

평행 결합 Mushroom 구조를 이용한 대역 통과 여파기의 고조파 성분 억제

Suppression of Harmonic Passband of Bandpass Filters(BPFs) Using Parallel-Coupled Mushroom Structure

이 재 곤 · 이 정 해

Jae-Gon Lee · Jeong-Hae Lee

요 약

본 논문에서는 평행 결합 버섯 구조를 이용하여 대역 통과 필터의 고조파 성분을 제거하였다. Double positive (DPS) 전송 선로인 마이크로스트립 라인과 double negative(DNG) 전송 선로인 버섯 구조 사이에서는 격리된 마이크로스트립 라인과 버섯 구조의 교차되는 분산 곡선 주파수 대역에서 강한 결합이 복소 전파 상수로 인해서 발생한다. 교차되는 분산 곡선 주파수에서 강한 결합으로 인하여 전파가 전파를 하지 못하기 때문에 이와 같은 구조는 대역 저지 필터로 이용할 수 있는 것이다. 제안된 대역 저지 필터는 공진기를 이용한 형태가 아니라 평행 결합 전송 선로를 이용하였기 때문에 넓은 대역폭을 가지고 DPS와 DNG 전송 선로 사이의 강한 결합으로 인해서 소형화에 유리하다는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 중심 주파수 4 GHz, 3 dB fractional 대역폭은 40 %인 평행 결합 대역 저지 필터를 설계하였고, 이를 두 가지 종류의 대역 통과 필터의 고조파 모드를 억제하는데 이용하였다.

Abstract

Harmonic band of bandpass filter(BPF) is suppressed using coupled mushroom structure. Between double positive (DPS) transmission line such as microstrip and double negative(DNG) transmission line such as one dimensional mushroom structure, strong coupling broadly arises in the cross range of dispersion curves of isolated microstrip and mushroom structure because of complex propagation constant in the cross range. Strong coupling inhibits wave propagation, so that this kind of structure can be utilized as bandstop filter(BSF). This BSF utilizes coupled transmission line instead of coupled resonator, resulting in broad bandwidth (>30 %), sharp-rejection, and high rejection level. The strong coupling between DPS and DNG transmissionline makes it possible shorten coupling length, resulting in compact size. In this paper, parallel coupled BSF having center frequency of 4 GHz and 3 dB fractional bandwidth of 40 % is designed and utilized to suppressed spurious mode of two bandpass filters.

Key words : Double Negative(DNG) Transmission Line, Mushroom Structure, Bandstop Filter, Harmonics Mode Suppression

I. 서 론

고주파 신호는 고조파, 저조파, 기생 성분, 상호

변조 왜곡과 같은 원하지 않는 기생 성분을 가지고 있으므로 대역 저지 필터는 통신 시스템에서 중요한 소자 중에 하나이다. 이러한 기생 모드를 억제하기

「본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2004-000-10158-0)지원으로 수행되었음.

홍익대학교 전파통신공학과(Department of Radio Science and Communication Engineering, Hongik University)

· 논문 번호 : 20061103-03S

· 수정완료일자 : 2007년 1월 25일

위해서 여러 종류의 대역 저지 필터가 연구되고 있는데, 예를 들면 $\lambda/4$ 오픈 스텝을 이용한 대역 저지 필터^[1], $\lambda/4$ 평행 결합 대역 저지 필터^[2], $\lambda/4$ spur-line 대역 저지 필터 등이 있다. 기존의 대역 저지 필터는 공진 구조를 이용하기 때문에 광 대역 필터를 설계하는 많은 어려움을 가지고 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 평행 결합된 전송 선로를 이용하면 되지만 기존의 double positive(DPS) 전송 선로 사이의 작은 결합으로 인하여 대역 저지 필터는 길어지는 단점이 있다. 본 논문에서는 일 차원 버섯 구조^{[4]-[6]}와 같은 double negative(DNG) 전송 선로를 이용한 새로운 형태의 평행 결합 대역 저지 필터를 제안하였다. 제안된 대역 저지 필터는 DNG와 DPS 전송 선로 사이의 강한 결합^{[7],[8]}을 이용하였고 이로 인하여 필터의 길이를 대폭 줄일 수 있었다. 또한 공진 구조를 이용하지 않았기 때문에 상대적으로 광 대역의 필터를 설계하는데 유리한 특성도 가지고 있다.

제안된 대역 저지 필터의 설계 파라미터에 대해서 살펴보면, 중심 주파수는 패치의 크기, 갭 길이와 같은 버섯 구조의 크기에 의해서 조절할 수 있다. 그러한 버섯 구조의 크기에 의해서 격리된 버섯 구조의 분산 곡선이 변화하고 따라서 격리된 마이크로스트립 라인과 교차되는 주파수도 변하기 때문이다. 그리고 필터의 대역폭은 결합 계수와 관계있는 결합 선로 사이의 거리와 관련이 있다. 중심 주파수 4 GHz, 3 dB fractional 대역폭은 40 %인 평행 결합 대역 저지 필터를 설계하였고, 평행 결합 버섯 구조를 접지된 $\lambda/4$ 스텝을 이용한 필터와 평행 결합 선로를 이용한 필터의 고조파 모드를 억제하는데 이용하였다. 제안된 DNG 전송 선로를 이용한 평행 결합 대역 저지 필터의 설계 방법과 특성은 이론, 모의 실험, 측정으로 검증을 하였다.

II. 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터

대역 저지 특성을 얻기 위해서는 DPS 전송 선로 사이의 결합도는 약하기 때문에 그림 1(a)와 같이 평행 결합 마이크로스트립 라인의 길이는 길어져야 한다. 따라서 DPS 전송 선로를 이용한 평행 결합 대역 저지 필터는 실용적이지 못하다. 제안된 DNG 전송 선로를 이용한 평행 결합 대역 저지 필터는 그림 1(b)와

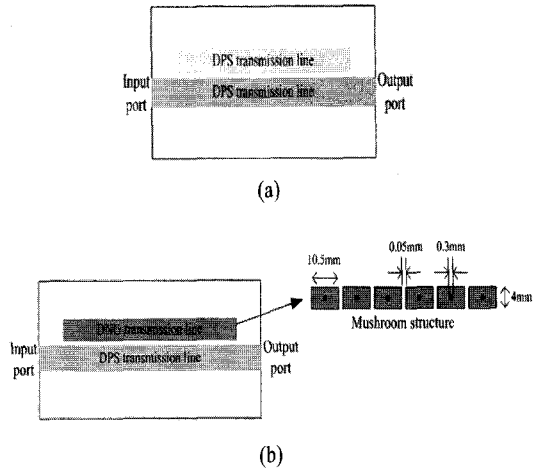


그림 1. (a) 평행 결합된 마이크로스트립 대역 저지 필터, (b) 제안된 DNG 전송 선로를 이용한 평행 결합된 대역 저지 필터

Fig. 1. (a) Structure of parallel coupled microstrip line bandstop filter, (b) Structure of proposed parallel coupled double negative(DNG) transmission line bandstop filter.

같이 DPS 전송 선로인 마이크로스트립 라인과 DNG 전송 선로인 결합된 일 차원 버섯 구조로 구성되어 있다. 이러한 구조의 대역 저지 필터의 특징으로는 DNG와 DPS 전송 선로 사이의 강한 결합으로 결합 길이는 감소하기 때문에 소형화에 유리하고 공진 구조를 사용하지 않았기 때문에 광 대역에 적합하다. 마이크로스트립과 버섯 구조 사이의 강한 결합은 복소 전파 상수 구간에서 횡 방향 소멸 전파에 의해서 발생한다. 따라서 출력 포트 방향의 신호는 복소 전파 상수 구간에서 전파하지 못한다. 두 가지의 결합 전송 선로에서 발생하는 결합 모드의 복소 전파 상수는 식 (1)에서 구할 수 있다^[8].

$$r_c^2 = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) + \frac{1}{2}\sqrt{(a_1 - a_2)^2 + 4b_1 b_2} \quad (1a)$$

$$r_\pi^2 = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) - \frac{1}{2}\sqrt{(a_1 - a_2)^2 + 4b_1 b_2} \quad (1b)$$

식 (1)에서 a_1, a_2, b_1, b_2 는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} a_1 &= Y_1 Z_1 + Y_m Z_m, & a_2 &= Y_2 Z_2 + Y_m Z_m \\ b_1 &= Y_m Z_1 + Y_2 Z_m, & b_2 &= Y_m Z_2 + Y_1 Z_m \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $Z_1 = j\omega L_1, Z_2 = j\omega L_2(1 - 1/(\omega^2 dL_2 C)), Y_1 = j\omega$

C_1 , and $Y_2=j\omega C_2(1-1/(\omega^2 dC_2L))$ 이다. Z_m 과 Y_m 은 각각 입력과 결합 선로 사이의 상호 임피던스와 어드미턴스이고^[9], $L_1(L_2)$ 과 $C_1(C_2)$ 는 각각 입력 선로(결합 선로)의 단위 길이당 인덕턴스와 커패시턴스이다. 그리고 L 과 C 는 일 차원 버섯 구조의 병렬 인덕턴스와 직렬 커패시턴스이며, d 는 버섯 구조의 단위 길이이다. 중심 주파수가 4 GHz인 대역 저지 필터를 설계하기 위해서 복소 전파 상수 구간은 4 GHz에서 일어나야 하고, 이를 위해서는 격리된 마이크로스트립과 버섯 구조의 분산 곡선이 4 GHz에서 교차해야 한다. 그러므로 마이크로스트립 라인의 폭은 4.8 mm, 버섯 구조의 패치 크기(폭×길이)는 4×10.5 mm, 갭 길이는 0.05 mm, 접지된 와이어의 지름은 0.3 mm, 두 결합 선로 사이의 거리는 식 (1)에 의해서 0.1 mm가 되어야 한다. 사용된 기판 (RT/Duroid 5880)의 두께와 유전율은 1.57 mm와 2.2이다. 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터의 이론적인 결합 모드 분산 곡선을 식 (1)를 이용해서 그림 2에 나타내었다. 강

한 결합이 일어나는 이론적인 복소 전파 상수 구간은 3.5 GHz에서 4.9 GHz이고 4 GHz에서 C모드와 π 모드의 복소 전파 상수는 각각 $51+j100.5$ 와 $-51+j100.5$ 이다. 복소 전파 상수 구간에서의 전달 계수 (T)는 다음과 같이 계산된다^[6].

$$T = \left[\cos \frac{j(\gamma_c - \gamma_\pi)D}{2} + j \frac{1-p}{1+p} \cdot \sin \frac{j(\gamma_c - \gamma_\pi)D}{2} \right] e^{-\frac{(\gamma_c + \gamma_\pi)D}{2}} \quad (3)$$

$$p = -\frac{R_c}{R_\pi} \quad (4a)$$

$$R_c = \frac{(a_2 - a_1) + [(a_2 - a_1)^2 + 4b_1 b_2]^{1/2}}{2b_1} \quad (4b)$$

$$R_\pi = \frac{(a_2 - a_1) + [(a_2 - a_1)^2 + 4b_1 b_2]^{1/2}}{2b_1} \quad (4c)$$

여기서 D 는 일 차원 버섯 구조의 결합되는 길이이고, R_c 와 R_π 는 두 결합 전송 선로 사이 거리의 함수이다. 만약 유한한 일 차원 버섯 구조의 결합되는 길이가 무한한 일 차원 버섯 구조의 분산 곡선을 만족시킬 정도로 길다면, 두 결합 전송 선로 사이의 거리(S)는 전달 계수가 0일 때, R_c 와 R_π 가 선로 간격 S 의 함수이기 때문에 p 에 의해서 계산할 수 있다. 무 전송, 즉 완전한 결합은 가장 넓은 대역폭을 보장하고 식 (3)에서 무 전송을 얻기 위해서 D 와 S 는 계산되어야 한다. 버섯 구조의 단위 셀 개수를 증가하면서 무 전송일 때 S 를 계산하였는데, 단위 셀 개수가 6개일 때 무 전송이 가능하였고 S 는 0.1 mm로 계산되었다. 만약 단위 셀 개수가 6개 이하이면 무 전송이 일어나는 S 는 얻어질 수 없기 때문에 일 차원 버섯 구조의 결합되는 길이는 63.25 mm(6개의 단위 셀)이다. 제안된 대역 저지 필터의 모의 실험과 측정된 주파수 응답 특성은 그림 3에 나타내었다. 측정된 중심 주파수는 4.2 GHz이고 3 dB fractional 대역폭은 38 % (3.4 ~ 5 GHz)이다. 모의 실험 결과와는 200 MHz 상향 이동된 중심 주파수와 2 % 감소한 3 dB fractional 대역폭을 얻었지만 매우 일치하는 것을 알 수 있다. 저지 대역에서 반사 손실은 1 dB 이하이고, 급격한 스킵 특성을 가진 20 dB 이상의 rejection을 얻었다. 중심 주파수와 대역폭은 각각 버섯 구조의 크기와 두 결합 전송 선로 사이의 거리에 의해서 조절할 수 있

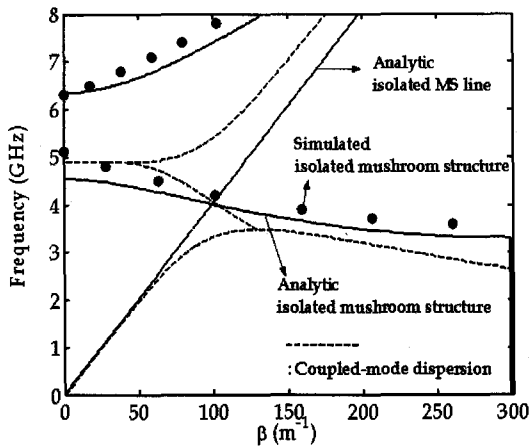


그림 2. 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터의 이론적인 결합 모드 분산 곡선(마이크로스트립 라인의 폭은 4.8 mm, 버섯 구조의 패치 크기(폭×길이)는 4×10.5 mm, 갭 길이는 0.05 mm, 접지된 와이어의 지름은 0.3 mm, 두 결합 선로 사이의 거리는 0.1 mm)

Fig. 2. Analytic coupled mode dispersion for BSF coupled mushroom structure (Width of microstrip of 4.8mm, patch size of 4×10.5 mm, gap distance of 0.05 mm, diameter of wire of 0.3 mm, and separation between two coupled lines of 0.1 mm).

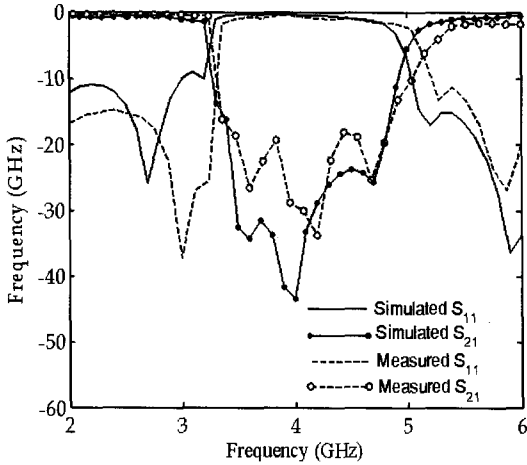


그림 3. 제안된 대역 저지 필터의 모의 실험과 측정된 주파수 응답 특성(마이크로스트립 라인의 폭은 4.8 mm, 버섯 구조의 패치 크기(폭×길이)는 4×10.5 mm, 갭 길이는 0.05 mm, 접지된 와이어의 지름은 0.3 mm, 두 결합 선로 사이의 거리는 0.1 mm)

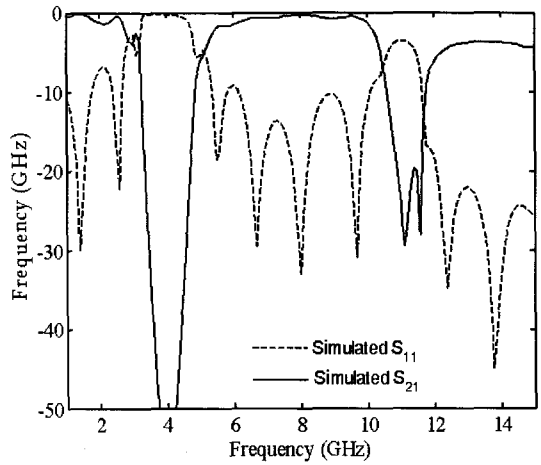
Fig. 3. Full-wave simulated and measured frequency responses of designed BSF(Width of microstrip of 4.8 mm, patch size of 4×10.5 mm, gap distance of 0.05 mm, diameter of wire of 0.3 mm, and separation between two coupled lines of 0.1 mm).

다. 예를 들어, 버섯 구조의 패치 크기(폭×길이)는 10×10.5 mm, 갭 길이는 0.05 mm, 접지된 와이어의 지름은 0.3 mm, 두 결합 선로 사이의 거리는 0.1 mm 인 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터의 중심 주파수는 3 GHz이다. 그리고 표 1에 두 결합 선로 사이의 거리에 따른 3 dB fractional 대역폭을 나타내었는데 거리가 증가하면 대역폭은 감소하는 것을 알 수 있다.

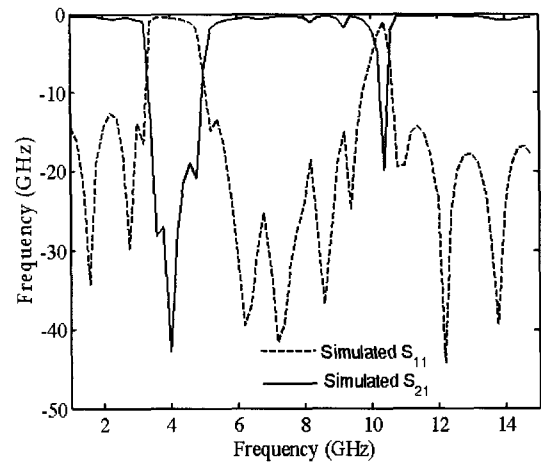
표 1. 두 결합 선로 사이의 거리에 따른 제안된 대역 저지 필터의 3 dB fractional 대역폭

Table 1. Comparison of 3 dB fractional bandwidth for the proposed BSF against separation between two coupled lines.

Separation between two coupled lines (S)	0.1 mm	0.2 mm	0.3 mm	0.4 mm
3-dB fractional bandwidth (FBW)	40 %	30 %	25 %	20 %



(a)



(b)

그림 4. (a) 기존의 $\lambda/4$ 오픈 스텝을 이용한 대역 저지 필터의 주파수 응답 특성, (b) 제안된 대역 저지 필터의 주파수 응답 특성(중심 주파수 4 GHz, 3 dB fractional 대역폭 40 %)

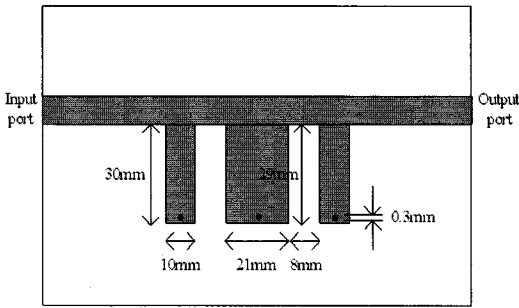
Fig. 4. (a) Full-wave simulated frequency response of conventional quarter wavelength stubs bandstop filter, (b) Full-wave simulated frequency response of proposed bandstop filter(Center frequency of 4 GHz and 3 dB fractional bandwidth of 40 %).

또한 그림 4와 같은 동일한 중심 주파수와 대역폭을 가진 기존 $\lambda/4$ 오픈 스텝을 이용한 대역 저지 필터(12.5×45.3 mm)보다 제안된 필터(4.1×63.25 mm)의 크기가 54 % 감소하였다.

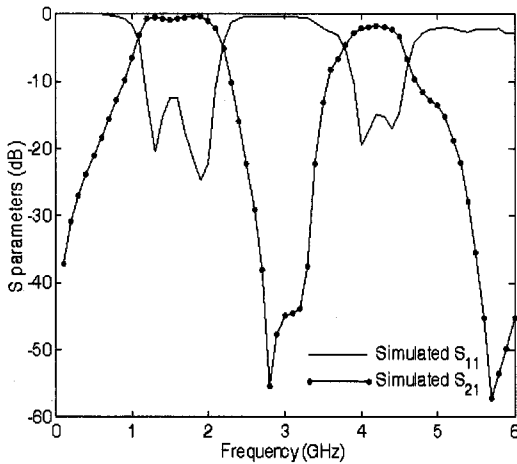
III. 대역 통과 필터의 고조파 억제

평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 접지된 $\lambda/4$ 스텝을 이용한 대역 통과 필터(중심 주파수 1.6 GHz, 3 dB fractional 대역폭 50%)와 평행 결합 선로를 이용한 대역 통과 필터(중심 주파수 1.3 GHz, 3 dB fractional 대역폭 15%)의 고조파 모드를 억제하는데 이용하였다. 먼저, 접지된 $\lambda/4$ 스텝을 이용한 대역 통과 필터에 대해서 살펴보면 첫 번째, 두 번째 스텝의 길이와 폭은 각각 30 mm, 10 mm와 29 mm, 21 mm이다. 세 번째 스텝은 첫 번째 스텝과 크기가 같고 스텝 사이의 주기는 8 mm이다. 그림 5와 6은

각각 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 적용하지 않은 경우와 저지 필터를 적용한 경우의 $\lambda/4$ 스텝을 이용한 대역 통과 필터의 구조와 모의 실험된 주파수 응답 특성을 보여주고 있다. 그림 5에서 3.5 GHz에서 5 GHz까지 고조파가 발생하고 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터가 위치하면 중심 주파수의 통과 대역에는 영향을 주지 않으면서 그림 6과 같이 -20 dB 이하로 억제됨을 알 수 있다. 그리고 평행 결합 선로를 이용한 대역 통과 필터에서는 각각 크기는 그림 7에 표기하였고 마찬가지로 그림 7



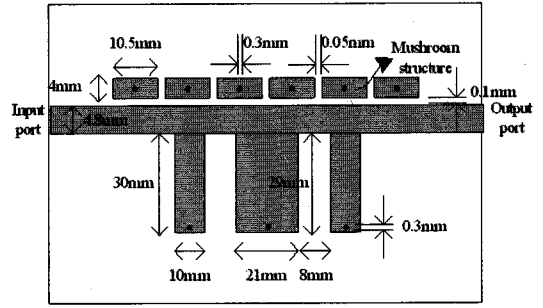
(a) 구조
(a) Geometry



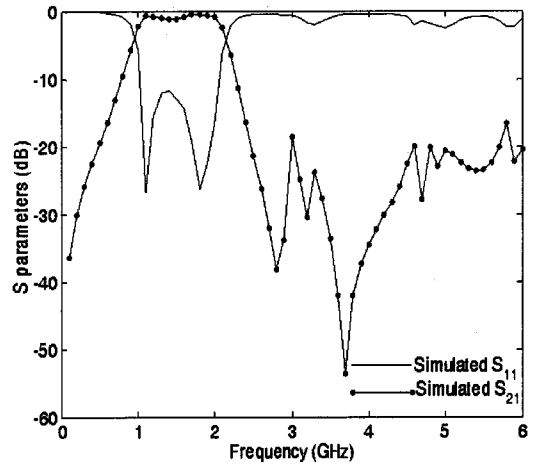
(b) 모의 실험된 주파수 응답 특성(중심 주파수 1.6 GHz, 3 dB fractional 대역폭 50%)
(b) Full-wave simulated frequency responses(Center frequency of 1.6 GHz and 3 dB fractional bandwidth of 50%)

그림 5. 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 적용하지 않은 접지된 $\lambda/4$ 스텝을 이용한 대역 통과 필터

Fig. 5. Short quarter wavelength stubs bandpass filter without mushroom bandstop filter.



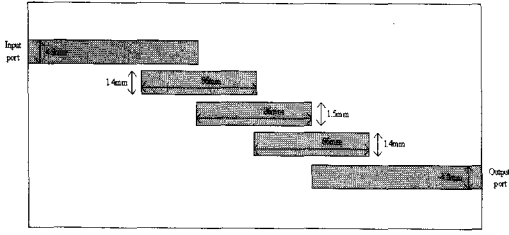
(a) 구조
(a) Geometry



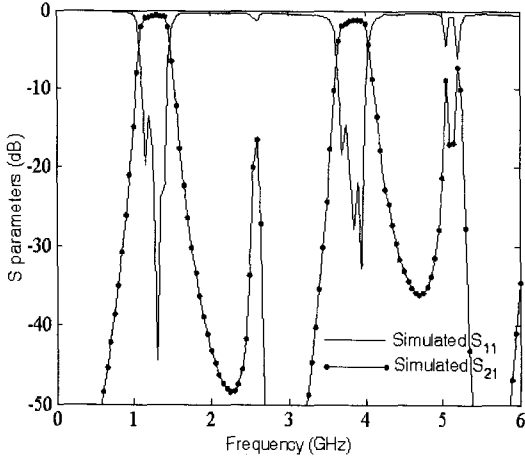
(b) 모의 실험된 주파수 응답 특성(중심 주파수 1.6 GHz, 3 dB fractional 대역폭 50%)
(b) Full-wave simulated frequency responses(Center frequency of 1.6 GHz and 3 dB fractional bandwidth of 50%)

그림 6. 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 적용한 접지된 $\lambda/4$ 스텝을 이용한 대역 통과 필터

Fig. 6. Short quarter wavelength stubs bandpass filter with mushroom bandstop filter.



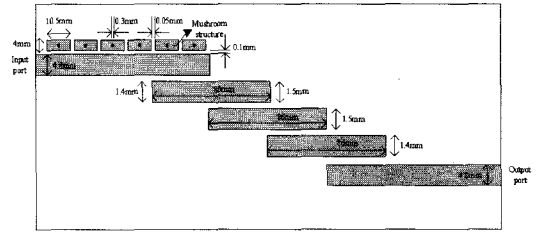
(a) 구조
(a) Geometry



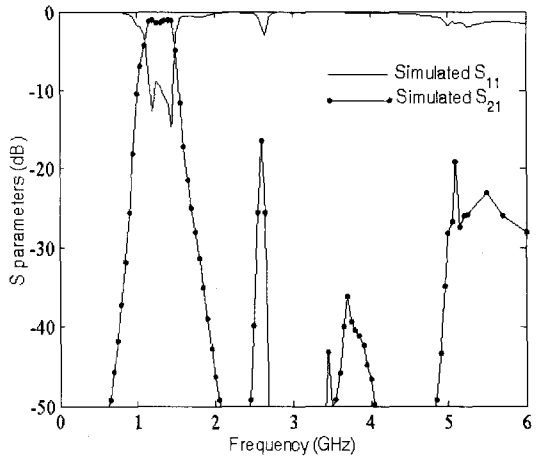
(b) 모의 실험된 주파수 응답 특성(중심 주파수 1.3 GHz, 3 dB fractional 대역폭 15 %)
(b) Full-wave simulated frequency responses(Center frequency of 1.3 GHz and 3 dB fractional bandwidth of 15 %)

그림 7. 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 적용하지 않은 평행 결합 선로를 이용한 대역 통과 필터

Fig. 7. Coupled line bandpass filter without mushroom bandstop filter.



(a) 구조
(a) Geometry



(b) 모의 실험된 주파수 응답 특성(중심 주파수 1.3 GHz, 3 dB fractional 대역폭 15 %)
(b) Full-wave simulated frequency responses(Center frequency of 1.3 GHz and 3 dB fractional bandwidth of 15 %)

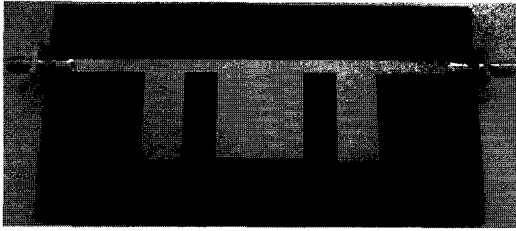
그림 8. 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 적용한 평행 결합 선로를 이용한 대역 통과 필터

Fig. 8. Coupled line bandpass filter with mushroom bandstop filter.

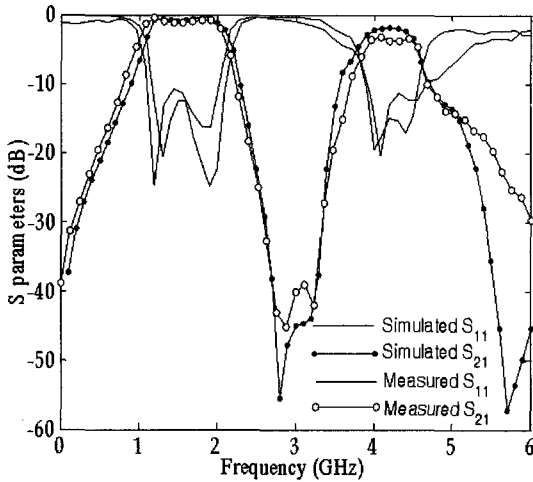
과 8은 각각 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 적용하지 않은 경우와 저지 필터를 적용한 경우의 평행 결합 선로를 이용한 대역 통과 필터의 구조와 모의 실험된 주파수 응답 특성을 보여주고 있다. 그림 8에서 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터로 인해서 -20 dB 이하로 억제된 고조파를 확인할 수 있다. 접지된 $\lambda/4$ 스텝을 이용한 대역 통과 필터의 경우는 제작하여 모의 측정된 결과를 검증하였다. 그림 9와 10에는 모의 측정된 결과와 측정된 결과를 보여주고 있는데 매우 유사함을 알 수 있고 작은 오차의 원인은 갭 길이와 접지된 와이어의 지름이 제작 오차에 근접하기 때문이다.

IV. 결론

본 논문에서는 새로운 형태의 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 제안하였고 설계하였다. DPS 전송 선로인 마이크로스트립과 DNG 전송 선로인 버섯 구조 사이의 강한 결합으로 대역 저지 특성을 가지고 이를 소형화된 대역 저지 필터로 이용할 수 있는 것이다. 제안된 대역 저지 필터의 특징으로는 광 대역, 급격한 저지, 높은 저지 레벨을 들 수 있다. 그리고 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 접지된 $\lambda/4$ 스텝을 이용한 대역 통과 필터와 평행 결합 선로를 이용한 대역 통과 필터의 고조파 모드를



(a) 사진
(a) Photograph



(b) 모의 실험과 측정된 주파수 응답 특성(중심 주파수 1.6 GHz, 3 dB fractional 대역폭 50 %)
(b) Full-wave simulated and measured frequency responses (Center frequency of 1.6 GHz and 3 dB fractional bandwidth of 50 %)

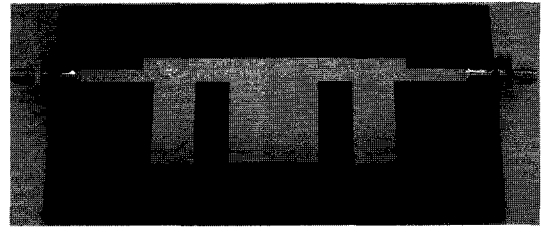
그림 9. 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 적용하지 않은 접지된 $\lambda/4$ 스텝을 이용한 대역 통과 필터

Fig. 9. Short quarter wavelength stubs bandpass filter without mushroom bandstop filter.

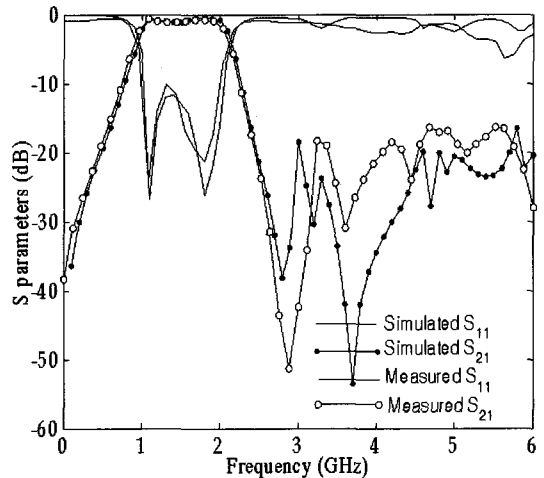
억제하는데 이용하였다. 그 결과 중심 주파수의 통과 대역에는 영향을 주지 않으면서 고조파 성분은 -20 dB 이하로 억제됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] G. L. Matthaei, L. Oung, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures*, New York, McGraw Hill, 1964.
[2] L. C. Tsai, H. M. Chen, and C. W. Hsue, "Z-



(a) 사진
(a) Photograph



(b) 모의 실험과 측정된 주파수 응답 특성(중심 주파수 1.6 GHz, 3 dB fractional 대역폭 50 %)
(b) Full-wave simulated and measured frequency responses (Center frequency of 1.6 GHz and 3 dB fractional bandwidth of 50 %)

그림 10. 평행 결합된 버섯 구조 대역 저지 필터를 적용한 접지된 $\lambda/4$ 스텝을 이용한 대역 통과 필터

Fig. 10. Short quarter wavelength stubs bandpass filter with mushroom bandstop filter.

domain formulations of equal-length coupled-serial-shunted lines and their applications to filters", *IEE Proc. -Microw. Antennas Propag.*, vol. 151, no. 2, pp. 97-103, 2004.

[3] W. H. Tu, K. Chang, "Compact microstrip bandstop filter using open stub and spurline", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 4, pp. 268-270, 2005.
[4] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden fre-

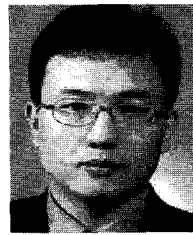
- quency band", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, 1999.
- [5] A. Sanada, C. Caloz, and T. Itoh, "Planar distributed structures with negative refractive index", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, no. 4, pp. 1252-1263, 2004.
- [6] J. G. Lee, J. H. Lee, "Backward-wave directional coupler with complete coupling and broadband using conventional microstrip and 1D mushroom structure", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, no. 7, pp. 1293-1296, 2006.
- [7] C. Caloz, T. Itoh, "A novel mixed conventional microstrip and composite right/left-handed backward-wave directional coupler with broadband and tight coupling characteristics", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 31-33, 2004.
- [8] R. Islam, F. Elek, and G. V. Eleftheriades, "Coupled-line metamaterial coupler having co-directional phase but contra-directional power flow", *Electronics Letters*, vol. 40, no. 5, pp. 315-317, 2004.
- [9] Y. S. Sohn, J. C. Lee, H. J. Park, and S. I. Cho, "Empirical equations on electrical parameters of coupled microstrip lines for crosstalk estimation in printed circuit board", *IEEE Trans. Advanced Packaging*, vol. 24, no. 4, pp. 521-527, 2001.

이 재 곤



1999년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)
 2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학석사)
 2007년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학박사)
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계, Meta-materials

이 정 해



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)
 1993년 3월~1996년 2월: General Atomics 교환 연구원
 1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor
 1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 부교수
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계, 밀리미터파 진단, Meta-materials