커플된 개방 스터브를 이용한 마이크로스트립 저역통과 여파기

안성남°, 김상인, 박익모, 임한조
아주대학교 전자공학부
E-mail: ipark@ajou.ac.kr

A Compact Microstrip Lowpass Filter using Coupled Open Stub

Sungnam An, Sangin Kim, Ikmo Park, and H. Lim
School of Electrical and Computer Engineering
Ajou University

Abstract

본 논문에서는 개방 스터브(open stub)와 전송선로가 커플된(coupled) 구조를 Chebyshev prototype을 이용하여 저역통과 여파기를 설계하였다. 같은 길이의 스터브를 연속적으로 배열함으로써 깊은 저지대역을 갖고, 커플링에 의해 우수한 스컷 (skirt) 특성을 갖는 여파기를 설계할 수 있었다. 또한, 감쇄극이 다른 스터브를 추가로 연결하여 저지대역을 확장하였다.

Key words : Lowpass filter, Coupled open stub, Chebyshev prototype

Ⅰ. 서론

최근에 개방 스터브를 갖는 계단 임피던스(stepped impedance) 저역통과 여파기와 헤어핀 공진기 (hairpin resonator)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1-6]. [1]에서 제안한 구조는 기존의 링 (ring) 공진기를 압축한 구조로서, 커플되지 않은 개방 스터브를 가진 스텝 임피던스의 구조에서 스터브가 대칭이 되도록 전송선로의 중간 지점을 중심으로 접은 구조와 같다. 그리고 [6]에서 제안된 저역통과 여파기의 구조는 [1]에서 제안된 구조와 유사하지만 헤어핀 구조를 확장한 구조라는 차이가 있다.

개방 스터브는 첫 번째 공진주파수와 이의 홀수배의 주파수에서 감쇄극을 갖게 된다. $\lambda_g/4$, $\lambda_g/8$, $\lambda_g/16$, 등의 길이를 갖는 스터브에 의해 나타나는 감쇄극의 위치는 다음과 같다.

길이 $\lambda_g/4$의 Stub의 경우 : f_g, $3f_g$, $5f_g$, …
길이 $\lambda_g/8$의 Stub의 경우 : $2f_g$, $6f_g$, $10f_g$, …
길이 $\lambda_g/16$의 Stub의 경우 : $4f_g$, $12f_g$, $20f_g$, …

이러한 사실로부터, 길이가 다른 각각의 개방 스터브에 의해 형성되는 저지대역을 서로 중첩함으로써 넓은 저지대역을 갖는 저역통과 여파기의 구현이 가능하다. 하지만, 넓은 저지대역과 급격한 스컷 특성을 얻기 위해서는 개방 스터브의 개수가 많아져야 하므로 전체적인 여파기의 크기가 커지며 통과대역의 삽입손실이 증가하는 단점이 있다.

본 논문에서는 전체 여파기의 크기를 줄이기 위해서 [1]에서 제안된 커플된 개방 스터브를 가진 스텝 임피던스 구조를 이용하였다. 커플된 구조는 커플되지 않은 구조보다 넓은 대역폭을 가지기 때문에 적은 개수의 스터브를 사용할 수 있으며 그에 따라 전

체 여파기의 크기가 훨씬 감소되고, 각 스터브 사이의 커플링에 의해서 스컷 특성이 탁월하게 향상된다. 또한 개방 스터브의 수가 증가함에 따라 발생하는 통과대역의 특성 악화는 Chebyshev prototype의 임피던스 배열을 이용하여 최적화하였다. 그리고 위에서 보인 것처럼 서로 다른 주파수의 감쇄극을 중첩하기 위해서 서로 다른 길이의 스터브를 효과적으로 연결하였다.

Ⅱ. 여파기의 구조 및 설계

그림 1에 2개의 개방 스터브를 이용한 저역통과 여파기의 구조를 나타내었다. 그림 1(a)는 개방 스터브를 이용한 일반적인 저역통과 여파기이며, 그림 1(a)의 구조를 대칭적으로 접음으로써 그림 1(b)와 같이 커플링 갭을 갖는 구조를 얻을 수 있다. 두 구조의 스터브의 길이(l_s)는 $\lambda_g/4$이며, 그림 1(a)의 전송선의 길이(l_t)와 그림 1(b)의 전송선의 길이(l_{tc})는 각각 공진주파수의 $\lambda_g/2$, $\lambda_g/4$이다. 그림 1(a), (b)의 삽입손실 특성을 그림 2에 비교하여 나타내었다. 여파기의 특성을 고찰하기 위한 시뮬레이션에 비유전율 ε_r=6.15, 두께 h=0.635 mm인 기판을 사용하였으며, EM 시뮬레이터인 Zeland사의 IE3D를 이용하였다. 그림 2에서 커플되었을 경우, 커플되지 않았을 때보다 넓은 대역폭과 급격한 스컷 특성을 가진다. 이러한 특성은 스터브와 전송선로의 커플링이 증가할수록 특성 임피던스와 전파상수가 기모드, 우모드로 나누어지며 이로 인하여 커플되지 않았을 때의 공진 주파수보다 낮은 주파수와 높은 주파수에 감쇄극이 생기기 때문이다 [1].

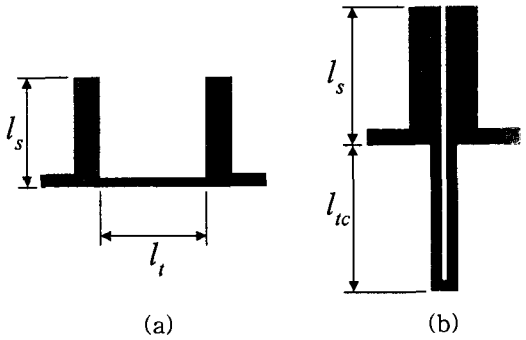


그림 1. 개방 스터브를 이용한 저역통과 여파기.
(a) 커플되지 않은 구조
(b) 커플된 구조

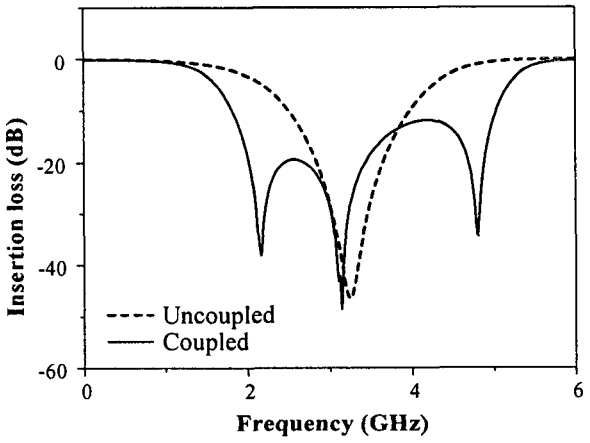


그림 2. 커플되지 않은 구조와 커플된 구조의 삽입손실.

그림 3은 스터브 개수의 변화에 따른 특성 변화를 나타낸 것이다. 스터브의 수가 증가할수록 저지대역이 깊어지고 스컷 특성이 좋아지지만, 통과대역의 특성이 나빠지는 단점이 있다. 그러므로 저역통과 여파기를 위한 prototype을 활용한 설계가 필요하다. 개방 스터브를 이용한 저역통과 여파기에서 prototype을 활용하는 일반적인 방법은 Kuroda identity 변환을 통해서 구현하는 것이다. 하지만, 이 방법을 사용할 경우, 전송선로의 길이가 $\lambda_g/4$이기 때문에 커플된 구조로 나타내었을 때, 커플링 효과를 기대하기 힘들다 [1]. 따라서 본 논문에서는 Chebyshev prototype에서 각 단의 스케일한 임피던스를 마이크로스트립 라인의 특성 임피던스로 대응시켜 설계하였다. 개방 스터브는 capacitor로 나타낼 수 있고, 스터브를 연결한 전송선은 폭이 작을 때 inductor로 표현할 수 있기 때문에, capacitance로 스케일링(scaling)한 홀수 번째 단의 값을 개방 스터브의 특성 임피던스에 대응시키고, inductance로 스케일링한 짝수 번째 단의

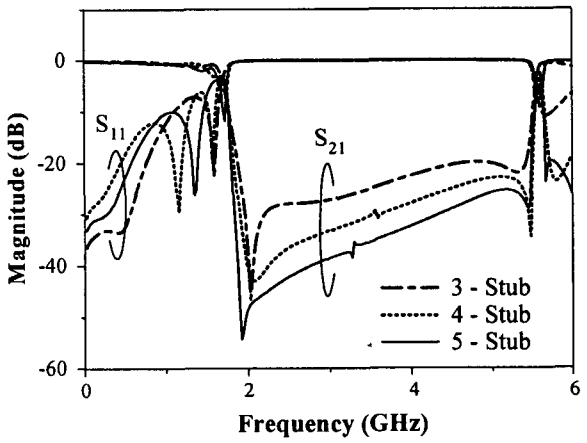


그림 3. 스터브 개수의 변화에 따른 특성.

값을 전송선로의 특성 임피던스에 대응시켰다. 표 1은 스터브 5개를 가진 구조를 설계하기 위한 0.01 dB 9단 Chebyshev prototype의 각 단의 값과 스케일된 임피던스, 그리고 특성 임피던스에 대응하는 전송선로와 스터브의 폭을 나타내며, 그림 4에 표 1을 이용하여 설계한 여파기의 특성을 나타내었다 [7, 8]. 그림 3과 4를 비교했을 때, 통과대역의 특성이 크게 개선됨을 알 수 있다.

스터브의 개수가 증가할수록 저지대역의 삽입손실이 깊어지지만 대역폭은 늘어나지 않는다. 그러므로 감쇄극이 다른 스터브를 추가해서 대역폭을 확장하였다. 본 논문에서는 그림 5와 같이 $\lambda_g/4$ 와 $\lambda_g/8$의 서로 다른 길이를 갖는 개방 스터브를 $\lambda_g/4$ 길이의 전송선으로 연결한 구조를 제안했다. 그림1과는 달리, $\lambda_g/4$ 와 $\lambda_g/8$ 길이의 개방 스터브를 연결한 전송선의 길이가 $\lambda_g/4$ 가 되는 이유는 개방 스터브에 의한 감쇄극과 전송선에 의한 영점의 위치 때문이다. $\lambda_g/4$ 와 $\lambda_g/8$ 길이의 개방 스터브의 감쇄극의 위치는 각각 첫 감쇄극이 나타나는 주파수의 홀수배의 주파수에서 나타난다. 그리고 부하 임피던스 값과 입력 임피던스 값이 같을 때, 선로의 임피던스와 관계없이 길이가 $\lambda_g/2$인 경우, λ_g에 대응하는 주파수의 정수배에 영점이 위치한다 [9]. 그림 5에서 입력단과 출력단의 임피던스가 50 Ω으로 같으므로 파장의 길이 λ_g에 해당하는 주파수가 f_g일 때, $\lambda_g/4$길이의 전송선로는 $2f_g$의 정수배의 주파수에 영점이 위치한다. 이때, 주파수 $2f_g$에서의 영점은 스터브에 의해 생기는 감쇄극에 의해 상쇄되어 넓은 저지대역을 가진다. 그림 6은 그림 5에 대한 특성을 나타낸 것이다. 커플되었을 때, 2개의 감쇄극이 추가되어 동일한 길이의 스터브를 이용한 저역통과 여파기와 마찬가지로 더 넓은 대역폭과 더 깊은 삽입손실을 갖는다.

그림 7은 그림 1과 그림 5의 구조를 이용해 설계한 저역통과 여파기의 구조와 특성을 나타낸다. 급격한 스컷 특성과 깊은 저지대역을 얻기 위해서 l_{s1}의 길이를 갖는 스터브의 개수를 5개로 하였고, 그림 5와 6에서 보인 것처럼 저지대역의 확장을 위해서 절

표 1. Chebyshev prototype을 이용해서 구한 선로의 폭.

	Element Value	Scaled Impedance	선로의 폭 (mm)
g_1	0.8144	61.39	0.63
g_2	1.4270	71.05	0.46
g_3	1.8043	27.71	2.35
g_4	1.7125	85.63	0.29
g_5	1.9057	26.24	2.53
g_6	1.7125	85.63	0.29
g_7	1.8043	27.71	2.35
g_8	1.4270	71.05	0.46
g_9	0.8144	61.39	0.63

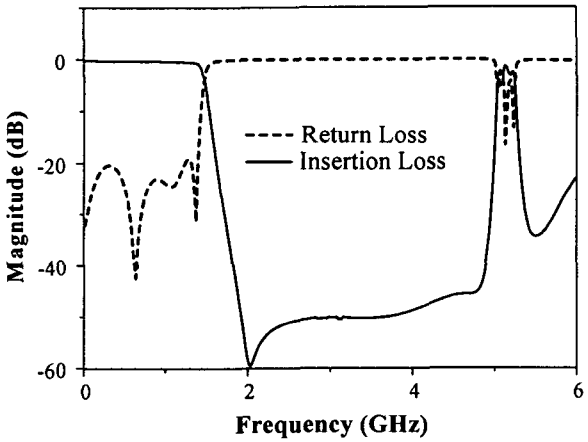


그림 4. Chebyshev prototype을 이용한 저역통과 여파기의 특성.

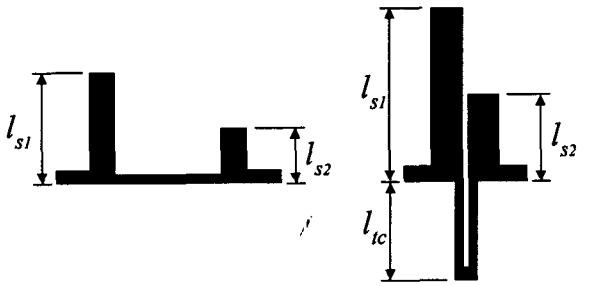


그림 5. 길이가 다른 개방 스터브를 가진 저역통과 여파기.
(a) 전송선로를 접지 않은 구조
(b) 전송선로를 접은 구조

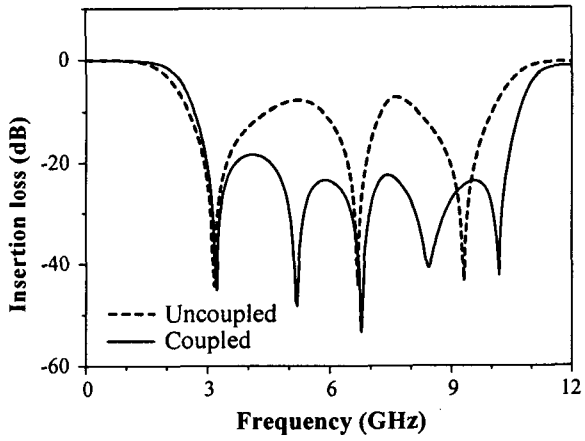
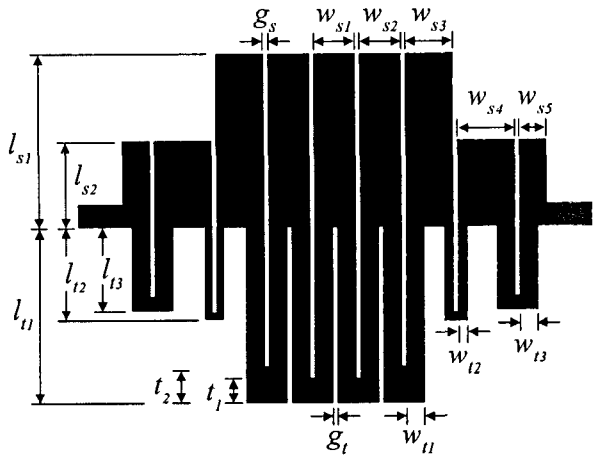
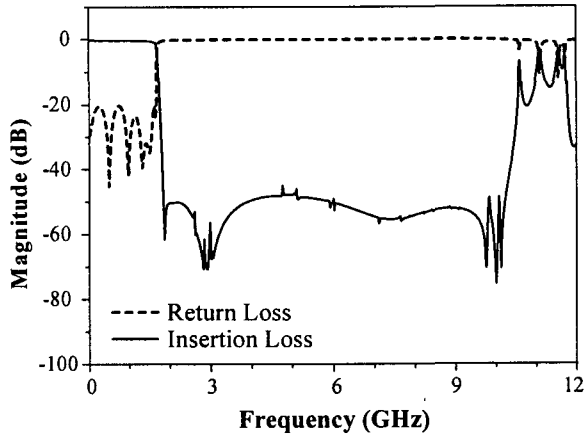


그림 6. 전송선로를 접지 않은 구조와 접은 구조의 삽입손실.

반 길이의 스터브를 추가하였다. Chebyshev prototype에서 가장 바깥쪽의 스케일된 임피던스가 가장 크기 때문에 가장 바깥쪽에 위치한 스터브의 폭이 다른 스터브에 비해서 작아야 한다. 그리고 절반 길이의 스터브는 저지대역의 감쇄의 정도를 결정하므로 감쇄를 크게 하기 위해 w_{s4}와 같이 폭이 넓은 스터브가 필요하다. 따라서 절반 길이의 스터브는 최소 2개가 필요하다. 한편, 보다 나은 스컷 특성 등을 얻기 위해 최적화 과정을 거치면서 스터브와 전송선로의 폭은 Chebyshev prototype 17단에 의해 얻어진 값과 약간 차이가 난다. 설계 변수는 w_{s1}=w_{s2}=1.1 mm, w_{s3}=1.5 mm, w_{s4}=2.5 mm, w_{s5}=0.9 mm, w_{t1}=0.5 mm, w_{t2}=0.2 mm, w_{t3}=0.5 mm, l_{s1}=12 mm, l_{s2}=6 mm



(a)



(b)

그림 7. 저역통과 여파기.
(a) 저역통과 여파기의 구조
(b) 저역통과 여파기의 특성

l_{t1}=12.3 mm, l_{t2}=6.4 mm, l_{t3}=5.15 mm, t_1=1.6 mm, t_2=2.2 mm, g_t=g_s=0.1 mm이며, 특성은 통과대역에서 -20 dB 이하의 반사손실을 가지고, 1.68 GHz에서 -3 dB , 1.82 GHz에서 10.34 GHz까지 -40 dB 이하의 삽입 손실을 가진다.

IV. 결론

본 논문에서는 Chebyshev prototype을 이용해 기존에 제안된 커플된 같은 길이의 스터브를 이용한 저역통과 여파기를 설계하였고, 서로 다른 감쇄극을 가지는 스터브를 추가로 연결함으로써 대역폭을 확장하였다. 그리고 최적화 과정을 통해, 스컷 특성이 우수한 저역통과 여파기를 설계하였다. 설계된 저역통과 여파기는 -3 dB 차단 주파수는 1.68 GHz이고, -40 dB를 기준으로 1.82 GHz부터 10.34 GHz까지의 저지대역을 갖는다.

참고문헌

[1] 김성일, 기철식, 박익모, 임한조, "넓은 저지대역을 가지는 압축된 PBG 링 구조," 한국전자파학회 논문집, vol. 13, no. 10, pp. 1071-1077, 2002년 12월.

[2] C. S. Kee, M. Y. Jang, I. Park, and H. Lim, "Photonic band gap formation by microstrip ring: A way to reduce the size of microstrip photonic band gap structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 1520-1522, 2002.

[3] S. Y. Lee and C, M. Tsai, "New cross-coupled filter design using improved hairpin resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, pp. 2482-2490, Dec. 2000.

[4] A. Enokihara, K. Setsune, M. Sagawa, and M. Makimoto, "High-T_c bandpass filter using miniaturized microstrip hairpin resonators," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 20, pp. 1925-1927, Sep. 1992

[5] H. Yabuki, M. Sagawa, and M. Makimoto, "Voltage controlled push-push oscillators using miniaturized hairpin resonators," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp., Digest*, pp. 1175-1178, June 1991.

[6] L. H. Hsieh and K. Chang, "Compact elliptic-function low-pass filter using microstrip stepped-impedance hairpin resonators ," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 51, pp. 193-199, Jan. 2003

[7] G. Mattael, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-matching Networks, and Coupling Structures*, Dedham: Artech House, 1980.

[8] J. S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, New York: John Willey & Sons, Inc., 2001.

[9] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. New York: Wiley, 1998.