

# IMT-2000 단말기의 Tx RF용 타원형 협대역 대역통과 필터의 설계에 관한 연구

## A Study on the Design of Elliptic-Function Narrow-Band Bandpass Filters for Tx RF of the IMT-2000 Mobile Equipment

이상원\*, 정명래\*\*, 김학선\*\*\*, 홍신남\*

Sang Won Lee\*, Myung-Rae Chung\*\*, Hak-Sun Kim\*\*\*, and Shin-Nam Hong\*

### 요 약

본 논문에서는 IMT-2000 단말기 송신기의 전력증폭기와 주파수 합성기 사이에 이용되는 통과 대역에서 적은 삽입 손실과 예리한 선택도를 갖는 소형의 고성능 협대역 대역통과 필터를 설계하였다. 설계된 새로운 구조의 마이크로스트립 선을 이용한 타원함수 협대역 대역통과 필터는 소형(3.2cm×1.25cm)이고, 3dB 대역폭이 3% 되는 특성을 갖고 있다. 또한 통과대역에서 삽입 손실이 2.5dB 이하로 기존의 RF SAW 필터의 삽입 손실 3.2dB보다 우수하다는 것을 확인할 수 있었고, 차단 대역에서 -56dB 이하의 두 개의 깊숙한 노치를 보였다.

### Abstract

This paper describe the development of narrow-band passband filter with small package and low loss, high selectivity performance. This filter is placed between power amplifier and frequency mixer of IMT-2000 mobile equipment. The elliptic-function narrow-band passband filter is designed with new architecture using the microstrip line. This package is very small by 3.2 cm×1.25 cm and have the 3% 3dB bandwidth. Also in the passband the insertion loss is about 2.5 dB and is better than older RF SAW filter(insertion loss: 3.2 dB). In the stop-band it has the two deep notch under the -56 dB.

### I. 서 론

IMT-2000은 보다 더 많은 정보 및 서비스를 받고자 하는 수요자의 요구와 전 세계 통신시장의 단일화라는 목적으로 언제, 어디서나, 누구에게나 음성통신은 물론 데이터 및 동영상 멀티미디어까지 송수신 가능한 제3세대 이동통신 서비스이다. 현재 IMT-2000 단말기는 기존의 2세대 이동통신 표준인

IS-95(CDMA), GSM(TDMA) 등의 기존 자원을 최대한 활용하면서 상호 호환되고, 동영상 멀티미디어 서비스를 사용자에게 제공할 수 있는 다중 모드 방식을 채택하는 추세이다.

이와 같은 무선 인터넷의 급속한 발전으로 정보통신 산업이 PC 중심에서 이동통신 단말기를 비롯한 휴대형 정보통신 단말기 중심으로 전개되고 있으며, 금년 일본을 시작으로 국내에서도 2002년 하반기부터 서비스가 개시될 예정인 차세대 이동통신

\* 한국항공대학교 항공전자공학과(Dept. of Avionics Eng., Hankuk Aviation Univ.)

\*\* 목포해양대학교 해양전자통신공학부(Faculty of Marine Electronic & Communication Eng., Mokpo National Marine Univ.)

\*\*\* 한밭대학교 정보통신·컴퓨터공학부(Division of Information Communication & Computer Eng., Hanbat National Univ.)

· 논문번호 : 2001-2-4

· 접수일자 : 2001년 11월 5일

IMT-2000 서비스의 본격화로 관련 단말기 및 부품의 신규 수요 확대가 예상되고 있다. 그러나 단말기에 소요되는 RF 핵심 부품은 대외 의존도가 높아 부품 국산화는 반드시 필요하다.

이동통신 단말기에 사용되는 RF 핵심 부품중에서 RF SAW 필터는 압전기판 상에 입출력의 2개 전극(IDT)을 설계해 공급된 전기신호를 표면탄성과로 변환하는 과정에서 특성 주파수만을 통과시키는 대역통과 필터로 웨이퍼를 이용한 반도체 기술과 고주파 기술이 결합된 제품으로 소형화, 복합화, unit화, 모듈화에 대한 대응이 요구되고 있다. 현재 RF SAW 필터의 기술 동향은 2 mm×2 mm 제품과 같은 소형화, 경량화를 위해 플라스틱 패키지를 이용, 기판 재료인 LN 및 LT를 온도 계수 및 삽입 손실이 좋은 LBO, 랑거사이트 등으로 대체 중이며, RF 용은 IDT 간격이 협소화되어 서브 마이크론의 반도체 제조공정(CDMA: 1 μm, PCS: 0.5 μm, IMT-2000: 0.3 μm)이 이용되고 있다.

이와 같이 이동통신 단말기의 RF용 대역통과 필터는 통과 대역에서 삽입 손실이 적고 예리한 선택도를 갖는 소형의 고성능 협대역(1%~3%) 대역통과 필터가 요구되며 범용으로 쓰이는 SAW 필터는 성능은 우수하지만 제조 비용이 많이 들기 때문에 비싸다. 그러나 평면 필터는 SAW 필터에 비해 낮은 제조 비용 때문에 많이 사용되었으며, 일반적인 마이크로스트립 대역통과 필터에 대한 설계 기술은 오래전에 입증되었지만 5% 이하의 통과 대역에 대한 비실용성 때문에 항상 어려움을 겪어 왔다[1]~[3]. 최근에 마이크로스트립 링 공진기를 이용한 이중 모드 마이크로스트립 필터 구조를 이용하여 평면 구조로 협대역 대역통과 필터의 설계가 가능하다. 중단 결합형 이중모드 링 필터는 삽입 손실이 약 4 dB 정도이지만, 전송 손실을 줄이기 위해서 입출력 단자에 결합 강도를 높이기 위한 배선 선로를 이용하면 삽입 손실은 약 2 dB 정도 향상되지만 3 dB 대역폭은 4% 정도이다[4],[5]. 그러므로 삽입 손실을 줄이기 위해서는 결합 영역을 증가시키거나 고온 초전도 박막 필름 기술 또는 능동 소자를 결합시킴으로써 도체와 유전체 손실에 의한 감쇠를 줄이는 방법이 있다[6]~[10]. 또한 새로운 마이크로스트립

타원함수 협대역 대역통과 필터 구조가 제안되었지만 크기는 작으나 3 dB 대역폭은 4%의 4-폴 필터에 대해서만 보고되었다[11].

본 논문에서는 IMT-2000 단말기의 Tx RF용 대역통과 필터로 사용될 수 있는 3%의 3 dB 대역폭과 저지대역에서 두개의 노치 특성을 갖는 결합되고 교차된 선을 갖는 마이크로스트립 개루프 공진기를 이용한 새로운 구조의 타원함수 협대역 대역통과 필터를 설계하였다.

II. 타원함수 대역통과 필터의 설계

2-1 직접 입출력 선로의 끝에 결합된 2단 링 필터

반과장 공진기를 이용한 2단의 일반적인 마이크로스트립 대역통과 필터를 그림 1에 나타내었다. 여기에서 단일 공진기 길이는 27.94 mm, 입출력 결합 갭 크기  $S_1 = S_2 = 0.1$  mm, 단 사이의 결합 갭 크기  $S_{12} = 1.5$  mm이다. 반면에 그림 2에서는 단일 링 둘레가 46.6 mm, 입출력 갭  $S_1 = S_2 = 0.1$  mm, 단 사이의 갭  $S_{12} = 2.2$  mm인 2단 결합된 사각 링 필터의 구조를 설명하고 있다.

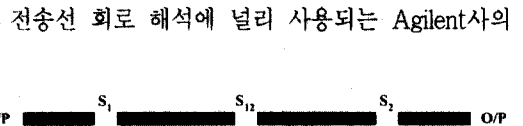


그림 1. 2단 중단에 결합된 반과장 마이크로스트립 대역통과 필터

Fig. 1. Schematic of a two-section end-coupled half-wave microstrip bandpass filter.

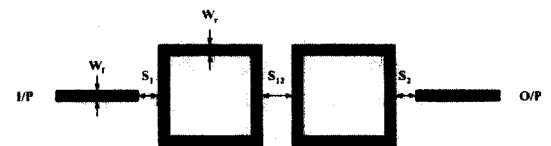


그림 2. 입출력 선로에 직접 결합된 2단 마이크로스트립 링 필터

Fig. 2. Arrangement of a two-section microstrip ring filter directly coupled to input/output lines.

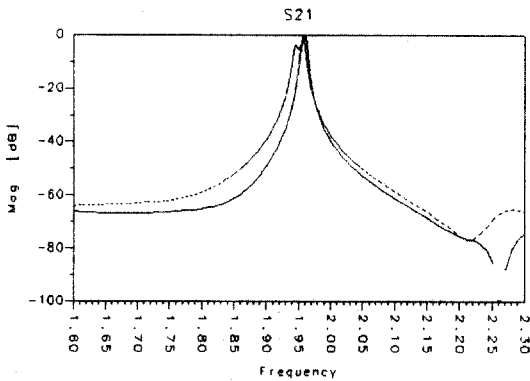


그림 3. 그림 1(dash)과 그림 2(solid)의 주파수 응답  
 Fig. 3. Comparison of the frequency responses of the Fig. 1(dashed line) and Fig. 2(solid line).

모우멘트(Ver 4.0) 소프트웨어를 이용하여 두 개의 마이크로스트립 대역통과 필터의 이론적인 주파수 응답을 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 알 수 있듯이, 링 공진기 필터는 용량적으로 결합된 반파장 공진기 필터에 비해서 위쪽 저지 대역에서 감쇠 노치를 나타낸다. 이것은 링 필터가 통과 대역에서 더 좁은 대역폭과 차단 대역에서 더 나은 제거를 제공한다는 것을 알 수 있다. 여기에 공급 선 위치와 링 공진기들 사이의 결합 길이를 충분히 바꾸어 주면 노치가 개선이 되는 것이 아니라 낮은 차단 대역이 만들어진다. 삽입 손실이 5.284 dB까지 얻어지는 것은 종단에 결합된 링 필터에 의한 영향이다[11],[12].

2-2 탭 입출력 선로에 에지 결합된 2단 링 필터

탭 입출력 선로의 결합 영역을 증가시킴으로써 삽입 손실을 향상시킬 수 있는 2단의 사각 링 필터를 그림 4에 나타내었다. 이 구조에 이용된 파라미터들은 다음과 같다. 링 선로의 두께  $W_r = W_f = 1.114$  mm, 주 루프 둘레는 46.6 mm,  $S_1 = S_2 = 0.4$  mm, 그리고  $S_{12} = 1.5$  mm이다. 모우멘트 소프트웨어를 이용하여 모의 실험한 결과를 그림 5에 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 1.960 GHz의 중심 주파수에서 삽입 손실은 0.657 dB, 3 dB 대역폭은 3.54 %이다.

2-1과 2-2의 링 필터를 살펴보면 일반적인 종단

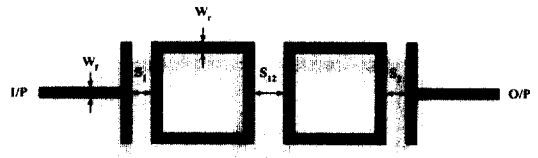


그림 4. 탭 입출력 선로에 에지 결합된 2단 링 필터  
 Fig. 4. Layout of a two-section ring filter edge coupled to tapped input/output lines.

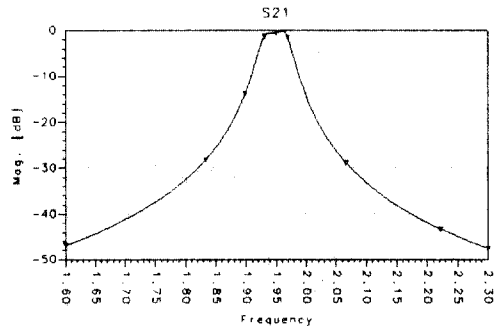


그림 5. 그림 4의 결합 링 필터의 주파수 응답  
 Fig. 5. Frequency responses of the coupled ring filter of Fig. 4.

결합형 링 필터보다 더욱 더 좁은 통과대역 대역폭과 저지대역 특성을 향상시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 삽입 손실을 원하는 만큼 향상시키기 위해서는 강한 결합 성능이 필요하게 된다.

2-3 개루프 공진기와 결합 선로를 이용한 대역 통과 필터

개루프 공진기와 결합 선로를 이용한 대역통과 필터는 상대적으로 결합 링 필터보다 PCB 크기가 작고 더욱더 좁은 대역폭을 제공할 수 있다는 것을 보여준다.

앞에서 설명되었던 것처럼 에지 결합된 구조는 충분한 통과대역 삽입 손실을 얻을 수 있지만, 종단에 결합된 필터는 불충분한 결합 강도를 제공한다. 이러한 관점에서 그림 6과 같은 구조가 고안되었다. 이러한 구조의 대역통과 필터는 두개의 이상적인 개루프 공진기와 결합 선로로 구성되어 있고, 충분한 용량성 결합을 얻기 위해 값을 적절히 조절하였다.

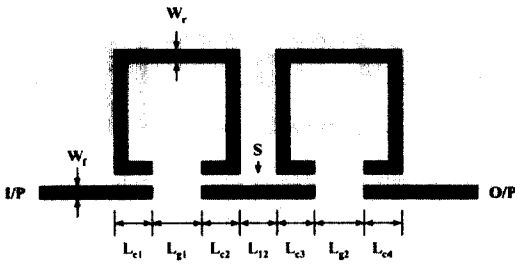


그림 6. 개루프 공진기와 결합 선을 이용한 대역통과 필터  
 Fig. 6. The bandpass filter using open-loop resonators and coupled lines.

결합된 마이크로스트립 선로의 짧은 단 사이의 용량성 결합의 갭에 대한 근사적인 계산은 무한한 두께를 가진 기판에서 두개의 대칭 코플레너 스트립(CPS) 사이의 용량으로 근접시킬 수 있다. 대기와 유전체 영역에서 전체에 의해 생성된 용량은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{\text{대기}} = \epsilon_0 \frac{K'(m)}{K(m)} \quad [\text{F/m}] \quad (1)$$

$$C_{\text{유전체}} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{K'(m)}{K(m)} \quad [\text{F/m}] \quad (2)$$

여기서  $K(m)$ 와  $K'(m)$  독립 변수  $m$ 은 다음과 같다.

$$K(m) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - m \sin^2 \theta}} \quad (3)$$

$$K'(m) = K(1 - m) \quad (4)$$

$$m = \sqrt{\frac{\text{CPS 갭크기}}{2 \times \text{CPS 선폭} + \text{CPS 갭크기}}} = \sqrt{\frac{S}{2 \times W_{\text{CPS}} + S}} \quad (5)$$

(1)~(4)식으로 부터 결합 선로 LCPS에 대한 전체 용량은 다음과 같다.

$$C_{\text{total}} = \epsilon_0 (1 + \epsilon_r) \frac{K'(m)}{K(m)} L_{\text{CPS}} \quad [\text{F}] \quad (6)$$

그림 1에서 선로 폭  $W = 1.114 \text{ mm}$ , 갭 크기  $S =$

$0.1 \text{ mm}$ , 그리고 유전체  $\epsilon_r = 10.5$ 을 가진 결합된 마이크로스트립 선로 사이의 갭 용량 값은 Garg와 Bahl에 의해 유도된 식으로 마이크로스트립 갭 용량이나 갭에 근접해 있는 구조를 계산할 수 있다[13]~[15]. 그리고 결합 갭이 주요 관심 부분이라면  $L_{\text{CPS}} = W_f$ 와  $W_{\text{CPS}} = 50 \text{ S}$ 를 갖는 짧은 CPS 선로로 볼 수 있다. 식 (1)~(6)을 이용하여 전체 결합 용량을 구하면  $0.186 \text{ pF}$ 이다. 그러나 종단에 결합된 선로 사이의 결합 갭의 정확한 값을 얻으려고  $W_{\text{CPS}}$ 을  $50 \text{ S}$ 에서  $100 \text{ S}$ 로 증가시켜도 관측되는 용량을 찾기가 힘들다. 선로 폭  $W_f = 1.114 \text{ mm}$ , 갭 크기  $S = 0.15 \text{ mm}$ , 결합 길이  $L_c = 2.5 \times W_f$ ,  $\epsilon_r = 10.5$ 를 갖는 그림 6과 같은 필터에서 종단의 에지 결합된 전송 선로 사이의 결합 갭은  $W_{\text{CPS}} = W_f$ 와  $L_{\text{CPS}} = L_c$ 인 CPS 선로와 유사하다. 이러한 파라미터들을 위의 방정식에 대입시키면 두개의 에지 결합된 선로 사이의 전체 결합 용량은  $0.370 \text{ pF}$ 으로 종단에서 결합된 선로의 두 배에 해당되는 용량 값이다.

앞에서 다루었던 예시들로부터 에지 결합된 선로의 작은 단이 종단에서 결합된 선로보다 더 강한 결합 강도와 유연성을 제공한다는 것을 알 수 있다.

그림 7에 나타낸 것과 같이 모우멘트 소프트웨어에 의해 얻어진 이론적인 주파수 응답에 대한 전송 특성은 삽입 손실과  $1.96 \text{ GHz}$ 에 중심을 둔  $3 \text{ dB}$  대역폭이 각각  $0.798 \text{ dB}$ 와  $1.8 \%$ 이다. 그러므로 2-2의  $3 \text{ dB}$  대역폭이  $3.54 \%$ 인 결합 링 필터의 특성과 비교해 보면 훨씬 더 좁은  $3 \text{ dB}$  대역폭을 제공한다. 게다가 결합 링 필터의 회로의 크기는  $6.7 \times 1.7 \text{ cm}$  인데

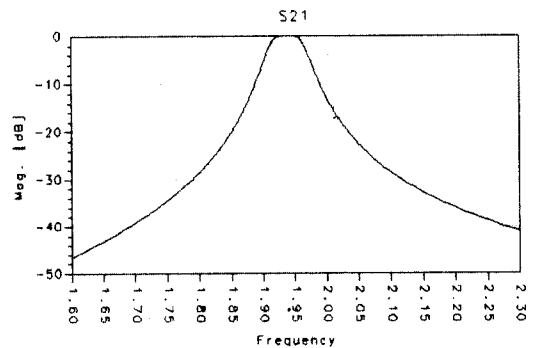


그림 7. 그림 6의 주파수 응답  
 Fig. 7. Frequency responses of Fig. 6.

비하여 그림 6의 필터는 3.2×0.95 cm의 크기로 제작 가능하다. 그리고 유전을 상수가 높은 기판을 사용할 경우 더욱 작게 제작할 수 있다. 이동통신이나 IMT-2000용으로 2 % 대역폭보다 더 작은 대역통과 필터가 일반적으로 필요하기 때문에 이러한 구조의 필터는 촉망받는 제품이 될 것이다.

2-4 결합과 교차된 선로를 갖는 개루프 공진기를 이용한 협대역 타원함수 대역통과 필터

그림 8과 같은 평면 필터의 개루프 공진기 구조는 헤어핀 구조의 필터와 같이 보이지만, 여기서 헤어핀 선로는 접혀진 개방 종단형 공진기로 헤어핀 선로 자체는 끝 부분에서 루프 접속을 가지는 에지 결합된 선로들의 쌍과 같고 다른 것은 개방 종단이다. 필터 설계에 필요한 헤어핀 선로들은 보통 위아래로 교환할 수 있다. 그러므로 그림 6에서 보이는 개루프 공진기는 헤어핀 구조와 다른 형태의 필터이다. 협대역 필터 설계에서 헤어핀 선로에 의해 달성되는 일반적인 3dB 대역폭은 약 5 % 정도이다. 이 값은 제안된 개루프 필터를 이용하여 얻은 2.8 %의 3dB 대역폭보다 크다[16],[17].

그림 6과 같은 대역통과 필터는 매우 협대역 대역폭을 만드는데 보다 유용하고 편리하다는 것을 알 수 있다. 그러나 저지 대역의 감쇠 기울기는 이중 모드 타원함수 링 공진기보다 가파르지는 않다. 그러므로 협대역과 소형의 특징을 갖는 타원함수 필터는 다음과 같이 제안되었다[18].

타원함수 필터의 특성은 저지대역에 대한 제거 특성이 좋으므로 그림 6과 같은 두 개의 개루프 공진기의 중간에 교차되는 추가의 선로를 연결하여 타원함수 협대역 대역통과 필터를 그림 8과 같이 만들 수 있으며, 개루프 공진기의 개방 종단에 결합 선로가 놓여있다. 이 교차된 선로는 공진기에서 최대 전류가 흐를 때 다른 불안한 원인을 제공할 수 있지만, 전자파의 이중 경로 상호 작용에 의해 저지대역에서 두 개의 깊은 노치가 존재하는 평면형 타원함수 협대역 대역통과 필터를 3.2×1.25 cm의 크기로 제작 가능하다.

비교의 편의를 위해 필터 제작은  $L_{12}'$ 를 제외하고

는 2-3에서 주어진 회로 파라미터와 같은 것을 사용하였고  $L_{12}'$ 는  $3W_f$ 와 같다. 그림 10의 컴퓨터 시뮬레이션 결과(●)를 보면 저지대역 특성이 개선됨을 확인할 수 있으며, 2.025 GHz에서의 3 dB 대역폭은 1.96 %이다.

III. 타원함수 대역통과 필터의 시뮬레이션

교차된 선로는 주로 다른 결합 경로를 만드는데 이용되므로 가능한 짧게 유지시켜야 한다. 중심 공진 주파수와 통과대역 대역폭에서 이 길이의 영향은  $L_{12}'=3W_f$ 를 갖는 중심 주파수를  $f_0$ 라 하면 중심 주파수 드리프트  $\Delta f$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta f = [f_0(L_{12}') - f_0(L_{12}' = 3W_f)] / (f_0(L_{12}' = 3W_f) \times 100\%) \quad (7)$$

그림 8에서  $L_{12}'$ 는 각 개루프 공진기의 최대 전류와 연결된 결합 선로이므로 공진기와 교차 선로 사이의 에지 결합을 위해 충분히 거리를 두어야 하지만, 회로 크기를 작게 하기 위해서는 가능한 짧게 해야 한다.

이상과 같은 협대역 대역통과 필터를 설계할 때 고려해야 될 사항은 첫째는 개루프 공진기 길이는 희망하는 주파수의 반파장에 맞추고, 둘째는 각각의 개루프 공진기의 종단은 불필요한 자기 종단 결합을 방지하기 위해 충분히 떨어뜨린다. 셋째, 주어진 결

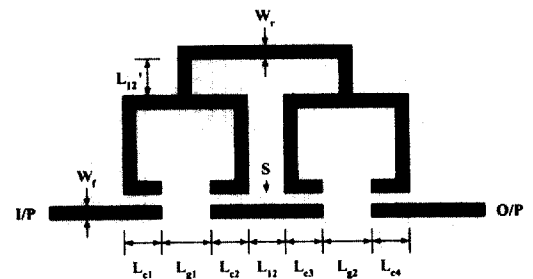


그림 8. 결합과 교차된 선로를 갖는 개루프 공진기를 이용한 타원함수 협대역 대역통과 필터

Fig. 8. The elliptic-function narrow-band bandpass filter using open-loop resonators together with coupled and crossing lines.

합 겹 크기에서 입력과 출력 결합 선로의 길이는 동작 주파수에서 충분한 결합 세기를 얻기 위해 조절되어야 한다. 넷째, 짧은 부가적인 개방 종단 스텐브는 두 개의 개루프 공진기 사이에서 신호의 에지 결합용으로 사용된다. 공진기의 종단을 따라 결합된 부분은 대역폭 조건에 맞도록 조정한다. 다섯째, 상기의 부가적인 결합 스텐브의 길이는 두 개의 개루프 공진기를 서로 결합되지 않도록 충분한 거리를 두도록 한다. 반면에 가능한 회로를 컴팩트하도록 짧게 한다.

이상과 같은 이론을 바탕으로 IMT-2000 단말기의 Tx RF 필터에 적용 가능한 협대역 대역통과 필터를 그림 9에 나타내었다. 2장에서 설명한 필터들은 10.5의 유전체 상수, 기판 두께가 1.27mm, 그리고 도체 두께가 35  $\mu\text{m}$ 인 기판에서 시뮬레이션하였다. 또한 폭  $W_f = 1.114\text{m}$ 의 50  $\Omega$  선은 필터를 구성

하는 모든 연결선으로 사용되었다. 그림 9는 그림 8의 필터에 대한 삽입 손실과 대역폭을 개선시키기 위해서 개루프 공진기와 교차된 선로의 결합 강도에 영향을 미치는 모서리 부분을 개선시킨 구조이다. 이러한 수정된 구조는 그림 10의 시뮬레이션 결과 ( $\Delta$ )와 같이 그림 8과 같은 필터의 특징을 유지하면서 중심 주파수를 변화시킬 수 있으며, 삽입 손실의 발생되지 않는 특징이 있다. 그림 10에서 실선은 FUJITSU사의 Tx용 SAW BPF(FAR-F6CE-1G9500-L2ZP)의 측정 데이터,  $\bullet$ 와  $\Delta$ 는 그림 8과 9의  $S_{21}$  특성이다. 이와 같이 수정된 필터는 저지대역에서 노치가 그림 8의 필터보다 깊고 통과대역의 중심 주파수를 가변하기에 용이하다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 모서리 부분의 결합 영역에 대한 용량 값을 변화시키는 것에 의하여 선로의 길이를 확장시키는 결과를 얻을 수 있기 때문이다.

IV. 결 론

결합 선로와 교차 선로를 갖는 개루프 공진기를 이용한 평면 필터를 이용하여 IMT-2000 단말기의 Tx용으로 사용될 수 있는 협대역 대역통과 필터를 설계하고 모의 실험하였다. 유전체 상수는 10.5, 기판 두께는 1.27 mm, 그리고 도체 두께가 35  $\mu\text{m}$ 인 기판을 구할 수 없어서 Agilent사의 모우멘트(Ver 4.0) 소프트웨어를 통해 시뮬레이션한 결과, 3 %의 3 dB 대역폭과 저지대역에서 두개의 노치를 관측할 수 있는 타원함수 필터의 특성을 얻을 수 있다는 것을 이론과 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다. 이러한 필터는 IMT-2000 단말기의 RF용 필터에 적용하면 기존의 RF SAW 필터에 비해 면적은 많이 차지하지만 저가로 협대역 대역통과 필터를 만들 수 있다.

그러므로 향후의 연구 방향은 이론과 모의 실험을 통해 설계된 타원함수 필터를 PCB 기판에 제작하여 측정 값과 모의 실험 값을 최적화시켜 평면 필터에 대한 크기를 줄이고, 통과대역에서 저지대역으로 감쇠되는 기울기를 더욱더 개선해야 된다. 또한 이중 모드 링이나 병렬로 결합된 개루프 공진기를 이용한 평면 필터의 등가회로에 대한 모델링을 정립

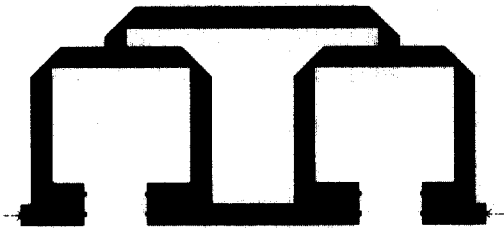


그림 9. 결합과 교차된 선로를 가진 공진기를 이용한 수정된 타원함수 협대역 대역통과 필터

Fig. 9. The elliptic-function narrow-band bandpass filter using open-loop resonators together with coupled and crossing lines proposed in this paper.

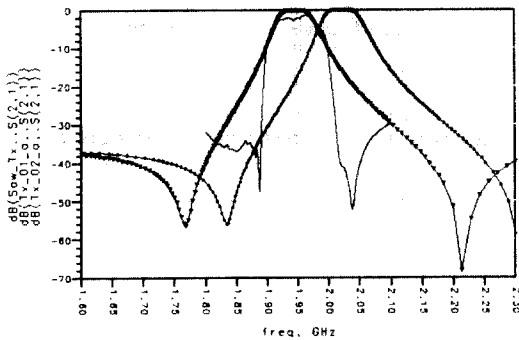


그림 10.  $S_{21}$  특성

Fig. 10. A characteristic  $S_{21}$  of the filters.

해야 될 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [2] J. A. G. Malherbe, *Microwave Transmission Line Filters*. Norwood, MA: Artech House, 1979.
- [3] R. Levy and S. B. Cohn, "A history of microwave filter research, design, and development," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 1055-1067, Sept. 1984.
- [4] J. A. Curtis and S. J. Fiedziuszko, "Multi-layered planar filters based on aperture coupled, dual mode microstrip or stripline resonators," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Albuquerque, NM, June 1-5, 1992, pp. 1203-206.
- [5] J. S. Hong and M. J. Lancaster, "Bandpass characteristics of new dual-mode microstrip square loop resonators," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 11, pp. 891-892, May 1995.
- [6] J. A. Curtis and S. J. Fiedziuszko, "Miniature dual mode microstrip filters," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Boston, MA, June 10-14, 1991, pp. 443-446.
- [7] R. R. Mansour, "Design of superconductive multiplexers using single-mode and dual-mode filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 1411-1418, July 1994.
- [8] S. J. Fiedziuszko, J. A. Curtis, S. C. Holme, and R. S. Kwok, "Low loss multiplexers with planar dual mode HTS resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, pp. 1248-1257, July 1996.
- [9] U. Karacaoglu, I. D. Robertson, and M. Guglielmi, "A dual-mode ring resonator filter with active devices for loss compensation," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Atlanta, GA, June 14-18, 1993, pp.189-192.
- [10] 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. 44, pp. 2099-2108, Dec. 1996.
- [11] M. Makimoto and M. Sagawa, "Varactor tuned bandpass filters using microstrip-line ring resonators," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Baltimore, MD, June 2-4, 1986, pp. 411-414.
- [12] K. Chang, *Microwave Ring Circuits and Antennas*. New York: Wiley, 1996.
- [13] R. Crampagne and G. Khoo, "Synthesis of certain transmission lines employed in microwave integrated circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-25, pp. 440-442, May 1977.
- [14] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*. New York: Dover, 1964, ch. 17, pp. 590-592.
- [15] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, 2nd Ed. Norwood, MA: Artech House, 1996, sec. 3.4.2, pp. 183-189.
- [16] E. G. Cristal and S. Frankel, "Hair-line and hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-20, pp. 719-728, Nov. 1972.
- [17] U. H. Gysel, "New theory and design for hair-line filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-22, pp. 523-531, May 1974.
- [18] C. C. Yu, "Novel Compact Elliptic-Function Narrow-Band Bandpass Filters Using Microstrip Open-Loop Resonators With Coupled and Crossing Lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, pp. 952-958, Jul 1998.

**이 상 원(李相元)**

1967년 3월 20일생  
 1989년 2월 : 한국항공대학교 항  
 공전자공학과(공학사)  
 1991년 8월 : 한국항공대학교 항  
 공전자공학과(공학석사)  
 2002년 2월 : 한국항공대학교 항  
 공전자공학과(공학박사)

1991년 3월~1997년 7월 : ED기술연구소(주)  
 1999년 9월~2001년 5월 : 터보텔레콤(주)  
 2001년 6월~현재 : 마젤텔레콤(주)  
 관심분야 : 이동통신 RF 시스템 설계 및 제작, 초고주  
 파 회로 및 시스템, RF MEMS 소자

**정 명 래(鄭明來)**

1941년 8월 28일생  
 1964년 2월 : 한국항공대학교 통  
 신학과(공학사)  
 1992년 2월 : 한국항공대학교 항  
 공전자공학과(공학석사)  
 1999년 2월 : 한국항공대학교 항  
 공전자공학과(공학박사)

1967년 : 목포해양고등전문학교 교수  
 1980년 : 목포해양전문대학 교수  
 1993년 7월~현재: 목포해양대학교 교수  
 관심분야 : RF 통신 회로, 마이크로파

**김 학 선(金學善)**

1959년 6월 3일생  
 1986년 2월 : 한국항공대학교 항  
 공전자공학과(공학사)  
 1990년 2월 : 한국항공대학교 항  
 공전자공학과(공학석사)  
 1993년 8월 : 한국항공대학교 항  
 공전자공학과(공학박사)

1993년 3월~현재 : 한밭대학교 정보통신·컴퓨터공학부  
 부교수  
 관심분야 : RF 시스템 설계 및 제작, MMIC 설계, 이동  
 통신 단말기 RF Block 설계/제작/측정, 이동통신 시  
 스템 시뮬레이션 및 부품 설계 및 제작

**홍 신 남(洪信男)**

1953년 12월 17일생  
 1972년 3월~1979년 2월 : 한양대  
 학교 전자공학과(공학사)  
 1981년 9월~1984년 12월 : 미국  
 North Carolina State Univer-  
 sity 전기공학과(공학석사)  
 1985년 1월~1989년 6월 : 미국  
 North Carolina State University 전기공학과(공학박사)

1989년 9월~현재 : 한국항공대학교 항공전자공학과 교  
 수  
 관심분야 : 반도체 소자, 물성, 공정