

$\lambda/4$ Hairpin 공진기를 이용한 2.4 GHz 대역 LTCC 대역통과 필터의 설계

성규제

국립한경대학교 전자공학과

The Design of 2.4 GHz Band LTCC Bandpass Filter using $\lambda/4$ Hairpin Resonators

Gyu-Je Sung

Dept. of Electronic Eng., Hankyong National University, Ansung, Kyonggi-Do, 456-749, Korea

초 록: 본 논문에서는 $\lambda/4$ 헤어핀 공진기를 2.4 GHz 대역의 LTCC(Low Temperature Co-fire Ceramic) 대역통과 필터의 설계에 적용하였다. $\lambda/4$ 헤어핀 공진기는 전송선로의 폭을 일정하게 유지한 상태로 특성임피던스를 변화시킬 수 있어, 등가적으로 SIR(Stepped Impedance Resonator)로 동작한다. $\lambda/4$ 헤어핀 공진기는 평행결합 선로와 전송선로 부분으로 구성된다. 따라서 공진기의 두 부분의 특성임피던스는 서로 다른 값을 갖는다. 또한 공진기 사이의 결합량을 조절하기 위하여 사용하는 부가적인 결합 패턴은 결합위치에 따라 결합량을 다르게 할 수 있다. 평행 결합선로의 결합 구조와 부가적인 결합 패턴을 모두 고려한 대역통과 필터를 설계하기 위해서 두 결합구조의 등가회로를 하나의 인버터로 통합하는 과정을 제시하였다. 2.4 GHz 대역에서 150 MHz 대역폭의 대역통과 필터를 적층 구조로 설계하여 설계 결과와 잘 일치하는 특성을 얻었다.

Abstract: In this paper, a $\lambda/4$ hairpin resonator is applied to reduce the size of planar resonators for a 2.4 GHz Band LTCC MLC bandpass filter. The $\lambda/4$ hairpin resonator operates as stepped impedance resonator (SIR) without changing the width of the planar resonator. It is composed of two sections those are parallel coupled line and transmission line. The characteristic impedance of two sections is different each other. The design formulas of the bandpass filter using the coupling element at the arbitrary position are derived from even and odd-mode analysis. The formulas can take account of the arbitrary coupling of lumped and/or distributed resonators. The advantage of this filter is its abilities to change freely the coupling structure between two resonators. Experimental bandpass filters for 2.4 GHz Band are implemented and their performances are shown.

Keywords: LTCC, Multi-layer Chip Filter, and Quarter-Wavelength Hairpin Resonator

1. 서 론

무선 네트워크 서비스가 빠르게 증가하면서, 보다 작고 저렴하면서도 우수한 성능의 필터에 대한 수요가 더 증가하고 있다. 지금까지 무선 단말기

에서 많이 사용되고 있던 TEM 공진기나 모노블럭 필터로서는 소형화에 한계가 있어 최근에는 LTCC 적층형 필터가 많이 소개되고 있다. LTCC 적층형 필터는 LC(Lumped Constant) 칩 형태와 평면 칩 형태로 구별할 수 있다. LC 칩 필터는 비유

*Corresponding author
E-mail: gjsung@hknu.ac.kr

전율 20 이하의 낮은 유전율의 LTCC를 사용하고 집중형 L, C 공진기를 사용하여 소자수가 많고 구조가 복잡해진다. 평면 칩 필터는 비유전율 30 이상의 상대적으로 높은 유전율의 LTCC를 사용하고 분포형 전송선로 공진기를 사용하여 소자수가 적고 구조가 상대적으로 간단해진다.¹⁻³⁾

본 논문에서는 $\lambda/4$ 헤어핀 공진기를 이용하여 평면형 공진기의 크기를 더욱 줄여서 보다 소형화된 LTCC 적층 칩 필터를 설계, 제작하였다. $\lambda/4$ 헤어핀 공진기는 전송선로의 폭 변화 없이 평행결합선로 사이의 결합량을 변화시켜 공진기의 특성 임피던스를 변화시킴으로써 계단형 임피던스 공진기(Stepped Impedance Resonator; SIR)로 동작한다.⁴⁾ $\lambda/4$ 헤어핀 공진기에서 평행결합선로 부분의 특성 임피던스는 등가적으로 우모드 임피던스가 되므로 공진기 사이의 결합이 없는 전송선로 부분의 특성 임피던스와 다른 값을 갖는다. 평행 결합선로의 π 등가회로를 이용하면 $\lambda/4$ 헤어핀 공진기를 갖는 대역통과 필터의 등가회로를 구성할 수 있다. 따라서 평행결합선로에서 발생하는 전자계 결합은 $\lambda/4$ 헤어핀 공진기의 중간에서 옆 공진기와 연결된다. S. B. Cohn이 제시한 인버터를 이용한 대역통과 필터 설계 이론에서는 공진기 끝단에서 연결되는 인버터만을 고려하고 있다.⁵⁾ 본 논문에서는 공진기 중간 단에서 연결되는 결합 구조를 갖는 $\lambda/4$ 헤어핀 공진기를 이용한 대역통과 필터의 설계이론을 제시하고, 2.4 GHz 대역의 LTCC 적층 칩 필터의 설계에 적용하였다. 제작된 필터의 주파수 특성은 설계 결과와 잘 일치하였다.

2. 본 론

Fig. 1(a)는 본 논문의 $\lambda/4$ 헤어핀 공진기를 이용한 LTCC 적층 칩 필터를 보여 주고 있다. 그 등가회로는 Fig. 1(b)와 같다. 따라서 공진기는 전기적 길이 θ_{12} 의 평행결합선로 부분과 전기적 길이 θ_3 의 전송선로 부분으로 구성된다. 캐패시터 C_{01} , C_{23} 는 입출력 결합을 나타내고, 캐패시터 C_{12} 와 평행결합선로 사이의 전자계 결합은 두 공진기 사이의 인버터를 구성한다. 이 등가회로는 S. B. Cohn이 제시한 인버터를 이용한 대역통과 필터 설계 이론을 적용할 수 없는 구조이다.

Fig. 1(b)의 평행결합선로 부분은 이분법 이론에 의해 해석할 수 있다.⁶⁾ Fig. 2(a)의 평행결합선로에 부호가 같고, 같은 크기의 전압이 인가되면 평행결합선로의 대칭면에 자계벽이 형성되고 선로의 특성 어드미턴스는 우모드 어드미턴스, Y_e 이 된다. 그러므로 평행결합선로의 입력 어드미턴스는

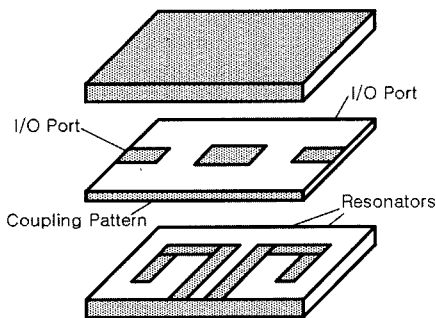
$$Y_{oc} = -jY_e \cot \theta \quad (1)$$

와 같이 된다.

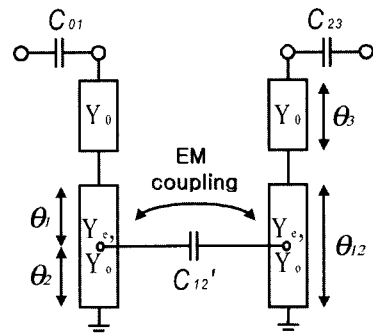
Fig. 2(a)의 평행결합선로에 부호가 반대이고, 크기가 같은 전압이 인가되면 평행결합선로의 대칭면에 전계벽이 형성되고 선로의 특성 어드미턴스는 기모드 어드미턴스, Y_o 가 된다. 그러므로 평행결합선로의 입력 어드미턴스는

$$Y_{sc} = -jY_o \cot \theta \quad (2)$$

와 같이 된다. 그러면 평행결합선로의 π 등가회로는



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Structure of LTCC MLC bandpass filter using $\lambda/4$ hairpin resonators, (b) Equivalent circuit.

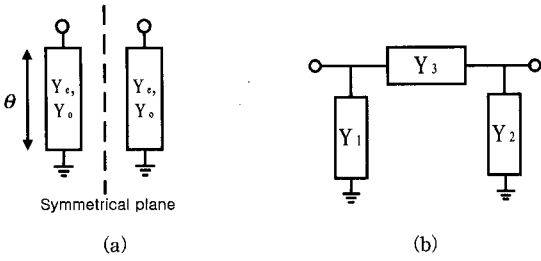


Fig. 2. (a) 2-port parallel-coupled lines, (b) π equivalent circuit.

Fig. 2(b)와 같이 되고, 각 소자 값은

$$Y_1 = Y_2 = Y_{oc} = -jY_e \cot \theta \quad (3)$$

$$Y_3 = \frac{Y_{sc} - Y_{oc}}{2} = -j \frac{Y_o - Y_e}{2} \cot \theta \quad (4)$$

이 된다.

Fig. 1(a)에서와 같이 평행 결합선로 사이의 결합 소자가 선로 상의 중간에 있을 때 선로 끝단에 있는 결합 소자와 동일한 결합량을 갖기 위해서는 동일한 입력 어드미턴스를 갖으면 된다.

Fig. 3(a), (b)의 평행 결합 선로 중앙에 자계벽이 있는 경우, 각각의 우모드 입력 어드미턴스는

$$Y_{oc} = -jY_e \cot \theta \quad (5)$$

$$Y_{oc}' = -jY_e \cot (\theta_1 + \theta_2) \quad (6)$$

여기서, $\theta = \theta_1 + \theta_2$ 이다. Fig. 3(a), (b)의 평행 결합 선로 중앙에 전계벽이 있는 경우, 각각의 기모드 입력 어드미턴스는

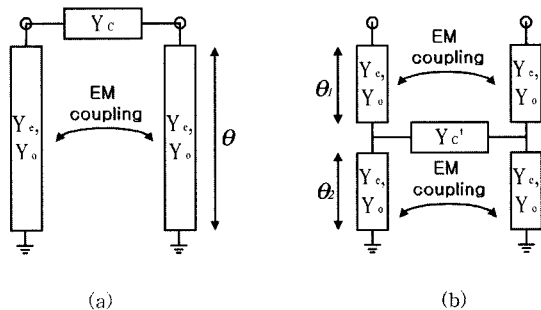


Fig. 3. (a) End point coupling between parallel-coupled lines, (b) Mid point coupling between parallel-coupled lines.

$$Y_{sc} = -jY_o \cot \theta + 2Y_c \quad (7)$$

$$Y_{sc}' = Y_o \frac{Y_2 + jY_o \tan \theta_1}{Y_o + jY_2 \tan \theta_1} \quad (8)$$

여기서,

$$Y_2 = -jY_o \cot \theta_2 + 2Y_c' \quad (9)$$

이다. 따라서, $Y_{oc} = Y_{oc}'$ 이고 $Y_{sc} = Y_{sc}'$ 이 되기 위해서는

$$Y_{12} = \frac{Y_o Y_{12}' (\tan \theta_1 + \cot \theta_1)}{(\cot \theta_1 + \cot \theta_2) (Y_o + Y_o \cot \theta_2 \tan \theta_1 + j2Y_{12}' \tan \theta_1)} \quad (10)$$

또는,

$$Y_{12}' = \frac{Y_o Y_{12} (\cot \theta_1 + \cot \theta_2) (1 + \cot \theta_2 \tan \theta_1)}{Y_o (\tan \theta_1 + \cot \theta_1) - j2Y_{12} \tan \theta_1 (\cot \theta_1 + \cot \theta_2)} \quad (11)$$

을 만족해야 한다.

평행결합선로의 π 등가회로를 Fig. 1(b)의 λ/4 헤어핀 공진기를 이용한 LTCC 적층 칩 필터의 등가회로에 적용시키면 Fig. 4(a)의 등가회로를 얻을 수 있다. 여기서 공진기 사이의 새로운 결합 소자값

$$Y_{12}' = -j \frac{Y_o - Y_e}{2} \cot \theta_{12} \quad (12)$$

$$C_{12}'' = \frac{Y_o C_{12}' (\tan \theta_1 + \cot \theta_1)}{(\cot \theta_1 + \cot \theta_2) (Y_o + Y_o \cot \theta_2 \tan \theta_1 - 2\omega C_{12}' \tan \theta_1)} \quad (13)$$

이 된다.

Fig. 4(a)에서 각 공진기는 특성 어드미턴스 Y_o 와 Y_e 의 두 전송선로로 구성되고, 두 공진기 사이의 결합은 Y_{12}' 와 C_{12}'' 에 의해 구성된다. Fig. 4(a)의 등가회로를 다시 Fig. 4(b)의 새로운 등가회로로 변환시키면 S. B. Cohn이 제시한 인버터를 이용한 대역통과 필터 설계 이론을 적용할 수 있는 구조가 된다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 결합소자 사이의 관계는 이분법 이론에 의해 구할 수 있다.

$$C_{12} = \frac{Y_o^2 C_{12}'' (1 + \tan^2 \theta_3)}{(Y_o + Y_o \cot \theta_{12} \tan \theta_3) (Y_o + Y_o \cot \theta_{12} \tan \theta_3 - 2\omega C_{12}'' \tan \theta_3)} \quad (14)$$

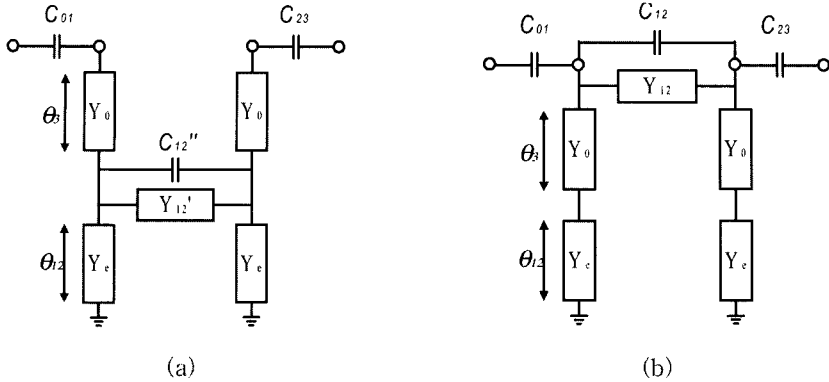


Fig. 4. (a) Equivalent circuit of LTCC MLC bandpass filters including π equivalent circuit, (b) Equivalent circuit with an inverter composed of two elements, C_{12} and Y_{12} .

$$Y_{12} = \frac{Y_0^2 Y_{12}' (1 + \tan^2 \theta_3)}{(Y_0 + Y_e \cot \theta_{12} \tan \theta_3)(Y_0 + Y_e \cot \theta_{12} \tan \theta_3 + j2Y_{12}' \tan \theta_3)} \quad (15)$$

따라서 Fig. 4(b) 등가회로의 $\lambda/4$ 헤어핀 공진기는 전송선로의 선 폭의 변화 없이 등가적으로 계단형 임피던스 공진기(SIR)가 된다.

3. 결과 및 고찰

$\lambda/4$ 헤어핀 공진기를 이용한 2단 LTCC 적층 칩 필터를 중심주파수 $f_0=2.45$ GHz에서 설계, 제작하였다. 대역폭 $\Delta f=150$ MHz, 반사손실 $RL=15$ dB min., 삽입손실 $IL=1.5$ dB max.의 설계 사양에 따라, 비유전율 $\epsilon_r=32$ 의 LTCC를 사용하여 전송선로의 특성임피던스 $Z_0=17.42 \Omega$, SIR의 임피던스비 $R_z=0.63$, 평행결합선로의 전기적 길이 $\theta_{12}=29.3^\circ$ 로 설계하였다. 설계 파라미터는 앞 절의 설계이론에 따라 결정하였다. $35 \mu\text{m}$ 두께의 LTCC 그린 테이프를 사용하여 Fig. 1(a)의 구조에 따라 2개의 도체층을 만들고, 80°C 에서 500 kg/cm^3 의 압력으로 적층시킨 후, 920°C 에서 30분간 동시 소성하였다. Fig. 5는 등가회로 설계 결과 및 전자계 시뮬레이션 결과, 측정 결과를 보여주고 있다. 측정 결과가 두 설계 결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 측정결과를 보면 중심주파수 $f_0=2.45$ GHz, 대역폭 $\Delta f=120$ MHz, 반사손실 $R_L=17$ dB, 삽입손실 $IL=1.7$ dB의 특성을 얻어 대역폭이 30 MHz 감소하였

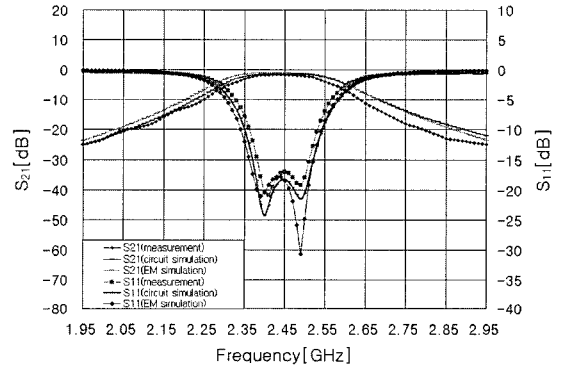


Fig. 5. Simulated and measured frequency response.

고, 삽입손실이 0.2 dB 크게 나타났다. 이는 소성 과정에서 층간 간격이 설계 값과 달라져서 나타난 결과로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 $\lambda/4$ 헤어핀 공진기를 이용한 2단 LTCC 적층 칩 필터의 설계이론을 제시하고 2.4 GHz 대역에서 설계, 제작하여 설계이론을 입증하였다. 평행결합선로와 전송선로로 구성된 $\lambda/4$ 헤어핀 공진기 사이의 부분적인 전자계 결합과 부가적인 결합 캐패시터를 하나의 인버터로 변환하여 인버터를 이용한 대역통과 필터의 설계이론을 적용할 수 있었다. $\lambda/4$ 헤어핀 공진기는 전송선로의 폭을 일정하게 유지하며 SIR로 동작하는 특성을 가지므로 RF 필터를 소형화하는 유용한 방법

이 될 수 있다. 2.4 GHz 대역에서 LTCC 적층 칩 필터의 설계, 제작하여 설계사양을 만족하는 결과를 얻었다.

참고문헌

1. T. Nishigawa, "RF Front-End Circuit Components Miniatured Using Dielectric Resonators for Cellular Portable Telephones", *IEICE Trans.*, vol E74, no. 6, pp. 1556-1562, June 1991.
2. T. Ishizaki, M. Fujita, H. Kagata, T. Uwano, H. Miyake, "A Very Small Dielectric Planar Filter for Portable Telephones", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-42, no. 11, pp. 2017-2022, Nov. 1994.
3. J. Sheen, "LTCC-MLC Duplexer for DCS -1800", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-47, no. 9, pp. 1833-1890, Sept. 1999.
4. M. Sagawa, "Geometrical Structures and Fundamental Characteristics of Microwave Stepped-Impedance Resonators", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-45, no. 7, pp. 1078-1085, July 1997.
5. S. B. Cohn, "Direct coupled cavity filters", *Proc. IRE*, vol. 45, pp. 187-196, Feb., 1957.
6. G. L. Matthaei, "Comb-line Band-pass Filters of Narrow or Moderate Bandwidth", *Microwave J.*, vol. 6, pp. 82-96, Aug. 1963.