

# 고출력 특성을 고려한 능동 가변 대역 통과 여파기 설계

## An Active Tunable Bandpass Filter Design for High Power Application

김도관 · 윤상원

Do-Kwan Kim · Sang-Won Yun

### 요약

본 논문에서, 부정 저항 특성을 갖는 능동 커패시턴스 회로를 이용한 고출력 능동 가변 대역 통과 여파기는 동축형 유전체 공진기와 버랙터 다이오드를 사용하여 설계하였으며, 셀룰러 TX, RX 대역을 모두 가변할 수 있도록 설계하였다. 능동 커패시턴스 회로의 직렬 피드백 구조는 가변 대역 통과 여파기의 버랙터 다이오드로부터 생기는 손실을 보상함과 동시에 고출력 특성을 갖도록 하기 위해  $P_{1dB}$ 가 32 dBm인 GaAs HFET을 사용하였다. 버랙터 다이오드는 고선형 특성을 갖도록 하기 위해 back-to-back 구조를 사용하였다. 제작된 2단 능동 가변 대역 통과 여파기는 셀룰러 대역인 800 MHz에서 900 MHz를 가변하며, 각각 25 MHz 대역폭으로 TX 대역 836 MHz에서 0.48 dB 삽입 손실 특성을 나타냈으며, RX 대역 881.5 MHz에서 0.39 dB 삽입 손실 특성을 나타내었다.  $P_{1dB}$  특성은 TX 및 RX 대역에서 각각 19.5 dBm과 23 dBm을 얻었다.

### Abstract

In this paper, a high power active tunable bandpass filter made of dielectric resonators and varactor diodes is designed using the active capacitance circuit generating negative resistance for tuning cellular TX, RX band. An active capacitance circuit's series feedback circuit using GaAs HFET whose  $P_{1dB}$  is 32 dBm is used for compensating the losses from the varactor diodes of the tunable bandpass filter. The tuning elements, the varactor diodes are used as the back-to-back configuration to achieve the high power performance, The designed active capacitance circuit improves the insertion loss characteristics. The designed 2-stage active tunable dielectric bandpass filter at cellular band can cover from 800 MHz to 900 MHz. The insertion losses at 836 MHz and 881.5 MHz with 25 MHz bandwidth are 0.48 dB and 0.39 dB, respectively. The  $P_{1dB}$  of the designed bandpass filter at TX and RX band are measured as 19.5 dBm and 23 dBm, respectively.

Key words : Dielectric Resonator, Tunable Bandpass Filter, Negative Resistance, Active Capacitance,  $P_{1dB}$

### I. 서론

현재의 무선 통신 시스템에서는 여러 대역을 하나의 단말기에서 송수신을 할 수 있는 기능이 요구된다. 고정된 주파수 특성을 갖는 대역 통과 여파기를 사용하는 경우 여러 개의 여파기를 사용하여야

하므로, 여파기 부분의 전체 크기가 커지고 여러 여파기를 결합하는 데서 추가로 손실이 발생하는 등의 문제점이 발생하게 된다. 그러므로 차세대 다중 밴드 단말기에 적용하기 위해서는 가변 대역 통과 여파기 하나로 이 기능을 구현하는 것이 유리하다. 그러나 버랙터 다이오드를 사용하는 경우, 버랙터 다이

「본 연구는 지식경제부의 차세대 신기술개발 사업의 지원을 받아, 수행하는 차세대 무선 통신용 트랜시버 시스템개발사업의 일환으로 수행되었습니다.」

서강대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

· 논문 번호 : 20091111-133

· 교신저자 : 윤상원(e-mail : swyun@sogang.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2009년 12월 29일

오드에서 발생하는 손실로 인하여 대역 통과 여파기의 삽입 손실이 크게 증가하는 문제점을 갖는다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 부성 저항을 갖는 능동 회로를 사용하는 방법이 있다<sup>[1]-[4]</sup>. 이 제시된 능동 회로는 트랜지스터와 직렬 공진기를 사용하여 설계되는 구조이다. 이 능동 회로는 부성 저항을 발생시켜, 가변 대역 통과 여파기에 설계 시 쓰이는 벡터 다이오드에서 생기는 손실을 보상하면서 커패시턴스 특성을 유지하는 장점을 지닌다. 그러나 제시된 논문에서는 삽입 손실 개선 및 저잡음, 소신호 특성에 국한되어 연구되었기 때문에 벡터 다이오드와 부성 저항 회로가 갖는 취약한 선형성으로 인해 고출력 시스템을 고려한 여파기 제작은 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 참고한 논문과 같이 트랜지스터와 직렬 공진기를 사용한 능동 회로를 사용하되, 고출력 특성을 가진 GaAs HFET를 사용함과 동시에 벡터 다이오드의 선형성을 증가시키기 위하여 벡터 다이오드를 back-to-back 방식<sup>[5]</sup>으로 연결한 능동 가변 대역 통과 여파기가 셀룰러 대역에서 삽입 손실이 획기적으로 개선되며, 고출력의 특성을 만족하는지에 중점을 두고 설계, 제작하였다.

## II. 능동 가변 대역 통과 여파기 설계

### 2.1 능동 커패시턴스 회로 설계

본 논문에서 제안된 구조는 그림 1에 나타나 있듯이 공통소스 형태이며, GaAs HFET의 드레인 단에 R, L, C를 직렬 형태로 단 회로이다.

이 회로의 등가회로는 그림 2와 같으며, 입력 어드미턴스는 식 (1)과 같이 정리된다<sup>[1]-[4]</sup>.

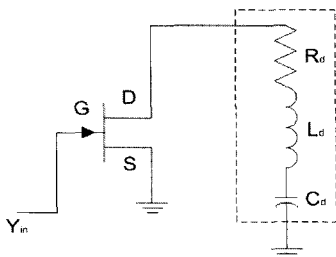


그림 1. 능동 커패시턴스 회로  
Fig. 1. The active capacitance circuit.

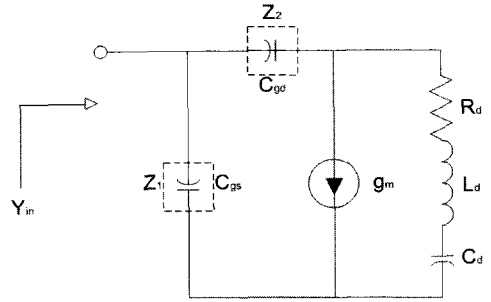


그림 2. 능동 커패시턴스 회로 해석을 위한 등가회로  
Fig. 2. The detailed equivalent circuit for the analysis.

$$Y_{in} = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_d + g_m Z_1 Z_d}{Z_1(Z_2 + Z_d)} \quad (1)$$

여기서 각 변수들은

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_{gs}} = -jX_1,$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_{gd}} = -jX_2,$$

$$Z = R_d + j\left(\omega L_d - \frac{1}{\omega C_d}\right) = R_d + jX_d$$

이다. 본 식에서 부성 저항을 갖는 조건은 아래 식 (2)로 표시된다.

$$\frac{1}{\sqrt{L_d C_d}} < \omega < \frac{1}{\sqrt{L_d \frac{C_d C_{gd}}{C_d + C_{gd}}}} \quad (2)$$

식 (2)에서 얻고자 하는 부성 저항의 크기는 외부 소자인  $L_d$ 와  $C_d$ 에 의해서 결정된다.

또한 공진기에 연결되는 능동 회로의 게이트(또는 베이스) 단의 커패시턴스를 이용하여 구성된 회로의 공진 주파수를 쉽게 조절할 수 있고 드레인(또는 콜렉터) 단의 직렬 R, L, C 소자를 각각 조절하여 부성 저항에 의한 주파수 대역의 변화를 통해 통과 대역 내 평탄도가 일정한 능동 가변 대역 통과 여파기가 설계 가능하다.

설계 목표 대역인 셀룰러 대역에서 부성 저항을 갖는 능동 커패시턴스 회로 제작을 위해, 제시된 설계 방법을 이용하여 능동 커패시턴스 회로의 구성 소자 값을 얻는다. 그림 1의 트랜지스터는 고출력 특성을 지닌 Sirenza사의 HFET SHF-0589을 사용했으며, 이 때, 드레인단에 연결된 R, L, C 값을 1 Ω, 2.2 nH, 10 pF, 게이트단에 연결된 C 값 39 pF을 얻었다.

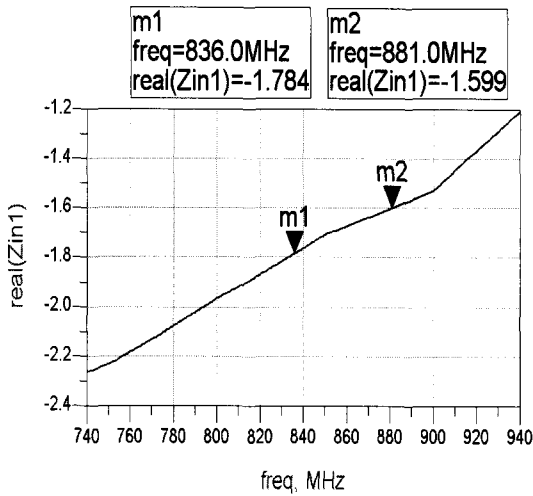


그림 3. 제작한 능동 커패시턴스 회로의 부성 저항 특성

Fig. 3. The negative resistance performances of the fabricated active capacitance circuit.

그림 3은 설계를 통해 얻어진 값을 이용해 제작한 능동 커패시턴스 회로의 부성 저항 특성을 보여주며, 그림 4는 제작한 능동 커패시턴스의 스미스 차트 상에서 본 반사계수의 특성을 나타낸다.

그림 4에서 원하는 주파수 대역에서의 반사계수 특성이 스미스 차트 단위 원 밖으로 나가고 아래쪽에 위치하는데, 이것은 부성 저항을 가짐과 동시에 커패시턴스 성분을 가짐을 의미한다. 설계하고자 하는 셀룰러 대역에서 이러한 부성 저항 특성을 얻어

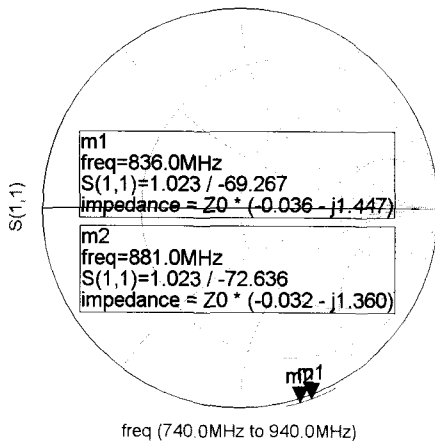


그림 4. 제작한 능동 커패시턴스 회로의 반사계수 특성  
Fig. 4. The  $S_{11}$  performance for the fabricated active capacitance circuit.

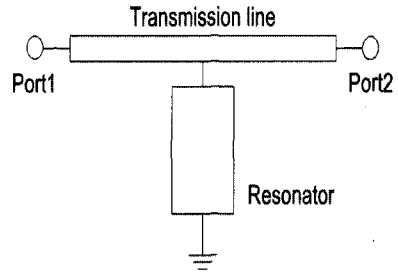


그림 5. 공진기의 특성 측정을 위한 구성

Fig. 5. The measurement method of equivalent circuit for the ceramic resonator.

버랙터 다이오드에서 생기는 손실을 보상하여 통과 대역 내 평탄도가 우수하며 삽입 손실이 개선된 능동 가변 대역 통과 여파기를 설계한다.

### 2-2 가변 대역 통과 여파기 설계

본 논문에서 사용된 동축형 유전체 공진기는 LC 공진기에 비해  $Q$ 가 매우 크고, 온도에 따른 주파수 안정도가 좋으며, 비유전율  $\epsilon_r$ 이 큰 특성을 가지고 있어 상대적으로 적은 삽입 손실을 얻을 수 있다.

여파기를 설계하기 위해서는 그림 5에서처럼 공진기에 대한 모델링이 필요하다. 이 마이크로스트립 50  $\Omega$  전송 선로에 공진기를 병렬로 직접 연결한 회로를 구성하면 공진기의  $\lambda/4$  길이에 해당하는 주파수에서 병렬 공진을 하는데, 이 구조를 해석하여 공진기의 등가 소자 값을 추출한다.

그림 6은 버랙터 다이오드의 등가회로와 역 바이어스 전압을 인가했을 때의  $R, L, C$  등가회로를 나타낸 것이다. 동작 주파수가 낮을 경우  $L_p$ 와  $C_p$  성분의 영향은 작아져서  $L_s, C_s(V), R_s, R_p$ 만으로 이루어진 등가회로를 Deloach법을 이용하여 모델링이 가능하다<sup>[6]</sup>. 그리고 역 바이어스 전압을 인가할 때  $R_p$ 는 무시될 수 있으므로 등가회로는  $R, L, C$  직렬 공진 회로로 구성된다.

설계 시 사용한 버랙터 다이오드는 선형성을 증가시키기 위하여 버랙터 다이오드를 back-to-back 방식으로 연결하였다. 이 버랙터 다이오드의 바이어스 전압을 점차 증가시켰을 때 바이어스 전압에 따른  $C_s$  값은 Deloach법을 이용하여 추출한 결과를 그림 7에 나타내었다. 가변 대역 통과 여파기의 주파수 가변은 이  $C_s$ 를 변화시키면 된다. 설계된 여파기의 전

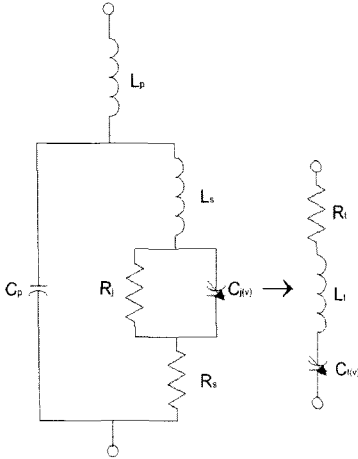


그림 6. 버랙터 다이오드의 등가회로와 직렬 R, L, C 회로로의 전환  
 Fig. 6. The equivalent circuit of varactor diode and conversion to series R, L, C circuit.

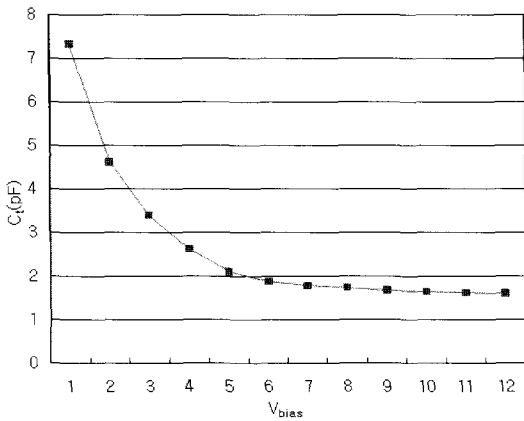


그림 7. 바이어스 전압에 의한 C<sub>1</sub> 값  
 Fig. 7. The C<sub>1</sub> values for bias voltage.

압은 셀룰러 TX 대역은 5 V, RX 대역에서 9 V를 각각 인가하였을 때 대역 통과 특성을 얻었다.

여파기의 공진기 간의 결합은 결합창을 통한 자체결합을 이용하였으며, 여파기의 중요한 설계 인자인 결합계수는 여파기의 중심 주파수와 대역폭, 리플의 크기와 차수에 의해 결정된다. 결합계수 구하는 식은 식 (3)과 같다<sup>[7]</sup>.

$$K_{n,n+1} = \frac{J_{n,n+1}}{b} = \frac{W}{\sqrt{g_n g_{n+1}}} \quad (3)$$

실험을 통해 확인한 결과, 길이가 12.0 mm, 내부 지름은 2.15 mm인 유전체 공진기에 대해서, 공진기

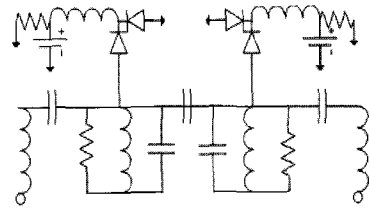


그림 8. 설계된 2단 가변 대역 통과 여파기 회로도  
 Fig. 8. The designed tunable bandpass filter circuit.

사이의 결합창이 단락면에서 1 mm부터 6 mm 사이의 길이로, 5 mm일 때의 결합계수가 설계에 적합하여, 이 때 결합계수의 크기가 0.026이었다. 버랙터 다이오드를 사용한 능동 가변 대역 통과 여파기는 인가된 전압에 따라 커패시턴스 값이 변하는 특성을 가지므로 가변 특성을 가지는 여파기 제작이 가능하다.

특히 가변 대역에서 일정한 대역폭을 갖기 위해 결합창의 위치와 크기에 따른 결합계수의 주파수 축에 따른 변화를 확인하여 평탄도가 우수한 여파기를 구현하였다<sup>[8]</sup>.

### III. 여파기 제작 및 특성 측정

여파기 설계는 가변 대역을 800~900 MHz로 하고, 대역폭은 25 MHz로 하였다. 제작에는 비유전율이 4인 두께 0.8 mm FR4 기판을 사용하였다.

능동 커패시턴스 회로를 포함하지 않은 2단 가변 대역 통과 여파기 회로는 그림 8과 같으며, 본 회로를 제작하여 측정한 결과 그림 9와 같은 주파수 특성을 얻었다. 셀룰러 TX, RX 대역 중심 주파수에서 각각 2.89 dB, 1.7 dB이고, 대역폭은 각각 25 MHz이다. 사용된 버랙터 다이오드는 Siemens사의 BB535로 back-to-back 구조로 사용하였다.

그림 10은 제작된 가변 대역 통과 여파기를 스펙트럼 분석기로 P<sub>1dB</sub> 특성을 측정한 그림이다. 측정 결과, 셀룰러 TX 대역에서 P<sub>1dB</sub>는 22 dBm이며, RX 대역은 26 dBm을 얻었다.

능동 가변 대역 통과 여파기는 가변 대역 통과 여파기에서 발생하는 삽입 손실을 개선하기 위해 능동 커패시턴스 회로를 추가하여 제작하였다. 제작된 2단 고출력 능동 가변 대역 통과 여파기 회로는 그림 11과 같으며, 제작된 여파기는 그림 12와 같다. 이

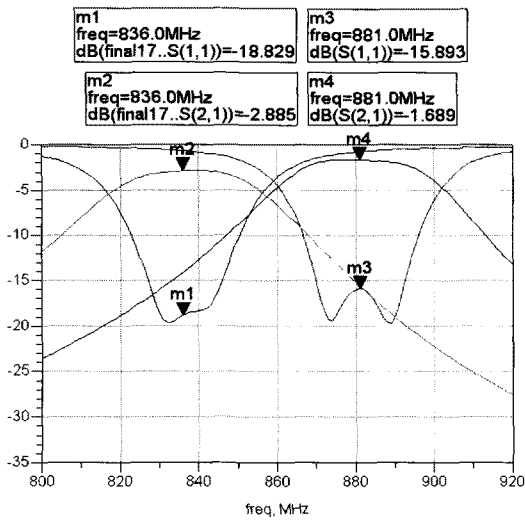


그림 9. 가변 대역 통과 여파기 특성  
Fig. 9. The tunable bandpass filter performance.

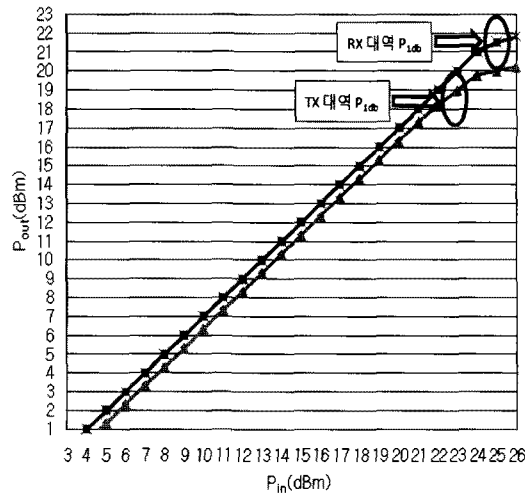


그림 10. 가변 대역 통과 여파기  $P_{1dB}$   
Fig. 10. The  $P_{1dB}$  of tunable bandpass filter.

경우에도 공진부는 back-to-back 구조로 버랙터 다이오드를 사용하여 커패시턴스 값이 조절되게 하였고, dc block에 저항 소자를 써서 고출력 특성을 갖는 회로를 제작하였다. 능동 커패시턴스 회로는 HFET의 드레인단에 외부 소자  $C_d$ 와  $L_d$ 를 연결하고, 게이트단에 외부 직렬 커패시터  $C_g$ 를 연결하여 구성하였다. 제작된 여파기는 셀룰러 TX 대역에서 중심주파수가 836 MHz, RX 대역에서 중심주파수는 881.5 MHz로 제작되었으며, 대역폭은 각각 25 MHz이다.

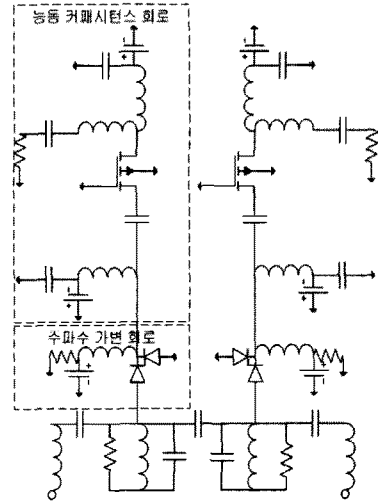


그림 11. 설계된 2단 능동 가변 대역 통과 여파기 회로도  
Fig. 11. The designed active tunable bandpass filter circuit.

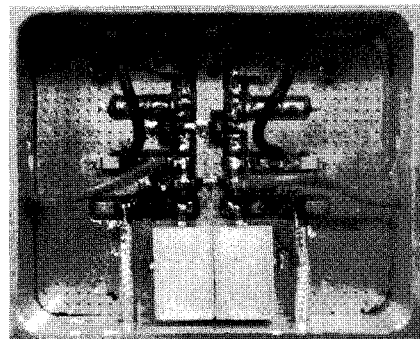


그림 12. 제작된 2단 능동 가변 대역 통과 여파기  
Fig. 12. The fabricated active tunable bandpass filter.

사용된 버랙터 다이오드는 Siemens사의 BB535이며, 전압은 셀룰러 TX 대역에서 5 V, RX 대역에서 9 V이며, 능동 회로에 사용된 트랜지스터는  $P_{1dB}=32$  dBm인 Sirenza사의 HFET SHF-0589이다. 능동 커패시턴스 가변 여파기에서 사용한 바이어스 전압은  $V_{ds}$ 가 1.3 V, 이 때 전류는 140 mA가 흐른다.

그림 13은 제작된 능동 가변 여파기의 삽입 손실 특성을 보여주고 있다. 능동 커패시턴스 회로를 사용하지 않는 가변 대역 통과 여파기와 비교했을 때 셀룰러 TX 대역에서 삽입 손실이 2.4 dB 이상, RX 대역에서 1.30 dB 이상 향상됨을 보여준다.

그리고 능동 커패시턴스 회로를 사용했을 때가

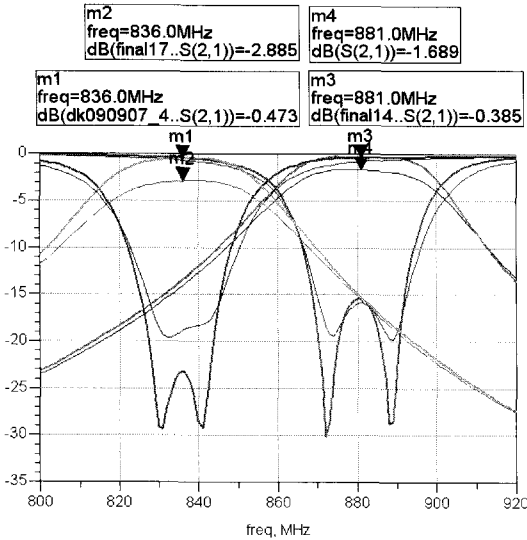


그림 13. 능동 가변 대역 통과 여파기 특성  
Fig. 13. The active tunable bandpass filter performance.

사용하지 않았을 때보다 통과 대역 내 평탄도도 향상됨을 알 수 있으며, 주파수 가변 시에 대역폭도 일정하다.

그림 14는 제작된 능동 가변 대역 통과 여파기를 스펙트럼 분석기로  $P_{1dB}$  특성을 측정한 그림이다. 앞서 설명한 바와 같이 능동 커패시턴스를 이용한 여파기의 고출력 특성을 보이기 위해 버랙터 다이오드는 back-to-back 구조를 사용하였고, dc block은 저항 소자를 사용하여 선형성을 개선하였다. 측정 결과, 셀룰러 TX 대역에서  $P_{1dB}$ 는 19.5 dBm이며, RX 대역은 23 dBm을 얻었다. 그러나 TX 대역의  $P_{1dB}$  특성이 RX 대역의  $P_{1dB}$  특성에 비해 다소 낮은 것을 확인하였다. 그 이유는 RX 대역에 비해 TX 대역의 버랙터 다이오드의 손실이 더 커, TX 대역에서 더 큰 능동 커패시턴스 회로의 부성 저항값이 요구되기 때문이다. 더 큰 부성 저항 값은 일반적으로 능동 커패시턴스 회로의 선형성을 악화시킨다. 전체적으로 버랙터 다이오드의 비선형 특성이 능동 대역 통과 여파기의 전체적인 비선형 특성에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 저잡음 및 소신호용에 적용되었던 능동 커패시턴스 회로를 송신부에 적용할

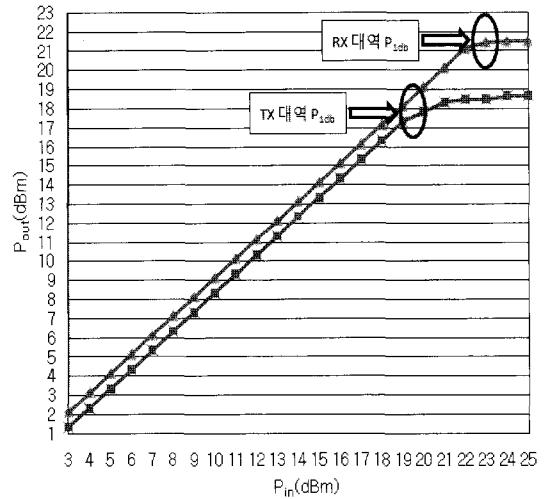


그림 14. 능동 가변 대역 통과 여파기  $P_{1dB}$   
Fig. 14. The  $P_{1dB}$  of active tunable bandpass filter.

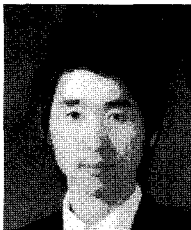
수 있도록 고출력 트랜지스터를 사용하여 설계할 수 있음을 확인하였다. 버랙터 다이오드에 의한 비선형 특성을 바탕으로 능동형의 대역 통과 여파기의 비선형 특성을 검토하였다. 우선 고출력 트랜지스터를 사용하여 능동 커패시턴스 회로의 구성이 가능하여 삽입 손실을 줄였으며, 이 때 버랙터 다이오드의 비선형 특성에 비해 다소 열화되는  $P_{1dB}$  값을 얻었다. 셀룰러 TX 및 RX 대역에서 대역폭이 25 MHz 인 2 단 능동 가변 대역 통과 여파기를 제작하여 측정한 결과, 각 대역에서 삽입 손실이 0.48 dB 미만이며,  $P_{1dB}$ 가 TX 및 RX 대역에서 각각 19.5 dBm과 23 dBm 인 성능을 얻음으로써 고출력 회로에도 적용 가능함을 보였다. 일반적으로 셀룰러 대역 트랜시버 시스템은 30 dBm 이상의  $P_{1dB}$ 를 갖는다. 본 논문에서 사용한 트랜지스터보다  $P_{1dB}$ 가 좋은 트랜지스터를 사용할 경우, 제시된 구조를 사용하여 이 특성을 만족할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Y. -H. Chun, J. -R. Lee, and S. -W. Yun, "Analysis of negative resistance characteristics in active capacitance circuit", *Microwave and Optical Technology Letter*, pp. 240-243, Aug. 2004.
- [2] Il-Soo Kim, Young-Hoon Chun, and Sang-Won Yun, "Analysis of a novel active capacitance circuit

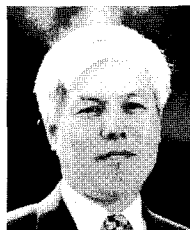
- using BJT and its application to RF bandpass filters", 2005 *IEEE MTT-S IMS Digest*, pp. 2207-2210, Jun. 2005.
- [3] Moon-Seok Chung, Il-Soo Kim, and Sang-Won Yun, "Microwave active hairpin filter based on coupled negative resistance method", *Proceeding of Korea-Japan Microwave Workshop(KJMW-2005)*, p. 75, 2005.
- [4] 이재룡, 윤상원, "저잡음 특성을 갖는 새로운 RF 능동 대역 통과 여파기", 한국전자과학회논문지, 13(8), pp. 748-753, 2002년 9월.
- [5] Mohammed A. El-Tanani, Gabriel M. Rebeiz, "A two-zero tunable filter with improved linearity", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-57, no. 4, pp. 830-839, Apr. 2009.
- [6] Bernard C. Deloach, "A new microwave measurement technique to characterize diodes and an 800-Gc cutoff frequency varactor at zero volts bias", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, pp. 15-20, Jan. 1964.
- [7] 김병욱, 윤두일, 윤상원, "유전체 공진기 필터의 결합창 특성 해석", 한국전자과학회논문지, 13(1), pp. 101-106, 2002년 1월.
- [8] 윤두일, 김병욱, 윤상원, "IMT-2000 대역 가변 대역 통과 여파기의 설계", 2002년 춘계 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 25(1), pp. 387- 390, 2002년 5월.

### 김 도 관



2008년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)  
 2008년 3월~현재: 서강대학교 대학원 전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] RF 여파기 설계, RF 시스템

### 윤 상 원



1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1979년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1984년 5월: 미국 Texas 주립대학교 전기공학과 (공학박사)  
 1984년 9월~현재: 서강대학교 전자공학과 교수  
 [주 관심분야] 초고주파 및 밀리미터파 회로설계, RF 시스템