

하나의 이중 모드 공진기를 이용한 대역 통과 필터 설계

Design of Bandpass Filter with a Single Dual-Mode Resonator

안재민 · 임영석

Jaemin An · Yeongseog Lim

요약

본 논문에서는 하나의 이중 모드 공진기를 이용한 대역 통과 필터의 새로운 설계 방법을 제안한다. 제안한 설계 방법은 이중 모드 공진기를 두 개의 단일 공진기로 보고 공진기 사이의 결합 계수를 구하여, 이를 바탕으로 이중 모드 공진기의 두 공진 주파수를 계산한 후 필터 전송 영점의 위치에 따라 각각 배치하였다. 제안한 설계 방법을 검증하기 위해, E-모양의 이중 모드 공진기를 이용하여 WLAN 서비스 대역을 만족하고, 전송 영점이 각각 상측과 하측에 위치하는 대역 통과 필터를 설계·제작하였다.

Abstract

This paper proposes a new design method of bandpass filter with single dual-mode resonator. In the proposed method, a coupling coefficient between two resonators was obtained by considering a dual-mode resonator as two single resonators. Based on the obtained coupling coefficient, two resonant frequencies of dual-mode resonator were calculated and then arranged according to a transmission zero's location of required filter. To verify the proposed theory, two WLAN bandpass filters which have a transmission zero to a lower and an upper stopband respectively were designed and implemented.

Key words : Dual-Mode Resonator, Coupling Coefficient, Bandpass Filter

I. 서론

한정된 주파수를 효율적으로 사용해야 하는 현재의 무선 통신 기술에서, 대역 통과 필터는 협소한 대역폭과 높은 선택도를 갖는 우수한 주파수 선별 특성의 구현이 필요하다^[1]. 이는 필터의 차수 즉, 공진기의 개수를 증가시켜 구현함으로써 가능하지만, 필터의 크기가 증가하는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 해결하기 위한 방법으로, 이중 모드 공진기(dual-mode resonator)의 연구가 1972년 I. Wolff에 의해 처음 발표된^[2] 후 지속적으로 이루어지고 있다. 이중 모드 공진기는 하나의 공진기에 두 개의 공진점과 하나의 전송 영점(transmission zero)이 발생하여, 필

터의 소형화와 성능의 개선에 있어서 높은 성과를 이룰 수 있다^{[3]~[6]}.

하지만, 다수의 연구들이 이중 모드 공진기 자체의 특성에 치중하여 설명하고 있으며, 이를 이용한 필터의 설계 과정은 생략하고 있다^{[3]~[5]}. 최근 coupling matrix를 이용한 설계가 소개되고 있지만 설계의 과정이 상당히 복잡하고, 도파관 필터에 적합하기 때문에 microstrip 이중 모드 공진기를 이용한 대역 통과 필터 설계 적용에 어려움이 많다^{[6],[7]}. 이러한 단점과 어려움을 보완하기 위해 보다 간단하고 편리한 이중 모드 공진기를 이용한 필터의 설계 방법이 필요하다.

본 논문에서는 하나의 이중 모드 공진기를 이용

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

· 논문 번호 : 20100825-120

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

· 수정완료일자 : 2010년 10월 28일

Prototype 저역 통과 필터
↓ 대역 통과 필터 scaling, K-인버터
대역 통과 필터의 등가회로
↓ 회로 해석을 통한 등가회로의 변형
변형된 대역 통과 필터의 등가회로
↓ 결합 계수 계산
결합 계수를 이용한 공진 주파수 계산 (f_e, f_m)
↓ 설계 필터의 전송 영점 위치 고려
전송 영점의 위치에 따른 공진 주파수 배치 (f_{TZ}, f_{NTZ})

그림 1. 하나의 이중 모드 공진기를 이용한 대역 통과 필터 설계 과정
Fig. 1. Design procedure of bandpass filter with single dual-mode resonator.

한 대역 통과 필터의 새로운 설계 방법을 제안한다. 제안하는 설계 과정은 그림 1에 나타내었으며, 간략한 설명은 다음과 같다. 이중 모드 공진기를 두 개의 단일 공진기로 보고, K-인버터와 회로 해석을 통해 원하는 필터 설계 목표에 맞는 결합 계수를 구한다. 결합 계수를 이용하여 필터의 공진 주파수 즉, pole의 위치(f_e, f_m)를 계산한 후, 이중 모드 공진기의 전송 영점이 발생하는 공진 주파수(f_{TZ})와 전송 영점이 발생하지 않는 공진 주파수(f_{NTZ})를 필터의 전송 영점 위치에 맞게 f_e, f_m 로 배치시킨다. 이와 같은 과정을 통해서, 하나의 이중 모드 공진기로 구현이 가능한 통과 대역의 상측 혹은 하측에 전송 영점이 위치하는 대역 통과 필터를 설계할 수 있다. 제안한 설계 방법을 검증하기 위해, WLAN 대역을 만족하고 상측과 하측에 각각 전송 영점이 위치하는 대역 통과 필터를 설계 및 제작·측정하였다.

II. 대역 통과 필터 설계 방법

2.1 등가회로 분석을 통한 공진 주파수 계산

하나의 이중 모드 공진기를 사용한 대역 통과 필터는 전송 영점을 제외한 두 개의 단일 공진기로 이루어진 2차 대역 통과 필터로 볼 수 있다. 그림 2는 K-인버터를 이용하여 변형된 2차 대역 통과 필터의 등가회로이다. 회로 해석의 편의를 위해 참조 면 A-

하나의 이중 모드 공진기를 이용한 대역 통과 필터 설계

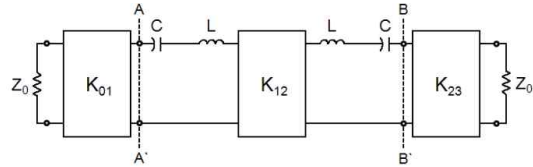


그림 2. 변형된 대역 통과 필터의 등가회로
Fig. 2. Transformed equivalent circuit for the bandpass filter.

A'과 B-B' 사이의 L, C 소자값을 같게 하고, 양 단의 특성 임피던스를 Z_0 로 동일하게 하였다. 이때 K_{01} , K_{12} , K_{23} 과 L, C의 값은 식 (1)~(4)와 같다.

$$K_{01} = K_{12} = \frac{Z_0 \sqrt{g_2}}{\sqrt{g_1}} \quad (1)$$

$$K_{23} = Z_0 \sqrt{g_3} \quad (2)$$

$$L = \frac{Z_0 g_2}{\omega_0 FBW} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L} = \frac{FBW}{Z_0 \omega_0 g_2} \quad (4)$$

여기서, g_1, g_2, g_3 은 prototype 저역 통과 필터의 소자 값이고, Z_0 는 특성 임피던스, ω_0, FBW 는 각각 설계하고자 하는 대역 통과 필터의 중심 각주파수와 fractional bandwidth이다.

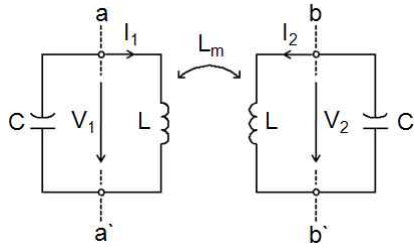
그림 2의 참조 면 A-A'과 B-B' 사이의 회로는 그림 3(a)와 같은 자체 결합을 갖는 두 개의 공진 회로로 볼 수 있다. 기본적인 회로 변환^[8]을 이용하면, 그림 3(a)는 그림 3(b)와 같은 회로로 변형할 수 있다.

그림 3(b)의 대칭 면 s-s'에 전개 벽과 자체 벽 조건을 적용하여 각 조건의 공진 주파수 f_e 와 f_m 을 식 (5), (6)과 같이, 결합 계수 k 는 f_e 와 f_m 을 이용하여 식 (7)과 같이 구할 수 있다^[1].

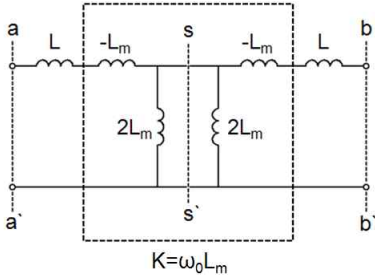
$$f_e = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L - L_m)C}} \quad (5)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L + L_m)C}} \quad (6)$$

$$k = \frac{L_m}{L} = \frac{f_e^2 - f_m^2}{f_e^2 + f_m^2} \quad (7)$$



(a) 자계 결합을 갖는 두 개의 공진 회로
(a) Circuit of two resonators with magnetic coupling



(b) 변형된 공진 회로
(b) Transformed circuit of two resonators with magnetic coupling

그림 3. 변형된 동가회로
Fig. 3. Transformed equivalent circuit.

대역 통과 필터의 중심 주파수 f_0 와 f_e, f_m 사이의 크기는 $f_e > f_0 > f_m$ 이다. 식 (5)~(7)을 이용하여, f_0 로 정규화한 $f_e - f_0$ 와 $f_0 - f_m$ 을 결합 계수 k 의 식으로 정리할 수 있으며, 이는 식 (8), (9)와 같다.

$$\frac{f_e - f_0}{f_0} = \frac{1 - \sqrt{1 - k}}{\sqrt{1 - k}} \quad (8)$$

$$\frac{f_0 - f_m}{f_0} = \frac{\sqrt{1 + k} - 1}{\sqrt{1 + k}} \quad (9)$$

k 의 증가에 따른 식 (8)과 (9)의 변화를 그림 4를 통해 살펴보면, 두 식의 차이는 $k=0.03$ 에서 $0.00068f_0$ 로 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 결합 계수 k 는 식 (1), (3)과 그림 3(b)의 $K = \omega_0 L_m$ 를 이용하여, 식 (10)과 같이 쓸 수 있다. 그림 4와 식 (10)

$$k = \frac{FBW}{\sqrt{g_1 g_2}} \quad (10)$$

을 보면, 좁은 대역폭을 갖는 대역 통과 필터의 설계에서 $f_e - f_0$ 와 $f_0 - f_m$ 의 차이가 무시할 수 있을 정도로 충분히 작으므로 f_e 와 f_m 은 $f_e = f_0 + \Delta f$, $f_m = f_0 - \Delta f$ 와 같이 표현할 수 있는 것을 알 수 있다.

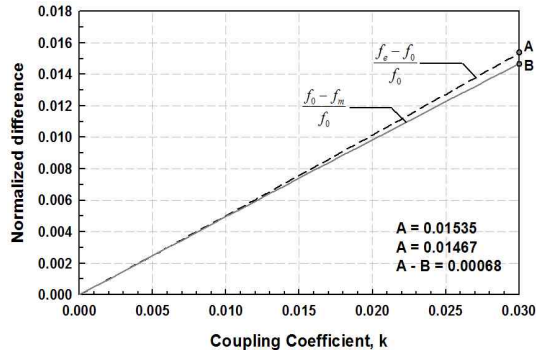


그림 4. $k=0.03$ 까지의 정규화한 차이의 변화
Fig. 4. Variation of the normalized difference up to $k=0.03$.

식 (7)을 이용하면, Δf 는 아래의 식과 같으므로

$$\Delta f = \frac{2f_0 - f_0 \sqrt{4 - 2k^2}}{k} \quad (11)$$

최종적으로 f_e, f_m 은 식 (12), (13)과 같이 f_0 와 k 의 식으로 표현할 수 있다.

$$f_e = f_0 + \frac{2f_0 - f_0 \sqrt{4 - 2k^2}}{k} \quad (12)$$

$$f_m = f_0 - \frac{2f_0 - f_0 \sqrt{4 - 2k^2}}{k} \quad (13)$$

f_e 와 f_m 은 f_0 와 FBW , g_1, g_2 를 대입하여 구할 수 있으며, 하나의 이중 모드 공진기로 구성된 대역 통과 필터의 pole을 나타낸다.



2-2 필터의 전송 영점 위치에 따른 주파수 배치

하나의 이중 모드 공진기로 구성된 대역 통과 필터는 전송 영점이 통과 대역 상측과 하측에 위치하는 두 가지의 필터로 설계가 가능하다. 이런 이유에서, 이중 모드 공진기의 전송 영점이 발생하는 공진 주파수 f_{TZ} 와 전송 영점이 발생하지 않는 공진 주파수 f_{NTZ} ^[4]는 설계하고자 하는 필터의 전송 영점 위치에 맞게 각각 f_e 와 f_m 으로 배치된다.

표 1은 필터의 주파수 응답 개형에 따른 공진 주파수의 위치를 나타낸 것이다. 통과 대역 상측에 전송 영점이 발생하는 대역 통과 필터는 f_{TZ} 가 필터의 중심 주파수 f_0 보다 큰 f_e 로, f_{NTZ} 는 f_0 보다 작은 f_m 으로

표 1. 필터 전송 영점 위치에 따른 공진 주파수의 위치

Table 1. Location of resonant frequencies according to a position of a transmission zero.

		전송 영점의 위치	
		통과 대역 상측	통과 대역 하측
필터의 주파수 응답 개형			
공진 주파수 위치	f_{TZ}	f_e	f_m
	f_{NTZ}	f_m	f_e

위치가 결정이 된다. 또한, 통과 대역 하측에 전송 영점이 발생하는 경우는 그와 반대로 f_{TZ} 가 f_m 으로, f_{NTZ} 가 f_e 로 결정되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 전송 영점의 위치에 따라 공진 주파수의 위치를 결정함으로써 원하는 필터를 설계할 수 있다.

III. 필터 설계 응용

본 절에서는 앞의 2절에서 설명한 설계 방법의 적합함을 보이기 위해, 이를 바탕으로 이중 모드 공진기를 이용하여 각각 상측과 하측에 전송 영점이 위치하는 대역 통과 필터를 설계·제작하였다.

필터의 설계 목표는 WLAN 서비스 대역으로 2.45 GHz의 중심 주파수와 4.08 %의 FBW를 갖는다. 0.01 dB의 통과 대역 ripple을 갖는 Chebyshev 저역 통과 필터 prototype^[9]을 사용하였고, E-모양의 이중 모드 공진기^[3]를 이용하여 구현하였다. 식 (10)과 (12), (13)을 바탕으로 구한 k 와 f_e, f_m 은 각각 0.028, 2.485 GHz, 2.414 GHz이다. 전송 영점이 상측에 위치하는 대역 통과 필터는 $f_{TZ}=2.485$ GHz, $f_{NTZ}=2.414$ GHz이고, 하측에 위치하는 필터는 $f_{TZ}=2.414$ GHz, $f_{NTZ}=2.485$ GHz이다.

그림 5는 E-모양의 이중 모드 공진기를 이용한 대역 통과 필터의 구조를 그린 것이다. 구조 변수 $L1$, $L2$ 와 SL 을 조절하여 공진 주파수 f_{TZ} 와 f_{NTZ} 를 원하는 주파수에 위치시킬 수 있다^[4]. 표 2는 f_{TZ} 와 f_{NTZ} 가 전송 영점이 통과 대역 상측에 발생하도록 2.485 GHz와 2.414 GHz에, 하측에 발생하도록 2.414 GHz와 2.485 GHz에 위치시켰을 때의 구조 변수들의 값을 정리한 것이다. 이때 사용한 유전체는 비유전율 2.46,

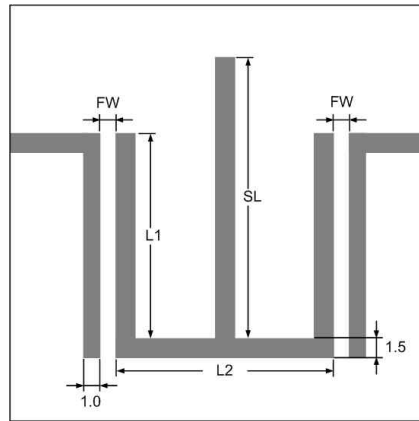


그림 5. E-모양의 이중 모드 공진기를 이용한 대역 통과 필터

Fig. 5. Bandpass filter with E-shaped dual-mode resonator.

높이 0.79 mm, $\tan \delta = 0.002$ 의 Teflon 유전체이다. 표 2를 이용하면 설계하고자 하는 필터의 주파수 응답에 맞게 그림 5의 공진기의 공진 주파수를 위치시킬 수 있다. 그리고 공진기와 급전 선로 사이의 간격 FW 의 크기를 조절하여 설계하고자 하는 필터의 응답을 얻을 수 있다.

그림 6은 FW 의 변화에 따른 삽입 손실의 변화를 나타내고 있으며, $FW=0.6$ mm일 때 중심 주파수 2.45 GHz, FBW 4.08 %의 응답을 구현할 수 있다.

그림 7은 표 2의 구조 변수를 이용하여 설계한 대역 통과 필터의 제작 사진이다. 왼쪽은 전송 영점이 통과 대역 상측에 발생하는 필터이며, 오른쪽은 전송 영점이 통과 대역 하측에 발생하는 필터이다. 그림 8은 제작한 필터의 측정 결과를 나타낸다. 필터

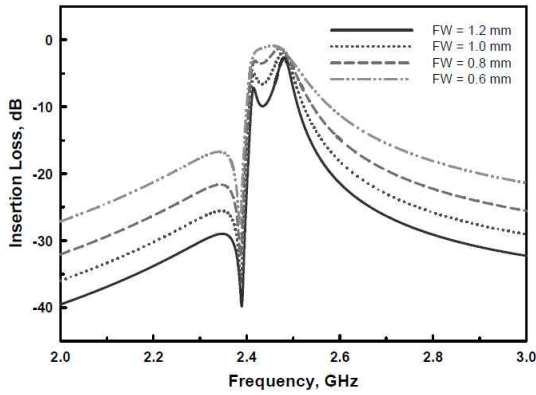


그림 6. FW 변화에 따른 주파수 응답
Fig. 6. Frequency response of the filter with various FW.

표 2. 전송 영점 위치에 따른 구조 변수
Table 2. Structural variable as a position of a transmission zero.

단위: mm	L_1	L_2	S_L
전송 영점 상측 위치	13.4	14.7	21
전송 영점 하측 위치	15	14.5	22.3

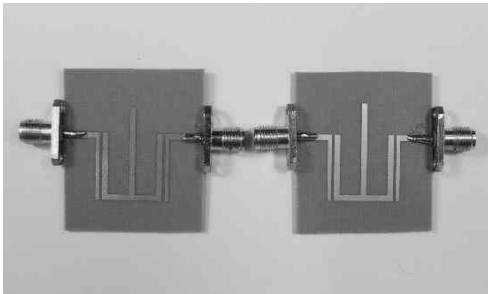
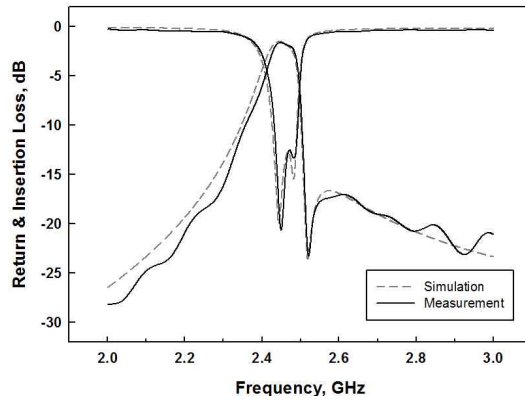


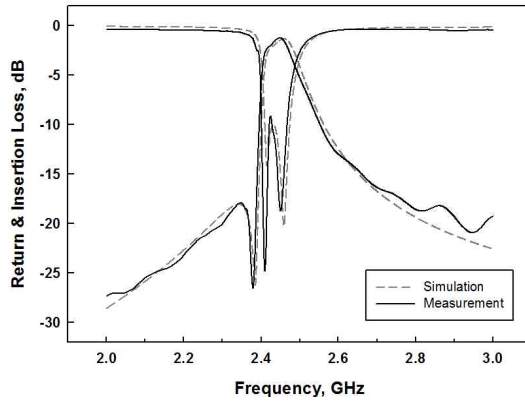
그림 7. 제작한 대역 통과 필터
Fig. 7. Fabricated bandpass filter.

설계의 목표에 맞게 각각 통과 대역 상·하측에 전송 영점이 발생한 것을 알 수 있다.

측정한 대역 통과 필터의 중심 주파수와 FBW는 통과 대역 상측에 전송 영점이 발생하는 필터는 2.45 GHz와 4.2 %, 통과 대역 하측에 전송 영점이 발생하는 필터는 2.44 GHz와 3.8 %로 각각 나타났다. 이는 simulation 결과와 잘 일치하며, 목표로 하였던 WLAN 대역을 만족한다. 통과 대역은 유전체 손실과 도체 손실에 의해 평탄하지 않고 볼록한 응답을 보인다.



(a) 통과 대역 상측에 전송 영점이 발생하는 필터
(a) Bandpass filter with a transmission zero in an upper stopband



(b) 통과 대역 하측에 전송 영점이 발생하는 필터
(b) Bandpass filter with a transmission zero in a lower stopband

그림 8. 대역 통과 필터의 측정 결과
Fig. 8. Measured result of bandpass filters.

IV. 결 론

본 논문에서는 하나의 이중 모드 공진기를 이용한 대역 통과 필터의 새로운 설계 방법을 제안하였다. 이중 모드 공진기를 두 개의 단일 공진기로 보고 공진기 사이의 결합 계수를 구하여, 이를 바탕으로 이중 모드 공진기의 두 공진 주파수를 계산한 후 전송 영점의 위치에 따라 각각 배치하였다. 제안한 설계 방법을 검증하기 위해, E-모양의 이중 모드 공진기를 이용하여 WLAN 서비스 대역을 만족하고, 전송 영점이 각각 상측과 하측에 위치하는 대역 통과 필터를 설계·제작하였다. 제안한 방법은 기존의 방

법에 비해 설계 과정이 간단하고 편리하여, 이중 모드 공진기를 이용한 microstrip 대역 통과 필터의 설계를 더욱 쉽고 간단하게 해줄 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] J. S. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, Wiley, 2001.

[2] I. Wolff, "Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator", *Electron Letters*, vol. 8, no. 12, pp. 163-164, Jun. 1972.

[3] Jae-Ryong Lee, Jeong-Hoon Cho, and Sang-Won Yun, "New compact bandpass filter using microstrip $\lambda/4$ resonators with open stub inverter", *IEEE M.G.W. Letters*, vol. 10, no. 12, Dec. 2000.

[4] X. Y. Zhang, J. X. Chen, Q. Xue, and M. Li, "Dual-band bandpass filters using stub-loaded resonators", *IEEE M.W.C. Lett.*, vol. 17, no. 8, Aug. 2007.

[5] J. S. Hong, H. Shaman, and Y. H. Chun, "Dual-mode microstrip open-loop resonators and filters", *IEEE Trans. M.T.T.*, vol. 55, no. 8, Aug. 2007.

[6] X. C. Zhang, Z. Y. Yu, and J. Xu, "Design of microstrip dual-mode filters based on source-load coupling", *IEEE Trans. M.T.T.*, vol. 18, no. 10, Oct. 2008.

[7] R. J. Cameron, C. M. Kudsia, and R. R. Mansour, *Microwave Filters for Communication System*, Wiley, 2007.

[8] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd Ed. McGRAW-HILL, 1992.

[9] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. Jones, *Microwave Filters, Impedance-matching Networks, and Coupling Structures*, Artch-House, 1980.

안 재 민



2009년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 (공학사)
 2009년 3월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계 및 해석, 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 전자공학과 교수
 [주 관심분야] 전자파 수치 해석, 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계, 안테나