

평탄한 통과 대역과 급격한 경사도를 위한 대역통과필터 설계에 관한 연구

강두병*, 김성진*, 황정호*, 정찬수**
 송실대학교, 전기공학과

Design of bandpass filter for flat passband and sharp steepness

Doo-Byung Kang*, Seong-Jin Kim*, Chung-Ho Hwang*, Chan-Soo Chung**
 Soong-Sil University*, Soong-Sil University**

Abstract - 무선통신 시스템의 소형화와 저가격, 고품질, 다기능 재료 및 첨단 가공 기술과 연계된 필터설계 및 제작 기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 그러나 무선통신 시스템은 주파수라는 한정된 자원을 사용하기 때문에 주파수 자원의 효율적 관리를 위한 규제나 방안이 필요하고, 이에 따라서 여러 가지 대책과 방안이 필요로 하고 있다. 그래서 필터의 성능개선을 위한 연구가 본질 적으로 중요하게 되었다. 본 논문은 체비셰프(Chebyshev)필터와 버터워스(Butterworth)필터를 이용한 대역통과(band pass) 필터를 제안한다. 이 필터는 안정화된 통과대역과 빠른 주파수 응답을 얻기위해 6차 체비셰프필터와 8차 버터워스필터를 결합 하였다. 측정된 대역통과 필터는, 차단 영역을 구분하는 스킨트(skirt)특성은 날카롭게(sharp) 되었고 통과대역의 평탄도 또한 개선되어 짐을 볼 수 있다. 제안된 필터의 중심주파수는 2.5GHz, 대역폭은 200MHz이고, 대역내 평탄도는 0.5dB, 경사도는 오차가 60dB일때 체비셰프는 210MHz, 버터워스는 340MHz, 체비셰프-버터워스는 290MHz가 되어 버터워스 보다 좋게 되었으며 극점의 배치도 안정적인 결과를 얻었다.

1. 서 론

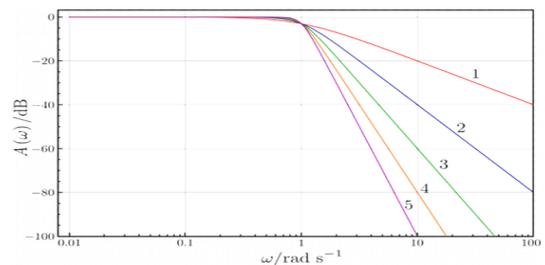
최근 정보 통신 분야의 기술적인 발달과 수요가 폭발적으로 증가함에 따라 무선 통신 시스템 시장은 그 규모가 급격히 커지고, 매우 빠른 속도로 확대 되고 있다. 무선통신 서비스 시장에서의 기술 선점을 통한 국가 경쟁력의 제고를 위해서는 초고주파대 무선 부품 기술 분야의 원천 기술과 응용 기술의 선형 개발이 지속적으로 이루어 져야 한다. 통신 시스템의 수요가 마이크로파 및 밀리미터파 대역으로까지 요구됨에 따라 더욱 기술 적인 요구가 강해지고 있다. 이런 경향 가운데 이동통신 시스템에서 대역통과 필터는 중요한 역할을 한다. 대역통과 필터는 원하는 주파수 범위를 선택적으로 구분하는 것이다. 대표적으로 쓰이는 필터는 체비셰프 필터와 버터워스 필터가 있다. 체비셰프 필터는 차단영역의 특성을 나타내는 스킨트(skirt)특성이 좋은 대신 통과대역에서 리플(ripple)이 있으며, 스킨트 특성이 좋아질수록 리플의 크기는 점점 더 커지는 단점이 있다. 반면에 버터워스 필터는 통과대역에 리플이 없이 평평한 특성을 보이지만 스킨트 특성이 좋지 않다는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 두가지 필터들의 단점을 보완 하고자 두 가지 필터의 장점을 결합하여 통과대역은 평평하고, 스킨트 특성은 좋은 필터를 설계 하였다. 혼합 필터는 8차 체비셰프 필터와 6차 버터워스 필터를 합성으로 설계하여 통과대역의 평탄도 특성과 스킨트 특성이 개선됨을 확인 하였고 극점의 위치 또한 안정함을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 버터워스 필터(Butterworth filter)

버터워스 필터는 통과대역에서 리플을 발생 시키지 않는 최대 평탄(Maximally flat) 형태의 필터이며, 나머지 대역의 원하지 않는 주파수는 감쇠시키는 특성이 있다.[1] 위상 응답은 주파수에 따라 비선형으로 변하지만 이득은 통과 대역의 모든 주파수에서 동일하다. 또한 최대평탄한 장점을 갖는것에 비해 스킨트(skirt) 특성은 좋지 못하다는 단점이 있다.[5][10] 식(1)은 버터워스 필터의 크기(Magnitude)특성방정식 이고, 버터워스 저역통과 필터를 차수(n=1,2,3,4,5)에 따라 나타낸 [그림1]에서 보여지듯이 통과대역이 평탄한 것을 볼 수 있다.[2]

$$|H_B(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1+\epsilon^2\omega^{2n}}} \quad n = 1, 2, 3 \dots \dots \quad (1)$$

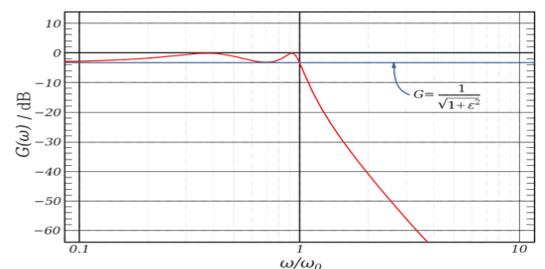


<그림1> 버터워스 저역통과 필터

2.2 체비셰프 필터(Chebyshev filter)

체비셰프 필터와 버터워스 필터와의 차이점은 $f(\omega^2) = C_n^2(\omega)$ 로 한다는 것인데, 체비셰프 다항식 $C_n(\omega)$ 는 그 근이 통과대역(passband)에 퍼져 있어 $|H(j\omega)|=1$ 이 되는 점이 통과대역에 여러 군데 있다. 그 결과, 버터워스 필터는 차단영역에서 완만한 특성, 즉 스킨트 특성이 좋지않은 것과 다르게 체비셰프 필터는 저지역에서의 경사가 날카로운 특성을 가지고 있다.[1][5] 식(2)는 체비셰프 필터의 특성방정식을 나타내고 [그림 2]는 통과대역에 리플이 생기고 있는 체비셰프 저역통과 필터를 나타내었다.[2][4]

$$|H_c(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1+\epsilon^2 C_n^2(\omega)}} \quad (2)$$



<그림 2> 체비셰프 저역통과 필터

2.3 체비셰프-버터워스 혼합 필터 (Transitional Butterworth-Chebyshev filter)

버터워스는 $\omega=0$ 에서 최대평탄(Maximallyflat)한 특성을 가지고 체비셰프는 $\omega=\omega_c$, 즉 선택주파수 근방과 $\omega \gg 1$ 인 영역, 다시말해서 저지역(cut-off frequency)에서의 감쇠율이 큰 특성을 가진다. 한편 위상특성으로 평가할 때는 버터워스가 통과대역에서 선형성을 더 가지게 되므로 비교적 우수하다고 할 수 있다. 이러한 장단점을 고려할 때, 두 근사법을 적당히 혼합하면 두가지의 장점을 동시에 나타나게 할 수 있다. 식(3)에서 체비셰프와 버터워스가 혼합된 식을 보여준다.[1][4][5]

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+\epsilon^2\omega^{2k} C_{n-k}^2(\omega)}} \quad (3)$$

k=0에 가까울 수록 Chebyshev 특성이 우수하고 k가 n에 가까울 수록 버터워스 특성이 뚜렷해 진다.

$$C_{n-k}^2(\omega) = \begin{cases} 1 + a_2\omega^2 + a_4\omega^4 + \dots & n-k \text{가 짝수} \\ b_2\omega^2 + b_4\omega^4 + b_6\omega^6 + \dots & n-k \text{가 홀수} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, k가 클수록 평탄도가 높아지는 것이고 k가 작을수록 경사도(steeptness)가 커지는 것이다. 경사도를 찾기 위한 식은 미분하여서 나타낸다.

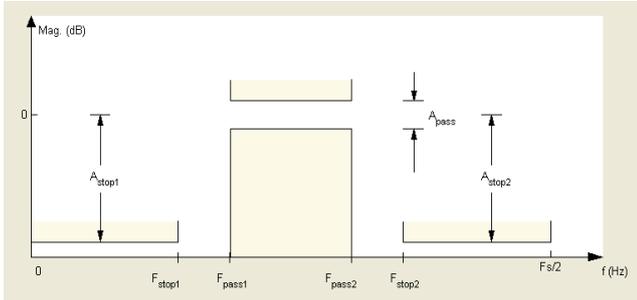
$$\frac{dH(j\omega)}{d\omega} \Big|_{\omega=1} = -\frac{\varepsilon^2}{(1+\varepsilon^2)^2} \frac{3}{2} [(n-k)^2 + k] \quad (5)$$

또한, 저지역(cut-off frequency)에서의 감쇠도(attenuation)를 계산하기 위하여 dB로 환산하면

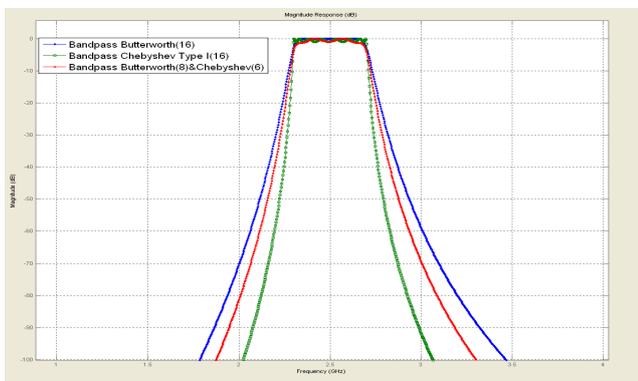
$$\begin{aligned} 20[\log|H(j\omega)|] &= 10\log[1 + \varepsilon^2 \omega^{2k} C_{n-k}^2(\omega)] \\ \omega \gg 1 \text{에서는 } C_{n-k}^2(\omega) &= 2^{n-k-1} \omega^{n-k} \text{이므로} \\ 20\log|H(j\omega)| &\approx 20\log(2^{n-k-1} \omega^{n-k}) \quad (\omega \gg 1), (k \neq n) \\ &\approx 6(n-k-1) + 20\log\varepsilon + 20n \log(\omega \gg 1) \end{aligned} \quad (6)$$

2.4 실험(simulation)

필터란 얼마나 안정하게 원하는 대역을 잘 구별하느냐에 따라서 비교 및 분석되어지며 또한 원하는 대역대에 따라서, 혹은 이용하려고 하는 부품에 의해 정해지고 평가 하게된다. 우리는 앞에서 체비세프와 버터워스의 특성을 알아 보았고 그 장단점에 대하여 언급 하였다. 시뮬레이션의 목적은 두 개의 필터를 혼합함으로써 그 단점을 서로 보완하는 하고자 하는 것을 말한다. 그림3에서는 필터의 성능을 나타내는 대역통과 필터의 척도를 나타낸다. 이 척도에 의해서 필터를 디자인 하고 시뮬레이션 하였다. 본 논문에서는 2.5GHz의 중심주파수를 가지고 통과대역은 200MHz인 체비세프 필터보다 리플이 적으며 버터워스 보다 경사도가 더 좋은 체비세프-버터워스 혼합필터를 시뮬레이션 하였다.



<그림 3> 대역통과 필터 기준 척도



<그림 4> 체비세프16차 필터,버터워스16차 필터, 체비세프-버터워스 14차 대역통과 혼합필터 파형

설계된 필터는 그림 4에서 나타내었다. 결과 파형은 중심주파수 2.5GHz 이고 대역폭 200MHz는 동일한 조건이고 버터워스 16차 필터를 설계하

였고 리플이 없고 안정한 필터이다. 또한 설계한 16차 체비세프 필터의 리플은 1dB이고 안정한 필터이다. 다음으로 버터워스 또한 16차 필터를 설계하였고 리플이 없다. 두가지의 장점을 결합하고 또한 소형화를 위해 차수를 줄이고 안정도도 유지하면서 통과대역의 리플을 줄이기 위하여 14차 체비세프-버터워스 혼합필터를 설계하게 되었다. 설계되어진 필터는 차수가 줄어들게 되어 소형화를 이루었고 또한 경사도는 오차가 60dB일때 체비세프는 210MHz, 버터워스는 340MHz, 체비세프-버터워스는 290MHz가 되어 버터워스 보다 좋게 되었으며 통과대역의 리플은 줄어들어 0.5dB가 되었다.

<표 1> 실험 결과

항 목	규 격
중심 주파수(f0)	2.5GHz
안 정 도	Yes
Ripple 특성	0.5dB
필 터 차 수	14
응 답 특 성	Chebyshev & Butterworth

3. 결 론

본 논문에서는 대역통과 필터를 설계하는데 요구되는 통과대역의 평탄도와 스킵트 특성의 경사도를 좋게 하기위하여 체비세프 필터의 장점과 버터워스 필터의 장점을 결합한 필터설계를 목적으로 연구하였다. 연구된 필터는 안정화된 통과대역과 빠른 주파수 응답을 얻기위해 6차 체비세프필터와 8차 버터워스필터를 결합 하였다. 그 결과 16차 버터워스 필터 보다 체비세프 필터-버터워스 필터를 사용함으로써 더 줄어든 14차를 가지게 되는 필터를 설계할 수 있었고 중심주파수 2.5GHz, 대역폭 200MHz, 평탄도는 1dB에서 0.5dB로 되었고, 경사도는 오차가 60dB일때 체비세프는 210MHz, 버터워스는 340MHz, 체비세프-버터워스는 290MHz가 되어 버터워스 보다 좋게 되었으며 극점의 위치도 안정적인 결과를 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김형갑, "최로망 합성론과 필터설계", 대한전기협회, 제 1판, pp.33-75, 1983.3
- [2] <http://en.wikipedia.org>
- [3] Dražžen Jurišićić, George S. Moschytz, Neven Mijat "Single Amplifier, Active-RC, Butterworth, and Chebyshev Filters Using Impedance Tapering", proceeding of the IASTED International Conference SIGNAL PROCESSING,PATTERN RECOGNITION & APPLICATIONS, JUNE 25-28 2002
- [4] B. A. Sheno, 'Introduction to digital signal processing and filter design', WILEY-INTERSCIENCE, pp.234-240, 2006
- [5] ROLF SCHAUMANN MAC E. VAN VALKENBURG, "Design of analog filters", OXFORD, pp.252-340, 2001
- [6] 방인대, 전영훈, 이재룡, 윤상원, "통과대역 평탄도를 개선한 4단 저잡음 능동대역통과 여파기설계", 대한전기학회논문지 제6권, pp590-598, 2004. 6
- [7] 전형준, 강창수, 'KU-BAND Cavity 설계', 전자공학회 논문지, 제 42권 TE 편집 제4 호, pp.237-244, 2005.12
- [8] David Bsiez-Lcipez and Victor Jimknez-Fernindez, 'MODIFIED CHEBYSHEV FILTER DESIGN', IEEE, pp.642-646, 2000
- [9] Rong Ye, Qing-Xin Chu, "Extraction of Finite Transmission Zeros of General Chebyshev Filters", IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, pp.272-274, Aug.2004
- [10] <http://www.rfdh.com>
- [11] 이원택, '다중 케환 대역통과에 의한 Butterworth형, Chebyshev형의 6차 대역통과 여파기 실현에 관한 연구', 건국대 석사 학위 논문, 1986