

λ/4 Hair-pin 공진기를 이용한 LTCC MLC 대역통과 여파기의 설계

The Design of LTCC MLC Bandpass Filters using λ/4 Hair-pin Resonators

성 규 제 · 여 동 훈*

Gyu-Je Sung · Dong-Hun Yeo*

요 약

본 논문에서는 λ/4 hair-pin 공진기를 이용한 LTCC MLC 대역통과 여파기를 제안하였다. λ/4 hair-pin 공진기는 부분적인 평행 결합선로와 그 선폭이 동일한 전송선로로 구성되어, 등가적으로 SIR이 되므로 기존의 SIR과 달리 구조적인 불연속 없이 공진기의 크기를 소형화할 수 있다. 부가적인 용량성 결합을 포함한 λ/4 hair-pin 공진기를 이용한 LTCC MLC 대역통과 여파기의 등가회로를 유도하고, 설계 절차를 기술하였다. 1.8 GHz 대역에서 2단의 대역통과 여파기를 설계, 제작하였다.

Abstract

In this paper, a λ/4 hair-pin resonator is proposed to reduce the size of resonators. A LTCC MLC bandpass filter is designed using the λ/4 hair-pin resonators. The electromagnetic coupling structure between two planar resonators is analysed. The equivalent circuit is derived to explain the behavior of the LTCC MLC bandpass filter using λ/4 hair-pin resonators. A design procedure is also described. The simulated and measured results of 1.8 GHz band 2-pole bandpass filter are presented.

Key words : LTCC, MLC, λ/4 Hair-pin Resonator, Bandpass Filter

I. 서 론

이동통신 단말기의 기능이 다양화되고 복잡적이 되면서 단말기 부품의 소형화가 꾸준히 진행되고 있다. 최근 LTCC를 응용한 부품의 개발은 부품 소형화 및 모듈화에 크게 기여하고 있다^{[1][2]}. 또한 다층 설계가 가능하여 보다 다양한 회로 설계가 가능해지고 있다. 따라서 LTCC MLC 여파기는 기존 단말기의 모노블록 형태나 TEM 공진기를 이용한 여파기를 지속적으로 대체해 가고 있다. 본 논문에서

는 LTCC MLC 여파기 설계에 있어, 제한된 단면적 내에서 공진기의 배치 면적을 줄이고 입출력 단자의 방향을 조정하기 위해, λ/4 공진기를 헤어핀 형태로 변형시킨 공진기를 이용하여 대역통과 여파기를 설계하였다. λ/4 hair-pin 공진기는 공진기 사이의 결합을 위하여 전체 길이의 일부만을 평행 결합선로의 구조로 만들게 되므로 기존의 Comb-line 여파기의 설계 이론^[3]에 의해 설계가 불가능하다. 또한, 공진기의 선폭의 변화가 없는 경우에도, 등가적으로 공진기의 특성 임피던스가 변화하는 SIR 형태

한경대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Hankyong National University)

*(주)한원 마이크로웨이브(Korea First Microwave, Inc.)

· 논문 번호 : 20021102-03S

· 수정완료일자 : 2002년 12월 5일

가 된다. 따라서 기존의 $\lambda/4$ SIR과 달리 구조적인 불연속 없이 공진기의 크기를 소형화할 수 있다. 다층 구조의 MLC 여파기의 설계에서는 공진기 사이의 결합량을 조절하기 위하여 결합 패턴을 공진기 끝단이 아닌 임의의 위치에 배치하게 되는데 이를 고려한 설계를 해야 한다. 본 논문에서는 위의 두 가지 문제를 고려하여 1.8 GHz 대역의 2단 LTCC MLC 대역통과 여파기를 $\lambda/4$ hair-pin 공진기를 이용하여 설계, 제작하였다.

II. 회로 해석

그림 1의 $\lambda/4$ hair-pin 공진기를 이용한 2단 대역통과 여파기의 등가회로는 그림 2와 같다. 각 공진기는 전기적 길이가 θ_{12} 인 평행 결합선로와 전기적 길이가 θ_3 인 전송선로로 구성되고, 입출력 결합은 C_{01} 에 의해, 두 공진기 사이의 결합은 평행 결합선

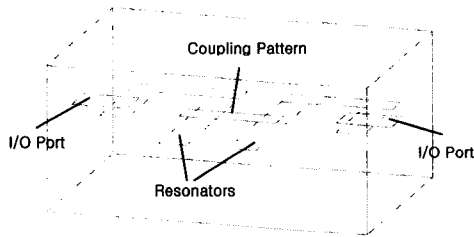


그림 1. $\lambda/4$ hair-pin 공진기를 이용한 LTCC MLC 대역통과 여파기 구조
Fig. 1. Structure of LTCC MLC bandpass filter using $\lambda/4$ hair-pin resonators.

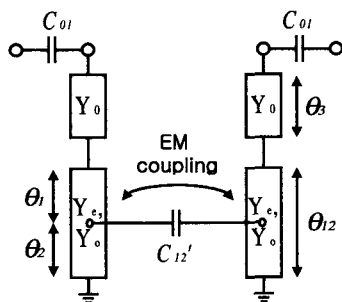


그림 2. $\lambda/4$ hair-pin 공진기를 이용한 대역통과 여파기의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of LTCC MLC bandpass filter using $\lambda/4$ hair-pin resonators.

로의 전자계 결합과 C_{12}' 에 의해 이루어진다.

그림 2의 등가 회로에서, 평행 결합선로는 대칭면을 전계벽, 혹은 자계벽으로 놓고 이분법 이론을 통해 해석할 수 있다. 그림 3에서 대칭면이 자계벽일 경우, 각 단자의 입력 어드미턴스는

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

이다. Y_e 는 평행 결합선로의 우모드 특성 어드미턴스이다. 대칭면이 전계벽일 경우의 입력 어드미턴스는

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

이다. Y_o 는 평행 결합선로의 기모드 특성 어드미턴스이다. 이를 그림 4의 π 등가회로로 변환하면 각 소자값은

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

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

이다.

따라서 그림 2의 $\lambda/4$ hair-pin 공진기를 이용한 2단 대역통과 여파기의 등가회로는 결과적으로 그림

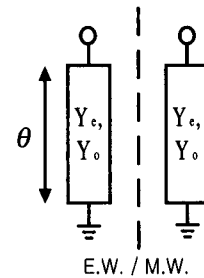


그림 3. 평행 결합선로
Fig. 3. Parallel coupled lines.

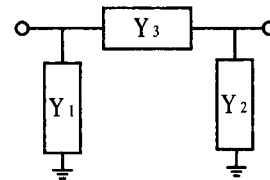


그림 4. 평행 결합선로의 π 등가회로
Fig. 4. π equivalent circuit of parallel coupled lines.

5와 같이 된다. 여기서,

$$Y_{12}' = -j \frac{Y_o - Y_e}{2} \cot \theta_{12} \quad (5)$$

이고,

$$C_{12}'' = \frac{C_{12}'(\tan \theta_1 + \cot \theta_1)}{\cot \theta_1 + \cot \theta_2} \times \frac{1}{(1 + \cot \theta_2 \tan \theta_1) - 2\omega C_{12}' \tan \theta_1 / Y_o} \quad (6)$$

이다^[4].

그림 5의 등가회로에서 공진기는 Y_o , Y_e 의 특성 어드미턴스를 갖는 전송선로로 구성되고, 인버터는 C_{12} '와 Y_{12} '에 의해 구성된다. 그림 5의 등가회로를 다시 C_{12} '와 Y_{12} '가 연결되는 결합 노드의 위치를 공진기 끝단으로 바꾸면^[4] 그림 6과 같다. 따라서 각 공진기는 SIR의 형태로 볼 수 있다.

그림 6에서 공진기의 어드미턴스는

$$Y_i = jY_o \frac{Y_o \tan \theta_{12} \tan \theta_3 - Y_e}{Y_o \tan \theta_{12} + Y_e \tan \theta_3} \quad (7)$$

이고, 공진주파수 ω_0 에서 $Y_i = 0$ 이므로

$$\tan \theta_{12} \tan \theta_3 = \frac{Y_e}{Y_o} = R_Z \quad (8)$$

이 된다. 공진기 전체의 전기적 길이는

$$\begin{aligned} \theta_T &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \theta_{12} + \theta_3 \\ &= \theta_{12} + \tan^{-1} \left(\frac{R_Z}{\tan \theta_{12}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

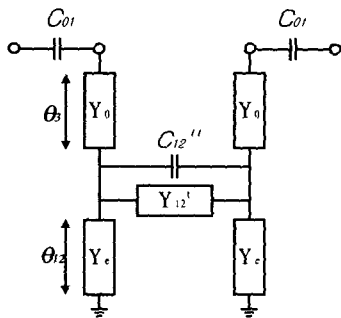


그림 5. 평행 결합선로의 π 등가회로를 적용한 $\lambda/4$ hair-pin 공진기를 이용한 대역통과 여파기
Fig. 5. Equivalent circuit of LTCC MLC band-pass filter including π equivalent circuit.

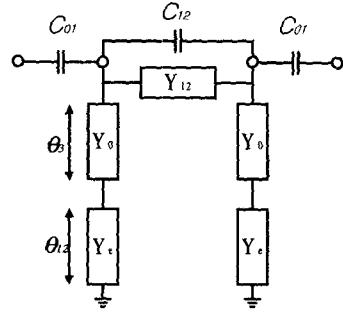


그림 6. C_{12} '와 Y_{12} '의 결합 노드 위치를 공진기 끝단으로 바꾼 등가회로
Fig. 6. Equivalent circuit with changed coupling nodal point of C_{12}' and Y_{12}' .

이다^{[5][6]}.

결론적으로 $\lambda/4$ hair-pin 공진기를 이용한 대역통과 여파기는 다음의 과정을 통해 설계할 수 있다.

- 1) Z_o , θ_{12} 그리고 R_Z 를 선택하면, 식 (8)에 의해서 θ_3 와 Z_e 가 결정된다.
- 2) 설계 사양으로부터 인버터 값 J_{12} 와 감쇠극 주파수 f_b 가 결정되면, C_{12} 와 Y_{12} 가 결정된다.
- 3) C_{12} 와 Y_{12} 를 결합 위치를 바꾼 C_{12}' 와 Y_{12}' 로 변환하면, Y_{12}' 으로부터 Z_o 를 결정할 수 있다.
- 4) Z_o 에 의해 전송선로 공진기의 폭 w 이 결정되고 Z_e , Z_o 로부터 평행 결합선로 간격 g 를 결정한다.

III. 설계 및 제작

$\lambda/4$ hair-pin 공진기를 이용한 LTCC MLC 2단 대역통과 여파기를 아래의 사양에 따라 설계, 제작하였다.

본 연구에서는 $\epsilon_r = 45$ 인 유전체를 사용하여 유

표 1. 설계 사양
Table 1. Design specification.

항 목	사 양
중심주파수	1820 MHz
대역폭	120 MHz
반사손실	16.3 dB min
삽입손실	3.0 dB max
리플	0.5 dB max
크기	4.5×3.2×2.1 mm ³

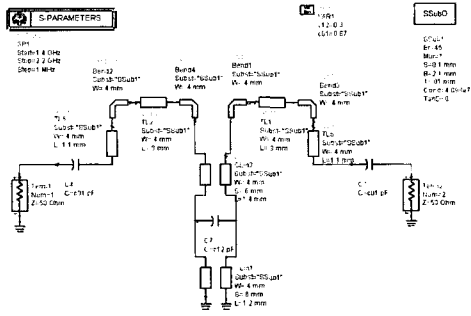


그림 7. LTCC MLC 2단 대역통과 여파기 회로
Fig. 7. Design circuit of LTCC MLC 2nd order bandpass filter.

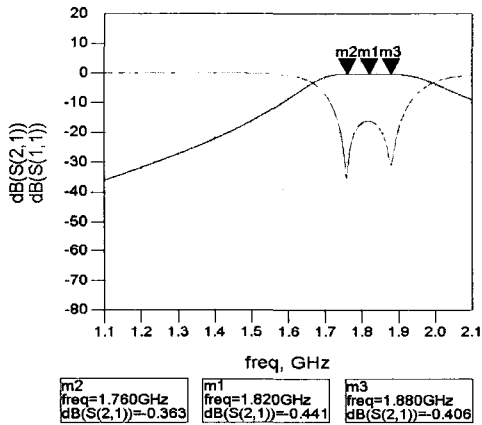


그림 8. 회로 설계 결과
Fig. 8. Design results.

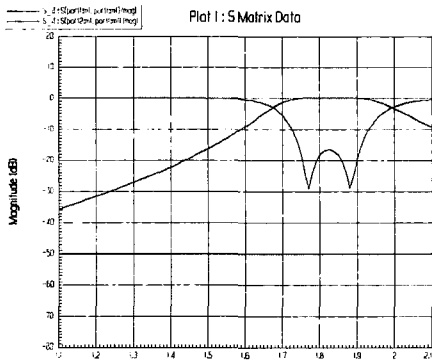


그림 9. 구조 설계 결과
Fig. 9. Simulated results.

전체 각 층의 두께 $t_1 = 1.1$ mm, $t_2 = 0.13$ mm, $t_3 = 0.87$ mm, 평면선로의 선폭 $w = 0.4$ mm 로 스택

업라인 공진기를 구성하고 $g = 0.6$ mm인 평행 결합선로와 결합 패턴으로 인버터를 구성하였다. 공진기의 전기적 길이는 $\theta_{12} = 37.7^\circ$ 이고, SIR의 임피던스비 $R_z = 0.86$ 으로 설계되었다. 그림 7은 설계 회로이고, 그림 8은 그 주파수 특성이다. 그림 9는 설계 검증을 위해 수행한 구조 설계 결과이다. 회로 설계 결과와 다소 차이를 보이는 것은 회로 설계에서 결합패턴에 의한 캐패시터의 구조적 형상을 고려할 수 없었기 때문인 것으로 판단된다. 그림 10은 의사응답 설계 결과로 SIR에 의한 효과로 첫 번째 의사응답이 3%보다 높은 주파수에서 나타나고 있다.

그림 11은 제작된 여파기의 주파수 특성이다. 설계 결과와 비교하여 볼 때, 중심 주파수가 26 MHz

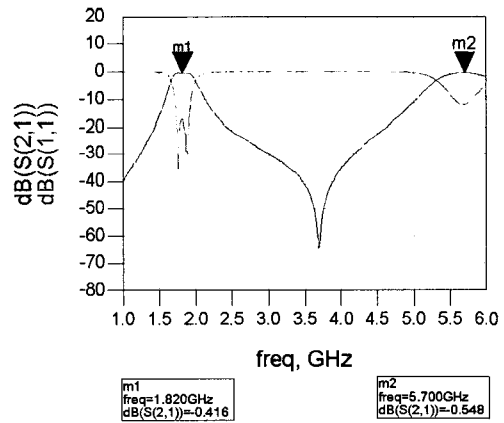


그림 10. 의사 응답 설계 결과
Fig. 10. Design results of spurious responses.

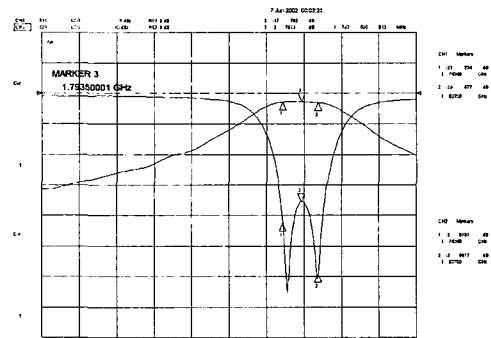


그림 11. 측정 결과
Fig. 11. Measured results.

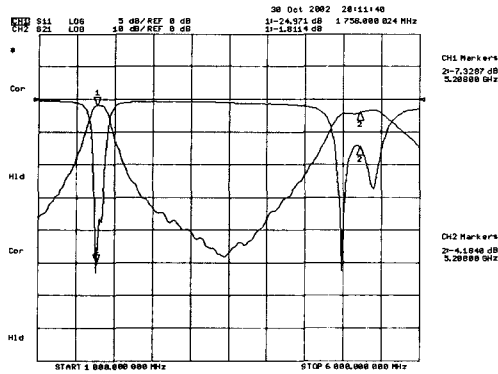


그림 12. 의사 응답 측정 결과
Fig. 12. Measured results of spurious responses.

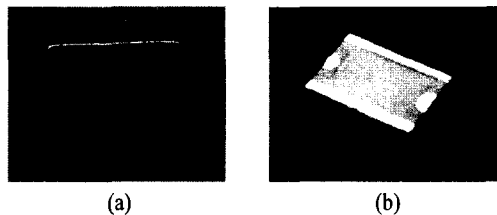


그림 13. $\lambda/4$ hair-pin 공진기를 이용한 LTCC MLC 대역통과 여파기 외형
Fig. 13. Outside view of LTCC MLC bandpass filter using $\lambda/4$ hair-pin resonators.

이동하였고, 대역폭은 20 MHz 정도 차이를 보이고 있다. 삽입손실과 반사손실, 그리고 리플은 설계 사양을 만족하는 결과를 얻었다. 그림 12는 측정된 의사 응답 특성으로 설계 결과와 비교하여 0.5 GHz의 차이를 보이고 있다. 이는 LTCC MLC 공정에서의 여러 변수에 의한 영향으로 판단된다. 그림 13은 제작된 제품의 외형으로 $4.5 \times 3.2 \times 2.1 \text{ mm}^3$ 의 크기를 갖는다.

IV. 결 론

본 논문에서는 $\lambda/4$ hair-pin 공진기를 이용한 LTCC MLC 대역통과 여파기를 설계, 제작하였다. $\lambda/4$ hair-pin 공진기는 LTCC MLC 여파기 설계에 있어, 부품의 소형화에 따라 더욱 작아지는 한정된 공간을 활용하기에 적합한 구조이다. 공진기의 선폭을 변화시키지 않아도, SIR로 동작하는 특성을 갖고

있어 UIR에 비해 공진기의 길이를 줄여주는 효과를 갖는다. 1.8 GHz 대역에서 비유전율 $\epsilon_r = 45$ 인 유전체를 사용하여 크기가 $4.5 \times 3.2 \times 2.1 \text{ mm}^3$ 인 2단 대역통과 여파기를 설계, 제작하여 설계 사양에 가까운 측정 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] T. Ishizaki, "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.
- [2] J. Sheen, "LTCC-MLC duplexer for DCS-1800", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-47, no. 9, pp. 1833-1890, Sept. 1999.
- [3] G. L. Matthaei, "Comb-line band-pass filters of narrow or moderate bandwidth", *Microwave J.*, vol. 6, pp. 82-96, Aug. 1963.
- [4] 성규제, "공진기의 결합 노드 위치가 바뀐 대역통과 여파기의 설계", 한국전자과학회 종합학술 발표회 논문집, 12(1), pp. 49-53, 2002년.
- [5] 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.
- [6] M. Makimoto, "Bandpass filters using parallel coupled stripline stepped impedance resonators", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-28, pp. 1413-1417, Dec. 1980.
- [7] S. B. Cohn, "Direct-coupled resonator filters", *Proc. IRE*, vol. 45, pp. 187-196, Feb. 1957.
- [8] R. Levy, "Theory of directed-coupled-cavity filters", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-15, no. 6, pp. 340-347, June 1967.
- [9] G. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance Matching Networks*, McGraw Hill, 1980.

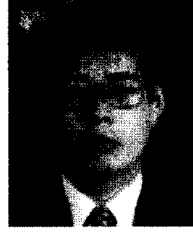
성 규 제



1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
1988년 2월~1993년 7월: 국방과학연구소 연구원
1998년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)

1998년 3월~현재: 한경대학교 전자공학과 조교수
[주 관심분야] 마이크로파 필드해석 및 회로 설계

여 동 훈



1990년 2월: 성균관대학교 전기공학과 (공학사)
1992년 2월: 성균관대학교 전기공학 (공학석사)
1997년 2월: 성균관대학교 전기공학 (공학박사)
2000년 3월~현재: (주) 한원 마이크로웨이브 연구소장

[주 관심분야] 세라믹 RF 부품, 마이크로파 유전체 재료