PI-SIR과 OLRR을 이용한 마이크로스트립 이중 대역 여파기의 설계 방법

A Novel Design Method of Microstrip Dual-Band Filter Using PI-SIR and OLRR

임 지 은 · 이 재 현

Ji-Eun Lim · Jea-Hyun Lee

요 약

본 논문에서는 의사 인터디지털 계단형 임피던스 공진기(Pseudo-Interdigital Stepped Impedance Resonator: PI-SIR)와 개방 루프 링 공진기(Open-Loop Ring Resonator: OLRR)를 이용한 마이크로스트립 이중 대역 대역 통과 여파기를 제안한다. PI-SIR을 이용하여 이중 대역 여파기의 첫 번째 통과 대역과 두 번째 통과 대역을 설계하고, OLRR을 이용하여 두 번째 통과 대역 특성을 강화한다. PI-SIR 구조에서 특성 임피던스 비와 전기적 길이 비를 이용하면 첫 번째 통과 대역과 두 번째 통과 대역을 쉽고 정확하게 조정할 수 있다. 2.45 GHz와 5.8 GHz에서 동작하는 이중 대역 여파기의 설계 결과와 측정 결과로부터 제안된 여파기가 유용하다는 것을 알 수 있다.

Abstract

In this paper, dual-band bandpass filter by using Pseudo-Interdigital Stepped-Impedance Resonator(PI-SIR) and Open-Loop Ring Resonator(OLRR) is proposed. The first passband and second passband are formed by PI-SIR and the second passband is reinforced by an OLRR. In a PI-SIR the first band and second band are easily and exactly adjusted by characteristic impedance ratio and electrical length ratio. The proposed design method may be confirmed to be useful from fabricated and measured results for dual-band bandpass filter operated at 2.45 GHz and 5.8 GHz.

Key words : Dual-Band Filter, Pseudo-Interdigital Stepped Impedance Resonator, Open-Loop Ring Resonator, Magnetic Coupling

I. 서 론

현대 무선 통신 서비스에서 두 개 이상의 대역을 사용하는 시스템이 증가하고 있다. 예를 들면, WLAN(Wireless Local Area Network)의 IEEE 802.11 규격은 2.4~2.45 GHz 대역과 5.15~5.85 GHz 대역을 사용하고, WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)의 IEEE 802.16 표준은 2.3~2.7 GHz, 3.3~3.9 GHz, 5.15~5.85 GHz 대역을 사용하고 있

다. 따라서 다중 대역 RF 프론트엔드의 필요성이 증가하면서 이중 대역 대역 통과 여파기는 통신 기기의 중요한 부품으로 자리 잡고 있다.

이러한 경향에 따라 마이크로스트립 이중 대역 여파기에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 노치 추가 법^{[1],[2]}은 광대역 대역 통과 여파기에 전달 영점이나 노치를 추가하여 광대역 통과 대역을 보다 좁은 두 개의 통과 대역으로 분리할 수 있다. PI-SIR (Pseudo-Interdigital Stepped-Impedance Resonator)법^[3],

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20101126-06S

· 교신저자 : 이재현(e-mail : jaehyun@cuvic.cnu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 1월 18일

[4]은 의사 인터디지털 결합을 형성하면서 SIR 구조를 갖는 공진기를 이용한 여파기로서 선로의 전기적 길이 비와 임피던스 비를 이용하여 이중 대역을 원하는 각각의 주파수에서 발생시킬 수 있다. 또한 높은 선택도와 향상된 저지 대역의 특성을 얻을 수 있으며 소형화가 장점이다. 이중 여파기법^{[5],[6]}은 공통의 입력과 출력 단자를 이용하여 두 개의 단일 대역 통과 여파기로 각 대역 신호들을 생성함으로써 이중 대역을 형성하는 것으로 서로 다른 공진기를 통과하기 때문에 두 개의 단일 대역 여파기를 독립적으로 설계할 수 있어서 구현이 용이하다. 특히, 참고문헌 [6]에서 제안된 구조는 두 개의 균일 마이크로스트립 피드 라인 사이에 두 쌍의 균일 OLRR(Open-Loop Ring Resonator)을 위치시킨 여파기이다. 피드 라인에서 전류 분포 세기가 최대인 지점에 각각의 OLRR 쌍을 위치시킴으로써 임피던스 변환이 없이도 통과 대역에서 신호 전달이 잘 일어나도록 하였다. 하지만, 두 번째 통과 대역 특성이 상대적으로 약화된 것을 볼 수 있다.

본 논문에서는 PI-SIR과 OLRR, 균일 마이크로스트립 피드 라인으로 구성된 새로운 이중 대역 대역 통과 여파기를 제안한다. 이중 여파기 법과 PI-SIR 법을 결합한 것으로 PI-SIR로 첫 번째와 두 번째 통과 대역을 모두 발생시키고, OLRR로 두 번째 통과 대역만을 발생시켜서 두 번째 통과 대역 특성을 강화시킨다. 제안된 이중 대역 대역 통과 여파기는 높은 선택도를 갖고, 통과 대역 조정과 설계가 용이하며, 외부 임피던스 정합 블록이 필요 없는 장점을 갖고 있다. 2.45 GHz와 5.8 GHz에서 동작하는 이중 대역 대역 통과 여파기를 설계 및 제작함으로써 제안된 구조의 타당성을 검증하였다.

II. 이중 대역 대역 통과 여파기 설계

그림 1에 제안된 여파기를 나타내었다. 여파기는 두 개의 균일 마이크로스트립 피드 라인, PI-SIR(공진기 1과 2), 균일 OLRR(공진기 3과 4)로 구성된다. PI-SIR과 OLRR은 두 개의 마이크로스트립 피드 라인 사이에 위치하며, 공진기는 각 대역의 기본 공진 주파수에서 반 파장 길이를 갖는다.

PI-SIR은 의사 인터디지털 결합 형태를 갖는 SIR

그림 1. PI-SIR과 OLRR을 이용한 이중 대역 대역 통과 여파기

Fig. 1. Dual-band bandpass filter using PI-SIRs and OLRRs.

그림 2. SIR의 구조

Fig. 2. Structure of SIR.

로서, 전송 선로의 전기적 길이 비와 임피던스 비를 이용하면 원하는 주파수에 첫 번째 통과 대역과 두 번째 통과 대역을 생성시킬 수 있다. 따라서 PI-SIR을 통해 첫 번째 대역과 두 번째 대역을 형성하고 OLRR을 두 번째 대역에서만 동작하도록 설계하여, 두 번째 통과 대역의 특성을 강화시킨다. 또한, OLRR은 폴디드 구조로, 반 파장 링 공진기는 두 번째 공진 주파수에서 라인의 개방된 끝 부근에서 최대 전기장 밀도와 라인의 중앙에서 최대 자기장 밀도를 갖는다.

그림 2에 SIR 구조를 나타내었다. 공진 조건은 다음과 같은 방정식에 의하여 결정된다^[7].

$$\tan\theta_1 = -R_z \cot\theta_2, \text{ at } f_0 \quad (1)$$

$$\cot\theta_1 = -R_z \cot\theta_2, \text{ at } f_{s1} \quad (2)$$

f_0 와 f_{s1} 은 이중 대역 대역 통과 여파기의 첫 번째 대역과 두 번째 대역의 중심 주파수이다. $a=f_{s1}/f_0$ 는 주파수 비이고, $R_z=Z_2/Z_1$ 는 임피던스 비이다. θ_1 와 θ_2 는 각각 높은 임피던스(Z_1) 선로와 낮은 임피던스(Z_2) 선로의 전기적 길이이다. 길이 비를 $U=\theta_2/(\theta_1+\theta_2)$ 라고 정의하면, 그림 3과 같은 특성을 얻을 수 있다.

 그림 3. R_z 와 U 에 대한 f_{sl}/f_0

 Fig. 3. f_{sl}/f_0 for R_z and U .

III. 시뮬레이션 및 측정 결과

제안된 설계 방법의 타당성을 보이기 위하여 버터워즈(Butterworth) 응답을 갖는 이중 대역 대역 통과 여파기를 설계 및 제작하였다. 여파기 규격과 규격에 따른 설계 파라미터^[8]를 표 1에 나타내었다.

제안된 여파기 제작에 사용된 기판은 유전율이 10.2이고, $\tan \delta$ 가 0.0023인 RT/Duroid6010.2LM이다.

먼저 규격을 만족하는 SIR의 기하학적 구조를 결정한다. 주파수 비 a 가 2.37이므로, 그림 3으로부터 $R_z=0.67$, $U=0.61$ 로 결정되고 $Z_1=50 \Omega$ (0.6 mm)라고 하면, $Z_2=33.5 \Omega$ (1.2 mm), $\theta_1=0.538 \text{ rad}$ (4.0 mm), $\theta_2=0.841 \text{ rad}$ (6.1 mm)로 얻어진다. 결정된 치수를 적용한 공진기를 구부려서 PI-SIR 구조를 형성한다.

결합계수 규격은 각각의 공진기 사이의 간격을 조정하고, 외부 Q -factor 규격은 각각의 공진기와 피

표 1. 규격 및 설계 파라미터

Table 1. Specifications and design parameters.

파라미터	첫 번째 대역	두 번째 대역
중심 주파수 GHz	$f_0=2.45$	$f_{s1}=5.80$
3 dB-FBW % (MHz)	12(290)	5(290)
차수	2	2
소자값	$g_1=g_2=1.4142$ $g_0=g_3=1$	$g_1=g_2=1.4142$ $g_0=g_3=1$
결합계수	$M_1=0.085$	$M_2=0.037$
Q -factor	$Q_{ei}=Q_{eo}=11.55$	$Q_{ei}=Q_{eo}=27.34$

 그림 4. D_{12} 에 따른 결합 계수 M_1

 Fig. 4. Coupling coefficient M_1 against D_{12} .

드 라인의 간격을 조정하면 만족시킬 수 있다.

PI-SIR 간의 간격 D_{12} 에 따른 결합계수 M_1 의 변화를 그림 4에 나타내었다. Full-wave EM simulator인 HFSS의 Eigen-frequency 해석 방법을 이용하여 공진 주파수들을 구하고 얻어진 공진 주파수로 부터 결합계수를 계산^[9]한 결과이다. 그림 4로부터 설계 값($M_1=0.085$)에 가까운 M 값을 갖는 $L_{c1}=3.2 \text{ mm}$, $D_{12}=0.4 \text{ mm}$ 또는 $L_{c1}=3.7 \text{ mm}$, $D_{12}=0.5 \text{ mm}$ 를 선택할 수 있다. $L_{c1}=3.2 \text{ mm}$, $D_{12}=0.4 \text{ mm}$ 의 경우 피드 라인의 거리가 멀어짐에 따라 OLRR을 형성하는데 문제가 따른다. 따라서 $L_{c1}=3.7 \text{ mm}$, $D_{12}=0.5 \text{ mm}$ 로 결정한다.

PI-SIR과 마이크로스트립 피드 라인(특성 임피던스는 50Ω , 폭은 0.6 mm)을 최대 자기장으로 결합시키기 위해 피드 라인의 한 쪽 끝을 개방시켰다. 피드 라인의 자기장 분포는 그림 5와 같다. 2.45 GHz에서 자기장이 최대가 되는 개방단으로부터 10.8 mm 떨어진 지점($R_1=37.2 \text{ mm}$)에 PI-SIR을 위치시킨다.

PI-SIR의 부하 효과로 인하여 D_{11} 에 따라 외부 Q -factor와 반사 계수가 변화하게 된다. 그 결과는 그림 6과 같다. 최대 반사 손실이 -10 dB 이하 값

그림 5. 피드 라인의 H-field 분포(@ 2.45 GHz)

Fig. 5. H-field distribution for feed line(@ 2.45 GHz).

그림 6. D_{11} 에 따른 Q -factor와 반사 계수
Fig. 6. Q -factor and return loss for D_{11} .

그림 7. D_{22} 에 따른 결합 계수 M_2
Fig. 7. Coupling coefficient M_2 against D_{22} .

을 가지면서 설계 Q 값($Q_{ei}=Q_{eo}=11.55$)과 가장 근접한 값을 갖도록 $D_{11}=0.3$ mm로 선택한다.

동일한 방법으로 OLRR을 설계한다. OLRR의 전송 선로 특성 임피던스는 53 Ω (폭은 0.5 mm)이다. 균일 OLRR의 길이는 두 번째 대역의 중심 주파수에서 반 파장인 10 mm이다. D_{22} 에 따른 결합계수 M_2 변화를 그림 7에 나타내었다. 설계 파라미터($M_2=0.037$)에 근접한 값을 갖도록 $L_{c2}=0.7$ mm, $D_{22}=0.5$ mm로 결정한다.

PI-SIR과 마찬가지로 OLRR과 마이크로스트립 피드 라인(특성 임피던스=50 Ω , 폭=0.6 mm)을 최대 자기장으로 결합시키기 위하여 피드 라인의 한 쪽 끝을 개방시켰다. 피드 라인의 자기장 분포는 그림 8과 같다. 5.8 GHz에서 자기장이 최대가 되는 위치

그림 8. 피드 라인의 H-field 분포(@ 5.8 GHz)
Fig. 8. H-field distribution for feed line(@ 5.8 GHz).

그림 9. D_{21} 에 따른 Q -factor와 반사 계수
Fig. 9. Q -factor and return loss for D_{21} .

인 개방단으로부터 43.8 mm인 지점($R_1=4.2$ mm)에 OLRR을 위치시킨다.

그림 9에 D_{21} 에 따른 외부 Q -factor와 반사 계수 변화를 나타내었다. 최대 반사 손실이 -10 dB 이하 값을 가지면서 설계 Q 값($Q_{ei}=Q_{eo}=27.34$)과 가장 근접한 값을 갖도록 $D_{21}=0.4$ mm로 선택한다.

그림 10은 제작된 이중 대역 대역 통과 여파기의

그림 10. 제작된 이중 대역 대역 통과 여파기
Fig. 10. Fabricated dual-band bandpass filter with coupled-line feeding.

그림 11. PI-SIR과 OLRR의 시뮬레이션 결과
Fig. 11. Simulated results for PI-SIR and OLRR.

사진이다. 여파기의 크기는 피드 라인을 포함하여 $48 \text{ mm} \times 9.9 \text{ mm}$ ($\lambda \times 0.21 \lambda$)이다. λ 는 첫 번째 통과 대역의 중심 주파수에서 기판에서 전파되는 전파의 파장(48 mm)이다.

그림 11은 각각의 공진기에 대한 시뮬레이션 특성이다. PI-SIR에 의하여 첫 번째 통과 대역과 두 번째 통과 대역이 형성된 것을 볼 수 있고, OLRR에 의하여 두 번째 통과 대역만이 형성된 것을 알 수 있다.

그림 12는 HFSS 시뮬레이션 결과 및 벡터 회로 망 분석기(Agilent N5230A)로 측정된 주파수 응답 특성이다. 표 2에 각 대역의 규격과 시뮬레이션 및 측정된 주파수 응답을 나타내었다. 첫 번째 대역의 중심 주파수는 2.48 GHz, 대역폭은 284 MHz(11.5 %), 삽입 손실은 -1.68 dB 로 측정되었고, 두 번째 대역

그림 12. 이중 대역 대역 통과 여파기에 대한 시뮬레이션 및 측정된 주파수 응답
Fig. 12. Simulated and measured frequency responses for dual-band bandpass filter.

표 2. 규격과 시뮬레이션 및 측정된 결과
Table 2. Specifications and simulated and measured results.

	파라미터	f_1	f_2
규격	중심 주파수 (GHz)	2.45	5.80
	3 dB-FBW % (MHz)	12.0 (290)	5.0 (290)
시뮬레이션 (각 공진기)	중심 주파수 (GHz)	2.51	5.88
	3 dB-FBW % (MHz)	12.5 (314)	5.2 (304)
	삽입 손실 (dB)	-1.13	-2.05
시뮬레이션 (여파기)	중심 주파수 (GHz)	2.51	5.94
	3 dB-FBW % (MHz)	12.3 (308)	5.6 (332)
	삽입 손실 (dB)	-1.10	-2.03
측정 (여파기)	중심 주파수 (GHz)	2.48	5.73
	3 dB-FBW % (MHz)	11.5 (284)	6.1 (348)
	삽입 손실 (dB)	-1.68	-2.73

의 중심 주파수는 5.73 GHz, 대역폭은 348 MHz(6.1 %), 삽입 손실은 -2.73 dB 로 측정되었다. 측정 결

과로부터 두 번째 통과 대역을 비교적 협대역으로 형성시켰음을 볼 수 있다.

IV. 결 론

PI-SIR과 OLRR을 이용한 마이크로스트립 이중 대역 대역 통과 여파기의 새로운 설계 방법을 제안하였다. PI-SIR은 의사 인터디지털의 결합 형태를 가지면서 SIR 구조를 갖는 공진기로서 각 선로의 임피던스와 전기적 길이를 조절하여 원하는 주파수에 대역을 조정할 수 있다. 따라서 PI-SIR을 이용하여 첫 번째 통과 대역과 두 번째 통과 대역을 형성하고, OLRR을 이용하여 두 번째 통과 대역 특성을 강화시켰다. 2.45 GHz와 5.8 GHz에서 동작하는 이중 대역 여파기의 설계, 제작 및 측정함으로써 제안된 여파기가 유용하다는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 여파기는 각 대역의 중심 주파수에서 입력 라인과 출력 라인, 모두 H-field가 최대인 지점에 공진기를 위치시키기 위해 첫 번째 대역은 한 파장, 두 번째 대역은 5/2 파장을 갖도록 피드 라인의 길이를 결정하였다. 이와 같이 피드 라인의 길이를 확보하게 되면서 크기가 커지는 단점을 갖게 된다. 이는 각 대역에서 피드 라인의 길이를 더 작은 파장을 갖도록 하면서, H-field가 최대인 지점에 공진기를 위치시킨다면 충분히 감소시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] C. Quendo, E. Rim, and C. Person, "An original topology of dual-band filter with transmission zeros", *IEEE MTT-S Int. Dig. Microwave Symp.*, vol. 2, pp. 1093-1096, Jun. 2003.
- [2] J. Lee, K. Sarabandi, "A synthesis method for dual-passband microwave filters", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 6, pp. 1163-1170, Jun. 2007.
- [3] Y. M. Chen, S. F. Chang, "A compact stepped-impedance pseudo-interdigital bandpass filter with controllable transmission zero and wide stopband range", *European Microw. Conference*, pp. 783-786, Sep. 2009.
- [4] M. H. Weng, H. W. Wu, and Y. K. Su, "Compact low loss dual-band bandpass filter using pseudo-interdigital stepped impedance resonators for WLANs", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 187-189, Mar. 2007.
- [5] F. Guan, X. Sun, W. Xue, and J. Zhang, "Design of a tunable dual-band filter using step-impedance resonators with wide stopband", *2008 Global Symposium on Millimeter Waves*, pp. 362-364, Apr. 2008.
- [6] C. Y. Chen, C. Y. Hsu, "A simple and effective method for microstrip dual-band filters design", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 16, no. 5, pp. 246-248, May 2006.
- [7] M. Makimoto, S. Yamashita, *Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication*, Springer Series in Advanced Electromagnetics, New York, 2001.
- [8] G. Matthaei, L. Young, and EMT Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, McGraw-Hill, New York, pp. 98, 432, 1964.
- [9] 김홍득, 민병철, 최영환, 문승현, 이승민, 오병두, "결합 계수를 이용한 헤어콤 여파기의 설계", *대한전자공학회 학술대회 논문집*, 21(2), pp. 97-100, 1998년 10월.

임 지 은

2010년 2월: 충남대학교 전기정보
통신공학부 (공학사)
2010년 3월~현재: 충남대학교 전
파공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선 통신용 여파기,
위성 탑재체 EMC

이 재 현

1978년 2월: 인하대학교 전자공학
과 (공학사)
1985년 2월: 한국과학기술원 전기
및 전자과 (공학석사)
1993년 2월: 한국과학기술원 전기
및 전자과 (공학박사)
1991년 2월~2001년 2월: 한국전자
통신연구원책임연구원
2001년 2월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
[주 관심분야] 여파기, EMC, 초고주파 신호 처리 소자