이중 모드 공진기를 이용한 이중 대역 대역 통과 필터 설계

Design of Dual-Band Bandpass Filter Using Dual-Mode Resonators

이 자 현 · 임 영 석

Jahyeon Lee · Yeongseog Lim

요 약

본 논문에서는 설계 방법이 단순하면서 통과 대역의 대역폭 조절이 독립적으로 가능한 소형의 이중 대역 대역 통과 필터를 제안하였다. 각각의 통과 대역은 서로 다른 두 개의 이중 모드 공진기를 이용하여 독립적으로 설계하였다. 제안된 이중 대역 대역 통과 필터는 세 개의 전송 영점을 갖는다. 두 개의 전송 영점은 각각의 이중 모드 공진기에서 발생하며, 입출력 선로 간의 결합 효과에 의해 추가적으로 하나의 전송 영점이 발생한다. 제안된 이중 대역 대역 통과 필터 설계 방법을 이용하여 2.4/5.7 GHz WLAN에 동작하는 이중 대역 대역 통과 필터를 설계 및 제작하였다.

Abstract

A compact microstrip dual-band bandpass filter with controllable bandwidth for each passband is proposed. Each passband is independently designed using two different dual-mode resonators. The proposed dual-band bandpass filter has three transmission zeros. Two transmission zeros are generated by each dual-mode resonator. An additional transmission zero is generated by input/output port coupling. The dual-band bandpass filter application is designed for 2.4/5.7 GHz WLAN. Experimental results are presented to validate theory.

Key words : Dual-Mode Resonator, Dual-Band Bandpass Filter

I. 서 론

최근 하나의 무선 통신 단말기에서 여러 무선 서비스가 됨에 따라 무선 통신 시스템에서 이중 대역 대역 통과 필터는 매우 중요한 소자가 되었다^{[1]~[6]}. 참고문헌 [1]은 설계 방법이 매우 단순한 이중 대역 마이크로스트립 대역 통과 필터로써 공통의 입출력 포트를 갖는 두 개의 개별적인 단일 대역 대역 통과 필터를 사용하여 설계하였다. 참고문헌 [2]~[4]에서는 첫 번째 고조파가 제어 가능한 공진기를 이용하여 두 번째 통과 대역을 형성하여 이중 대역 필터를 설계한 연구가 진행되었다. 하지만 이러한 이중 대역 대역 통과 필터들은 참고문헌 [1]의 경우 필터 설

계에 최소 4개 이상의 공진기가 필요하게 되어 크기가 커지는 단점이 있으며, 참고문헌 [2]~[4]는 단지 두 통과 대역의 중심 주파수 만을 조절할 수 있기 때문에 각각의 통과 대역을 다양한 필터의 설계 조건에 맞춰 이중 대역을 설계하기가 어렵다.

또한, 두 대역의 대역폭이 조절 가능한 이중 대역 대역 통과 필터들이 제안되어져 왔으나, 설계 절차가 복잡하고 각각의 대역이 공통의 결합 경로를 갖고 있어 각각의 대역폭을 독립적으로 조절하는 데에는 한계가 있다^{[5]~[8]}.

본 논문에서는 이중 모드 동작을 하는 ICLSR (Interdigital Capacitor Loop Step Impedance Resonator) 과 OSLHR (Open-circuited Stub Loaded Hairpin Reso-

전남대학교 전자컴퓨터공학과(Department of Electronic and Computer Engineering, Chonnam National University)

· 논문 번호 : 20101126-07S

· 교신저자 : 임영석(e-mail : limys@chonnam.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 1월 14일

nator)을 이용하여 각각의 대역을 독립적으로 대역폭 조절이 가능하면서 설계 방법이 단순한 소형의 이중 대역 대역 통과 필터를 제안하였다. 제안된 이중 대역 대역 통과 필터의 구성은 공통의 입출력 포트를 갖는 형태로 참고문헌 [1]과 유사하지만 적은 수의 공진기로 구성되었다. 이중 대역을 형성하기 위해 ICLSR과 OSLHR을 이용하여 각각의 대역에서 독립적으로 동작하는 단일 대역 대역 통과 필터를 설계 하였으며, 각각의 이중 모드 공진기는 자체적으로 전송 영점을 발생시키며, 이를 이용하여 필터의 선택도를 높일 수 있다. 또한, ICLSR을 OSLHR 내부에 위치하게 함으로써 이중 대역 대역 통과 필터를 소형화 하였다. 제안된 이중 대역 대역 통과 필터의 설계 방법을 이용하여 2.4/5.7 GHz WLAN 대역에서 동작하는 이중 대역 대역 통과 필터를 설계 및 제작 하였다.

II. 이중 모드 공진기 해석

그림 1은 OSLHR과 ICLSR의 구조이다. 그림 1(a)의 OSLHR은 잘 알려진 일반적인 이중 모드 공진기로 반파장 공진기의 좌우 대칭 평면에 개방 스테브가 삽입된 형태이다. OSLHR과 같은 형태의 이중 모드 공진기의 해석은 참고문헌 [9]에 잘 정리되어 있으며, 본 논문에서는 이를 반복하여 기술하지 않았다. 그림 2는 ICLSR의 해석을 간단히 하기 위한 등가 모델이다. 여기서 C_M 과 C_p 는 각각 interdigital 커패시터의 직렬 및 병렬 커패시턴스이다. ICLSR은 반파장의 SIR의 좌우 대칭 평면에 interdigital 커패시터와 단락 스테브가 삽입된 형태이다. ICLSR은 좌우 대칭이므로 기-우 모드 해석을 통해 각각의 공진 모

그림 1. 이중 모드 공진기의 구조
Fig. 1. Structure of dual-mode resonator.

그림 2. ICLSR의 등가 모델
Fig. 2. Equivalent model of the ICLSR.

드를 찾을 수 있다. 기 모드에서는 좌우 대칭 평면이 가상 접지로 대체되며, C_M 이 두 배로 나뉘지고 단락 스테브가 무시된다. 우 모드에서는 가상 접지가 개방 회로로 대체되며, C_M 은 무시되고 단락 스테브의 너비가 절반으로 나누어지게 된다. 여기서 $w_{ss}=2w_1$ 이면 나누어진 단락 스테브의 임피던스는 Z_1 이 된다. 그림 3는 ICLSR의 대응되는 기 또는 우 모드 등가 공진기 모델이다. 각각의 등가 공진기는 용량성 부하가 걸린 $\lambda_g/4$ 타입의 SIR이며, 여기서 $C_{odd}=2C_M+C_p$, $C_{even}=C_p$ 이다. 기-우 모드 등가 공진기의 설계를 용이하게 하기 위해 용량성 부하 C_L 을 개방 스테브와 등가하여 등가의 마이크로스트립 선로 l_c 로 변환할 수 있다. 변환 관계 식은 다음과 같다^[10].

$$l_c \approx \frac{v_p C_L}{Y_2} \quad (1)$$

여기서 v_p 는 변환된 개방 스테브에서의 위상 속도이다.

그림 3. ICLSR의 등가 공진기 모델
Fig. 3. Equivalent resonator model of the ICLSR.

그림 4. 전기적 길이
Fig. 4. Electrical lengths.

변환된 각각의 기-우 모드 공진기는 일반적인 $\lambda_g/4$ 타입의 SIR이 되며, 공진 조건은 $Y_{odd}=0$, $Y_{even}=0$ 으로 각각 식 (2) 및 식 (3)과 같이 구해진다^[11].

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \tan(\theta_1) \tan(\theta_2 + \theta_{co}) \quad (2)$$

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \tan(\theta_1 + \theta_3) \tan(\theta_2 + \theta_{ce}) \quad (3)$$

여기서 θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_{co} , θ_{ce} 는 l_1 , l_2 , l_3 , l_{co} , l_{ce} 의 전기적 길이이다.

ICLSIR의 공진 주파수들은 먼저 기 모드 공진주파수(f_{odd})를 주어진 Z_1 , Z_2 , l_2 , C_M , C_P 에 l_1 의 길이를 결정하고, 우 모드 공진 주파수(f_{even})는 주어진 Z_1 , Z_2 , l_1 , l_2 , C_M , C_P 에 l_3 의 길이를 조절하여 결정할 수 있다^[11]. 또한, 기 모드에서 두 배로 동작하는 C_M 과 SIR의 임피던스 비(R_Z) 효과에 의해 ICLSIR의 전체 크기를 결정하는 기 모드 공진기의 크기가 매우 소형화 된다. 그림 4는 고정된 l_2 를 갖는 $\lambda_g/4$ 타입 공진기의 R_Z 와 interdigital 커패시터에 의한 소형화 정도를 나타낸다. SIR은 잘 알려져 있듯이 R_Z 효과에 의해 l_1 의 길이가 UIR(Uniform Impedance Resonator)에 대비하여 약 25 % 감소하였다. ICLSIR의 interdigital 커패시터가 $l_{ic}=0.8$ mm, $g_c=0.1$ mm, 핑거 쌍수=4일 때 $C_M=0.24$ pF, $C_P=0.17$ pF이 되며, 변환된 등가의 마이크로

스트립 선로 l_{co} 는 22.1이 되어 l_1 의 길이가 SIR에 대비하여 약 55 % 더 감소함을 알 수 있다.

III. 이중 대역 대역 통과 필터 설계

그림 5는 제안된 이중 대역 대역 통과 필터의 구조이다. 두 개의 결합 선로를 이용하여 각각의 이중 모드 공진기에 입출력 결합을 하였으며, 소형의 IC-SIR을 OSLHR 내부에 위치하게 하여 전체 필터의 크기 증가를 최소화 하였다. 이중 대역 대역 통과 필터의 설계는 먼저 ICLSIR을 이용하여 하측 대역 통과 필터를 설계한 후 OSLHR을 추가하여 상측 대역을 설계한다. 이중 모드 공진기를 이용하여 단일 대역 필터를 설계하는 방법은 각각의 이중 모드 공진기의 공진점 f_{odd} , f_{even} 을 주어진 필터의 요구 조건에 만족하도록 공진 주파수를 결정하고 입출력 결합 선로를 조절하여 필터의 요구 조건에 맞추도록 Q_e (External Quality Factor)를 구현할 수 있다^[10]. 본 논문에서는 이중 모드 필터의 설계를 위해 이중 모드 공진기의 각각의 공진점의 위치를 2차 Chebyshev 대역 통과 필터의 극점이 발생하는 주파수에 위치하게 하였다. 이중 대역 대역 통과 필터는 2.4/5.7 GHz 대역의 WLAN에서 동작하도록 하측/상측 필터의 설계 목표를 중심 주파수 2.45/5.7 GHz, 대역폭은 200/1,200 MHz로 설정하였다. 등리플 레벨 0.05 dB 일 때 하측 및 상측 2차 Chebyshev 대역 통과 필터의 전송 극점들의 주파수는 각각 2.41/2.49 GHz와 5.5/5.84 GHz이다. 그림 6은 2차 Chebyshev 대역 통과 필터와 최적화 과정을 통해 설계된 하측과 상측 대역의 이

그림 5. 이중 대역 대역 통과 필터의 구조
Fig. 5. Structure of the dual-band bandpass filter.

(a) 하측 대역
(a) Lower band

(b) 하측과 상측 대역
(b) Lower and upper band

그림 6. 2차 Chebyshev 대역 통과 필터와 최적화된 이중 대역 대역 통과 필터의 주파수 응답

Fig. 6. Frequency response of 2nd order Chebyshev bandpass filter and optimized dual-band bandpass filter.

중 모드 필터의 시뮬레이션 응답을 보여 준다. 그림 6(a)는 ICLSIR을 이용하여 하측 대역을 설계한 이중 모드 필터의 주파수 응답이다. 그림 6(b)는 ICLSIR을 이용하여 설계된 이중 모드 필터에 OSLHR을 추가하여 상측 대역을 설계한 주파수 응답이다. 그림 6(a)와 비교해 보면 먼저 설계된 하측 대역에 영향을 주지 않으면서 상측 대역이 설계되었음을 알 수 있다. 이는 제안된 이중 대역 대역 통과 필터 설계 방법이 각각의 대역을 형성하는 전송 극점의 위치가 독립적으로 조절 가능함을 보여 준다.

그림 7은 유전율 3.5, 두께 0.76 mm의 Taconic사

그림 7. 제작된 이중 대역 대역 통과 필터의 사진

Fig. 7. Photograph of fabricated dual-band bandpass filter.

그림 8. 시뮬레이션 및 측정된 주파수 응답

Fig. 8. Simulated and measured frequency response.

의 RF-35a를 이용하여 제작된 이중 대역 대역 통과 필터의 사진이다. 설계된 필터의 크기는 그림 5에 표기하였으며, 단락 스타브는 0.3 ϕ 의 비아를 사용하였다. 급전 선로를 포함한 제작된 필터의 전체 크기는 15.3 mm×10.6 mm이다.

그림 8은 측정된 이중 모드 이중 대역 대역 통과 필터의 주파수 응답을 시뮬레이션과 비교하여 나타낸 그림이다. 측정 결과, 각각의 상측/하측 대역은 중심 주파수 2.5/5.66 GHz에서 280/1,160 MHz의 3 dB 대역폭을 가지며, 측정 결과가 시뮬레이션과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. WLAN 동작 대역인 2.4 GHz의 하측 대역과 5.7 GHz의 상측 대역에서 시뮬레이션/측정 결과, 각각 최대 1.2/1.6 dB와 0.9/0.9 dB의 삽입 손실을 갖는다. 또한, 입출력 결합 효과와 각각의 이중 모드 공진기에 의해 차단 대역에서 총 3개의 전송 영점이 발생하였으며, 각각 1.65 GHz, 2.71 GHz, 9.02 GHz에서 -71 dB, -41 dB, -57.4

표 1. 기존에 연구와의 비교

Table 1. Comparison of previously reported.

Ref. freq. of band 1/2	Insertion loss (dB) band 1/2	Size(mm×mm), ϵ_r equiv. size(mm ²)
Ref. [1] 2.4/5.7	1.4/1.4	26×8, 10.2 (355)
Ref. [2] 2.4/5.7	1.1/1.9	20.9×18.5, 2.78 (344.6)
Ref. [3] 2.45/5.7	2.21/2.01	7.1×10, 3.5 (71)
Ref. [4] 2.45/5.7	1.87/1.68	22.3×11.15, 2.2 (197)
Ref. [5] 2.45/5.7	0.6/1	12.25×15.1, 2.2 (146)
Ref. [6] 2.45/5.25	1.7/1.5	7×5.1, 9.5 (58.8)
Ref. [7] 2.45/5.2	2.5/2	16.4×10.7, 2.2 (139.1)
This work 2.45/5.7	1.6/0.9	6.5×10.6, 3.5 (68.9)

dB의 감쇄 특성을 나타낸다.

표 1은 기존에 연구된 다양한 이중 대역 대역 통과 필터와 제안된 필터를 비교 정리한 표이다. 다양한 유전율을 갖는 필터와의 크기를 비교하기 위해 등가 크기를 이용하여 비교하였다. 등가 크기는 길이와 너비에 $\sqrt{\epsilon_r/3.5}$ 를 곱하여 계산하였다. 참고 문헌 [1]~[4]는 각각 대역의 대역폭 조절이 어려우며, 참고문헌 [5]~[7]은 제한된 범위 내에서 대역폭 조절이 가능하다. 제안된 이중 대역 대역 통과 필터는 기존의 이중 대역 대역 통과 필터와 비교하여 낮은 삽입 손실과 작은 크기를 갖는다.

IV. 결 론

본 논문에서는 각각의 대역을 독립적으로 설계가 가능한 소형의 이중 대역 대역 통과 필터를 제안하였다. 제안된 이중 대역 대역 통과 필터 설계 방법을 이용하여 2.4/5.7 GHz WLAN 대역에서 동작하는 이중 대역 대역 통과 필터를 설계 및 제작하였다. 제안된 설계 방법은 간단하면서 효율적으로 소형의 이중 대역 대역 통과 필터를 설계할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] C. -Y. Chen, C. -Y. Hsu, "A simple and effective method for microstrip dual-band filters design", *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, vol. 16, no. 5, pp. 246-248, May 2006.
- [2] S. Gao, Z. -Y. Xiao, and W. -F. Chen, "Dual-band bandpass filter with source-load coupling", *Electronics Letter*, vol. 45, no. 17, pp. 894-895, Aug. 2009.
- [3] J. Lee, J. Jung, K. Kim, and Y. Lim, "Compact dual-mode interdigital-loop resonator and filter application", *Wireless Information Technology and Systems*, pp. 1-4, 2010.
- [4] P. Mondal, M. -K. Mandal, "Design of dual-band bandpass filters using stub-loaded open-loop resonators", *IEEE Transaction Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 1, pp. 150-155, Jan. 2008.
- [5] C-Y. Chen, C-Y. Hsu, and H-T. Chuang, "Design of miniature planar dual-band filter using dual-feeding structures and embedded resonators", *IEEE Microwave And Wireless Component Letters*, vol. 16, no. 12, pp. 669-671, Dec. 2006.
- [6] M. Zhou, X. Tang, and F. Xiao, "Compact dual band bandpass filter using novel e-type resonators with controllable bandwidths", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 12, pp. 779-781, 2008.
- [7] Tsu-Wei Lin, U-Hou Lok, and Jen-Tasi Kuo, "New dual-mode dual-band bandpass filter with quasi-elliptic function passbands and controllable bandwidths", *Microwave Symposium Digest*, pp. 576- 579, 2010.
- [8] M. -L. Chuang, M. -T. Wu, and S. -M. Tsai, "Dual-band filter design using L-shaped stepped impedance resonators", *IET Microwave Antennas Propagation*, vol. 4, iss. 7, pp. 855-862, 2010.
- [9] W. -H. Tu, "Compact double-mode cross-coupled microstrip bandpass filter with tunable transmission zeros", *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 2, no. 4, pp. 373-377, 2008.

[10] J. S. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, New York: Wiley, 2001.

[11] M. Makimoto, S. Yamashita., *Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication*, Springer, 2000.

이 자 현

2007년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 전자공학전공 (공학사)

2009년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 (공학석사)

2009년 3월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 박사과정

[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, RF 소자 설계

임 영 석

1980년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1982년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

1989년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학박사)

1984년 9월~현재: 전남대학교 전자

컴퓨터공학부 교수

[주 관심분야] 전자파 수치 해석, 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계, 안테나