소형의 삼중 모드 공진기와 삼중 모드 필터 설계

Compact Triple-Mode Resonator and Triple-Mode Filter Design

이 자 현 · 임 영 석

Jahyeon Lee · Yeongseog Lim

요 약

본 논문에서는 새로운 구조의 작은 크기의 삼중 모드 공진기를 제안한다. 제안된 구조는 소형화를 위해 반파장의 Stepped Impedance Resonator에 개방 스테브와 단락 스테브를 이용하였으며, 개방 스테브에 의해 자체적으로 하나의 전송 영점을 발생시킨다. 각각의 세 가지 공진 모드에서 발생하는 공진점을 이론적으로 해석하였다. 제안된 삼중 모드 공진기를 이용하여 세 개의 전송 극점과 하나의 전송 영점을 갖는 2.4 GHz WLAN에 적용 가능한 대역 통과 필터를 설계 및 제작하였다. 제작된 삼중 모드 필터는 중심 주파수 2.4 GHz에서 15.8 %의 3 dB 대역 폭과 2.4~2.5 GHz 통과 대역 내에서 최대 1.17 dB 이하의 삽입 손실을 갖는다. 제작된 삼중 모드 공진기의 필터의 크기는 급전 선로를 포함하여 15.9 mm×9.7 mm로 기존의 삼중 모드 필터에 대비하여 매우 작은 크기를 갖는다.

Abstract

In this paper, we present a compact triple-mode resonator. The resonator itself can provide three transmission poles and one transmission zero. The resonance condition of each mode is analyzed theoretically, and the transmission zero is generated by open stub. Using this proposed resonator, a compact three pole bandpass filter for 2.4 GHz WLAN application with one transmission zero is designed and fabricated. The fabricated triple-mode filter shows 3 dB bandwidth of 15.8 % with the center frequency 2.4 GHz and less than 1.17 dB in 2.4~2.5 GHz passband. The size of fabricated triple-mode filter including the feed lines is 15.9 mm×9.7 mm and very compact compared with previous reported triple-mode filter.

Key words : Triple-Mode Resonator, Microstrip Resonator, Triple-Mode Filter

I. 서 론

근대의 초고주파 통신 시스템에서 초고주파 마이크로스트립 필터는 작은 크기와 낮은 삽입 손실, 가파른 스킨 특성, 고조파 차단 특성과 같은 높은 성능을 요구하고 있다. 이러한 요구 조건을 만족시키기 위한 최선의 방법 중 하나는 1972년 Wolff에 의해 최초 제안된 이중 모드 마이크로스트립 공진기를 이용하여 초고주파 필터를 설계하는 것이다^[1]. 이중 모

드 공진기는 각각의 공진 모드의 공진점을 이중으로 동조시킬 수 있으므로, 초고주파 필터 설계시에 필요한 공진기의 수를 절반으로 줄일 수 있다. 이중 모드 마이크로스트립 공진기는 Wolff에 의해 최초 제안된 후로 다양한 형태로 많은 연구자들에 의해 제안되었다^{[2]~[6]}. 이중 모드를 형성하는 방법으로, 참고문헌 [2]~[4]에서는 한 파장 폐회로 공진기나 패치형 공진기에 컵돌을 이용하였고, 참고문헌 [5], [6]에서는 반파장 공진기의 좌우 대칭 평면에 개방 스

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

· 논문 번호 : 20101130-170

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

· 수정완료일자 : 2011년 2월 21일

터브를 이용하였다. 또한, 필터 설계시 높은 차단 대역 특성을 갖게 할 수 있는 삼중 모드 공진기들이 제안되어졌다^{[7]~[11]}. 이러한 삼중 모드 공진기는 삼중 모드를 얻기 위해 참고문헌 [7]~[8]에서는 반파장 공진기에 두 개의 개방 스테르브를 이용하였고, 참고문헌 [9]와 [10]에서는 반파장 공진기에 개방 스테르브와 단락 스테르브를 사용하였으며, 참고문헌 [11]에서는 한파장 이중 모드 공진기 내부에 섭동이 달린 반파장 공진기를 사용하였다.

또한, 이러한 이중 또는 삼중 모드 공진기들은 물리적으로 개방 스테르브 효과 등에 의해 자체적으로 하나 이상의 전송 영점을 발생시키며, 필터 설계시 대칭 혹은 비대칭의 주파수 응답 특성을 갖게 할 수 있다.

본 논문에서는 새로운 구조의 작은 크기의 삼중 모드 공진기를 제안한다. 제안된 구조는 반파장의 stepped impedance resonator(SIR)에 개방 스테르브와 단락 스테르브를 삽입된 형태로 삽입된 개방 및 단락 스테르브에 의해 추가적으로 두 개의 공진 모드가 유도되며, 개방 스테르브에 의해 자체적으로 하나의 전송 영점을 발생시킨다. 또한, SIR과 미앤더 모양의 개방 스테르브를 사용함으로써 기존의 삼중 모드 공진기에 비해 작은 크기를 갖게 할 수 있으며, 고조파 특성을 향상시킬 수 있다^[13]. 각각의 세 가지 공진 모드에서 발생하는 공진점을 이론적으로 해석하였다. 제안된 삼중 모드 공진기를 이용하여 세 개의 전송 극점과 하나의 전송 영점을 갖는 삼중 모드 필터를 설계 및 제작하였다.

II. 삼중 모드 공진기 해석

그림 1은 제안된 공진기의 해석을 간단히 하기 위한 등가 모델이다. 제안된 공진기는 반파장의 SIR의 좌우 대칭 평면에 개방의 스테르브와 단락 스테르브가 삽입된 형태이다. 여기서 삽입된 개방 및 단락 스테르브에 의해 반파장 SIR의 공진 모드 외에 추가적으로 두 개의 공진 모드가 형성된다. 또한, 개방 스테르브에 의해 하나의 전송 영점이 발생한다.

그림 1. 제안된 소형의 삼중 모드 공진기의 등가 모델
Fig. 1. Equivalent model of the proposed compact triple-mode resonator.

제안된 삼중 모드 공진기는 좌우 대칭 회로이므로 기-우 모드 해석을 통해 각각의 공진 모드를 찾을 수 있다. 그림 2는 각각의 기 또는 우 모드 등가 공진기 모델이다. 기 모드에서는 좌우 대칭 평면이 가상 접지로 대체되며, 개방 및 단락 스테르브가 무시된다. 여기서 제안된 삼중 모드 공진기의 기본 공진 주파수인 f_{odd} 가 유도되며, Y_{odd} 는 식 (1)과 같이 구해진다.

$$Y_{odd} = -jY_2 \frac{Z_2 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2}{Z_1 \tan \theta_1 + Z_2 \tan \theta_2} \quad (1)$$

여기서 Y_2 는 Z_2 의 어드미턴스이다.

우 모드에서는 가상 접지가 개방 회로로 대체되며, 삽입된 개방 및 단락 스테르브의 너비가 절반으로 나누어지게 된다. 여기서 $w_{os}=w_{ss}=2w_1$ 이면 나누어진 개방 및 단락 스테르브의 임피던스는 Z_1 이 된다. 우 모드에서는 두 개의 공진 주파수 f_{even1} 과 f_{even2} 가 각각 f_{odd} 의 상측과 하측에 유도되며, Y_{even} 은 아래 식 (2)와 같이 구해진다. 또한, 개방 스테르브에 의해 하나의 전송 영점 f_{TRZ} 가 발생한다.

그림 3은 $Z_1=126 \text{ Ohm}$, $Z_2=41 \text{ Ohm}$, 2.45 GHz에서 $\theta_1=58^\circ$, $\theta_2=11.4^\circ$, $\theta_{os}=85^\circ$, $\theta_{ss}=5^\circ$ 일 때의 그림 1과 그림 2의 Y_{in} , Y_{odd} , Y_{even} 을 같이 도시한 그래프이다.

$$Y_{even} = -jY_2 \frac{Z_2(\tan \theta_{ss} - \cot \theta_{os} + \tan \theta_{ss} \cot \theta_{os} \tan \theta_1) + Z_1 \tan \theta_2 (\tan \theta_{ss} \cot \theta_{os} - \tan \theta_1 (\tan \theta_{ss} - \cot \theta_{os}))}{Z_1(\tan \theta_{ss} \cot \theta_{os} - \tan \theta_1 (\tan \theta_{ss} - \cot \theta_{os})) - Z_2 \tan \theta_2 (\tan \theta_{ss} - \cot \theta_{os} + \tan \theta_{ss} \cot \theta_{os} \tan \theta_1)} \quad (2)$$

그림 2. 제안된 소형의 삼중 모드 공진기의 등가 모델
Fig. 2. Equivalent model of the proposed compact triple-mode resonator.

그림 3. 등가 모델의 어드미턴스
Fig. 3. Admittance of equivalent model.

제안된 삼중 모드 공진기는 기 모드(Y_{odd})에서 한 점, 우 모드(Y_{even})에서 두 점이 서셉턴스가 0이 되어 공진점이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 서셉턴스가 0이 되는 주파수는 각각 $f_{odd}=2.45$ GHz, $f_{even1}=2.541$ GHz, $f_{even2}=2.245$ GHz이다.

그림 4는 개방 및 단락 스텔브의 길이 변화에 따른

그림 4. 스텔브의 길이 변화에 따른 주파수 응답
Fig. 4. Frequency responses with various stub length.

공진점들의 영향을 보다 쉽게 살펴보기 위해 그림 1의 등가 모델에 공진점에 영향이 거의 없도록 0.01 pF의 커패시터로 약한 임출력 결합을 주고 구한 개방 및 단락 스텔브의 길이 변화에 따른 시뮬레이션 주파수 응답이다. 단락 스텔브의 길이가 3°일 때, 개방 스텔브의 전기적 길이가 80°에서 88°까지 길어짐에 따라 f_{even1} 은 2.66 GHz에서 2.479 GHz까지 변화하고, f_{even2} 는 2.261 GHz에서 2.217 GHz까지 변화한다. 또한, f_{TRZ} 는 2.75 GHz에서 2.5 GHz까지 변화한다. 개방 스텔브의 길이가 85°일 때, 단락 스텔브의 길이가 1°에서 5°까지 변화함에 따라 f_{even2} 는 2.412 GHz에서 2.239 GHz로 변화하고, f_{even1} 은 2.59 GHz에서 2.559 GHz로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한, f_{TRZ} 는 단락 스텔브에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. f_{odd} 는 개

방 및 단락 스테르브에 영향을 받지 않고 SIR에 의해 서만 결정되는 것을 확인할 수 있으며, f_{even1} 과 f_{even2} 는 각각 개방 및 단락 스테르브에 주로 영향을 받는 것을 알 수 있다. 즉, 제안된 삼중 모드 공진기는 각각의 공진 주파수를 원하는 주파수에서 공진시키기 위해서 먼저 f_{odd} 에 공진하도록 SIR을 설계하고, f_{even1} 과 f_{even2} 에 공진하도록 개방 및 단락 스테르브의 길이를 조절하여 설계할 수 있다.

III. 필터 설계

제안된 삼중 모드 공진기 하나를 이용하여 세 개의 전송 극점과 하나의 전송 영점을 갖는 삼중 모드 필터를 설계할 수 있다. 그림 5는 삼중 모드 대역 통과 필터의 구조이다. 소형화를 위해 개방 스테르브를 미앤더 모양으로 변경하였으며, 두 개의 결합 선로를 이용하여 입출력 결합을 하였다. 필터의 설계 과정은 삼중 모드 공진기의 공진점 f_{odd} , f_{even1} , f_{even2} 를 주어진 필터의 요구 조건에 만족하도록 공진 주파수를 결정하고, 입출력 결합 선로를 조절하여 필터의 요구 조건에 맞도록 Q_e (External Quality Factor)를 구현할 수 있다^[13]. 여기서 삼중 모드 공진기의 공진 주파수들은 $f_{even2} < f_{odd} < f_{even1}$ 의 조건을 만족해야 한다. 본 논문에서는 필터의 설계를 위해 삼중 모드 공진기의 각각의 공진점의 위치를 3차 Chebyshev 대역 통과 필터의 극점이 발생하는 주파수에 위치하게 하였다. 필터의 설계 목표는 중심 주파수 2.45 GHz, 대역폭은 300 MHz로 설정하였다. 등리플 레벨 0.01 dB일

그림 5. 삼중 모드 필터의 구조
Fig. 5. Structure of the triple-mode filter.

그림 6. 3차 Chebyshev 대역 통과 필터와 최적화된 삼중 모드 필터의 주파수 응답

Fig. 6. Frequency response of 3rd order Chebyshev bandpass filter and optimized triple-mode filter.

그림 7. 제작된 삼중 모드 필터의 사진
Fig. 7. Photograph of fabricated triple-mode filter.

때 3차 Chebyshev 계수는 $g_0=g_4=1$, $g_1=g_3=1.0316$, $g_2=0.9703$ 이며, 이때 발생하는 극점들의 주파수는 각각 2.36 GHz, 2.45 GHz, 2.53 GHz이다^[13]. 그림 6은 3차 Chebyshev 대역 통과 필터와 최적화 과정을 통해 얻어진 삼중 모드 필터의 회로 시뮬레이션 주파수 응답을 보여준다. 삼중 모드 공진기의 공진 주파수는 각각 $f_{odd}=2.45$ GHz, $f_{even1}=2.53$ GHz, $f_{even2}=2.36$ GHz이며, $Z_1=126$ Ohm, $Z_2=41$ Ohm, 2.45 GHz에서 $\theta_1=58^\circ$, $\theta_2=11.4^\circ$, $\theta_{os}=83^\circ$, $\theta_{ss}=5^\circ$ 이다. 여기서 Z_1 과 Z_2 는 참고문헌 [12]를 참고하여 고조파 특성이 $3f_0$ 이상 되도록 약 0.3 정도의 비율을 갖도록 결정하였다. 또한, 개방 스테르브에 의해 통과 대역의 상측에 하나의 전송 영점이 발생하며, $f_{TRZ}=2.81$ GHz이다.

그림 7은 유전율 3.5, 두께 0.76 mm의 Taconic사의 RF-35a를 이용하여 제작된 삼중 모드 필터의 사

표 1. 기존에 연구와의 비교

Table 1. Comparison of previously reported.

Ref. f_c (GHz) / FBW(%)	Insertion loss(dB)	Size(mm×mm), ϵ_r equiv. size(mm ²)
Ref. [7] 2.35 / 14.9	1.15	25×15, 2.625 (324)
Ref. [8] 2 / 30.6	1.13	21.7×21.7, 9.2 (763)
Ref. [9] 2.5 / 8	1.7	36.9×16.05, 3.66 (605)
Ref. [10] 3.4 / 15	1	15.2×15.8, 2.55 (213)
Ref. [11] 5.06 / 4.3	2.2	10.9×10.9, 3.38 (116)
This work 2.4 / 15.3	1.17	5.9×9.1, 3.5 (53)

그림 8. 시뮬레이션 및 측정된 통과 대역 주파수 응답
Fig. 8. Simulation and measured passband frequency response.

진이다. 단락 스테브는 0.3 ϕ 의 비아를 사용하였다. 급전 선로를 포함한 제작된 필터의 전체 크기는 15.9 mm×9.7 mm이다. 그림 8은 측정된 삼중 모드 필터의 통과 대역 주파수 응답을 EM 시뮬레이션과 비교하여 나타낸 그림이다. 측정 결과, 2.4~2.5 GHz의 통과 대역내 최대 1.17 dB 이하의 삽입 손실과 최소 13 dB 이상의 반사 손실을 보인다. 이는 제작상의 오차로 주로 비아에 인한 손실로 보인다.

표 1은 기존에 연구된 다양한 삼중 모드 필터와 제안된 필터를 비교 정리한 표이다. 다양한 유전율을 갖는 필터와의 크기를 비교하기 위해 등가 크기를 이용하여 비교하였다. 등가 크기는 길이와 너비에

그림 9. 측정된 광대역 주파수 응답

Fig. 9. Measured broad band frequency response.

$\sqrt{(\epsilon_r/3.5)}$ 를 곱하여 계산하였다. 제작된 삼중 모드 필터는 기존의 삼중 모드 공진기들과 비교하여 통과 대역내 삽입 손실 차이가 거의 없이 매우 작은 크기를 갖는다.

그림 9는 측정된 필터의 광대역 주파수 응답이다. 측정 결과, 하나의 전송 영점이 2.75 GHz에서 발생되며, 참고문헌 [9]와 비교하여 더 넓은 차단 대역을 갖는다.

IV. 결 론

본 논문에서는 소형의 삼중 모드 공진기와 이를 이용하여 소형의 삼중 대역 필터를 설계 및 제작하였다. 삼중 모드의 유도를 위해 반파장의 SIR의 좌우 대칭 평면에 개방 및 단락 스테브를 이용하였으며, 각각의 공진 모드를 등가 모델을 이용하여 해석하였다. 또한, 미앤더 모양의 개방 스테브와 SIR을 이용하여 기존의 삼중 모드 공진기와 비교하여 크기를 소형화 하고 고조파 특성을 향상하였다.

참 고 문 헌

- [1] I. Wolff, "Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator", *Electron. Lett.*, vol. 8, no. 12, pp. 29-30, 1972.
- [2] C. Karpuz, G. M. Eryilmaz, and A. Görür, "Compact dual-mode microstrip quasi-meander loop resonator for filter applications", *38th European Mi-*

- crowave Conference*, pp. 630-633, 2008.
- [3] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a novel meander loop resonator", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 5, no. 11 pp. 371-372, 1995.
- [4] J. L. Li, S. -W. Qu, and Q. Xue, "Compact dual-mode patch resonator for filter applicatoins", *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on*, pp. 83-86, 2008.
- [5] J. -R. Lee, J. -H. Cho, and Sang-Won Yun, "New compact bandpass filter using microstrip $\lambda/4$ resonators with open stub inverter", *IEEE, Microwave and Guided Wave Letter*, vol. 10, no. 12, pp. 526-527, 2000.
- [6] W. -H. Tu, "Compact double-mode cross-coupled microstrip bandpass filter with tunable transmission zeros", *IET. Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 2, no. 4, pp. 373-377, 2008.
- [7] W. Shen, X. -W. Sun, and W.-Y. Yin, "A novel microstrip filter using Three-Mode Stepped Impedance Resonator(TSIR)", *IEEE. Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 774-776, 2009.
- [8] L. Zhang, Z. Yu, and L. Guo, "A novel microstrip

- triple-mode wideband bandpass filter using radial-line stubs", *2010 Microwave and Milimeter Wave Technology*, pp. 471-743, 2010.
- [9] W. -H. Tu, "Microstrip bandpass filters using cross-shaped triple-mode resonator", *IET. Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 4, issue 9, pp. 1421-1426, 2010.
- [10] Q. -X. Chu, F. -C. Chen, Z. -H. Tu, and H. Wang, "A novel crossed resonator and its applications to bandpass filters", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no. 7, pp. 1753-1759, 2009.
- [11] A. Balalem, A. R. Ali, S. Amari, J. Machac, and A. Omar, "Realization of a microstrip triple-mode bandpass filter using a square-loop resonator", *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on*, pp. 849-852, 2009.
- [12] M. Makimoto, S. Yamashita., *Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication*, Springer, 2000.
- [13] J. S. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, New York: Willey, 2001.

이 자 현

RF 소자 설계

2007년 2월: 전남대학교 전자공학 전공 (공학사)
 2009년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 (공학석사)
 2009년 3월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 박사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계,

임 영 석

컴퓨터공학부 교수

1980년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1989년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학박사)
 1984년 9월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수
 [주 관심분야] 전자파 수치 해석, 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계, 안테나