

Chebyshev BPF와 종속 Chebyshev BPF의 리플-천이대역 Trade-offs

Trade-offs Between the Ripple and the Transition Band for the Chebyshev BPF and the Cascading Chebyshev BPF

신 승 식* · 유 치 형*
(Seung-Sik Shin · Chi-hyung You)

Abstract - This study is focusing on the trade-offs between the passband ripples and transition bands of the Chebyshev BPF, which is converted by using the Chebyshev LPF that is well known as a proto-type analog filter. It is also focusing on the trade-offs between the passband ripples and transition bands of the cascading Chebyshev BPF, as well as, the trade-offs between the two BPFs. The study finds the frequency responses of the proto-type analog LPF, the Chebyshev BPF and the cascading Chebyshev BPF. The study shows the results as comparative analysis tables. The study designs the 10th Chebyshev BPF in order to analyze it easily. The simulation results show that the Chebyshev BPF decreases about 55% of the transition band for the -2.5 [dB] passband ripple comparing to the -0.5 [dB] passband ripple. This study shows the effectiveness and economic feasibility in the restricted frequency communication environment for the decrease of the transition band as providing the passband ripple margin.

Key Words : Ripple and transition band trade-off, Cascading filter, Chebyshev filter, Butterworth filter

1. 서 론

요즘 우리가 사용하고 있는 휴대폰이나 디지털 TV, DVD 등 수 많은 전기전자통신 기기는 음성 데이터와 영상 데이터와 같은 멀티미디어 신호를 처리하기 위하여 DSP(Digital Signal Processing) 기술을 사용한다. 또한 DSP 기술의 핵심인 디지털 필터는 필수적으로 사용되고 있다. 이러한 디지털 멀티미디어 장치들은 소비전력을 최소화하기 위하여 저전압에서 동작하도록 개발되고 있으며 음성 및 영상 데이터 신호를 처리하기 위한 증폭기는 입력 신호로써 진폭(V_{p-p})이 1[V] 이하에서 구동되고 있다. 또한 신호를 변복조하여 송수신할 때 중계시스템에 수신되는 신호는 매우 미약한 신호가 되기 때문에 이에 상응하는 필터는 리플에 대한 영향을 고려해야 한다. 아울러 특정 주파수만을 통과시켜주는 BPF에 있어서 차단특성은 대역폭과 함께 필터 스펙에 있어서 매우 중요한 요소이다. 그래서 통과대역에서는 등맥동의 리플을 가지고 있으며 급준한 차단특성을 갖는 Chebyshev 필터에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 필터를 종속 결합하여 리플을 저감시키고 차단특성은 Butterworth 필터보다 급준한 종속필터에 관해서도 연구되고 있다[1~4]. 그러나 이러한 연구들은 리플저감(ripple cancellation), 안정성(stability), skirt 특성에 관한 연구에 국한되어 있어서, 본 논문에서는 이와는 다르게 통

과대역의 리플 변화에 따른 차단영역의 변화, 즉 리플과 차단영역의 trade-off에 관하여 논하자 한다.

2. 이론적 고찰

필터는 저역, 고역, 그리고 대역통과필터 등이 있지만 저역통과 필터를 주파수 변환하여 다른 필터로 설계할 수가 있다. 따라서 필터를 설계할 때는 개별적으로 필터를 설계하는 것이 아니고 먼저 기본이 되는 저역통과필터, 즉 프로토타입 필터(prototype filter)를 설계하는 것이 바람직하다[4~5]. 프로토타입 필터의 대표적인 것으로 버터워스 저역 통과 필터(Butterworth Low frequency Pass Filter), 체비세프 저역 통과 필터(Chebyshev Low frequency Pass Filter), 그리고 베셀 저역 통과 필터(Bessel Low frequency Pass Filter) 등이 있으며 베셀 필터는 위상특성에 역점을 둔 필터로서 본 절에서는 버터워스와 체비세프 필터를 비교한다. 또한 BPF로 주파수 변환할 때 FIR 필터가 IIR 필터와 비슷한 진폭특성을 얻으려면 차수가 매우 커지게 되어 지연레지스터, 가산기, 승산기 등 하드웨어적으로 부담을 주며 느리게 수행되고, 주파수 응답에서는 FIR필터의 진폭특성이 우대칭인 경우와 비대칭인 경우 등에 따라 설계 불가능한 필터가 존재하므로 본 논문에서는 IIR필터로 설계를 한다.

2.1 Prototype Analog Butterworth LPF

최대평탄(maximally flat) 특성을 갖는 Prototype Analog

† Corresponding Author : Dept. of Electric Engineering, DongYang Mirae Univ., Korea
E-mail: manmind@dongyang.ac.kr

* Dept. of Electric Engineering, DongYang Mirae Univ., Korea
Received : September 20, 2017; Accepted : January 19, 2018

Butterworth LPF 주파수 진폭 특성은 식 (1.1)과 같다[4~11].

$$|H_N(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_c})^{2N}}} \quad (1.1)$$

식 (1.1)로부터 직류($\omega = 0$)이득은 1이고 0[dB]이며, $|H_N(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 이 되는 주파수 즉 $\frac{\omega}{\omega_c} = 1$ 로 되는 주파수 $\omega = \omega_c$ 를 차단주파수라 한다. $\omega = \infty$ 이면 $|H_N(j\omega)| = 0$ 이고, ω 가 커지면 단조로운 감소특성을 보이고 작아지면 0dB에 가까워지며, 그림 2.1과 같이 차수 N에 따라 통과 대역에서의 진폭특성이 차수 N이 커질수록 이상적인 최대 평탄특성과 비교적 급준한 차단 특성을 갖는다.

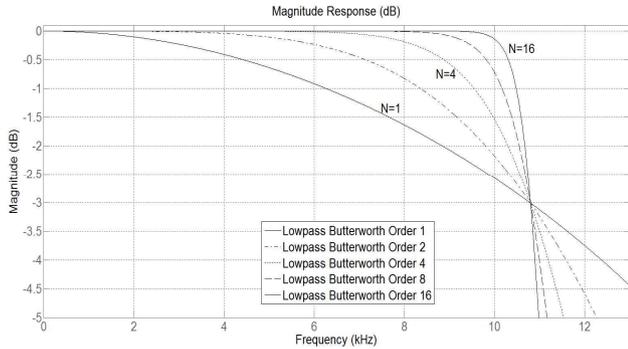


그림 2.1 Prototype Analog Butterworth LPF의 주파수 응답
Fig. 2.1 The frequency response of Prototype Analog Butterworth LPF

그림 2.1에서 차단주파수는 통과대역 전력의 1/2, 즉 3[dB] 감쇠인 10.8[kHz]로 설정하였으며 샘플링 주파수는 48[kHz]로 하였다.

2.2 Prototype Analog Chebyshev LPF

일반적으로 Butterworth 필터는 통과대역에서 리플이 없지만 체비세프 필터는 등맥동(equiripple)의 리플이 존재한다. 급준한 skirt 경사 특성을 갖는 Prototype Analog Chebyshev LPF의 주파수 응답 식은 식 (1.2)와 같다[4~12].

$$|H_N(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 C_N^2(\frac{\omega}{\omega_c})}} \quad (1.2)$$

여기서 ϵ 은 통과대역의 리플조절 매개변수(regulating parameter)이고 C_N 은 Chebyshev 다항식이다. $\frac{\omega}{\omega_c}$ 을 1로 정규화(normalizing)하여 ω 로 표시하면 다항식 C_N 은 식 (1.3)과 같다[1~6].

- 통과대역 ($|\omega| \leq 1$) : $C_N(\omega) = \cos(N\cos^{-1}\omega)$ (1.3)
- 저지대역 ($|\omega| > 1$) : $C_N(\omega) = \cosh(N\cosh^{-1}\omega)$

통과대역 리플(passband ripple)을 $A_p = 1$ [dB]로 놓으면 통과대역 리플조절 매개변수(regulating parameter) ϵ 은 식 (1.4)와 같이 구해진다[3].

$$\epsilon = \sqrt{10^{\frac{A_p}{10}} - 1} \approx 0.5088 \quad (1.4)$$

통과대역 리플 $A_p = 1$ [dB], 통과대역 주파수는 9.8[kHz], 샘플링 주파수는 48[kHz]로 하였을 때의 체비세프의 주파수에 대한 진폭특성은 그림 2.2와 같다. 필터의 차수 N이 커질수록 급준한 skirt 특성을 가지며 통과대역에서 등맥동한다.

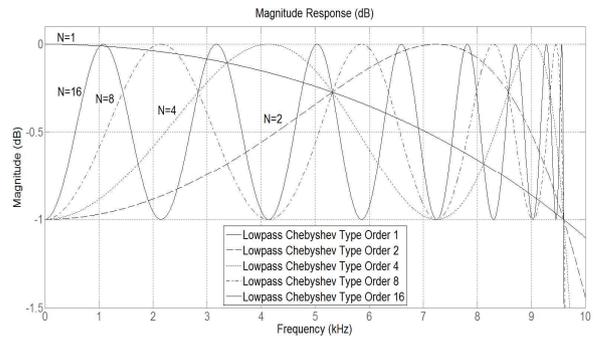


그림 2.2 Prototype Analog Chebyshev LPF의 주파수 응답
Fig. 2.2 The frequency response of Prototype Analog Chebyshev LPF

2.3 Frequency Transformation

prototype analog LPF를 BPF로 주파수 변환하기 위해서는 먼저 원하는 디지털 필터의 스펙으로부터 prototype analog LPF를 유도하고, 유도한 LPF를 원하는 특성의 필터, 즉 BPF나 HPF 등으로 변환시킨다. 본 논문에서 원하는 필터 특성은 BPF이므로 BPF의 하한 주파수(lower edge frequency) ω_L 과 상한 주파수 ω_H 를 결정하여 저역 필터의 전달함수 H(s)에 식 (1.5)를 대입하여 BPF의 전달함수를 구한다[4] [6~9].

$$s = \frac{s^2 + \omega_c^2}{Bs} \quad (1.5)$$

여기서, ω_c 는 중심주파수이며 $\omega_c^2 = \omega_1 \cdot \omega_2$ 이고, B 는 대역폭이며 $B = \omega_2 - \omega_1$ 이다.

식 (1.5)에 의해 구한 BPF의 전달함수 H(s)를 식 (1.6)의 쌍선형 z변환(bilinear z transform)을 적용하여 디지털 IIR 필터 전달함수 H(z)을 구한다.

$$s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (1.6)$$

식 (1.6)에 의해 쌍선형 변환을 하면 주파수 응답의 왜곡현상이 발생하는데 이를 보상하기 위해, 즉 아날로그 주파수 응답과 디지털 주파수 응답이 원하는 주파수 범위에서 매우 비슷해지도록 하기 위해 미리 식 (1.7)을 대입하여 프리워핑(rewarping)시킨다[4][9~10].

$$\omega_c' = \frac{2}{T} \tan^{-1}\left(\frac{\omega_c T}{2}\right) \quad (1.7)$$

여기서 ω_c' 는 디지털 임계 주파수이며, ω_c 는 아날로그 임계주파수이다.

prototype analog LPF의 중심주파수 ω_c 를 식 (1.7)에 대입하여 프리워핑한 후 식 (1.5)에 대입하여 BPF로 주파수 변환하고, 마지막으로 쌍선형 변환 식(1.6)에 대입함으로써 디지털 IIR 필터의 전달함수 $H(z)$ 을 구할 수 있다[2][4~6]. 주파수 변환된 BPF의 주파수 응답을 그림 2.3과 그림 2.4에 나타내었다.

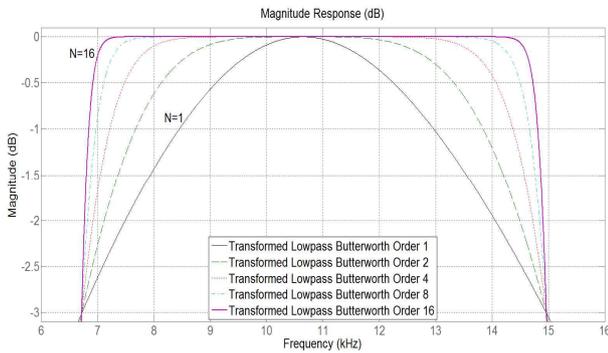


그림 2.3 주파수 변환된 BPF로의 주파수 응답(Prototype Analog Butterworth LPF)

Fig. 2.3 The frequency response of Prototype Analog Butterworth LPF transformed to BPF

그림 2.3은 Prototype Analog Butterworth LPF를 BPF로 주파수 변환한 BPF의 주파수 응답이며, 그림 2.4는 Prototype Analog Chebyshev LPF를 BPF로 주파수 변환한 주파수 응답이다.

주파수 변환된 BPF는 Prototype LPF의 차수보다 식 (1.5)에 의해 2배가 되는데[4], 그림 2.4의 굵은 실선은 주파수 변환된 Chebyshev BPF로서 1차의 Prototype Chebyshev LPF를 BPF로 주파수 변환하여 차수는 2차가 된다. 그림 2.4는 주파수 변환된 BPF의 차수와 리플의 수가 동일함을 보여주고 있다.

2.4 Cascade of Transformed Lowpass Chebyshev

중속필터의 원리를 설명하기 위하여 그림 2.5에 중속 Chebyshev BPF의 상쇄 개념도를 예로 보았다. 그림에서 보는

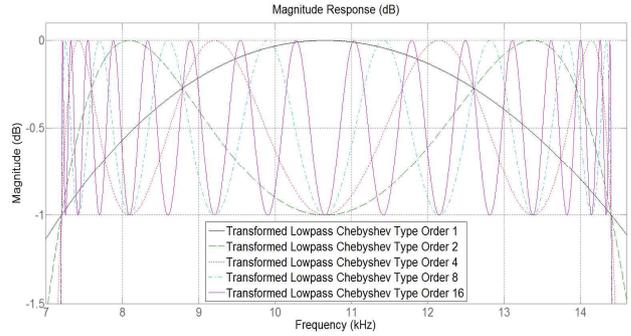


그림 2.4 주파수 변환된 BPF로의 주파수 응답(Prototype Analog Chebyshev LPF)

Fig. 2.4 The frequency response of Prototype Analog Chebyshev LPF transformed to BPF

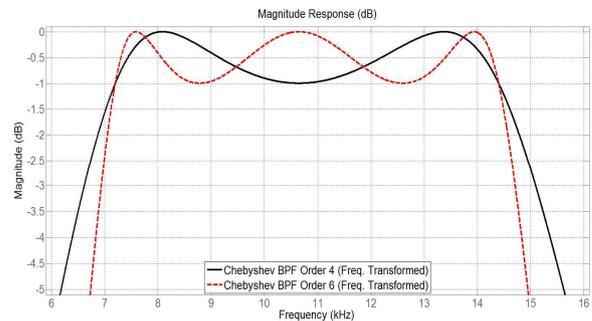


그림 2.5 중속 Chebyshev BPF의 리플 상쇄 개념 예

Fig. 2.5 The fundamental concept of ripple cancellation in the cascading Chebyshev BPF

바와 같이 중속필터의 리플상쇄 원리는 2개의 Chebyshev BPF에서 한 필터의 리플 감쇠주기가 상승일 때 다른 필터의 리플감쇠주기를 하강이 되도록 맞추고, 반대로 하강일 때는 상승이 되도록 맞추도록 하여 서로 상쇄되게 하는 것이다. 그림 2.5에서 검정색 실선은 Chebyshev 4차 BPF의 주파수 응답이고 빨간색 점선은 Chebyshev 6차 BPF의 주파수 응답이다. 4차 BPF와 6차 BPF를 중속 연결하면 리플이 상쇄되어 Butterworth 필터의 장점인 통과대역의 평탄성을 얻을 수 있고 Chebyshev 필터의 장점인 급준한 skirt 특성도 얻을 수 있다. 이러한 최적의 리플 상쇄를 이루기 위해서는 중속필터의 차수가 서로 2차의 차이가 나야 한다[1].

2.5 Definition of passband and transition band in Chebyshev BPF

Chebyshev BPF의 통과대역과 천이대역을 정의하기 위하여 통과대역 리플감쇠 A_{pass} 을 -1 [dB], 저지대역 크기(Magnitude) 감쇠 A_{stop} 을 -10 [dB]로 설계하여 그림 2.6에 나타낸다.

그림 2.6에 보인 것처럼 체비셰프 BPF에서의 통과대역은 주파

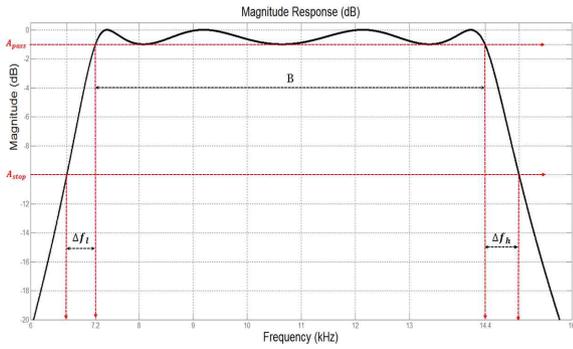


그림 2.6 Chebyshev BPF에서 통과대역과 천이영역 정의를 위한 도시에
 Fig. 2.6 The example of the pass band and transition band in Chebyshev BPF

수 크기응답(Magnitude Response)이 0[dB]에서 통과대역 리플 감쇠 A_{pass} [dB] 사이의 값을 갖는 주파수 대역을 의미한다. 즉 통과대역은 차단주파수의 하한값 (f_d)에서 상한값(f_{ch})까지의 대역이다. 통과대역은 필터의 대역폭(Band width)에 해당하므로 B로 표기하였다. 그리고 천이대역은 통과대역 리플감쇠 A_{pass} 보다 작은 값을 갖는 주파수부터 저지대역(stop band) 감쇠 A_{stop} 까지의 주파수 대역을 의미한다. 천이대역은 하한 천이대역과 상한 천이대역으로 구분할 수 있는데, 하한 천이대역은 Δf_l 로 표기하고 상한 천이대역은 Δf_h 로 표기한다. 하한 천이대역 Δf_l 는 저지대역 하한주파수(f_{sl})와 차단주파수 하한값(f_d) 사이의 주파수 대역 즉 $f_{sl} \leq \Delta f_l \leq f_d$ 이며, 상한 천이대역 Δf_h 는 차단주파수 상한값(f_{ch})과 저지대역 상한주파수(f_{sh}) 사이의 대역, $f_{ch} \leq \Delta f_h \leq f_{sh}$ 이다.

3. Chebyshev BPF와 종속 Chebyshev BPF의 trade-off 분석

Chebyshev 필터와 종속필터(cascading filter)의 리플 저감(ripple cancellation)과 안정성(stability), skirt 특성 등에 관한 연구는 많이 진행되어 있다[1~4]. 그러나 통과대역의 리플감쇠 A_{pass} 와 급격한 경사의 차단 특성에 관한 비교 논문은 다루어지지 않았다. 그래서 이와는 다르게 본 논문에서 리플감쇠 A_{pass} 의 변화에 따른 BPF의 skirt 특성 변화를 분석한다. 시스템에서 원하는 필터의 스펙에 따라 다르지만, 본 논문에서는 10차 Chebyshev BPF를 모델로 삼아 trade-off 관계를 분석할 것이다. 이를 위해 Prototype LPF의 통과대역 리플감쇠 A_{pass} 를 0.5[dB], 1[dB], 1.5[dB], 2[dB], 2.5[dB]의 5개 샘플과 저지대역 감쇠 A_{stop} 10[dB]로 설계한다. 또한 모두 감쇠이기 때문에 편의상 부(-)부호는 생략한다. 4차의 Chebyshev BPF와 6차의 Chebyshev BPF를 종속하면 10차의 종속 Chebyshev BPF가 되

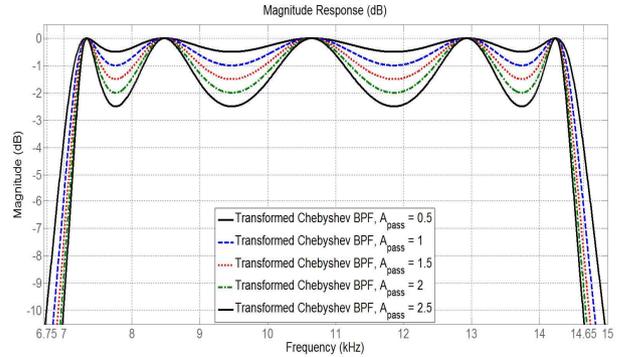


그림 3.1 10차 Chebyshev BPF의 통과대역 리플감쇠의 변화에 따른 천이대역의 trade-off
 Fig. 3.1 The trade-off in the pass band of the Chebyshev 10th BPF

기 때문에 10차의 Chebyshev BPF를 설계하여 두 BPF의 차수를 동일하게 맞추어 trade-off 관계를 분석한다.

3.1 10차 Chebyshev BPF의 Trade-off 분석

10차 Chebyshev BPF의 리플감쇠에 따른 천이대역의 trade-off 관계를 그림 3.2에 나타낸다. 10차 Chebyshev BPF는 Prototype Chebyshev LPF의 차수를 5차로 설계하고 이것을 주파수 변환하여 10차의 BPF로 설계한 것이다.

통과대역의 리플 A_{pass} 를 작게 설정하면 skirt 특성이 완만하게 되어 천이대역이 넓어지고, 리플 A_{pass} 를 크게 설정하면 급격한 경사의 skirt 특성을 갖는다. 따라서 설계하고자 하는 필터의 스펙 범위에서 통과대역 리플 A_{pass} 를 크게 잡을수록 천이대역폭이 줄어들게 되어 가용할 수 있는 주파수 대역이 넓어진다. 통과대역 리플 A_{pass} 에 따른 자세한 실험값을 표 3.1에 정리한다.

표 3.1 Chebyshev BPF의 통과대역 리플감쇠에 따른 천이대역폭 trade-off

Table 3.1 The trade-off in the pass band of Chebyshev BPF

A_{pass} [dB]		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
하한 천이대역 Δf_l [kHz]	f_{sl}	6.748	6.86	6.922	6.964	6.997
	f_d	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
	천이대역폭	0.452	0.34	0.278	0.236	0.203
상한 천이대역 Δf_h [kHz]	f_{ch}	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4
	f_{sh}	14.937	14.803	14.729	14.679	14.64
	천이대역폭	0.537	0.403	0.329	0.279	0.24

표 3.1에 보인 바와 같이 통과대역 리플감쇠 A_{pass} 를 변화시키면 천이대역폭도 변화가 된다. 즉 필터의 스펙에서 리플감쇠

A_{pass} 를 2.5[dB]의 여유도를 가질 경우 천이대역폭은 55% 이상 감쇠시킬 수 있어 통신대역을 효율적으로 이용할 수가 있어 경제적이다.

3.2 10차 종속 Chebyshev BPF의 Trade-off 분석

10차 종속 Chebyshev BPF는 4차 Chebyshev BPF와 6차 Chebyshev BPF를 종속 결합한 필터이다. 10차 종속 Chebyshev BPF의 리플감쇠에 따른 천이대역의 trade-off 관계를 그림 3.2에 나타낸다.

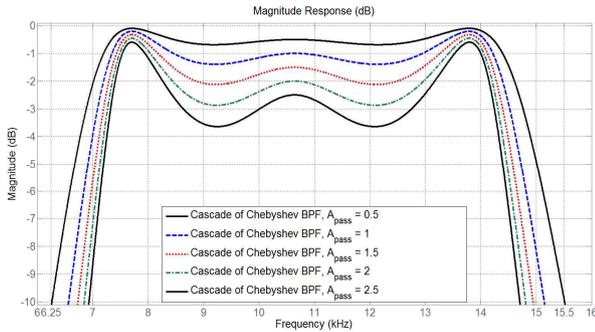


그림 3.2 10차 종속 Chebyshev BPF의 통과대역 리플감쇠의 변화에 따른 천이대역의 trade-off

Fig. 3.2 The trade-off in the pass band of the cascading Chebyshev 10th BPF

리플감쇠가 0.5[dB], 1[dB], 1.5[dB], 2[dB], 2.5[dB]에 대해 천이대역폭에 변동이 있으며 리플감쇠의 여유도가 2.5[dB] 정도로 클수록 천이대역폭은 크게 감소하여 급격한 경사의 skirt 특성을 가진다. 통과대역 리플 A_{pass} 에 따른 천이대역폭의 trade-off 관계를 정리하면 표 3.2와 같다.

표 3.2 종속 Chebyshev BPF의 통과대역 리플감쇠에 따른 천이대역폭 trade-off

Table 3.2 The trade-off in the pass band of cascading Chebyshev BPF

A_{pass} [dB]		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
하한 천이대역	f_{sl}	6.28	6.57	6.738	6.856	6.943
	f_d	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
Δf_i [kHz]	천이대역폭	0.92	0.63	0.462	0.344	0.257
	상한 천이대역	f_{ch}	14.4	14.4	14.4	14.4
Δf_h [kHz]	f_{sh}	15.51	15.14	14.95	14.81	14.71
	천이대역폭	1.11	0.74	0.55	0.41	0.31

표 3.2에서 하한 차단주파수(f_d)는 7.2[kHz], 상한 차단주파수(f_{ch})는 14.4[kHz]로서 Chebyshev BPF와 동일한 7.2[kHz]의 통

과대역을 가진다. 표에서 확인할 수 있듯이 종속 Chebyshev BPF는 Chebyshev BPF보다 리플감쇠 변화분에 대해 더 큰 천이대역 변동폭을 가지며, 수치적으로 자세하게 비교하면 통과대역 리플감쇠 $A_{pass} = 0.5$ [dB]일 때의 하한 천이대역폭 0.92[kHz]는 2.5[dB]일 때의 천이대역폭 0.257[kHz]에 비해 약 3.58배의 주파수 대역을 차지하게 되고, 약 72%의 주파수를 절약할 수 있다. 그러므로 필터의 리플감쇠에 여유를 가진다면 주파수 측면에서 볼 때 보다 효율적으로 주파수를 사용할 수 있고 따라서 통신 효율을 높일 수 있다.

3.3 Chebyshev BPF와 종속 Chebyshev BPF의 Trade-off 분석

10차 Chebyshev BPF와 10차 종속 Chebyshev BPF를 비교하기 위하여 통과대역 리플감쇠 A_{pass} 를 0.5[dB]와 2.5[dB]로 설계하여 주파수 응답을 나타내면 그림 3.3과 같다. 이전의 실험과 동일하게 통과대역은 7.2[kHz]에서 14.4[kHz]로서 대역폭은 7.2[kHz]이다.

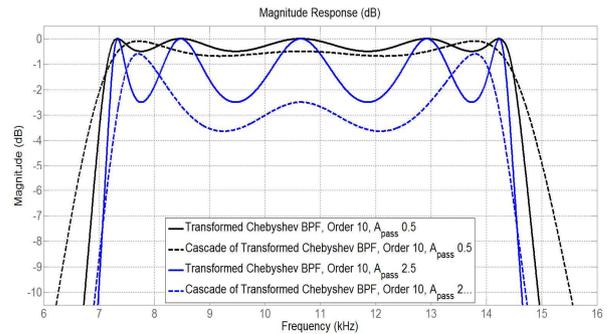


그림 3.3 10차 Chebyshev BPF와 종속 Chebyshev BPF의 통과대역 리플감쇠의 변화에 따른 천이대역의 trade-off

Fig. 3.3 The trade-offs in transition band of the Chebyshev 10th BPF and the cascading Chebyshev 10th BPF

표 3.3 리플감쇠 0.5[dB]에 대한 Chebyshev BPF와 종속 Chebyshev BPF의 천이대역폭 trade-off

Table 3.3 The trade-off in transition band of the Chebyshev BPF and the cascading Chebyshev

구분		Chebyshev BPF A_{pass} [dB]		종속 Chebyshev BPF A_{pass} [dB]	
		0.5	2.5	0.5	2.5
하한 천이대역	f_{sl}	6.748	6.997	6.28	6.943
	f_d	7.2	7.2	7.2	7.2
Δf_i [kHz]	천이대역폭	0.452	0.203	0.92	0.257
	상한 천이대역	f_{ch}	14.4	14.4	14.4
Δf_h [kHz]	f_{sh}	14.937	14.64	15.51	14.71
	천이대역폭	0.537	0.24	1.11	0.31

그림 3.3에서 검정색은 통과대역 리플감쇠가 $A_{pass} = 0.5$ [dB] 이고 파란색은 $A_{pass} = 2.5$ [dB]이다. 그림 3.3의 데이터를 통과대역 리플감쇠 변화에 대한 천이대역 trade-off 관계로 구분, 분석하여 표 3.3에 나타내었다.

표 3.3에서 알 수 있듯이 Chebyshev BPF의 통과대역 리플감쇠를 0.5[dB]에서 2.5[dB]로 허용 가능하다면 하한 천이대역폭과 상한 천이대역폭은 약 55% 감소시킬 수 있고, 종속 Chebyshev BPF는 약 72%를 감소시킬 수 있어 주파수를 절약할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 10차 Chebyshev BPF와 종속 Chebyshev BPF의 통과대역 리플감쇠 여유도에 따른 천이대역의 trade-off 관계를 비교, 분석하였다. 통과대역 리플감쇠의 크기를 0.5[dB], 1.0[dB], 1.5[dB], 2.0[dB], 2.5[dB]로 변화를 주고 이에 따른 필터의 천이대역폭을 비교하였다. 실험을 위해서 Proto-type Chebyshev LPF를 설계하고, 주파수 변환하여 Chebyshev BPF를 얻었으며, 이를 종속 결합한 종속 Chebyshev BPF를 설계하여 주파수 응답을 구하였다. 또한 실험 결과를 그림으로 나타내고 분석한 결과를 정리하여 표로 제시하였다. 결과적으로 리플감쇠가 클 경우 천이대역폭이 줄어들어 제한적인 주파수를 절약할 수 있으며 통신 효율을 극대화할 수 있을 것이라 사료된다.

References

[1] Doo-Byung Kang, Seung-Sik Shin, "A study on the Cascading Chebyshev Filter for Ripple Cancellation," THE TRANSACTIONS OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, vol. 61, no. 1, Nov. 2012

[2] Seung-Sik Shin, "A study on the ripple cancellation using two cascading Chebyshev filters," THE TRANSACTIONS OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, vol. 61, no. 11, Nov. 2012

[3] Jung-Hwan Kim, Seung-Sik Shin, "A study on the performance of the Stable Cascading BPF," THE TRANSACTIONS OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, vol. 62, no. 12, Nov. 2013

[4] Seung-Sik Shin, "A comparison of the cascading Chebyshev BPF's skirt characteristic and the same order BPF's," THE TRANSACTIONS OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, vol. 64, no. 4, Apr. 2015

[5] LeeChaeWook, Digital Signal Processing & Filter Design, BooksHill, 2008

[6] John G. Proakis, Dimitris, G. Manolakis, Digital Signal Processing, Prentice Hall Inc., 2006.

[7] Phillips/Nagle, Digital control system analysis and design, Prentice-Hall, 1995.

[8] Vinay K. INGLE, John G. Proakis, Digital Signal Processing

using MATLAB 2/E, Thomson, 2007.

[9] Lynn Paul A., Fuerst W, Introductory Digital Signal Processing 2/E, Wiley, 2008.

[10] Ivan W. Selesnick and C. Sidney Burrus, "Generalized Digital Butterworth Filter Design," IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, vol. 46, no. 6, JUNE 1998

[11] David Bsiez-Lcipez and Victor Jimknez-Fernindez, "Modified Chebyshev Filter Design," IEEE, pp. 642-646, 2000

[12] Rong Ye, Qing-Zin Chu, "Extraction of Finite Transmission Zero of General Chebyshev Filter," IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, pp.272-274, 2004 4th.

저 자 소 개



신 승 식((Seung-Sik Shin)

1997년 2월 송실대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학석사). 2004년 8월 송실대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학박사). 2000~2004년 인덕대학교 겸임교수. 2004~2009년 서일대학교 겸임교수. 2009년~현재 동양미래대학교 전기공학과 조교수



유 치 형 (Chi-hyung You)

1991년 2월 송실대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학석사). 1998년 2월 송실대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학박사). 2012~현재 동양미래대학교 전기공학과 겸임교수. 2016년 1월~2016년 12월 송실사이버대학교 특임교수