산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제27권 B호, 2007.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 27 B, 2007.

이중모드 접힌 링-공진기를 이용한 BPF 설계

A design of Dual-mode Folded Ring Resonator

강 성 준* 황 희 용**
Kang, Seong-Jun Hwang, Hee-Yong

Abstract

In this paper, a BPF with a dual mode folded ring resonator is presented. The dual mode ring resonator is also exactly analyzed by using Y-parameter method, in which the difference in admittance of two lines make the ring resonator work as a dual mode resonator. The proposed BPF has an advantage of small size compared to conventional one with dual mode ring resonator.

키워드 : *Y-파라미터 해석, 접힌구조, 링 공진기*
Keywords : *Y-parameter method, folded structure, ring resonator*

1. 서론

현재 전기전자 산업의 발전과 더불어 무선통신 시스템을 이용한 정보통신기술 및 통신 산업의 급속한 성장은 우리를 다양하고 다형화 된 정보의 혜택 아래 삶의 질을 급속도로 개선시키는데 지대한 일조를 하고 있다. 그러나 무선통신 시스템은 주파수라는 한정된 자원을 사용하기 때문에 주파수 자원의 효율적인 관리를 위한 규제나 방안이 필요하고, 또한 무선통신 시스템의 소형화와 저가격 추세로 인하여 RF 및 초고주파 필터의 설계 및 제작 기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 초고주파 필터의 성능 개선과 소형화 및 저가격화 실현은 주파수 자원의 효율적인 사용과 무선통신 시스템의 성능 향상 및 생산 원가 절감 등을 통한 제품가치의 증대 등과 같은 부대적인 효과 창출을 도모할 수 있게 한다. 현재 다양한 무선 데이터 서비스용 모듈의 저가격화가 급속히 진행되면서 홈 네트워킹을 비롯한 다양한 가전정보 장치 및 부품의 상용화를 목전에 두고 있는 시점에서 무선통신 서비스시장에서의 기술 선점을 통한 국가 경쟁력의 제고를 위해서는 초고주파대 무선 부품 기술 분야의 원천기술과 응용 기술의 선행 개발이 지속적으로 이루어져야 한다[1].

무선 통신의 중요 소자인 초고주파 대역통과 여파기는 특정 대역의 주파수 성분만을 골라내기 위한 회로 또는 구조물로서 등가 회로적으로 L과 C의 조합으로 구성이 가능하며, 대역 혹은 통과대역 파형 혹은 구현방법 등의 분류기준에 따라 다양한 종류의 필터가 존재한다[2]. 무선통신 분야에 이용되는 대역통과 필터는 소형화와 경량화를 필요로

* 강원대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정
** 강원대학교 전기전자공학과 부교수(교신저자)

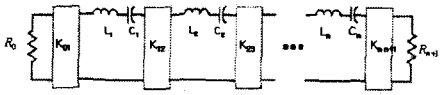
한다. 대역통과 필터에 사용되는 공진기의 크기를 줄이는 방법으로는 유전율이 높은 공진기를 사용하는 방법, 공진기를 변형하는 방법, 다중모드(multi mode)를 사용하는 방법이 있다[3]. 대역분류에 따라 특정 대역의 주파수 성분만을 골라내는 대역통과여파기(Band Pass Filter : BPF)가 가장 널리 사용된다.

BPF의 설계에는 분포 소자형과 집중 소자형의 다양한 공진기들이 사용되는데, 그 중에서 링-공진기는 단일 공진기로서 간단한 패치, 슬롯 혹은 노치와 같은 불연소성을 줌으로 인해 쉽게 2개의 공진기와 같은 역할을 하는 이중모드로 동작시키기에 편리하여 널리 사용된다.[3][4]

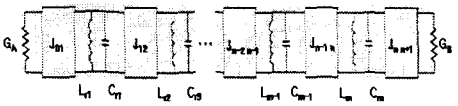
본 논문에서는 공진기의 소형화를 위해서 접힌 구조의 링-공진기를 제안하고 마이크로 스트립으로 구현하여 대역통과 여파기에 적용한다. 접힌 구조의 링-공진기는 기존의 링-공진기와 비교하여 1/2 정도의 크기로 소형화가 가능하다. 소형화된 BPF는 무선통신의 소형화에 도움을 줄 것이다.

2. 인버터를 이용한 대역통과 여파기

일반적으로 저역 통과 여파기의 기본형들로부터 대역통과 또는 대역저지 여파기로 변환될 때 직렬 공진기와 병렬 공진기로 구성되어진다. 하지만, 특별한 종류의 전송선로를 가지고 필터를 구현할 때 오직 직렬 또는 병렬 소자만이 사용되기를 요구할 경우가 있다. 이 경우 그림 1과 같이 임피던스(K)와 어드미턴스(J) 인버터를 사용하여 대역 통과 또는 대역저지 여파기를 구현할 수 있다.



(a) 임피던스 인버터를 이용한 BPF 회로



(b) 어드미턴스 인버터를 이용한 BPF 회로

그림 1. 인버터를 이용한 대역통과 여파기 회로

이러한 인버터들은 식 1의 결합(coupling) 계수와 비례한다.

$$k_{j,j+1} = \frac{K_{j,j+1}}{\sqrt{x_j x_{j+1}}} = \frac{\overline{w}}{\sqrt{g_j g_{j+1}}}$$
$$k_{j,j+1}\frac{J_{j,j+1}}{\sqrt{b_j b_{j+1}}} = \frac{\overline{w}}{\sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad (1)$$

따라서 결합 계수를 이용하여 여파기를 설계 할 수 있다. 일반적으로 그림 2와 같이 공진 주파수가 동일한 공진기 사이에 인버터나 결합 소자를 가하면 주파수는 공진 주파수를 기준으로 벌어진다. 그림 3과 같이 결합 계수가 커질수록 극점간의 간격이 벌어지는 특성을 보인다.

따라서 동일한 주파수 특성을 갖는 대역저지 공진기 간의 상호 결합을 이용하여 2단 대역 통과 여파기를 설계할 수 있다. 또한, 상호 결합량을 변화시켜 통과대역의 대역폭을 조절할 수 있다.

그림 2. 공진기 간의 상호 결합을 이용한 개념적 블록도

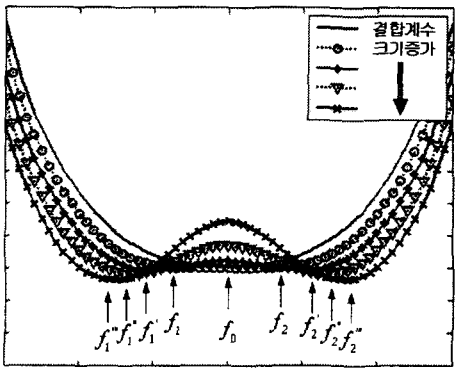


그림 3. 결합 계수의 증가에 따른 극점의 이동

본 논문에서는 대역통과 특성을 만들기 위하여 링-공진기를 이용하였다. 링-공진기의 선로간 임피던스 차를 이용하여 이중모드 링-공진기의 상호 결합량을 조절하였고 이 상호 결합량을 조절하므로 인해 등가적으로 2단 대역통과 여파기로 동작할 수 있다.[5]

3. 링-공진기

3.1 이중모드 링-공진기의 동작원리

그림 4는 일반적인 형태의 링-공진기이다. 링-공진기는 각각의 포트에 용량성 결합(gap coupling)을 이용하여 동작하도록 구성되었다. 식 (2)는 링-공진기의 둘레는 최저 공진 주파수에서 한 파장(λ) 길이에 해당하는 것을 나타낸다. 포트 1에서 포트 2로 전송되는 신호는 그림 4의 1번 방향으로 진행하는 성분과 2번 방향으로 진행하는 2가지 성분으로 이루어진다. 대칭적인 구조를 가지고 있기 때문에 두 방향의 신호는 그림 5와 같이 동일한 주파수에서 공진을 하게 되어 하나의 공진으로 보여진다. 하나의 공진을 두 개의 모드로 분리하기 위해서는 perturbation(=출력특성을 변화시키기 위하여 구조적인 변화를 주는 것)이 존재해야 한다. perturbation의 방법으로는 그림 6의 1 또는 2와 같이 구조적으로 대칭적인 위치에 추가적인 스터브를 연결해 주는 방법과 포트로 향하는 두 선로의 임피던스에 차이를 주는 방법이 있다. 또한, 링-공진기가 이중모드로 동작하게 위해서 두 포트는 그림 6과 같이 90° 위상차를 유지 시켜주어야 한다[3]. 그림 7은 perturbation에 의하여 링-공진기가 이중모드로 동작하게 되고, perturbation의 크기가 커짐에 따라서 극점의 이동을 보여주고 있다. perturbation의 크기가 커짐에 따라 극점의 간격도 벌어지고 있다.

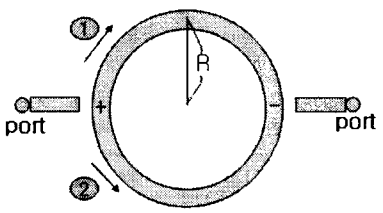


그림 4. 일반적인 링 공진기의 구조

$$\lambda = 2\pi R \qquad (2)$$

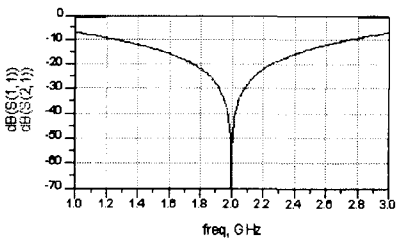


그림 5. 일반적인 링 공진기의 통과 및 반사 특성

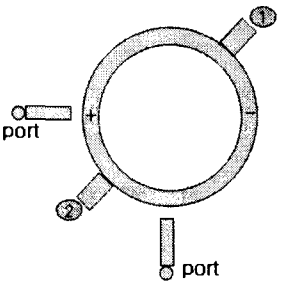


그림 6. 이중모드를 위한 perturbation 구조

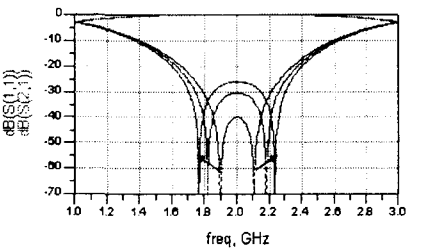


그림 7. perturbation 크기에 따른 극점이동
(perturbation ↑ →공진기간격 ↑)

3.2 링 공진기 구조 해석

그림 8은 두 선로 간 임피던스의 차이를 이용하여 이중모드로 동작하는 링-공진기의 구조이다. 링-공진기는 Y_1 선로와 Y_2 선로의 병렬연결 구조로 이루진다.

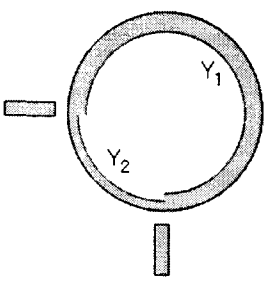


그림 8. 임피던스차를 이용한 이중모드
링-공진기의 구조

링-공진기가 대역통과 여파기로 동작하기 위해서는 그림 9와 같이 링-공진기의 등가회로 부분과 일반적인 대역통과 여파기의 등가회로 부분이 같아야 한다. 그림 9의 윗부분은 그림 8의 링-공진기의 구조를 등가적으로 나타낸 것이고, 아랫부분은 일반적인 인버터를 이용한 대역통과 여파기의 등가회로를 나타낸다.

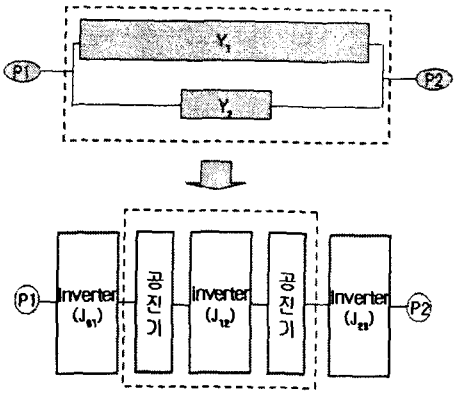


그림 9. 그림8의 이중모드 링-공진기의 등가회로(上)
일반적인 대역통과 여파기의 등가회로(下)

링-공진기의 해석방법에는 링-공진기를 전송전로로 보고 구조를 해석하는 방법과 우수모드와 기수모드로 나누어 해석하는 방법 등이 있다. 본 논문에서는 링-공진기를 전송선로 보고 구조를 해석하는 방법을 사용하였다. 그림 8의 링-공진기의 구조는 Y_1 선로와 Y_2 선로의 병렬 연결된 구조로 볼 수 있기 때문에 Y_1 선로와 Y_2 선로를 각각 ABCD 파라미터로 나타낸 후 Y 파라미터로 변환하여 더하면 전체의 구조식을 구할 수 있다. Y_1 선로와 Y_2 선로를 ABCD 파라미터로 나타내면 식 3과 같다. Y_1의 ABCD 파라미터와 Y_2의 ABCD 파라미터를 결합하기 위하여 식 4를 이용하여 Y파라미터로 변환하면 식 5와 같이 되고 링 공진기 전체의 Y파라미터는 식 6과 같이 된다[6].

$$ABCD_{Y_1}=\begin{bmatrix}\cos\theta_1 & jZ_1\sin\theta_1\\ jY_1\sin\theta_1 & \cos\theta_1\end{bmatrix}$$
$$ABCD_{Y_2}=\begin{bmatrix}\cos\theta_2 & jZ_2\sin\theta_2\\ jY_2\sin\theta_2 & \cos\theta_2\end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix}A & B\\ C & D\end{bmatrix}\Rightarrow\begin{bmatrix}\frac{D}{B} & \frac{BC-AD}{B}\\ \frac{-1}{B} & \frac{A}{B}\end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Y_{Y_1}=\begin{bmatrix}-jY_1\cot\theta_1 & jY_1\csc\theta_1\\ jY_1\csc\theta_1 & -jY_1\cot\theta_1\end{bmatrix}$$
$$Y_{Y_2}=\begin{bmatrix}-jY_2\cot\theta_2 & jY_2\csc\theta_2\\ jY_2\csc\theta_2 & -jY_2\cot\theta_2\end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y_T=j\begin{bmatrix}-(Y_1\cot\theta_1+Y_2\cot\theta_2) & (Y_1\csc\theta_1+Y_2\csc\theta_2)\\ (Y_1\csc\theta_1+Y_2\csc\theta_2) & -(Y_1\cot\theta_1+Y_2\cot\theta_2)\end{bmatrix} \quad (6)$$

Y 파라미터를 π형 등가회로로 나타내면 그림 10과 같이 된다. 여기서 $-Y_{12}$ 부분은 필터의 J_{12}(그림 6(下):2단 필터의 중간단 인버터 값) 부분에 해당하게 된다. 식 6에서 구한 관계식을 이용하면 J_{01}의 관계식을 식 7과 같이 구할 수 있다.

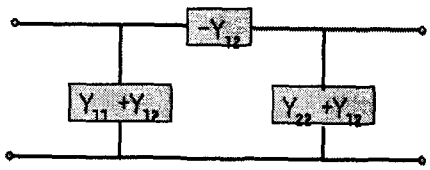


그림 10. 그림 9의 이중모드 링-공진기의 π형 등가회로

$$J_{12}=-(Y_1\csc\theta_1+Y_2\csc\theta_2)=Y_1-Y_2 \quad (7)$$

두 선로의 어드미턴스의 차가 J_{12}가 된다.

3.2 2단 링 BPF의 설계

중심주파수 2.45 GHz, 대역폭 24.99MHz (1.02%), ripple 0.01dB의 2단 체비셰프 대역통과 여파기를 설계한다. 임의로 Y_1=0.10761, Y_2=0.1로 하면 식 7을 이용하여 J_{12}의 값을 알 수 있다. 또한 대역통과 여파기의 중간단 인버터 관계식 식 8을 이용하면 앞에서 구한 J_{12}를 이용하여 b값을 구할 수 있다(2단 대역통과 여파기의 b_1, b_2의 값은 같기 때문이다.). 여기서 구한 b값을 초단 인버터의 관계식 식 9를 이용하여 초단 인버터의 값을 구할 수 있다. 표 1은 식 8과 9를 이용하여 구한 인버터 값들이다[7].

$$J_{12}=\bar{\omega}\sqrt{\frac{b_1b_2}{g_1g_2}} \quad (8)$$

$$J_{01}=\sqrt{\frac{\bar{\omega}G_0b_1}{g_0g_1}} \quad (9)$$

표 1. 2단 대역통과 여파기(중심주파수2.45 GHz, 대역폭 24.99MHz, ripple 0.01dB)의 설계 파라미터

	J_{01}	J_{12}	J_{23}
값	0.012	0.00761	0.012

식 10을 이용하여 초단 인버터의 크기를 정하고, 식 11를 이용하여 C_{01}의 값을 변환해 준다.

$$C_{01}^{e}=\frac{C_{01}}{1+\left(\frac{\omega_0 C_{01}}{G_0}\right)} \quad (10)$$

$$C_i=\frac{J_{01}}{\omega_0\sqrt{1-(J_{01}/Y_0)^2}} \quad (11)$$

각 단의 인버터는 그림 11과 같이 처리 할 수 있다. C_{01}은 그림 8에서와 같이 용량성 결합으로 구현이 가능하다. $-C^e$는 인버터의 동작을 위해서는 존재해야하는 부분이지만 (-)의 부분은 실제로 존재하지 않는 부분이기 때문에 공진기에 C^e를 더해 줌으로서 $-C^e$의 구현이 가능하다. 그림 11은 인버터를 이용한 2단 대역통과 여파기의 표준 회로로의 변환 과정을 나타낸다.

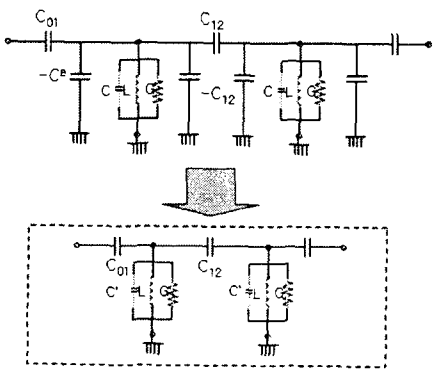


그림 11. 인버터를 이용한 2단 BPF 표준 회로로의 변환 과정도

위에서 구한 값들을 이용하여 이상적인 선로를 이용하여 필터를 설계하였다. 그림 12는 설계값들을 이용하여 시뮬레이션한 회로도이고 그림 13은 시뮬레이션 결과이다. 계산된 수치들은 집중소자를 이용하여 설계하는 식이기 때문에 전송선로를 이용하여 대역통과 여파기를 설계하는 과정에서 약간의 오차가 발생하였으나 설계한 값과 거의 일치하는 특성을 보였다.

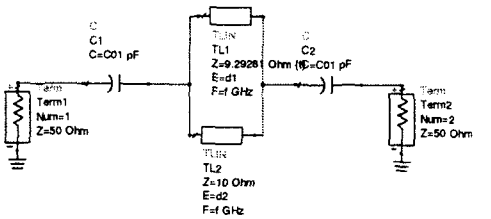


그림 12. 이상적인 대역통과 여파기의 회로도

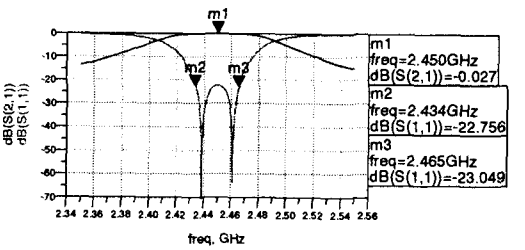


그림 13. 이상적인 대역통과 여파기의 주파수 응답특성

ADS 회로 시뮬레이션 툴을 이용하여 손실을 갖는 실제적인 선로로 변화하여 시뮬레이션 하였다. 기판은 MX0348ST0762C1C1, 유전율 3.48, 두께 0.762 mm, tanδ 0.003을 이용하여 시뮬레이션 결과 그림 11과 같이 대역폭 30MHz, 삽입손실 1.066 dB 반사손실 22.267 dB로 설계값에 근사한 특성을 보였다.

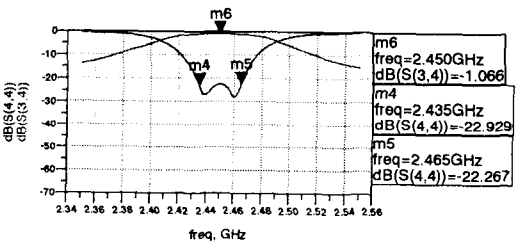


그림 14. 마이크로스트립 라인을 이용하여 설계한 BPF의 주파수 응답특성

3.3 감쇄극의 형성

선로 Y_1, Y_2의 크기를 비교했을 때 $Y_1 > Y_2$ 인 경우에는 그림 11과 같이 통과대역의 양옆에 감쇄극이 형성되지 않지만, $Y_1 < Y_2$ 경우에는 그림 15와 같이 통과대역의 양옆으로 감쇄극이 형성된다.

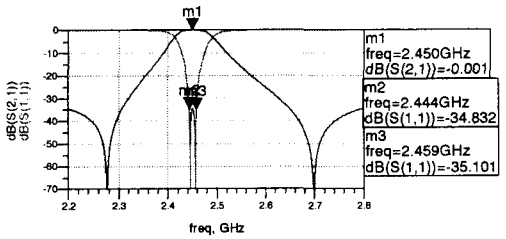


그림 15. $Y_1 < Y_2$인 경우의 대역통과 여파기의 주파수 응답특성

4. 구조변환

그림 8의 일반적인 링 공진기는 내부적으로 커플링이 발생하지 않는다. 하지만 부피를 줄이기 위하여 그림 16과 같이 접힌 구조의 링-공진기가 필요하다. 거리가 가까워짐에 따라 선로에는 커플링이 발생하게 된다. 링-공진기의 커플링의 영향을 알아보기 위하여 선로간의 간격(=S)을 변화 시키면서 시뮬레이션 하였다. 그림 18은 ADS를 이용한 시뮬레이션 회로도이고, 그림 17은 S를 1 mm에서 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm 로 늘려 갈 때의 시뮬레이션 특성의 변화를 나타낸 것이다. 간격이 늘어날수록 두 극사이의 간격이 넓어진다.

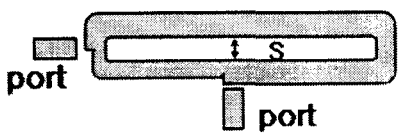


그림 16. 접힌 구조의 링-공진기 구조도

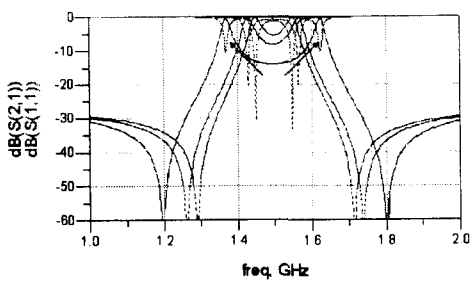


그림 17. 선로 간 간격(S)에 따른 극점의 이동

그림 18은 접힌 구조의 링-공진기를 이용하여 2단 대역통과 여파기를 설계한 회로도이고, 표 2의 설계파라미터를 이용하여 이상적인 마이크로 스트립라인으로 시뮬레이션 한 결과 그림 19와 같이 대역폭 94 MHz, 삽입손실 0.428 dB 반사손실 10.181 dB의 특성을 보였다.

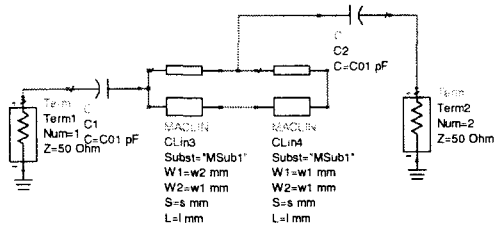


그림 18. 접힌 구조를 이용한 대역통과 여파기의 시뮬레이션 회로도

표 2. 접힌구조를 이용한 대역통과 여파기의 설계 파라미터

	L	S	W1	W2
값(mm)	16.9639	4	14.7169	12.5981

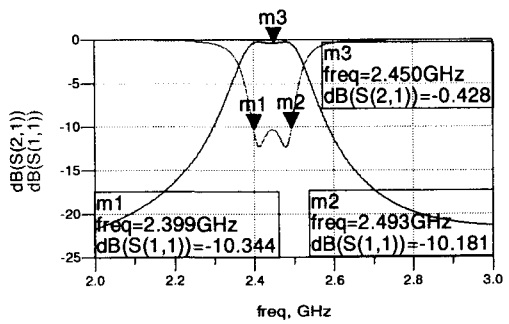


그림 19. 접힌구조를 이용한 대역통과 여파기의 시뮬레이션 주파수 응답특성

5. 결론

기존 링-공진기를 접힌 구조로 변환하여 이를 이용한 BPF의 소형화 방법을 제시하고 마이크로스트립 라인을 이용한 설계 예를 제시하였다.

제안한 방법은 다양한 주파수 대역에서의 실제 제작을 통하여 BPF의 소형화에 상당한 기여를 할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 박준석, 장병준, 오하령, 임재봉, 조홍구, "이동통신 단말기용 초소형 필터연구 동향", *한국전자파학회논문지*, 제16권, 제4호, pp24-37,

2005.10.

[2] 김동일, 김보영, 이서, "링 공진기를 사용한 대역통과 필터의 설계에 관한 연구", *한국전자파학회논문지,* 제15권, 제6호, pp.533-539, 2004.6.

[3] 최성수, 박동철, "소형화된 이중모드 마이크로스트립 링 공진기를 이용한 대역통과 필터", *마이크로파 및 전파전파 학술대회 논문집,* Vol.29 No.1, pp.315-318, 2006.5.

[4] Michiaki Matsuo, Hiroyuki Yabuki, and Mitsuo Makimoto, "Dual-Mode Stepped-Impedance Ring Resonator for Bandpass Filter Applications", *Ieee transaction on microwave theory and techniques,* VOL.49, NO.7, july 2001.

[5] 정을영, 황회용, "이중모드 링 공진기를 이용한 Balun-BPF의 설계", *한국전자파학회논문지,* 제17권, 제12호, pp. 1206-1211, 2006.12.

[6] David M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & Sons, Inc. 2005.

[7] G,Matthaei,et.al.,Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures. Artech House, pp. 429-434, 1980.