

주파수 가변 캐비티 대역통과필터의 설계 및 구현

강상기*

Design and Implementation of a Tunable Cavity Bandpass Filter

Sanggee Kang*

요약 최근에는 수요자의 다양한 요구를 충족하는 서비스를 제공하기 위해서 여러 개의 무선통신 시스템을 하나로 통합한 무선기기에 대한 수요가 증가하고 있다. 다양한 무선통신 시스템으로 구성된 무선기기에는 많은 주파수 고정형 필터가 필요하다. 주파수 가변 필터는 다수의 주파수 고정형 필터를 대체할 수 있으며, 주파수 가변 필터를 사용하면 시스템을 보다 효율적으로 구성할 수 있다. 본 논문에서는 800 ~ 2400MHz 대역에서 동작하는 3-폴 주파수 가변 대역통과필터(BPF)를 설계하였다. 주파수 가변범위를 넓히기 위해서 튜닝 스크류는 스텝을 갖도록 설계하였고, 튜닝 스크류의 조절을 용이하게 하기 위해서 리니어 모터를 사용하였다. 구현한 주파수 가변 BPF는 설계한 주파수 범위에서 동작하며, 삽입 손실은 최대 2.82dB, 중심주파수에서 ± 50 MHz 이격된 지점에서 최소 18.7dB의 감쇠 성능을 갖는다.

Abstract In recent years, the demand for wireless devices incorporating several wireless communication systems into one has been increasing in order to provide services that meet the diverse needs of consumers. Wireless devices consisting of various wireless communication systems require many frequency fixed filters. A frequency tunable filter can replace a number of frequency fixed filters in the wireless devices. If a frequency tunable filter is used in wireless systems, the system can be configured more efficiently. In this paper, a 3-pole frequency tunable BPF(bandpass filter) operating in the frequency band of 800 ~ 2400MHz is designed. In order to widen the operating frequency band, a tuning screw is designed to have a step and a linear motor is used to facilitate the adjustment of the tuning screw. The implemented frequency tunable BPF operates in the designed frequency range and has the maximum insertion loss of 2.82dB in the channel band and the minimum attenuation of 18.7dB at ± 50 MHz frequency offset from the center frequency of the band.

Key Words : Filter, Bandpass Filter, Cavity Filter, Tunable BPF, Broadband Tunable BPF

1. 서론

수요자들의 다양한 요구를 수용하고 많은 서비스를 제공하기 위해서 최근의 무선통신기기는 여러 무선통신 시스템을 하나로 통합해서 구성한다. 예를 들어 스마트폰에는 LTE, 5G, Wi-Fi, Bluetooth 그리고 GPS가 포함되어 있다. 다양한 무선통신 시스템으로 구성된 무선통신기기는 적절한 동작을 하기 위해서 송수신기 전단부에 중심주파수가 고정된 필터가 실장되며, 각각

의 무선통신 시스템마다 그에 적합한 개별 필터를 사용해야 한다. 따라서 각각의 시스템에 필요한 다수의 필터가 송수신기 전단부에 실장되어야 한다. 주파수 가변 필터는 필터의 중심주파수를 변경할 수 있는 기능을 제공하기 때문에 여러 개의 무선통신 시스템 중에서 특정 무선통신 시스템의 기능을 제공해야 하는 경우에 주파수 고정형 필터를 효과적으로 대체할 수 있다. 주파수 가변 필터를 사용하면 한 개의 주파수 가변 필터로 실장된 모든 시스템에 대해서 적절한 필터로 동작 가능

*School of Computer Information and Communication Engineering, Kunsan National University

Received December 12, 2020

Revised December 16, 2020

Accepted December 18, 2020

하므로 무선통신기기를 효율적으로 구성할 수 있다. 더불어 특정 무선통신기기도 필요에 따라서 동작주파수 대역을 변경할 필요가 있으며, 이 경우 송수신기 전단부의 필터를 교체해야 된다. 하지만 주파수 가변 필터를 적용하게 되면 필터의 교체 없이 통신시스템의 운영이 가능하므로 시스템의 중단시간을 단축할 수 있고 시스템을 효과적으로 구성할 수 있는 장점이 있다.

주파수 가변 필터는 바랙터를 이용한 주파수 가변 필터[1,2], 고정형 캐패시터 뱅크를 이용한 주파수 가변 필터[3,4] 그리고 기계적으로 주파수를 가변하는 필터가 있다[5-8]. 바랙터를 이용한 주파수 가변 필터는 중심주파수의 변경 속도는 빠르지만 취급 전력이 수십 mW로 낮다. 고정형 캐피시터 뱅크를 이용한 주파수 가변 필터는 바랙터를 이용한 경우와 유사하게 중심주파수 가변 속도도 빠르고 취급 전력이 수 W 정도까지 수용할 수 있다. 기계적인 주파수 가변 필터는 중심주파수 가변 속도는 느리지만 취급 전력이 수십 W 이상을 수용할 수 있다. 본 논문에서는 취급 전력이 큰 장점이 있고 이동통신 기지국 등에서 사용이 가능한 캐비티(cavity) 주파수 가변 BPF의 설계 및 구현에 대해서 기술한다.

2. 주파수 가변 BPF의 설계 및 구현

2.1 주파수 가변 BPF의 설계

BPF는 프로토타입 저역통과필터를 (그림 1)과 같은 어드미턴스 인버터(J-inverter)를 이용한 BPF로 변환해서 설계한다. (그림 1)과 같은 BPF의 설계 파라미터들은 다음과 같이 계산된다[9].

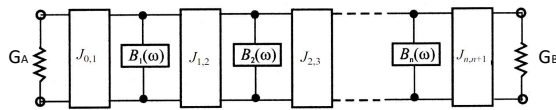


그림 1. 어드미턴스 인버터를 이용한 정규화된 BPF
Fig. 1. A generalized BPF using admittance inverters

$$J_{0,1} = \sqrt{\frac{G_A b_1 w_{FB}}{g_0 g_1 w_1'}} \quad (1)$$

$$J_{j,j+1} = \frac{w_{FB}}{w_1'} \sqrt{\frac{b_j b_{j+1}}{g_j g_{j+1}}}, j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

$$J_{n,n+1} = \sqrt{\frac{G_B b_n w_{FB}}{g_n g_{n+1} w_1'}} \quad (3)$$

여기서 w_{FB} 는 fractional 대역폭, g_i 는 프로토타입 저역통과필터의 소자값, G_A, G_B 는 각각 입력단과 출력단의 어드미턴스, b_j 서셉턴스 slope 파라미터 그리고 w_1' 은 프로토타입 저역통과필터의 차단주파수이다. 집중소자로 BPF를 설계할 때는 임피던스 척도변환과 주파수 척도변환 과정만 추가하면, (1) ~ (3)을 직접 이용해서 BPF를 설계할 수 있다. 그러나 BPF를 캐비티 형태로 설계하기 위해서는 캐비티 공진기의 인버터 값과 slope 파라미터를 계산해야 하며, 이를 위해서는 even 모드와 odd 모드 임피던스를 구하는 방법을 사용해야 한다. 그러나 실제 캐비티 BPF를 설계할 때는 보다 편리한 방법으로 결합계수와 external Q를 이용하는 방법을 주로 사용한다. External Q와 결합계수는 다음과 같이 계산된다[9].

$$Q_{eA} = \frac{b_1}{J_{0,1}^2 / G_A} = \frac{g_0 g_1 w_1'}{w_{FB}} \quad (4)$$

$$Q_{eB} = \frac{b_n}{J_{n,n+1}^2 / G_B} = \frac{g_n g_{n+1} w_1'}{w_{FB}} \quad (5)$$

$$k_{j,j+1} = \frac{J_{j,j+1}}{\sqrt{b_j b_{j+1}}} = \frac{w_{FB}}{w_1' \sqrt{g_j g_{j+1}}}, j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

여기서 Q_{eA} 와 Q_{eB} 는 각각 입력단 external Q와 출력단 external Q이며, $k_{j,j+1}$ 은 결합계수이다.

(4) ~ (6)을 이용하면 설계하고자 하는 BPF에 필요한 external Q와 결합계수를 구할 수 있으며, 공진기의 설계 치수와 입출력 결합을 위한 tap의 위치는 원하는 external Q와 결합계수 값을 만족하도록 EM 시뮬레이션을 통해서 계산할 수 있다.

본 논문의 주파수 가변 BPF는 800 ~ 2400MHz의 동작주파수 범위를 갖도록 설계하였다. 캐비티 BPF의 중심주파수는 공진기에 삽입되는 튜닝 스크류의 깊이로 조절되며, 주파수 가변 BPF의 중심주파수를 조절하기 하려면 튜닝 스크류의 삽입 깊이를 조절할 수 있어야 한다. (그림 2)에는 본 논문에서 사용한 튜닝 스

크류의 모양과 치수를 나타내었다. (그림 2)에서 A는 10.3mm, D는 6mm, B는 8mm 그리고 C는 13.5mm 이다. (그림 2)에서 알 수 있듯이 주파수 가변 범위를 넓히기 위해서 튜닝 스크류는 step을 갖는 형태로 설계하였다.

주파수 가변 BPF는 필터의 중심주파수가 이동할 수 있어야 하므로 공진기의 공진주파수 변경이 가능해야 한다. <표 1>은 튜닝 스크류의 삽입 길이에 따라서 공진주파수가 가변됨을 시뮬레이션한 결과를 요약한 것이다. 시뮬레이션을 할 때 공진기의 치수로 공진기의 외경은 12mm, 공진기의 내경 8mm, 공진기의 길이 14mm 그리고 포켓(pocket)의 치수는 포켓의 직경 34.8mm, 포켓의 길이 22mm를 사용하였다. (그림 3)은 <표 1>의 시뮬레이션 결과를 그림으로 표현한 것이다. (그림 3)에서 알 수 있듯이 튜닝 스크류의 깊이를 조절함으로써 공진주파수를 변경할 수 있지만 튜닝 스크류의 깊이에 따른 공진주파수의 변화는 비선형적으로 변화됨을 알 수 있다.

공진기의 수가 늘어남에 따라서 필터의 감쇠특성은 향상되지만 제어해야 할 공진기의 수가 증가한다. 더불어 공진기의 수가 증가하면 제어되는 공진기의 제어 민감도가 증가해서 공진기의 공진주파수를 정확하게 제어하기가 어렵다. 때문에 본 논문에서는 3개의 공진기로 구성된 주파수 가변 BPF를 설계하였다. (그림 4)는 설계한 주파수 가변 BPF의 성능을 시뮬레이션한 일예이며, 설계한 주파수 가변 BPF가 1.025 ~ 1.15GHz 대역에서 중심주파수가 적절하게 가변됨을 보여준다.

표 1. 튜닝 스크류의 삽입 길이에 따른 공진주파수
Table 1. Resonance frequency according to the depth of the tuning screw

Depth of tuning screw(mm)			Resonance freq.(GHz)
B	C	total depth	
0	4.79	4.79	2.301
0	6.00	6.00	2.007
0	7.80	7.80	1.702
0	10.85	10.85	1.398
0	13.15	13.15	1.251
2.2	13.5	15.70	1.150
4.0	13.5	17.50	1.044
4.6	13.5	18.10	0.951
4.8	13.5	18.30	0.852

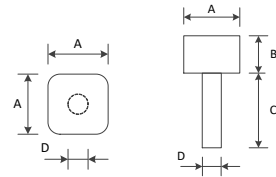


그림 2. 튜닝 스크류 모양과 크기
Fig. 2. Shape and dimensions of the tuning screw

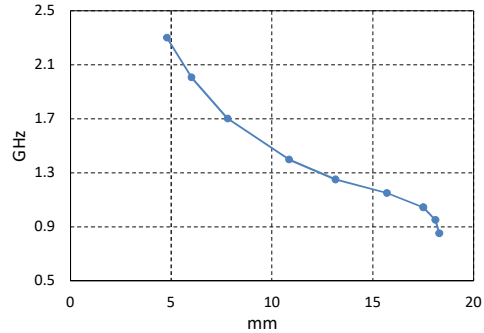


그림 3. 튜닝 스크류의 삽입 길이에 따른 공진주파수
Fig. 3. Resonance frequency according to the depth of the tuning screw

2.2 주파수 가변 BPF의 구현 및 실험

주파수 가변 BPF의 중심주파수를 변경하기 위해서 튜닝 스크류의 삽입 깊이를 조절해야 한다. 본 논문에서는 공진기의 튜닝 스크류의 삽입 깊이를 조절하기 위해서 리니어(linear) 모터를 사용하였다. 리니어 모터는 회전수에 따라서 중심축이 상하로 움직이는 구조로 되어 있기 때문에 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환하는 웜(worm)기어를 사용하지 않아도 되는 장점이 있다.

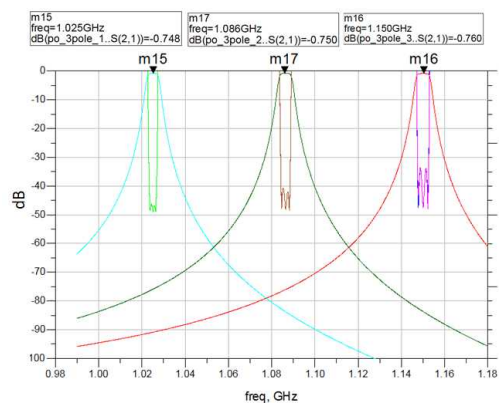


그림 4. 설계한 주파수 가변 BPF의 시뮬레이션 예
Fig. 4. One of simulation results of the designed tunable BPF

주파수 가변을 위해서 리니어 모터의 구동이 필요하며 본 논문에서는 리니어 모터를 구동하기 위한 제어기를 구현하였다. 구현한 주파수 가변 BPF의 제어기와 주파수 가변 BPF의 연동 구성도는 (그림 5)와 같다. (그림 5)에 나타내었듯이 주파수 가변 BPF의 중심주파수를 변경하기 위해서 RS-232를 통해서 중심주파수에 대한 정보가 인가되면, 제어기는 중심주파수 정보에 따라서 주파수 가변 BPF의 튜닝 스크류의 삽입 길이를 조절하기 위해서 모터를 제어한다. 본 논문에서 구현한 주파수 가변 BPF의 공진기는 3개이지만 향후 확장을 고려해서 6개까지 제어할 수 있도록 제어기를 구현하였다. (그림 3)에서 알 수 있듯이 공진기의 중심주파수 이동과 튜닝 스크류의 삽입 길이 사이에는 비선형 관계가 있다. 따라서 적절한 제어를 하기 위해서 튜닝 스크류의 삽입에 따른 중심주파수 이동 구간을 14개로 분할해서 근사적으로 선형관계가 되도록 하였고, 각각의 분할된 구간에서 주파수 가변 BPF의 중심주파수에 따른 모터의 제어 값은 다음과 같이 계산된다.

$$M_p = P_{SB} - (F_s - F_{in}) \times S_{FB} \quad (7)$$

여기서 P_{FB} 은 구간 시작주파수에서 튜닝 스크류의 위치, F_s 는 구간 시작주파수, M_p 는 모터 제어값, F_{in} 은 가변 필터의 중심주파수 그리고 S_{FB} 는 구간에서 스크류 위치 간격 차이를 구간 주파수 범위로 나눈 기울기이다. 실제 제어시 튜닝 스크류의 삽입 길이는 리니어 모터의 회전수로 계산된다. (그림 6)과 (그림 7)은 각각 리니어 모터가 장착된 주파수 가변 BPF 그리고 주파수 가변 BPF의 제어기가 제작된 사진이다.

(그림 8)은 제작된 캐비티형 주파수 가변 BPF의 성능을 측정된 결과이며, <표 2>에 결과를 요약해서 기술하였다. 측정 결과 1.25GHz의 중심주파수에서 삽입 손실은 1.68dB로 가장 작고, 중심주파수에서 ± 50 MHz 이격된 지점에서 감쇠량은 중심주파수가 0.86GHz일 때 34.8dB로 가장 좋다. 일반적으로 주파수 가변 BPF의 삽입 손실은 중심주파수가 낮은 수록 증가하지만, <표 2>의 결과는 중심주파수가 증가하면서 삽입손실이 감소하다가 다시 증가하는 특성을 보인다. 그 이유는 주파수 가변 BPF의 중심주파수는 가변

이 되도록 설계하였지만 결합량은 조절되지 않으므로 중심주파수가 증가할수록 결합량이 줄어들기 때문에 리플(ripple)이 증가함으로 인해서 삽입손실이 증가했기 때문이다. 주파수 가변 BPF는 중심주파수가 증가함에 따라서 대역폭도 증가한다. 따라서 <표 2>에서 확인할 수 있듯이 감쇠량은 중심주파수가 증가할수록 줄어들음을 알 수 있다.

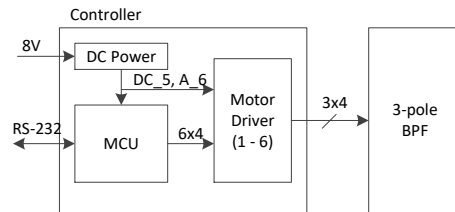


그림 5. 제어기와 주파수 가변 BPF의 연동 구성도
Fig. 5. Interface diagram between controller and frequency tunable BPF

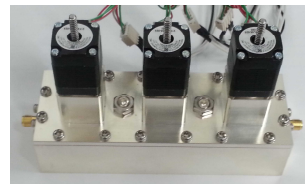


그림 6. 리니어 모터가 장착된 주파수 가변 BPF
Fig. 6. Frequency tunable BPF mounted with linear motor

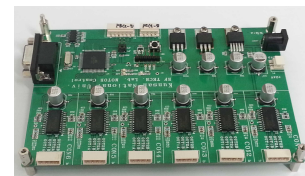
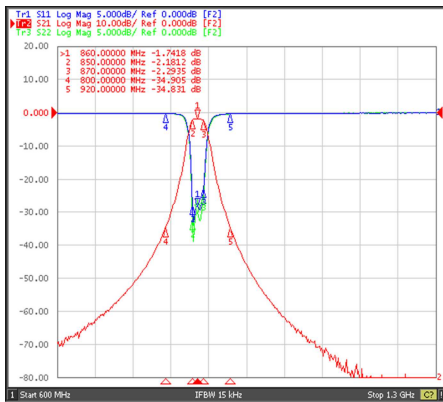


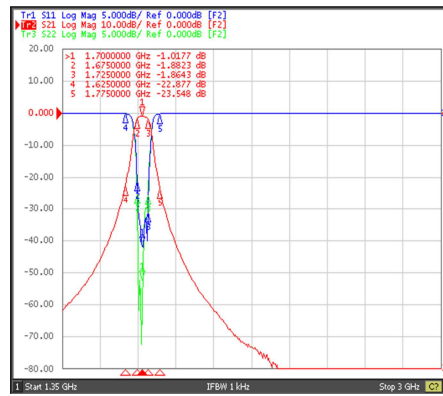
그림 7. 주파수 가변 BPF 제어기
Fig. 7. Controller for the tunable BPF

표 2. 제작된 주파수 가변 BPF의 성능 측정 결과
Table 2. Measurement results of the implemented tunable BPF

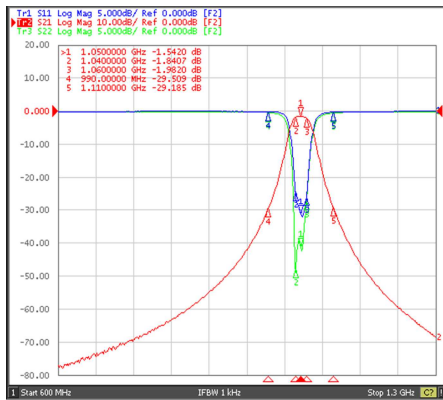
Frequency (GHz)	Insertion loss(dB)	Attenuation (dB, @fo \pm 50MHz)
0.86	2.29	34.8
1.05	1.98	29.1
1.25	1.68	24.4
1.70	1.88	22.8
2.30	2.82	18.7



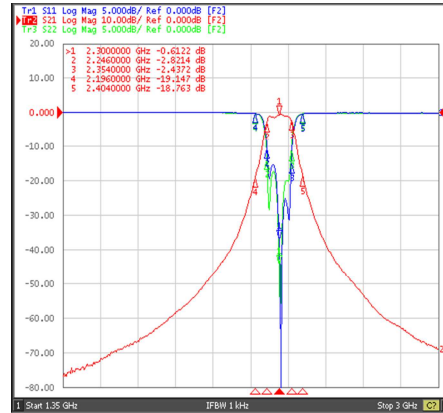
(a) Center frequency of 860MHz



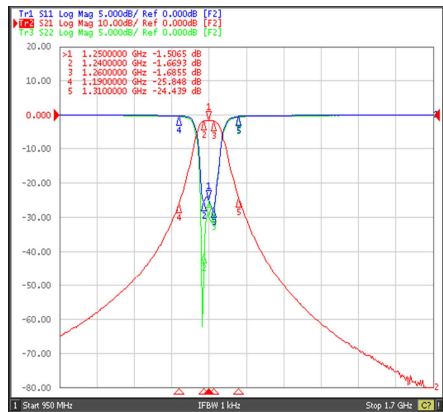
(d) Center frequency of 1700MHz



(b) Center frequency of 1050MHz



(e) Center frequency of 2300MHz



(c) Center frequency of 1250MHz

그림 8. 제작된 주파수 가변 BPF의 성능 측정 결과
Fig. 8. Measurement results of the implemented tunable BPF

3. 결론

본 논문에서는 800 ~ 2400MHz에서 동작하는 캐비티형 3-폴 주파수 가변 BPF를 설계 및 구현하였다. 논문에서는 주파수 가변범위를 넓히기 위해서 튜닝 스크류는 스템을 갖도록 설계하였고, 튜닝 스크류의 조절을 용이하게 하기 위해서 리니어 모터를 사용하였다. 구현한 주파수 가변 BPF는 설계한 주파수 범위에서 동작하며, 삽입손실은 최대 2.82dB, 감쇠량은 중심주파수에서 ± 50 MHz 이격된 주파수에서 최소 18.7dB의 성능을 갖는다.

REFERENCES

[1] B. W. Kim and S. W. Yun, "Varactor-tuned combline bandpass filter using step-impedance microstrip lines," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 52, no 4, pp. 1279 - 1283, April 2004.

[2] S.R. Chandler, I.C. Hunter and J.G. Gardiner, "Active varactor tunable bandpass filter," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 3, no 3, pp. 70-71, March 1993.

[3] <https://polezero.com>

[4] A. Anand, J. Small, D. Peroulis, and X. Liu, "Theory and design of octave tunable filters with lumped tuning elements," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 61, no. 12, p. 4353-4364, Dec. 2013.

[5] Yu, M., Tassini, B., Keats, B., and Wang, Y., "High-performance tunable filters based on air-cavity resonators," IEEE Microwave Magazine, vol. 15, no 5, pp. 83-931, 2014.

[6] D. Scarbrough, D. Psychogiou, D. Peroulis and C. Goldsmith, "Low-loss, broadly-tunable cavity filter operating at UHF frequencies," IEEE MTT-S International Microwave Symposium, pp. 1-4, 2015.

[7] S. W. Wong, F. Deng, Y. M. Wu, J. Y. Lin, L. Zhu, Q. X. Chu and Y. Yang, "Individually Frequency Tunable Dual and Triple band Filters in a Single Cavity," IEEE Access, vol. 5, pp. 11615-11625, 2017.

[8] Richard J. Cameron, Chandra M. Kudsia and Raafat R. Mansour, Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications, Wiley & Sons, 2018.

[9] George L. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures, Artech House, 1980.

저자약력

강상기(Sanggee Kang)

[정회원]



- 2004년: 충남대학교 전파공학과(공학박사)
- 1989년: 삼성반도체통신
- 1989~1992: 해군통신장교
- 1994~2005: ETRI 선임연구원
- 2006~2008: ETRI 초빙연구원
- 2005~현재: 군산대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수

〈관심분야〉 RF, M/W 부품 및 시스템