $d(n)$ 과 역상이면서 진폭이 동일하여야 한다. 그러나 이들이 서로 완전히 동일하지 못할 경우에 상쇄되지 못하고 남는 오차신호 $e_f(n)$ 을 제 2의 마이크로폰 즉, 오차 마이크로폰 M_2 로써 감지하여 채어기로 개환시킨다. 오차신호는 M-채널 QMF 분해 필터뱅크의 입력으로 사용한다. P 는 라우드스피커까지의 음향 플랜트의 전달함수이다.
 라우드스피커 및 오차음경로의 전달특성을 온라인 인식하기 위하여 적응필터의 출력신호 $y(n)$ 과 저대역 서브밴드 출력신호 $y_0(n)$ 과의 차신호 $u_0(n)$ 을 기준신호로 사용하고, 인식필터 C 의 출력신호 $y_0(n)$ 과 오차음경로의 오차신호 $e_f(n)$ 을 뺀 차신호 $e_c(n)$ 을 이용한다.

2. cosine-modulated pseudo QMF 필터뱅크

M-채널 서브밴드 QMF 필터뱅크는 그림 2에서와

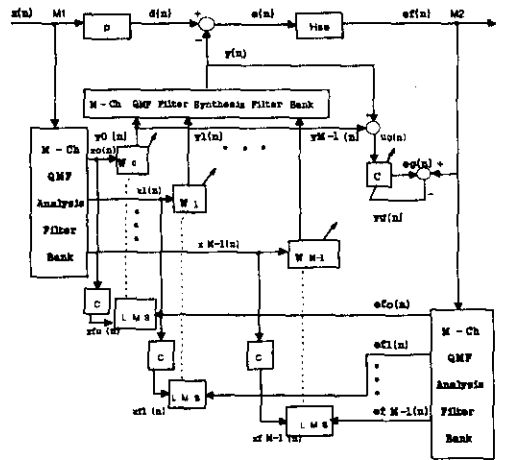


그림 1. 제안한 M-채널 서브밴드 QMF 필터뱅크의 자동차 소음제거 모델

같이 cosine-modulated pseudo QMF 필터뱅크를 사용한다. 이는 QMF 필터뱅크로 합성시 완전복원 조건에 적합하기 때문이다.

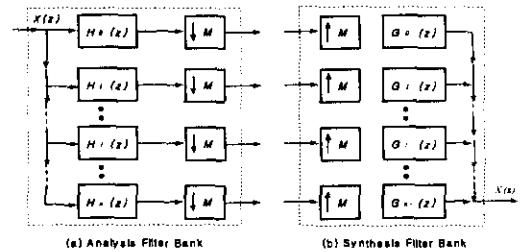


그림 2. M-채널 서브밴드 QMF 필터뱅크

$H(z)$ 는 분해 필터뱅크로서 분해 필터뱅크에 대한 임펄스 응답 $h_i(n)$ 은

$$h_j(n) = 2h(n) \cos\left(\left(j + \frac{1}{2}\right)\left(n - \frac{N-1}{2}\right)\frac{\pi}{M}\right) + (-1)^j \frac{\pi}{4} \quad (1)$$

이다. $G(z)$ 는 합성필터뱅크로서 cosine-modulated pseudo QMF 필터뱅크에 대한 임펄스 응답 $g_i(n)$ 은

$$g_j(n) = 2h(n) \cos\left(\left(j + \frac{1}{2}\right)\left(n - \frac{N-1}{2}\right)\frac{\pi}{M}\right) - (-1)^j \frac{\pi}{4} \quad (2)$$

이다. 여기에서 j 는 필터뱅크의 채널로서 $j=0, 1, 2, \dots, M-1$ 이다. M 은 필터뱅크의 수이고, N 은 원형(prototype)

필터뱅크의 필터 탭수이다. $(-1)^i \frac{\pi}{4}$ 의 성분은 하중인 자로서 모든 엘리머싱 성분을 보살할 뿐만 아니라 왜곡을 없애는 역할을 한다. 원형 필터뱅크는 $\frac{\pi}{M}$ 에서 대역 제한 되어지기 때문에 엘리머싱 성분의 보상은 두 개의 이웃하는 중앙주파수 사이의 모든 영역에서 독립적으로 일어난다.

식 (1) 및 (2)에서 $h(n)$ 은 causal 반대역(half-band)이 나 M차 대역필터를 구현하는데 적합한 이승여현 반대역필터(rasied-cosine half band filter)를 사용한다. 이승여현 반대역필터의 임펄스 응답은

$$h(n) = \frac{1}{M} \frac{\sin(\pi n/M)}{\pi n/M} \frac{\cos(r\pi n/M)}{1 - (2rn/M)^2} \quad (3)$$

이다. 여기에서 계수 r 은 roll-off 인자로서 $0 < r \leq 1$ 의 값을 가지며, $r \rightarrow 0$ 이면 이상 저역 통과필터로 근접한다.

3. M-채널 서브밴드 QMF 적응필터

제안한 M-채널 서브밴드 QMF 필터뱅크의 자동차 소음제거 모델에서 입력신호 $x(n)$ 및 Hse를 통과한 오차신호 $e_f(n)$ 은 M개 밴드로 나누기 위하여 M-채널 QMF 분해 필터뱅크에 의해 필터링된다. 각 채널의 필터 탭수는 N이다. m-번째 적응필터의 계수벡터는

$$W_k(n) = [w_k(n), w_k(n-1), \dots, w_k(n-N+1)]^T \quad (4)$$

이고, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 에 대한 적응필터의 출력신호는

$$y_m(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_{m,i}(n)x_k(n-i) \quad (5)$$

이다. 여기에서 입력신호 $x(n)$ 은 대역폭이 각각 $\frac{\pi}{M}$ 인 M개의 주파수대역으로 쪼개어진다. m-번째 추정한 오차경로 인식필터를 통과한 출력신호의 벡터는

$$X_{mf}(n) = [x_{mf}(n), x_{mf}(n-1), \dots, x_{mf}(n-N+1)]^T \quad (6)$$

이며, Filterd-X LMS 알고리즘을 사용한 적응필터의 계수벡터는

$$W_m(n+1) = W_m(n) + 2\mu_1 e_{mf}(n) X_{mf}(n) \quad (7)$$

이다. 여기에서 μ_1 은 적응필터의 수렴인자이다.

4. 오차경로의 전달특성 온라인 인식필터

오차경로의 전달특성을 온라인 인식하기 위한 필터 C의 입력신호 $u_k(n)$ 은 합성 필터뱅크의 출력신호 $y(n)$ 에서 서브밴드된 적응필터의 출력신호 $y_o(n)$ 의 차신호이다. 이의 차신호를 필터 C의 입력신호로 사용하는 이유는 신호원을 분석한 결과 오차신호 $e(n)$ 과 비슷한 분산값으로서 별도의 잡음발생기를 사용하지 않아도 되기 때문이다. 필터 C의 오차신호는 인식필터의 출력신호 $y_g(n)$ 에서 $e_f(n)$ 을 뺀 $e_g(n)$ 신호이다. 오차경로의 전달특성을 온라인 인식하기 위한 적응필

터 C의 계수벡터는

$$C_m(n+1) = C_m(n) + 2\mu_2 e_{mg}(n) U_{mg}(n) \quad (8)$$

이다. 이의 추정된 C 필터는 시스템의 안정성을 위하여 M-채널 서브밴드 QMF 분해 필터뱅크의 입력신호에 복제한다.

III. 실험결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 자동차 소음제거 모델에 대한 성능을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인하였다. 실험에 사용한 자동차 소음신호는 실제 획득한 엔진 및 머플러에서 나는 소음을 공회전 상태 및 시속 100km 속도의 중형 자동차의 소음으로 각각 사용하였다. 이들 획득한 자동차 소음은 10 kHz로 표본화하여, 16 비트로 A/D 변환시켜 사용하였다.

실험에 사용한 채널의 수는 $M=16$ 채널이며, 분해 및 합성필터는 cosine-modulated pseudo QMF 필터를 사용하였으며, 간축 및 보간은 16으로 하였다. 또한 실험에 사용한 신호의 한 프레임 데이터는 $N=512$ 개의 데이터를 사용하였고, 한 채널의 필터뱅크의 적응필터 탭 수는 $L=32$ 개로 하였다.

수렴특성은 랜덤잡음을 사용하여 제안한 알고리즘과 Filterd-X LMS 알고리즘을 512개의 데이터를 한 프레임으로 하여 매 프레임마다 갱신수(iteration number)에 대한 평균자승오차를 구한 것으로서 780번 수행하여 얻은 평균값이 그림 3에서와 같았다. 이 결과로부터 제안한 알고리즘은 120회 갱신후부터 수렴이 됨을 확인하였으며, Filterd-X LMS 알고리즘은 600회부터 수렴이 되어졌다. 따라서 제안한 방법이 훨씬 수렴속도가 빠름을 알 수 있었다.

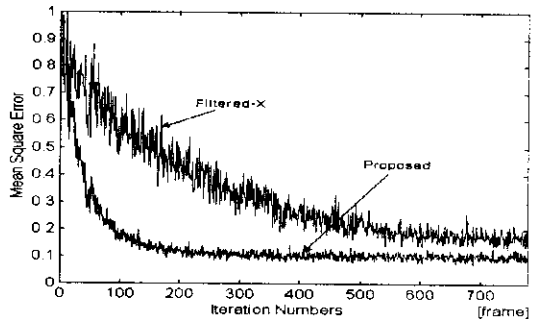


그림 3. 제안한 방법에 대한 수렴특성 비교

표 1은 제안한 방법을 사용하여 시속 100km에 대한 엔진소음을 사용하여 100 프레임 단위로 소음을 제거한 실험 결과이다. 표 1에서 알 수 있듯이 760 프레임 동안 안정되게 동작함을 알 수 있다.

자동차 소음제거에 대한 실험으로 공회전 및 100km 속력의 자동차 엔진소음을 제안한 방식에 대해 적용하여 얻은 오차신호에 대한 2 kHz 이내의 주파수 스펙트럼을 조사한 결과는 그림 4 및 그림 5와 같다.

표 1. 제안한 방법의 평균 주파수 스펙트럼[dB]

frame수	Input	Output	Error
1~100	49.72	38.98	10.74
101~200	49.80	36.21	13.59
201~300	49.16	35.45	13.70
301~400	49.63	35.79	13.84
401~500	49.92	36.04	13.88
501~600	49.33	35.00	14.33
601~700	49.09	34.79	14.30
701~760	49.34	34.80	14.54

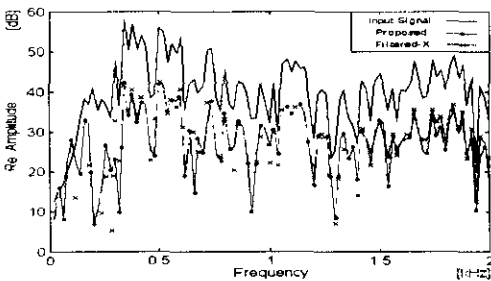


그림 4. 공회전상태의 소음에 대한 오차신호의 주파수 스펙트럼

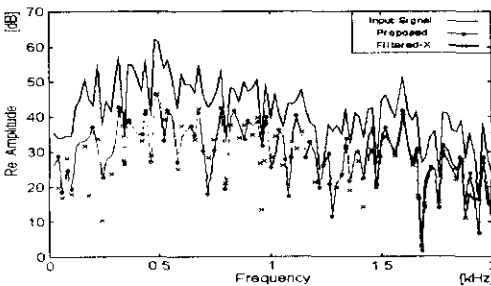


그림 5. 시속 100 km의 소음에 대한 오차신호의 주파수 스펙트럼

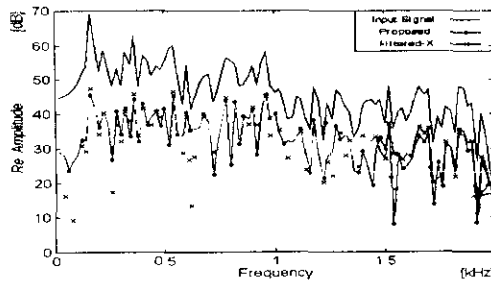


그림 6. 머플러 소음에 대한 오차신호의 주파수 스펙트럼

이들 결과로부터 제안한 방식에 의해 소음레벨이 공회전 및 100km 속력의 자동차 엔진소음에 대하여 각각 평균 12.62 및 12.00 [dB] 정도 감소된 것임을 알 수 있었다. 또한 머플러 소음의 오차신호에 대한 주파수 스펙트럼은 그림 6에서 나타내었고, 소음레벨은 14.27[dB] 감소되었다. 제안한 방법을 Filtered-X LMS 와 비교하였을 때 소음레벨의 감소정도는 비슷하나 계산량과 수렴속도면에서 현저히 제안한 방법이 우수함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 M-채널 서브밴드 QMF 필터뱅크와 적응필터를 사용하여 온라인 제어가 되는 자동차 소음 제거 모델을 제안하였다. M-채널 서브밴드 필터뱅크의 입력신호와 오차신호에는 분해 필터뱅크를 사용하여 각 서브밴드의 적응 필터계수를 새롭게 갱신시키며, 각 서브밴드의 적응필터 출력신호를 합성 필터뱅크로서 합성한 후 광대역 적응필터 출력을 만들었다. 분해 및 합성필터는 완전복원 조건에 맞는 cosine-modulated pseudo QMF 필터를 사용하였다. 또한 오차음경로의 전달특성을 온라인 인식하기 위하여 적응필터 및 저대역 서브밴드 출력신호와와 차신호를 기준신호로 사용하였다. 따라서 제안한 방법은 계산량이 적으면서도 수렴속도가 빠른 견실한 시스템이 되도록 하였다. 제안한 시스템을 자동차 엔진의 공회전 상태 및 시속 100km 속도와 머플러 소음에 대하여 실험한 결과 평균 12.62, 12.00 및 14.27 [dB] 정도 감소됨을 알 수 있었다. 앞으로 본 방식을 적용하여 다채널의 필터뱅크를 이용한 소음 제거 시스템을 구현하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] L. J. Eriksson and M. C. Allie, "Use of random noise for on-line transducer modeling in an adaptive active attenuation system," *J. of Acous. Soc. of Amer.*, vol. 85, no. 2, pp. 797-802, Feb. 1989.
- [2] A. N. Akansu and M. Smith, *Subband and wavelets transforms*, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [3] C. R. Galand and H. J. Nussbaumerl, "New quadrature mirror filter structures," *IEEE Trans. on Acus. Speech, and Signal Processing*, vol. 32, no. 3, pp. 522-531, June 1984.
- [4] D. R. Morgan and J. C. Thi, "A delayless subband adaptive filter architecture," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 43, no. 8, pp. 1819-1830, Aug. 1995.
- [5] P. P. Vaidyanathan, "Multirate digital filters, filter banks, polyphase networks, and applications : A tutorial," *IEEE Proc.*, vol. 78, pp. 56-93, Jan. 1990.
- [6] R. E. Crochiere and L. R. Rabiner, *Multirate digital signal processing*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1983.
- [7] R. D. Koilpillai and P. P. Vaidyanathan, "Cosine-modulated FIR filter banks satisfying perfect reconstruction," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 40, pp. 770-783, Apl. 1992.