

가변 Q-factor를 가지는 디지털 그래픽 이퀄라이저

이 용 희, 김 인 철
서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부

A Digital Graphic Equalizer with Variable Q-factor

Yong-Hee Lee, Rin-Chul Kim
Dept. of Electrical & Computer Eng., University of Seoul
E-mail : rin@uos.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 디지털 이퀄라이저에 대하여 검토하고, 대역 및 이득에 따라 Q-factor를 가변시키는 디지털 이퀄라이저 필터를 제안한다. 제안한 기법은 고정된 Q-factor를 사용하거나, 대역에 따라 Q-factor를 결정하는 기존의 방법들에 비해 가청 주파수 영역에서의 대칭성과 이득 리플 등의 측면에서 우수하고, 기존의 방법과 동일한 수준의 하드웨어 복잡도를 보인다. 또한, 중심 주파수 선정에 따른 성능 변화에 대해서도 고찰한다.¹⁾

I. 서론

오디오 신호는 주위 환경에 의해 발생하는 반향 등으로 인해 특정 주파수 성분이 감쇠되거나 증폭되어 원음이 왜곡될 수 있다. 이러한 오디오 신호의 왜곡을 보상하여 원음을 충실히 표현하기 위해 오디오 이퀄라이저를 사용한다. 현재, 이퀄라이저는 이러한 목적 이외에 다양한 효과를 얻기 위해서도 사용된다. 그래픽 이퀄라이저는 가장 널리 사용되는 오디오 이퀄라이저로, 가청 주파수 대역을 미리 정의된 몇 개의 부 대역으로 나누고, 각 대역 별로 필터를 설치하여 이득을 증감시킨다. 각 대역별로 설치된 이퀄라이저 필터는 일반적으로 2차 IIR(infinite impulse response) 필터로 구현되며, 이 필터들은 중심주파수(center frequency), Q-factor, 그리고 이득(gain) 등 3요소에 의해 결정된다. 여기서 Q-factor는 필터의 대역폭을 규정하는 요소

본 논문은 2002-3년 산자부 산업기술개발사업중 (주) 디지털엔아날로그 위탁 연구의 일부분입니다.

로서, 이퀄라이저 설계 시 대역에 관계없이 동일한 Q-factor의 필터를 사용하는 constant-Q 방법, 혹은 각 대역에 적합한 Q-factor를 적용하는 variable-Q 방법으로 Q-factor를 결정한다.[2]

한편, 최근 들어 대부분의 오디오 신호가 디지털화된 형태로 제공되고, class-D 증폭기 등 디지털 증폭기가 보급됨에 따라 디지털화된 오디오 증폭기에 대한 관심이 높아졌다. 이에 따라 디지털 필터를 사용하는 디지털 그래픽 이퀄라이저의 개발이 필요하게 되었다. 디지털 그래픽 이퀄라이저는 기존의 아날로그 필터를 바이리니어 변환(bilinear transform)하여 얻은 디지털 필터로 설계할 수 있다. 그러나 이러한 경우 고주파 대역에서는 필터의 주파수 응답이 비대칭적으로 나타나 이득 리플이 커지는 문제가 있었다. 본 논문에서는 이러한 문제를 최소화하는 한 방법으로 각 대역과 이득에 따라 최적의 Q-factor를 가지는 필터를 적용하는 방법을 제시한다.

II. 그래픽 이퀄라이저

이퀄라이저에서는 일반적으로 다음과 같이 표현되는 2차 IIR 필터를 사용한다[1].

$$H(s) = \frac{1 + \frac{G^+ 2\pi F_c}{Q} s^{-1} + (2\pi F_c)^2 s^{-2}}{1 + \frac{2\pi F_c}{G^- Q} s^{-1} + (2\pi F_c)^2 s^{-2}} \quad (1)$$

여기서, F_c 와 Q 는 각각 중심 주파수와 Q-factor를 나타내고, G^+ , G^- 는 이득을 나타낸다. 필터의 이득을 G 라고 한다면, 이득이 양수일 때는 $G^- = 1$, $G^+ = G$ 이고 음수일 때는 $G^+ = 1$, $G^- = G$ 로 정의되는데, 이는 필터의 주파수 응답이 이득에 대하여 대

칭이 되도록 하기 위함이다. 식 (1)로 표현된 아날로그 필터를 바이리니어 변환하면 다음과 같은 디지털 필터를 얻는데,

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (2)$$

이때, F_s 를 표본화율(sampling-rate)이라고 하면, 필터 계수들은 다음과 같이 주어진다[5].

$$\begin{aligned} b_0 &= T^2 + \frac{G^+ 2\pi F_c T}{Q} + (2\pi F_c)^2 \\ b_1 &= -2T^2 + 2(2\pi F_c)^2 \\ b_2 &= T^2 - \frac{G^+ 2\pi F_c T}{Q} + (2\pi F_c)^2 \\ a_0 &= T^2 + \frac{2\pi F_c T}{QG^-} + (2\pi F_c)^2 \\ a_1 &= -2T^2 + 2(2\pi F_c)^2 \\ a_2 &= T^2 - \frac{2\pi F_c T}{QG^-} + (2\pi F_c)^2 \\ T &= \frac{2\pi F_c}{\tan(\pi \frac{F_c}{F_s}) Q} \end{aligned} \quad (3)$$

본 논문에서는 식 (2)로 표현된 필터를 이용하여 실험을 수행하였고, 양수 및 음수 이득일 때의 주파수 응답을 그림 1에 제시하였다.

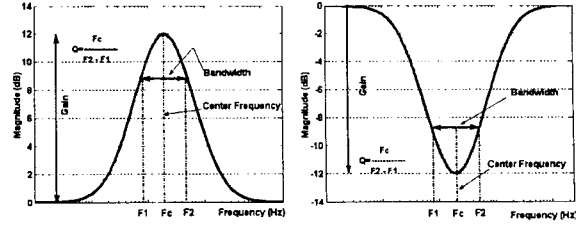
그래픽 이퀄라이저는 그림 2와 같이 k 개의 이퀄라이저 필터를 직렬 연결하여 구현한다. 일반적으로 그래픽 이퀄라이저는 각 대역에 대한 이득을 잘 반영하면 좋지만 대역간의 간섭현상으로 인해서 왜곡이 생기게 된다. Azizi[1]는 opposite filter를 도입하여 대역간 간섭을 보상하였다. 그러나, opposite filter는 일반적인 방법에 비해 2-3배의 계산량 및 메모리를 요구하므로 실제 이를 적용하기는 어렵다.

III. 가변 Q-factor 이퀄라이저

3.1 Constant-Q 이퀄라이저

표 1은 TI(Texas Instruments)[3]에 제시된 5대역 이퀄라이저의 대역별 중심주파수와 Q-factor를 나타낸다. 표 1에서 제시한 이퀄라이저는 모든 대역에서 동일한 Q-factor의 필터를 이용하는데, 이를 식 (2)로 주어지는 디지털 필터로 구현하였을 때 주파수 응답은 그림 3과 같다. 그림 3 (a)는 12dB 이득에 대한 각 대역의 주파수 응답과 전체를 하나로 합성했을 때의 주파수 응답이고, (b)는 대역별 이득을 -12dB에서 +12dB까지 동일하게 1dB 단위로 변화시켰을 때의 주파수 응답을 나타낸다.

그림 3의 주파수 응답은 [3]에 제시한 응답과는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 그림 3(a)의 주파수 응답



(a) 양의 이득 (b) 음의 이득
그림 1. 이퀄라이저 필터의 주파수 응답.

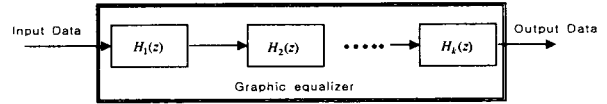
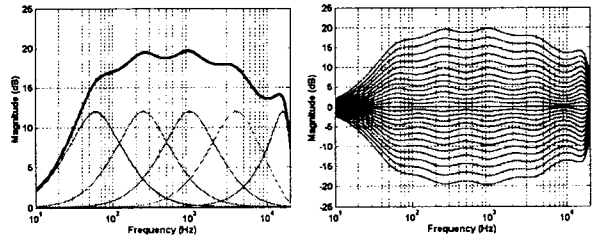


그림 2. 그래픽 이퀄라이저.

표 1. Constant-Q 이퀄라이저의 Q 및 중심주파수.

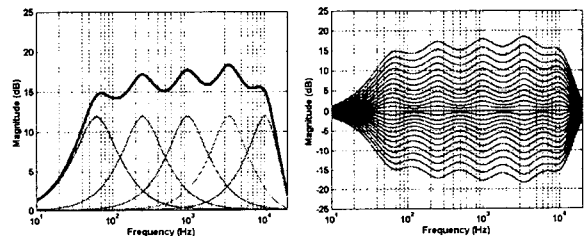
Band	1	2	3	4	5
Fc(Hz)	100	300	1000	3000	10000
Q	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85



(a) all 12dB (b) ±12dB per 1dB
그림 3. Constant-Q 이퀄라이저의 주파수 응답.

표 2. Variable-Q의 Q 및 중심주파수.

Band	1	2	3	4	5
Fc(Hz)	61.81	250.81	977.34	3429	10158
Q	1.15	1.21	1.20	1.25	1.15



(a) all 12dB (b) ±12dB per 1dB
그림 4. Variable-Q 그래픽 이퀄라이저 주파수 응답.

답은 가청 주파수 대역에서 대칭적인 형태가 아니라 고주파 영역에서 이득이 감소한다. 그리고, 그림 3(b)에 제시한 바와 같이 이득이 클수록 설정 이득보다 실

표 3. Constant-Q, variable-Q의 이득 리플.

이득(dB) \ method	Constant Q(dB)	Variable Q(dB)
12	6.072	4.090
11	5.562	3.799
10	5.097	3.549
9	4.661	3.332
8	4.242	3.10
7	3.823	2.867
6	3.391	2.612
5	2.934	2.316
4	2.440	1.982
3	1.903	1.580
2	1.318	1.115
1	0.684	0.589
0	0.0	0.0

제 이득이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 모든 대역의 Q-factor를 동일하게 설정하기 때문에 디지털 필터를 얻는 과정에서 사용한 바이너리어 변환으로 인해 고주파 영역 필터의 대칭성이 손상되고, 이득이 커짐에 따라 인접한 대역 사이의 간섭이 커지기 때문이다.

3.2 Variable-Q 이퀄라이저

표 2는 STMicroelectronics[4]에 제시된 5대역 이퀄라이저의 대역별 중심주파수와 Q-factor를 나타낸다. 표 2는 대역별로 상이한 Q-factor를 갖는 variable-Q 이퀄라이저로 그림 4(a), (b)와 같은 주파수 응답을 갖는다. 그림 4를 참조하면, variable-Q 이퀄라이저는 constant-Q 이퀄라이저와 마찬가지로 모든 대역의 이득이 동일하게 12dB일 때 비대칭적인 주파수 응답을 보이며, 모든 대역의 이득을 동일하게 1dB씩 증가시킬 때 이득이 증가함에 따라 설정 이득과 실제 이득의 편차가 커짐을 알 수 있다. 그러나 그림 3의 constant-Q 이퀄라이저에 비해 개선된 성능을 가짐을 알 수 있다.

3.3 제안한 기법

앞에서 살펴본 바와 같이 constant-Q 혹은 variable-Q 이퀄라이저는 가청 주파수 대역에서의 대칭성 문제와 이득이 증가함에 따라 설정 이득과 실제 이득의 편차가 커진다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 방법의 문제점이 Q-factor를 결정하는데 있다고 보고 각 대역뿐만 아니라 각 이득에 따라 Q-factor를 결정하는 기법을 제시한다. 기존의 기법에 비해 다양한 Q-factor가 적용되지만, 하드웨어 구현 시 계수를 저장한다고 할 때 대역 수에 따라 동일한 수의 계수가 요구되므로 제안한 기법의 하드웨어 복잡도는 기존의 기법과 동일하다.

제안한 방법에서 Q-factor는 모든 대역에 동일한 이득을 주었을 때 이득 리플이 가장 작고, 주파수 응답이 대칭적으로 표현될 수 있도록 결정하였다. 여기서 리플 이득은 첫 번째 대역의 중심 주파수에서 마지막

표 4. 제안한 기법의 중심주파수(Hz).

기법 \ Band	1	2	3	4	5
제안한 기법 1	111	333	1000	3000	9000
제안한 기법 2	39	158	632	2517	10023
제안한 기법 3	39	158	632	2495	8871

대역의 중심주파수까지의 주파수 영역에서 최대 이득과 최소 이득의 차이로 측정하였다.

Q-factor 결정 과정을 보다 상세히 설명하면 다음과 같다. 먼저, 1~3 대역에서는 어느 정도 대칭성이 유지되는 점을 고려하여, 주어진 이득에 대해 1~3 대역에서 최소의 이득 리플을 나타내는 Q-factor들을 얻는다. 그런 다음, 각 이득에서 4, 5 대역의 Q-factor들을 조정하여, 전체 이득 리플을 최소화시켰다.

IV. 실험 및 결과

4.1 실험 방법

본 논문에서는 48KHz로 표본화된 오디오 신호를 위한 5대역 이퀄라이저의 성능을 Matlab을 이용하여 평가하였다. 제안한 기법은 표 4에 제시한 바와 같이 중심주파수의 선정에 따라 3가지 기법으로 나누었다. 제안한 기법 1에서는 1KHz를 중심으로 3배 증가 혹은 1/3로 감소하는 주파수를 중심 주파수로 선정하고, 제안한 기법 2에서는 가청 주파수 대역 즉, 20~20000Hz를 로그 스케일(log-scale)로 나타내어 5등분한 중심주파수를 사용하였다. 실제 구현시 제안한 기법 2의 중심 주파수는 바이너리어 변환 후 고주파 부분이 wrapping 되어 나타나는데, 제안한 기법 3에서는 wrapping 된 중심주파수를 그대로 사용한 기법이다.

각 실험에서 Q-factor는 0.5~1.5 범위에서 0.05 단위로 변화시키면서 적합한 값을 선정하였다.

4.2 실험 결과

제안한 기법 1은 중심주파수를 표 4에 제시한 바와 같이 설정하였을 때 각 이득에 대해 최소의 이득 리플을 보이는 Q-factor를 표 5에 제시한 바와 같이 결정하였다. 이때, 그림 5와 같은 주파수 응답과 표 5의 이득 리플을 얻을 수가 있었다. 이를 참조하면, 제안한 기법은 기존의 기법에 비해 대칭성이 향상되고 이득 리플이 작아짐을 알 수 있다. 또한, 설정 이득과 실제 이득의 편차가 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 그러나 첫 번째 대역의 중심주파수가 111Hz로 다소 높아, 낮은 주파수 대역에서 주파수 응답이 제대로 나타나지 않는 것을 볼 수 있다.

제안한 기법 2에서는 중심 주파수를 표 4에 제시한

바와 같이 설정하였고, 최소의 이득 리플을 보이는 Q-factor를 표 5와 같이 결정하였다. 표 5에 제시한 바와 같이 제안한 기법 2는 제안한 기법 1에 비해 이득 리플이 작아졌다. 그리고, 그림 6에 제시한 제안한 기법 2의 주파수 응답을 그림 5와 비교하면, 설정 이득과 실제 이득의 차이가 줄었고, 실제 이득이 일정한 간격으로 조정될 뿐만 아니라 대칭성이 향상되었음을 알 수 있다. 이로부터 중심주파수를 가칭 주파수 영역에서 로그 스케일 측면에서 균일하게 배치하는 것이 Q-factor를 조정함으로써 높은 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

한편, 제안한 기법 3은 표 4의 중심주파수와 표 5의 Q-factor를 이용해서 그림 7의 주파수 응답을 얻을 수가 있었다. 표 5를 참조하면, 제안한 기법 3에서는 모든 대역에서 동일한 Q-factor를 적용하였는데, 이는 앞에서 설명했듯이 바이리니어 변환 후 중심주파수를 조정하지 않아 아날로그 필터의 특성이 보존되기 때문으로 판단된다. 따라서, 제안한 기법 3은 제안한 기법 1, 2에 비해 대칭성 및 이득 리플 측면에서 가장 우수한

표 5. 제안한 기법의 Q-factor 및 리플 이득.

①: 제안한 기법 1, ②: 제안한 기법 2, ③: 제안한 기법 3

band	1~3			4			5			리플이득(dB)		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
12	1.4	1.1	1.1	1.4	1.1	1.1	1.2	0.9	1.1	3.927	3.411	3.062
11	1.3	1.05	1.05	1.3	1.05	1.05	1.15	0.85	1.05	3.588	3.026	2.721
10	1.25	1.0	1.0	1.3	0.95	1.0	1.05	0.85	1.0	3.147	2.679	2.396
9	1.2	0.95	0.95	1.25	0.95	0.95	1.0	0.8	0.95	2.732	2.336	2.096
8	1.51	0.9	0.9	1.2	0.9	0.9	0.95	0.75	0.9	2.378	2.028	1.805
7	1.1	0.85	0.85	1.1	0.85	0.85	0.9	0.7	0.85	1.955	1.750	1.527
6	1.0	0.8	0.8	1.0	0.8	0.8	0.9	0.65	0.8	1.758	1.493	1.263
5	0.95	0.75	0.75	0.95	0.75	0.75	0.85	0.65	0.75	1.438	1.233	1.032
4	0.9	0.7	0.7	0.9	0.7	0.7	0.8	0.6	0.7	1.136	0.996	0.834
3	0.85	0.7	0.7	0.85	0.65	0.7	0.75	0.6	0.7	0.847	0.696	0.631
2	0.85	0.65	0.65	0.85	0.65	0.65	0.7	0.55	0.65	0.521	0.464	0.405
1	0.8	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.65	0.5	0.6	0.261	0.239	0.119
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0	0.0	0.0

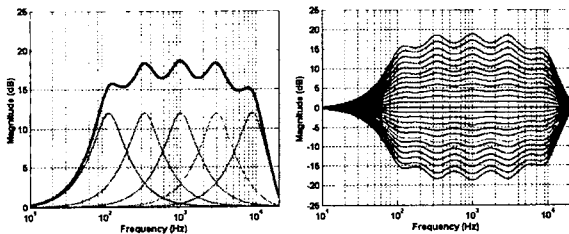
성능을 보인다. 그러나, 제안한 기법 3에서는 표본화율에 따라 중심주파수가 변한다는 점을 고려해야 한다.

V. 결론

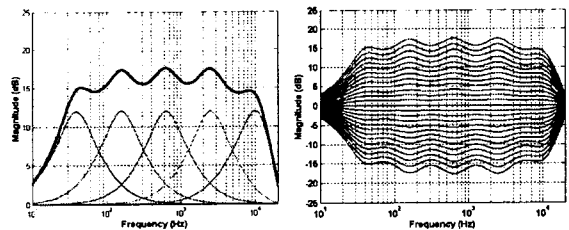
본 논문에서는 디지털 이퀄라이저에 대하여 검토하고, 대역 및 이득에 따라 Q-factor를 가변시키는 디지털 이퀄라이저 필터를 제안하였다. 제안한 기법은 고정된 Q-factor를 사용하거나, 대역에 따라 Q-factor를 결정하는 기존의 방법들에 비해 가칭 주파수 영역에서의 대칭성과 이득 리플 등의 측면에서 우수한 특성을 보임을 알 수 있었다. 또한, 중심 주파수를 가칭 주파수 영역에서 로그 스케일 측면에서 균일하게 배치함으로써, 보다 우수한 성능을 얻을 수 있음을 보였다. 그리고, 제안한 기법은 하드웨어 복잡도 측면에서 기존의 기법들과 동등한 수준임을 보였다.

참고문헌

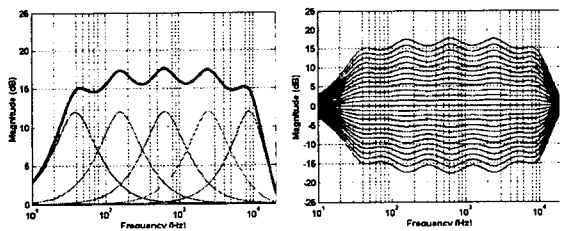
- [1] S.A. Azizi Sandler, "A New Concept of Interference Compensation for Parametric and Graphic Equalizer Banks," *111th AES Convention Preprint 5482*, Sep. 2001.
- [2] D.Bohn, "Constant-Q Graphic Equalizers," *Audio Eng. Soc.*, vol.34, Sep. 1986.
- [3] B.Carter, "An audio circuit collection Part3," *Analog application Journal*, Texas Instruments July, 2001.
- [4] STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES, data sheet, "Five bands digital controlled graphic equalizer," Nov, 1999.
- [5] Release Notes for Release 13, MathWorks.



(a) all 12dB (b) $\pm 12\text{dB per 1dB}$
그림 5. 제안한 기법 1의 주파수 응답.



(a) all 12dB (b) $\pm 12\text{dB per 1dB}$
그림 6. 제안한 기법 2의 주파수 응답.



(a) all 12dB (b) $\pm 12\text{dB per 1dB}$
그림 7. 제안한 기법 3의 주파수 응답.