
교차결합 헤어핀 공진기를 이용한 마이크로스트립 대역통과 여파기 설계

오창근*, 전성근**, 이문수*

Design of Microstrip Band-Pass Filters Using Cross-Coupled Hairpin Resonators

Chang-Geun Oh, Sung-Geun Jeon, Mun-Soo Lee

요 약

교차결합 마이크로스트립 헤어핀 공진기 여파기는 통과대역과 저지대역에서 리플이 나타나며 이러한 리플들은 주파수 선택도와 삽입손실을 개선시킬 수 있다. 교차결합 여파기는 구조가 간단할 뿐만 아니라 여러 가지 형태로 구성할 수 있으므로 그에 따라 여파기 크기가 달라진다. 본 연구에서는 중심 주파수가 1.8GHz 이고 대역폭이 5.0%를 갖는 대역통과 여파기를 Ensemble 소프트웨어로 설계하였다. 제작된 여파기의 대역폭은 중심 주파수 1.8GHz에서 약 4.53%를 나타내었다.

Abstract

A microstrip band-pass filter using cross-coupled resonators is designed and studied experimentally. The cross-coupled microstrip hairpin resonator filters exhibit ripples in both passband and stopband. These ripples can improve both frequency selectivity and insertion loss. The cross-coupled filters are not only simple and compact in configuration, but also have great flexibility to form filters into a variety of size. In this paper, a microstrip band-pass filter using cross-coupled resonators is designed at the center frequency of 1.8GHz with bandwidth of 5.0% using Ensemble software. The experimental results show that the bandwidth is about 4.53% at 1.8GHz.

* 경상대학교 전자공학과

** 경상대학교 정보통신공학과

접수일자 : 2000년 8월 8일

I. 서론

마이크로스트립을 이용한 마이크로파 회로들은 가볍고 소형이며 박막이며 마이크로파 집적회로 (microwave integrated circuit, MIC) 및 모노리딕 MIC(monolithic MIC, MMIC) 등으로 제작이 가능하다. 이러한 장점을 가진 마이크로스트립 회로들은 이동통신분야 등에 많이 사용되고 있다. 특히, 이동통신의 기본 소자인 여파기의 특성은 주파수 간섭과 잡음 등에 관계가 있으며 이동통신의 품질을 결정하는데 중요한 요소 중의 하나로 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^[1].

헤어핀 공진기를 이용한 여파기는 소형화와 MIC화를 위해 1980년대말에 Sagawa와 그의 동료들에 의해 제안되었으며 헤어핀 공진기를 이용한 교차결합 여파기는 통과대역과 저지대역에서 리플이 나타나며 이러한 리플은 주파수 선택도와 삽입손실 특성을 개선시킬 수 있다^[2]. 헤어핀 공진기의 배치에 따라 여파기의 특성과 모양을 다양하게 할 수 있고 제작도 쉽다.

본 연구에서는 4개의 헤어핀 공진기를 이용한 대역통과 여파기를 제작하여, 여파기의 특성을 실험적으로 고찰한다.

II. 교차결합 여파기

교차결합이란 인접하지 않는 공진기 사이의 결합간에 이루어지는 결합을 의미하며 이러한 교차결합을 이용하면 적은 공진기로 높은 선택도를 얻을 수 있으며 구조가 간단하고 집적화가 쉽다는 특징을 가지고 있다.

그림 1은 8개의 헤어핀 공진기가 교차결합되어 있는 여파기를 나타낸 것이다. 그림 1(a)의 결합상태도를 나타내면 그림 1(b)와 같다. 그림 1(b)의 각 노드는 공진기를 나타내고 실선과 점선은 각각 주경로 결합과 교차결합을 나타낸다^[3].

교차결합 여파기 설계에 이용되는 헤어핀 공진기의 기본 결합 구조는 그림 2와 같다^[5]. 반파장 공진기의 개방단에서 전압이 최대가 되기 때문에 개방단 부근에서 전기적 결합이 일어나며, 전류는 반파장 공진기의 중심에서 최대가 되기 때문에 공

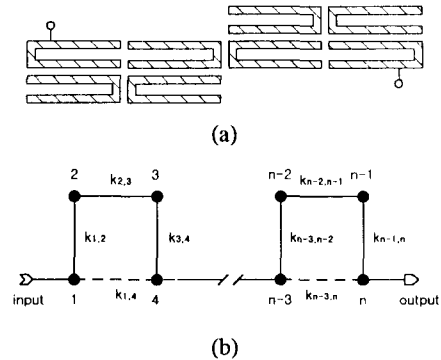


그림 1. 교차결합 마이크로스트립 여파기의 구조 : (a) 여파기의 구조 (b) 여파기의 결합상태도

Fig. 1. Typical cross-coupled microstrip bandpass filter : (a) Structure of filter (b) Coupling diagram of filter

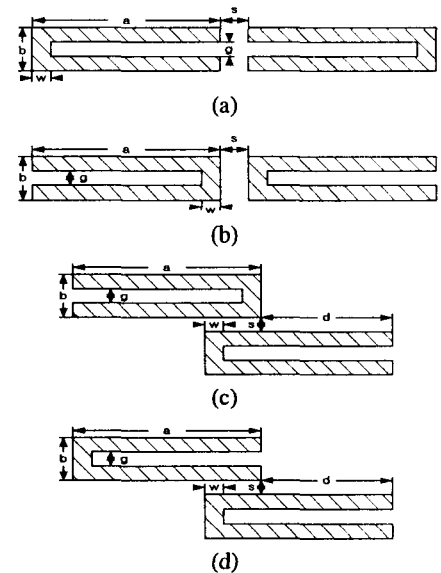


그림 2. 결합된 마이크로스트립 헤어핀 공진기의 기본 결합 구조 : (a) 전기적 결합, (b) 자기적 결합, (c) 혼합 결합 I, (d) 혼합 결합 II

Fig. 2. Basic coupling structure of coupled microstrip hairpin resonators : (a) Electric coupling, (c) The first type of mixed coupling, (d) The second type of mixed coupling

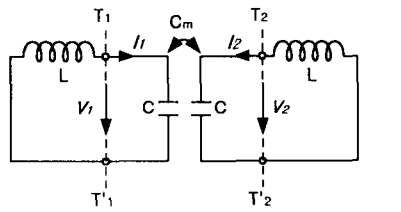
진기의 중심에서 자기적 결합이 주로 발생한다. 따라서, 그림 2(a)는 전기적 결합, 그림 2(b)는 자기적 결합을 나타낸다. 그림 2(c)와 (d)는 전기적 결합과 자기적 결합이 함께 이루어진 혼합 결합 형태로 공진기의 간격 s 와 오프셋 d 에 따라 결합 크기가 달라진다. 두 공진주파수(f_{p1} , f_{p2})와 결합 계수간에는 다음의 관계가 있다[4][5].

$$k = \frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} \dots\dots\dots (1)$$

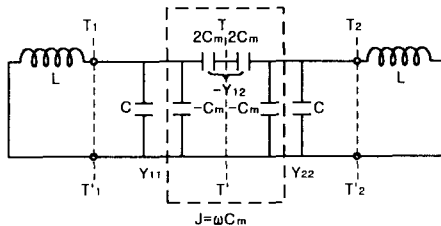
III. 결합 계수

1. 전기적 결합 계수

공진부근의 기본모드에 대해 그림 2(a)의 결합구



(a)



(b)

그림 3. 전기적 결합을 이루는 헤어핀 공진기 구조의 등가회로 : (a) 전기적 결합을 이루는 헤어핀 공진기의 등가회로, (b) 어드민턴스 인버터 $J = \omega C_m$ 를 이용한 등가회로

Fig. 3. Equivalent circuit of the coupled hairpin resonators exhibiting the electric coupling : (a) Equivalent circuit of the coupled hairpin resonators exhibiting the electric coupling, (b) Equivalent circuit with an admittance inverter $J = \omega C_m$

조는 그림 3(a)의 집중소자 등가회로로 나타낼 수 있다. 여기서, L 과 C 는 자기 인덕턴스와 자기 커패시턴스이고 C_m 는 상호 커패시턴스를 나타낸다. $T_1 - T_1'$ 과 $T_2 - T_2'$ 를 2포트 회로망으로 나타내면 다음과 같다.

$$I_1 = j\omega C V_1 - j\omega C_m V_2 \dots\dots\dots (2a)$$

$$I_2 = j\omega C V_2 - j\omega C_m V_1 \dots\dots\dots (2b)$$

식 (2)의 오른쪽 두 번째 항에 있는 $-j\omega C_m V_2$ 와 $-j\omega C_m V_1$ 은 오른쪽과 왼쪽에 있는 두 공진루프 사이의 유도전류이다. 식(2a)와 (2b)로부터 Y -파라미터와의 관계는

$$Y_{11} = Y_{22} = j\omega C \dots\dots\dots (3a)$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -j\omega C_m \dots\dots\dots (3b)$$

이고, 그림 3(a)는 회로망이론에 의해 그림 3(b)와 같이 나타낼 수 있다. 두 공진루프 사이의 전기적 결합은 어드민턴스 인버터 $J = \omega C_m$ 으로 나타낼 수 있다. 그림 3(b)에 있는 대칭면 $T - T'$ 을 전계벽으로 놓을 때 공진주파수 f_e 는

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + C_m)}} \dots\dots\dots (4)$$

이며 식 (4)의 공진 주파수는 결합되지 않은 단독 공진기보다 더 낮다. 물리적으로 설명하면 결합 효과는 전계벽이 결합 구조의 대칭면으로 삽입될 때 단독의 공진기의 전하 축적 능력을 향상시킨다. 또한 그림 3(b)에 있는 대칭면을 자계벽으로 놓을 때 공진 주파수는 다음과 같다.

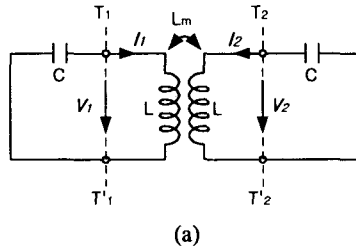
$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C - C_m)}} \dots\dots\dots (5)$$

이러한 경우에 결합 효과는 공진 주파수가 인가되기 위해서 전하 축적능력을 감소시킨다.

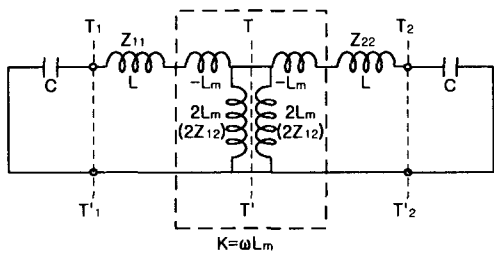
결합 계수에 관한 식 (1)에 식 (4)와 (5)를 대입하면 전기적 결합 계수 k_E 는

$$k_E = \frac{f_m^2 - f_e^2}{f_m^2 + f_e^2} = \frac{C_m}{C} \dots\dots\dots (6)$$

으로 되며 그 결과는 결합되지 않은 공진기의 축적된 에너지에 대한 결합된 전기적 에너지의 비와 같다.



(a)



(b)

그림 4. 자기적 결합을 이루는 헤어핀 공진기 구조의 등가회로 : (a) 자기적 결합을 이루는 헤어핀 공진기의 등가회로, (b) 임피던스 인버터 $K = \omega L_m$ 를 이용한 등가회로

Fig 4. Equivalent circuit of the coupled hairpin resonators exhibiting the magnetic coupling : (a) Equivalent circuit of the coupled hairpin resonators exhibiting the magnetic coupling, (b) Equivalent circuit with an admittance inverter $K = \omega L_m$

2. 자기적 결합 계수

그림 4(a)는 그림 2(b)의 집중소자 등가회로를 나타낸 것으로 L과 C가 자기 인덕턴스와 자기 커패시턴스이며 L_m 은 상호 인덕턴스를 나타낸다. $T_1 - T_1'$ 과 $T_2 - T_2'$ 에서 2포트 회로망으로 나타내면

$$V_1 = j\omega L I_1 + j\omega L_m I_2 \dots\dots\dots (7a)$$

$$V_2 = j\omega L I_2 + j\omega L_m I_1 \dots\dots\dots (7a)$$

이며, 식 (7a)와 (7b)는 자기 인덕턴스 L는 인접 루프가 개방회로인 그림 4(a)에서 하나의 공진 루프상에서 나타나는 인덕턴스이고 식(6a)와 (6b)의 오른쪽에 있는 두 번째 항은 각 루프상에서 유도된 전류이다. 식 (7a)와 (7b)로부터 Z 파라미터와의 관계는

$$Z_{11} = Z_{22} = j\omega L \dots\dots\dots (8a)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = j\omega L_m \dots\dots\dots (8b)$$

이며, 그림 4(a)는 회로망의 파라미터를 이용하여 그림 4(b)와 같이 나타낼 수 있다. 두 공진루프 사이의 자기적 결합은 임피던스 인버터 $K = \omega L_m$ 으로 낼 수 있다. 그림 4 (b)에 있는 대칭면 T-T'이 전계벽으로서 놓음으로서 공진 주파수는 다음과 같다.

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L - L_m)C}} \dots\dots\dots (9)$$

공진 주파수의 증가는 전계벽이 대칭면으로 삽입될 때 결합 효과가 축적된 전속을 감소시키기 때문이다. 그림 4 (b)에서 대칭면이 자계벽으로서 놓음으로서 생기는 공진 회로의 공진 주파수는 다음과 같다.

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + L_m)C}} \dots\dots\dots (10)$$

식 (10)에서 결합 효과는 공진 주파수가 아래로 이동하기 위해서 축적된 전속을 증가시킨다.

식 (8)과 (9)를 이용하여 자기적 결합 계수 k_M 를 구하면

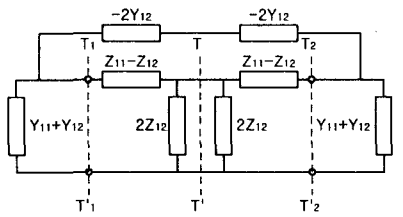
$$k_M = \frac{f_e^2 - f_m^2}{f_e^2 + f_m^2} = \frac{L_m}{L} \dots\dots\dots (11)$$

으로 자기적 결합계수는 결합되지 않은 공진기의 축적된 에너지에 대한 결합된 자기적 에너지의 비를 나타낸다.

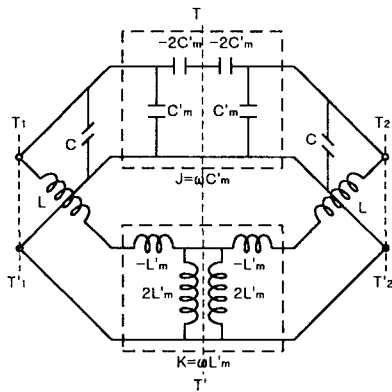
3. 혼합 결합 계수

그림 2(c)와 (d)의 결합 구조는 전기적 결합과 자기적 결합이 함께 나타난다. 혼합된 결합 구조의 등가 회로망은 그림 5(a)와 같이 나타낼 수 있으며 Y-파라미터와 Z-파라미터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y_{11} &= Y_{22} = j\omega C \\ Y_{12} &= Y_{21} = j\omega C_m' \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$



(a)



(b)

그림 5. 혼합 결합을 이루는 헤어핀 공진기 구조의 등가회로 : (a) 혼합 결합을 이루는 헤어핀 공진기의 등가회로, (b) 임피던스 인버터($K = \omega L_m'$)와 어드미턴스 인버터($J = \omega C_m'$)를 이용한 등가회로

Fig. 5. Equivalent circuit of the coupled hairpin resonators exhibiting the mixed coupling : (a) Equivalent circuit of the coupled hairpin resonators exhibiting the mixed coupling, (b) Equivalent circuit with an impedance inverter $K = \omega L_m'$ and an admittance inverter $J = \omega C_m'$

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{22} = j\omega L \\ Z_{12} &= Z_{21} = j\omega L_m' \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

여기서, C , L , C_m' 와 L_m' 는 자기 커패시턴스, 자기 인덕턴스, 상호 커패시턴스와 상호 인덕턴스이다.

그림 4(b)에 있는 등가 회로의 대칭면에 자계벽과 전계벽을 삽입함으로써 다음을 얻을 수 있다.

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L - L_m')(C - C_m')}} \quad \dots\dots\dots (14a)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + L_m')(C + C_m')}} \quad \dots\dots\dots (14b)$$

자기적·전기적 결합은 전계벽이나 자계벽이 삽입될 때 공진회로의 전속과 전하를 감소시키거나 강화시킨다.

식 (14)로부터 혼합된 결합 계수 k_B 는 다음과 같다.

$$k_B = \frac{f_e - f_m}{f_e + f_m} = \frac{CL_m' + LC_m'}{LC + L_m'C_m'} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$L_m'C_m' \ll LC$ 이면 식 (15)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_B \approx \frac{L_m'}{L} + \frac{C_m'}{C} = k_M' + k_E' \quad \dots\dots\dots (16)$$

식 (16)은 혼합 결합이 전기적 결합과 자기적 결합으로 이루어져 있다는 것을 나타낸다.

표 1. 여파기의 특성

Table 1. Specifications of the filter

중심주파수	$f_0 = 1.8\text{GHz}$
공진기의 수	4
대역 폭	BW=5.00%
대역 리플	0.1dB

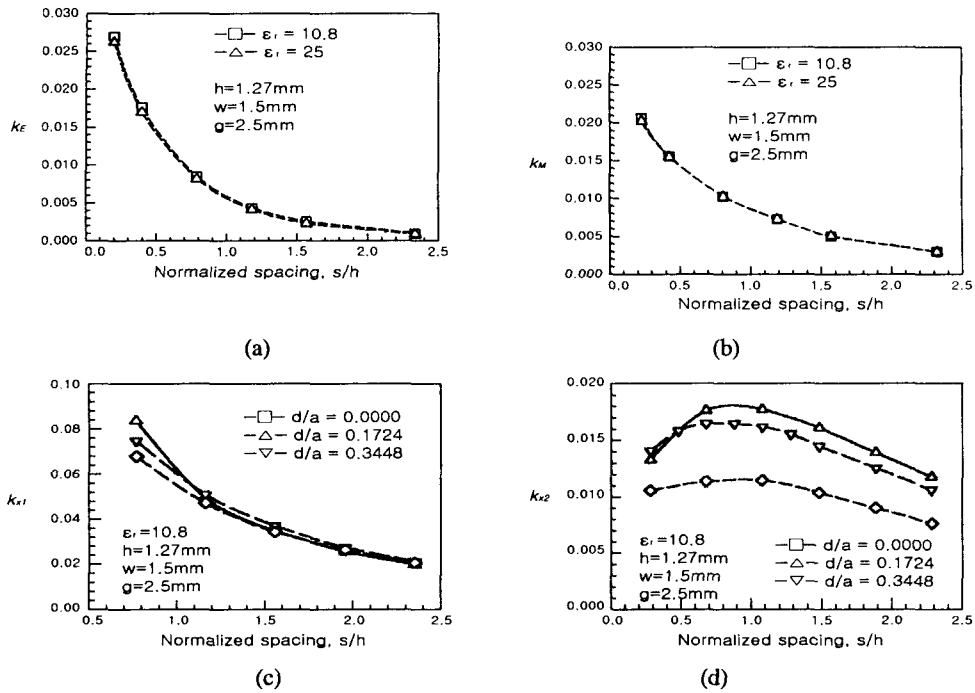


그림 6. 그림 2 결합구조에 대한 결합 계수 : (a) 그림 2(a) 구조의 전기적 결합 계수, (b) 그림 2(b) 구조의 자기적 결합 계수, (c) 그림 2(c) 구조의 혼합 결합 계수, (d) 그림 2(d) 구조의 혼합 결합 계수
 Fig. 6. Typical coupling coefficients of the coupling structures in Fig. 2 : (a) Electronic coupling coefficient for Fig. 2(a), (b) Magnetic coupling coefficient for Fig. 2(b), (c) Mixed coupling coefficient for Fig. 2(c), (d) Mixed coupling coefficient for Fig. 2(d)

4. 계산 결과

그림 2의 헤어핀 공진기 결합구조에서 공진기 간격 s 에 따라 계산된 결합계수는 그림 6과 같다. 전기적 결합 계수(k_E)는 자기적 결합 계수(k_M)보다 s/h 비에 따라 변화가 크며, 유전율이 높을 경우 k_E 와 k_M 은 유전율에 거의 무관하다.

IV. 설계 및 실험

1. 여파기 설계

4개의 헤어핀 공진기를 교차결합 시킨 마이크로 스트립 대역통과 여파기의 구조는 그림 7과 같다. 여파기 특성에 중요한 영향을 주는 결합 계수를 조절하여, 대역폭과 삽입손실 특성을 최적화 하였고, 여파기의 입·출력부는 여파기의 크기를 줄이

기 위해서 태핑(tapping)을 적용하였다[6].

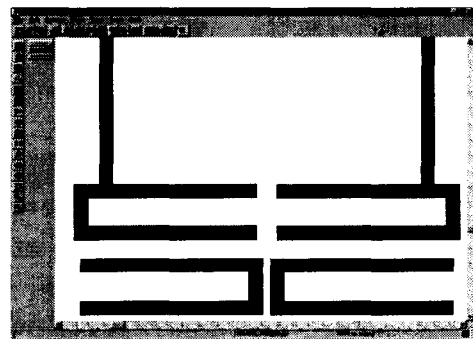


그림 7. 교차결합 마이크로 스트립 헤어핀 공진기의 구조
 Fig. 7. Geometry of the cross-coupled microstrip hairpin resonator filter

표 1은 설계된 여파기 특성을 나타내며 그림 8은 실제 제작된 여파기 이다. 그림 9는 시뮬레이션한 삽입손실과 반사손실을 나타낸다.

2. 여파기의 특성 측정

그림 10과 그림 11는 실제 제작된 여파기의 삽입손실과 반사손실의 측정결과를 나타낸다.

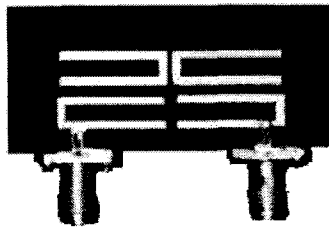


그림 8 제작된 여파기의 사진
Fig. 8. Photograph of the fabricated filter

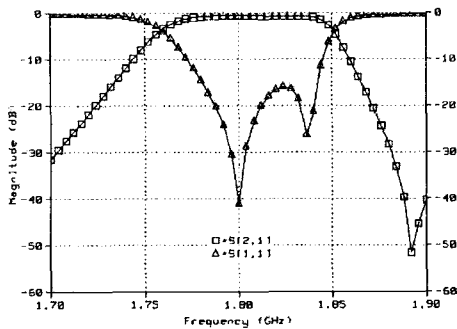


그림 9. 1.8GHz 여파기의 삽입손실과 반사손실 계산 결과
Fig. 9. Calculated insertion loss and return loss of the filter for 1.8GHz

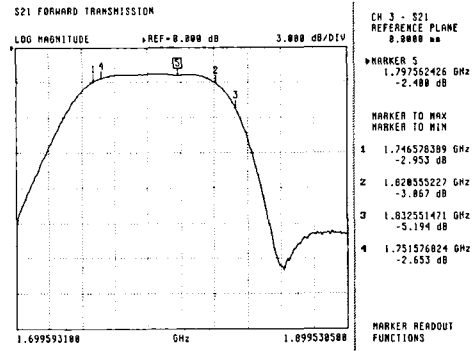


그림 10. 여파기의 삽입손실 측정결과
Fig. 10. Measured insertion loss of the filter

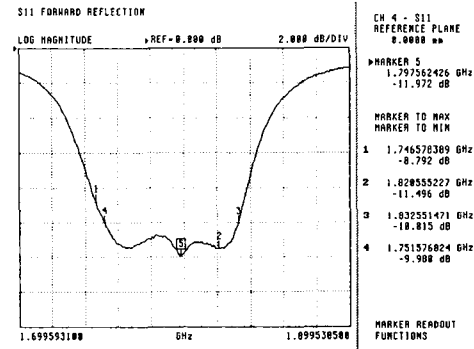


그림 11. 여파기의 반사손실 측정결과
Fig. 11. Measured return loss of the filter

V. 결론

본 연구에서는 교차결합 마이크로스트립 헤어핀 공진기로 구성된 대역통과 여파기를 설계·제작하였다. 중심주파수 1.8GHz에서 대역폭 5.00%인 여파기를 설계하였으나 중심주파수와 대역폭이 1.786GHz에서 4.53%로 측정되었다. 이것은 여파기 제작과정에서 에칭오차에 기인한다고 생각된다. 여파기의 리플특성은 공진기의 간격에 따라 좌우되며 공진기의 간격이 좁을수록 리플이 많이 나타났으며 본 연구에서 공진기의 간격을 최적화 시켜 제작하였다.

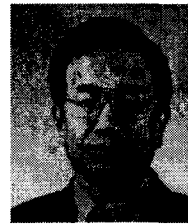
참 고 문 헌

- [1] M. Sagawa, K. Takahashi, and M. Makimoto, "Miniaturized hairpin resonator filters and application to receiver front-end MIC's", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-37, pp. 1991-1997, Dec. 1987.
- [2] S. Darlington, "Synthesis of reactance four poles which produce prescribed insertion loss characteristics", J. Macth. Phys., Vol. 18, pp. 257-353, Sept. 1939.
- [3] A. E. Williams and A. E. Atia, "dual-mode canonical waveguide filters", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol MTT-25, pp. 1021-1026, Dec. 1977
- [4] Jia-Sheng Hong and Michael J. Lancaster, "Cross-Coupled Microstrip Hairpin-Resonator Filters", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-46, pp. 108-122, Jan. 1998.
- [5] J. S. Hong and M. J. Lancaster, "Couplings of microstrip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-44, pp. 2099-2109, Nov. 1996.
- [6] International Telephone and Telegraph Corp., Reference data for Radio Engineers, 6th Ed. Howard W. Sams Co., Inc.

오 창 근(Chang-Geun Oh)

1997년 2월 경상대학교 전자공학과(공학사)
 2000년 2월 경상대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 2000년 3월~현재 경상대학교 대학원 전자공학과
 (박사과정 재학)

*관심분야 : 초고주파 회로 및 안테나



이 문 수(Mun-Soo Lee)

1970년 2월 한국항공대학교 항
 공통신공학과(공학사)
 1980년 2월 한양대학교 대학원
 전자통신공학과(공학
 석사)

1984년 8월 한양대학교 대학원 전자통신공학과(공
 학박사)
 1981년 3월~1986년 2월 제주대학교 통신공학과
 부교수
 1986년 8월~1987년 8월 미국 COMSAT 연구소 연
 구원
 1986년3월~현재 경상대학교 공과대학 전자공학과
 교수
 1997년 9월~1999년 8월 경상대학교 부설 정보통
 신연구센터 소장
 1998년 8월~2000년 7월 영남지부 전자과학회 지
 부장

* 관심분야 : 이동통신, 마이크로파, 안테나 GIS 등



전 성 근(Seong-Keun Jeon)

1971년 2월 한국항공대학 통신
 공학과(공학사)
 1982년 8월 전국대학교 대학원
 전자공학과(공학석사)
 1996년 8월 경상대학교 대학원

전자공학과(공학박사)

1979년 3월~1995년 2월 통영수산전문대학 교수
 1995년 3월~현재 경상대학교 정보통신공학과 교수

* 관심분야 : 전자장 및 마이크로파 회로설계