

요 약

마이크로파 능동필터는 RF 시스템에서 주목받고 있는 SoC(System on Chip) 기술을 위한 필터의 집적화 기술로 매우 활발한 연구가 수행되어지고 있다. chip상에서의 마이크로파 대역에서의 능동필터는 기판의 손실로 인한 공진기의 Q값 저하를 능동소자를 이용하여 보상하여 협대역 필터의 구현을 가능하게 할 뿐만 아니라, 바랙터 다이오드나 PIN 다이오드를 회로에 적용하여 가변 필터의 구현도 가능하게 되어 시스템의 유연성이 높은 SDR (Software Defined Radio) 등에도 적용될 수 있는 분야로 각광을 받을 것으로 판단된다. 본 고에서는 마이크로파 능동 필터에 대한 분류와 회로의 구조 연구 동향에 대해 살펴본다.

I. 서 론

RF와 Microwave 시스템에서의 최근 20년 사이의 가장 큰 변화는 MMIC와 RFIC를 통한 집적화, 소형화, 경량화를 들 수 있다. MMIC의 궁극적 목적은 RF의 대역에서 사용되는 증폭기, 발진기, 주파수 혼합기 등을 하나의 칩 상에서 구현하는 다기능 회로 (Multi-functional IC)의 구현일 것이다. 최근에는 필터를 제외한 대부분의 RF 부품이 하나의 chip상에 구현되어 시스템의 소형화와 경량화를 가능케 하였다. 하지만 마이크로파 필터의 경우에는 기판 손실과 IC상의 공진기의 구조적인 한계로 인한 공진기의 Q값의 저하로 offchip상에서 SAW, FBAR, 유전

체 필터, LTCC 등으로 구현이 되고 있다. 하지만 이러한 수동 소자를 가지고 협대역 필터를 설계하고자 하는 경우 높은 Q 특성을 갖는 공진기가 요구되나 세라믹 공진기의 경우 Q가 400~600 정도로 한정되어 있어 이동통신 대역에 적용하면 약 1~2 dB 정도의 삽입손실을 갖게 된다.

마이크로파 능동 필터는 이러한 주변 손실을 능동소자를 이용하여 보상하고, 경우에 따라 증폭기의 기능을 흡수하여 시스템을 단순화 하고 원칩화하고자 하는 목적으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 무선 시스템에서의 원칩화는 시스템의 초소형화와 초저가화를 달성하기 위한 유일한 방법으로 칩상에서의 필터 구현이 가능한 능동 필터에 대한 연구가 향후에도 매우 활발히 진행될 것으로 예상이 된다.

본 고에서 동향을 파악하고자 하는 능동 필터의 장점 및 단점을 요약하면 다음과 같다.

1-1 마이크로파 능동 필터의 장점

- 증폭기, 발진기, 주파수 혼합기 등과 함께 하나의 칩상에 구현되어 S²C를 가능하게 한다.
- 수동소자의 Q특성을 무한대 까지 개선하여 초협대역 필터의 제작 가능하다.
- 저가화 시스템의 경우 필터와 증폭기를 하나의 부품으로 구현함으로써, 소형화 저가화가 가능하다.

1-2 마이크로파 능동 필터의 단점

- 부성저항이나 능동소자의 잡음원에 의한 잡음 지수가 증가한다.
- 능동소자의 비선형성으로 인한 상호변조 특성

이 나타난다.

- 부성저항이나 증폭기를 이용하므로 회로의 안정도가 문제가 될 수 있다.

능동 필터에 대한 지금까지의 주된 연구 주제는 초기에 다양한 능동필터에 대한 구조가 제시되었고, 최근에는 회로 구조와 잡음, 비선형 특성 연구가 주로 수행되어져 왔다. 구조 연구로는 능동 공진기를 구성하는 능동 인덕터와 캐패시터의 구조 연구, 부성저항과 마이크로스트립과의 결합구조 연구, 디지털 필터의 구조를 마이크로파 대역에 적용하기 위한 연구 등이 연구가 되어져 왔다. 잡음 및 비선형 특성 연구로는 능동필터의 잡음특성과 상호변조 특성 연구 등이 진행되고 있다.

본 고에서는 능동필터의 구조 및 연구의 동향을 살펴보고 향후의 연구방향에 대해 예측해 본다.

II. 능동 필터의 분류

마이크로파 능동 필터는 구조의 유사성과 설계방법을 고려하면 아래와 같이 네 가지 정도로 구분할 수 있다.

- 1) 저주파기술을 RF대역에 적용한 구조
- 2) 능동 캐패시턴스와 능동 인덕턴스를 이용하는 능동 공진기형 필터
- 3) 공진기간의 결합을 능동 소자를 이용하는 능동 결합 또는 능동 인버터형 필터
- 4) 디지털회로 설계를 마이크로파 대역에 적용한 트랜스버설/회귀 필터

아래에서는 이와 같은 구분을 중심으로 지금까지의 연구 결과를 살펴보고자 한다.

2-1 저주파기술을 적용한 능동필터

이 구조는 저주파대역에서의 능동 필터의 이론 및 구조를 마이크로파 대역에 적용한 구조이다. 저주파에서는 OP-AMP와 같이 이상적인 부품을 이용

하여 잘 정립된 필터 이론을 이용하여 능동필터를 구현할 수 있으므로 이를 직접 마이크로파 대역에 적용하려는 시도이다. 하지만, 마이크로파 대역에서는 기생적으로 존재하는 작은 인덕턴스나 캐패시턴스, 이상적인 증폭기의 부재로 인해 저주파 능동필터의 설계 이론을 그대로 적용하기란 매우 어렵다.

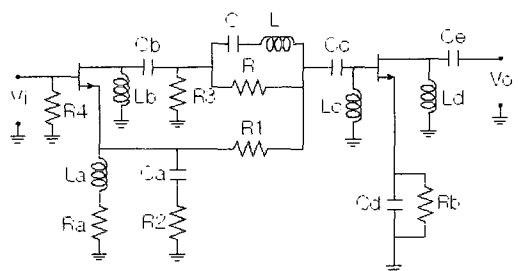
저주파 능동 필터를 최초로 마이크로파 대역의 능동 필터에 적용한 예는 1979년에 Sussman-Fort에 의해 마이크로파 all-pass 회로이다^[1]. 이후 몇몇 저자에 의해 저주파 대역에서 검증된 설계 기술을 이용하여 마이크로파 대역에 적용하는 논문들이 발표되었다^{[2]~[5]}. [그림 1]은 Sussman-Fort가 제안한 2차 필터의 기본 구조를 보여주고 있다. 이러한 필터 section을 cascade형태로 연결하여 필터의 차수를 늘릴 수 있다. 설계는 트랜지스터를 이상적인 전압 제어 전류원으로 가정하고 전달함수를 구하게 되고 최종적으로는 컴퓨터를 통해 최적화를 수행하여 값을 변화시킨다.

[그림 2]는 Sinsky와 Westgate가 설계한 마이크로파 대역에서 MMIC형태로 제작한 마이크로파 능동 RC Biquad회로이다^[6].

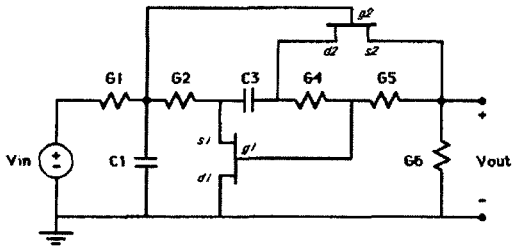
[그림 2]의 전달함수는 아래와 같다.

$$H(s) = \frac{(\omega_p s)}{s^2 + (\omega_p/q)s + \omega_p^2} \quad (1)$$

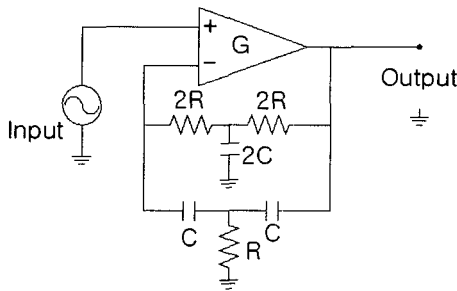
여기서



[그림 1] 마이크로파 대역 통과 필터 (바이어스 회로 포함) [1989 Sussman-Fort]



[그림 2] Sinsky와 Westgate가 마이크로파 대역의 Biquad 회로로 제안한 회로



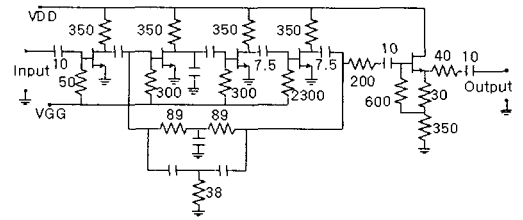
[그림 3] 저주파 부귀환 저주파 notch 회로의 구현

$$\omega_p^2 = (G_2 G_4 G_6) / (C_1 C_3 C_5),$$

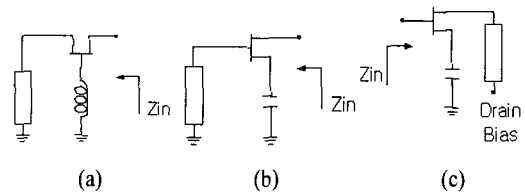
$$q = \omega_p C_1 / G_1 = \omega_p / 3dBBW$$

위의 마이크로대역용 Biquad회로는 2 GHz 대역에서 $q=25$ 인 GaAs FET MMIC로 개발(MB3000)이 되어 cascade형태로 연속해서 사용할 수 있다.

[그림 3]은 저주파에서 사용되는 OP-AMP를 통한 부귀환 notch회로의 구조를 보여준다^[7]. [그림 3]에서 R과 C에 의해 결정되어지는 notch 주파수에서는 귀환 회로가 개방되는 것으로 동작하여 전체 회로는 개발 루프로 동작하게 되고, notch 주파수를 벗어나게 되면 부귀환루프로 인해 전체 전달 함수의 이득은 작아지게 된다. [그림 4]는 [그림 3]의 저주파 회로를 마이크로파 대역인 2 GHz에서 GaAs MMIC 기술을 적용하여 구현한 예를 보여주고 있다. 마이크로파 대역에서는 저주파와는 달리 이상적



[그림 4] [그림3]의 구조를 MMIC기술을 이용하여 2 GHz 대역에 적용한 구조

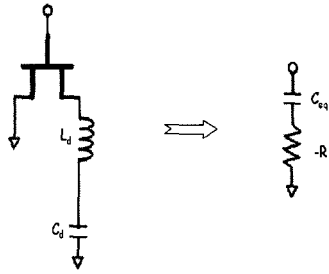


[그림 5] FET를 이용한 부성저항 구조. (a)인덕터 귀환을 이용한 공통 베이스 구조, (b)와 (c) 캐패시터 귀환을 이용한 공통 소오스 구조

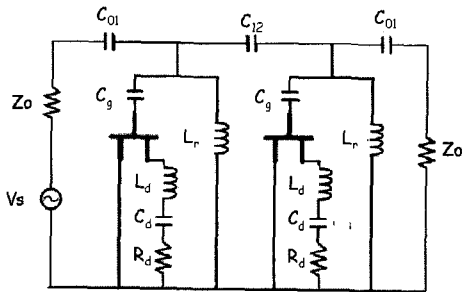
인 증폭기가 존재하지 않으므로 FET를 이용하여 3단으로 구성하였다. 제작한 회로의 Q값은 1000이고 MMIC의 크기는 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 이다.

2-2 능동 공진기형 필터

능동 공진기형 필터는 능동 캐패시터를 이용하는 공진기, 능동 인덕터를 이용하는 공진기, 수동 LC나 마이크로스트립 공진기의 손실보상을 위한 부성저항 결합 공진기로 구분할 수 있다. [그림 5]는 능동소자에 정귀환 회로를 가하여 부성저항을 얻을 수 있는 방법을 보여주고 있다^[8]. 부성저항을 이용하여 공진기의 손실을 보상할 때에는 회로의 발진을 억제하기 위해서는 부성저항이 대역통과 대역근처에서만 나타나고 발진조건을 만족하지 않도록 매우 세심한 주의가 필요하다. [그림 6]과 [그림 7]은 능동 캐패시터를 구현하여 수동 인덕터와 결합하여 공진기를 구성한 2차 대역통과 필터의 구조를 보여주고 있다^[9]. 그림에서 능동소자의 드레인 단에 연



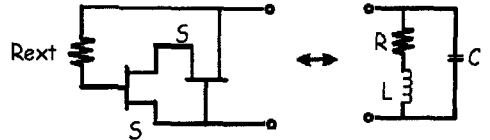
[그림 6] 능동 캐패시터의 구조



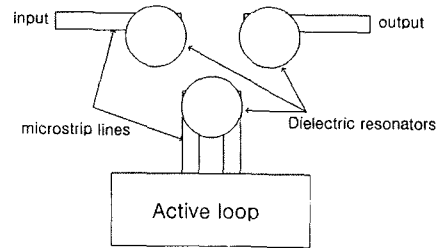
[그림 7] 능동 캐패시터를 이용한 2차 대역 통과 필터

결된 직렬 LRC는 원하는 대역 내에서 부성저항을 갖고 발진 가능성이 없도록 값을 선정해야 한다. 제작한 회로는 중심주파수 1.9 GHz, 대역폭 52.5 MHz, 삽입손실 0.3 dB, 잡음지수 2.7 dB이다.

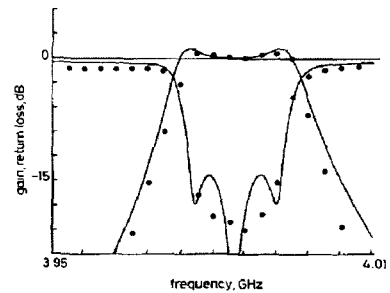
능동 인덕터를 이용한 능동 필터는 능동소자와 저항만을 가지고 높은 Q특성을 갖는 인덕터를 설계하여 이를 필터에 이용하는 구조이다. 수동 인덕터는 칩상에서 면적을 넓게 차지하고 Q값이 낮아 MMIC와 RFIC에서 해결해야 할 문제이다. Adams와 Ho는 1969년에 BJT를 이용하여 UHF 대역에서 높은 Q특성을 갖는 인덕터의 구조^[10]를 제안한 이후 여러 편의 논문이 발표가 되었고 1983년에 Seani에 의해 부동 인덕터(floating inductor)가 제안되었다^[11]. [그림 8]은 광대역에서 사용 가능한 능동 인덕터의 구조이다. 그림에서 두개의 트랜지스터가 동일한 경우 등가회로 값은 다음과 같이 된다^[12].



[그림 8] 능동 인덕터의 구현



[그림 9] 3차 유전체공진기를 이용한 대역통과 필터



[그림 10] 유전체 공진기의 손실을 보상한 대역통과 필터의 특성

$$R = 1/g_m \quad (2)$$

$$C = C_{gs} \left(\frac{\omega C_{gs}}{g_m} \right)^2 \quad (3)$$

$$L = \frac{C_{gs} R_{ext}}{g_m} \quad (4)$$

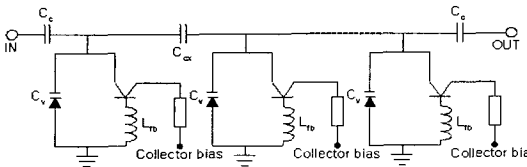
위 식에서 보면 R_{ext} 를 변화시킴으로써 능동 인덕터의 값을 변화시킬 수 있다. 200 ~ 800 Ω 을 변화시킬 때 인덕터의 변화는 0.1 ~ 8 GHz 범위에서 2에서 8 nH 정도가 변화되었다.

[그림 9]와 [그림 10]는 유전체 공진기의 손실을

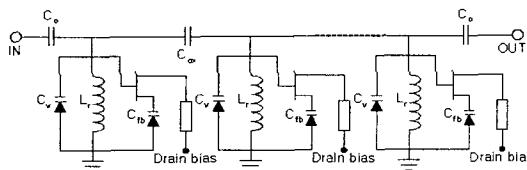
능동회로로 보상하여 협대역 필터를 제작한 예를 보여주고 있다. 유전체 손실을 보상하여 중심주파수 3.98 GHz에서 3 dB 대역폭 24 MHz로 0.6 % 초협대역 대역폭을 구현한 예를 보여주고 있다^[13].

능동 공진기를 이용한 필터 중에서는 가변 대역 통과 필터에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이는 향후 SDR(Software Defined Radio)이나 지능형 RF 부품 구현으로 인해 요구될 수 있는 사양이다. 수와 대역이 가변이 가능하고 다른 부품들과 함께 집적화가 요구되므로 이러한 필터들은 향후에도 지속적인 요구가 있을 것으로 판단된다. 능동 공진기를 이용하여 가변 능동 필터들에 대한 최근의 연구 동향을 구조 중심으로 살펴보고자 한다.

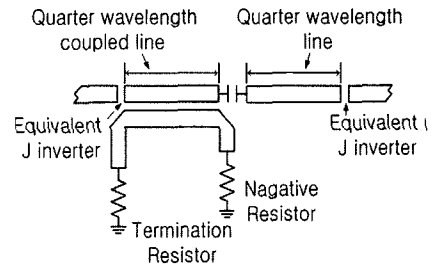
[그림 11]과 [그림 12]는 부성저항을 이용하여 가변 대역 통과 필터를 구성하는 예를 보여준다. [그림 11]에서는 인덕터를 부성저항을 갖도록 설계한 구조이고, [그림 12]는 바랙터 다이오드를 이용하여 부성저항을 갖는 가변 바랙터를 설계하여 가변 필터에 적용한 구조이다^[14].



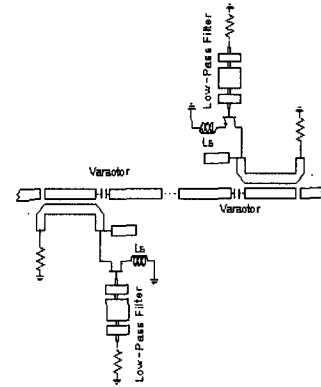
[그림 11] 인덕터 귀환회로로 구성된 부성저항과 바랙터 다이오드로 구성된 가변 대역 통과 필터



[그림 12] 캐패시터 귀환회로로 구성된 부성저항과 바랙터 다이오드로 구성된 가변 대역 통과 필터



[그림 13] 반파장 공진기에 부성저항을 결합하는 구조

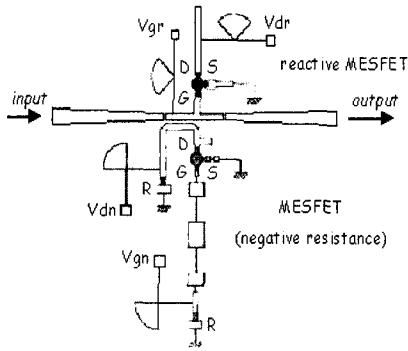


[그림 14] [그림 13] 공진기를 이용한 대역 통과 필터

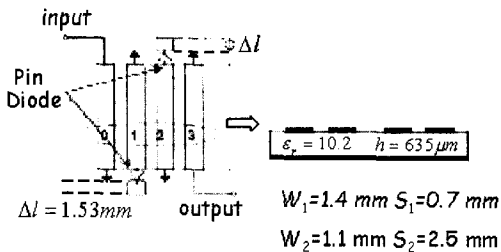
[그림 13]은 반파장 공진기에 부성저항을 결합하여 공진기의 Q값을 개선한 구조를 보여주고 있다. 튜닝영역은 10 GHz에서 500 MHz 가변 주파수 영역을 갖는다. [그림 14]는 2-pole 대역 통과 필터로 10 GHz 중심주파수에서 대역폭 20 MHz (0.2 %)을 갖고 바랙터 튜닝시 430 MHz의 가변 주파수 영역을 갖는다^[15].

[그림 15]은 MESFET를 이용하여 하나는 3단자 바랙터 모드(Reactive MESFET)로 이용하고 다른 하나는 부성저항을 갖도록 설계한 다음 마이크로스트립에 결합하여 능동 대역 통과 필터를 구현한 예이다^[16]. 특성은 X 대역에서 150 MHz 정도를 갖는다.

가변 필터를 PIN 다이오드를 이용하는 경우 스위칭 능동 필터로 동작하게 된다. 스위칭 능동 필터는



[그림 15] 가변 능동 대역통과 필터



[그림 16] PIN switch에 의한 가변 대역통과 필터 구조

DCS1800과 GSM1900 또는 GSM900과 DCS1800 등과 같은 듀얼밴드 시스템에 적용될 수 있는 구조이다. 스위칭 필터는 중심주파수 변화에 따라 근주파수 스위칭필터(예 : DCS1800과 GSM1900)와 원주파수 스위칭 필터(예: GSM900과 DCS1800)로 구분할 수 있다. [그림 16]는 근주파수 스위칭 필터의 구조를 보여주고 있다^[17]. 그림에서 PIN 다이오드의 동작에 따라 다음과 같이 대역이 가변된다.

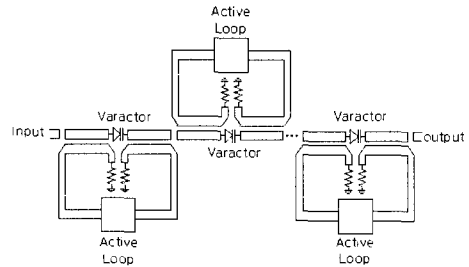
PIN diode switch ON:

$$f_{01} = 1.915 \text{ GHz} \quad 3\text{dB 대역폭} = 72 \text{ MHz}$$

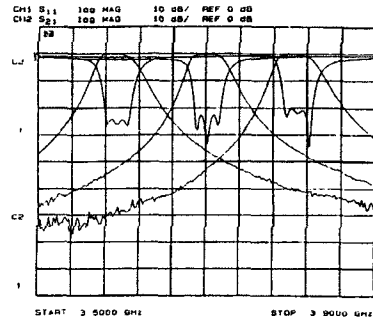
PIN diode switch OFF:

$$f_{02} = 2.075 \text{ GHz} \quad 3\text{dB 대역폭} = 97 \text{ MHz}$$

[그림 17]은 바랙터로 가변되는 반파장 공진기를



[그림 17] 마이크로 스트립 반파장 공진기에 부성저항을 결합한 능동 공진기를 이용한 대역통과 필터



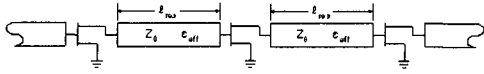
[그림 18] 가변 대역통과 필터 특성

루프형태의 부성저항을 결합하는 구조이다^[18]. 측정 결과는 [그림 18]과 같이 대역폭은 220 MHz이고 가변 주파수 영역은 3.6 GHz에서 3.8 GHz이다.

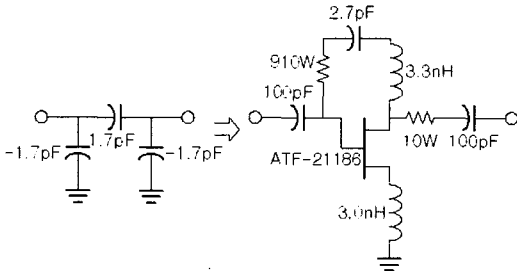
2.3 공진기간의 능동 결합 (능동 인버터형 필터)

필터에서 인버터는 공진기 사이에서 임피던스와 어드미턴스의 크기를 높이거나 낮추는데 이용된다. 마이크로파 능동필터에서도 인버터를 능동소자로 구현함으로써 공진기에서의 손실을 보상하여 필터의 전달이득을 얻을 수 있다. 예를 들면 End-coupled filter의 공진기 사이에 GaAs FET를 두는 구조이다[그림 19]^[19].

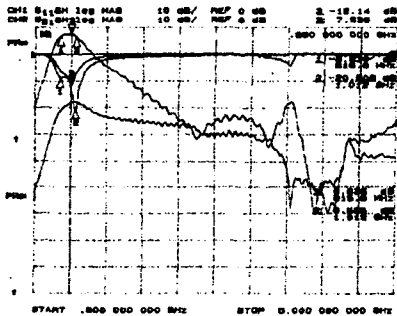
공진기간의 결합을 위한 능동 인버터의 연구는 국내의 서강대에서 활발한 연구를 수행하고 있다.



[그림 19] FET를 이용한 공진기간의 결합

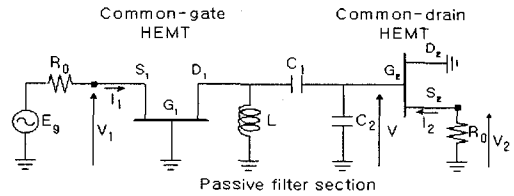


[그림 20] 수동 인버터를 능동 인버터로 변환한 구조

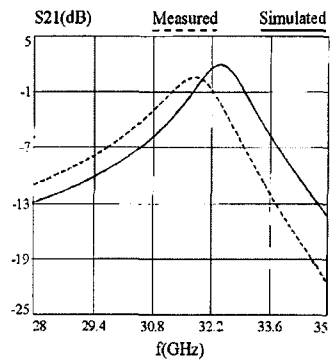


[그림 21] 능동 인버터를 이용하여 2단 대역 통과 필터를 구성한 회로의 결과

공진기간의 결합에 대한 인버터를 FET를 이용하여 구현하기 위해서는 FET에 직렬과 병렬 귀환회로를 구성하고, 인버팅 조건을 만족하도록 귀환회로를 설계하게 된다. [그림 20]은 수동소자로 구성된 J인버터를 능동 인버터로 대체되었을때의 값을 보여주는 그림이다^[20]. [그림 21]은 능동 인버터를 이용하여 900 MHz대역에서 대역폭 180 MHz를 2단으로 설계한 결과를 보여주고 있다. 측정 결과 잡음지수는 2.8 dB, 이득은 7.5 dB를 보이고 있다. 3단으로 필터를 구성하는 경우 이득은 24 dB로 능동 공진기



[그림 22] 능동정합 방법에 의한 능동 필터



[그림 23] 밀리미터대역 능동정합을 이용한 필터의 특성

형에 비해 매우 높은 이득을 보인다.

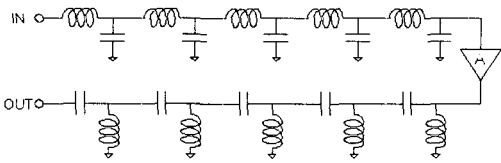
[그림 22]와 [그림 23]은 밀리미터대역에서 수동 필터의 손실을 능동정합을 이용하여 구현한 예를 보이고 있다^[21]. 발표된 결과는 중심주파수 31.825 GHz, 1.5 GHz의 3 dB대역폭을 갖고 잡음지수는 1 dB 압축점(compression point)인 +3 dBm에서 4 dB이다.

2-4 트랜스버설/회귀형 필터

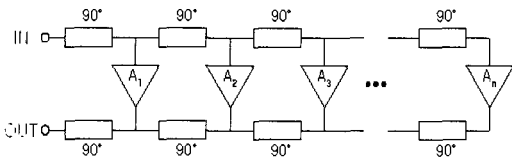
트랜스버설과 회귀형 필터의 기본식은 아래와 같다.

$$y(t) = \sum_{k=0}^N a_k x(t - kr) - \sum_{k=0}^N b_k y(t - pr) \quad (5)$$

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} = \frac{\sum_{k=0}^N a_k e^{-2j\pi fkr}}{1 + \sum_{k=0}^N b_k e^{-2j\pi fpr}} \quad (6)$$



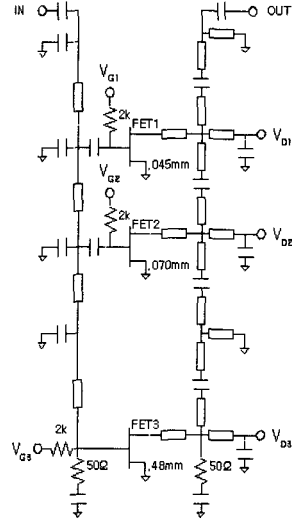
[그림 24] 저역통과 필터와 고역 통과 필터로 구성된 능동 대역통과 필터



[그림 25] 트랜스버설 필터의 구조

[그림 24]는 저역통과 필터와 고역통과 필터를 이용하여 능동 대역통과필터를 구성한 그림이다. 저역통과 필터의 차단 주파수는 대역통과필터의 높은 쪽 차단주파수와 같게 하고 고역통과 필터의 차단 주파수는 낮은 쪽 차단주파수와 같게 한다. 트랜스버설형 마이크로파 필터는 디지털 필터 이론을 마이크로대역에 적용한 것이다. Jutzi는 1971년에 MESFET을 이용하여 마이크로대역에 적용을 한 이후에 최근까지 이 논문을 기초로 많은 연구가 수행되고 있다^[22]. [그림 25]는 기본적인 트랜스버설형 대역통과 필터의 블록도를 보여주고 있다. 트랜스버설형 필터는 분포형 증폭기(distributed amplifier)와 비슷한 형태를 갖는데, 두 회로의 차이점은 증폭기는 능동소자를 통과하는 신호들끼리 위상조건을 동위상으로 맞추어 넓은 주파수 대역과 우수한 이득 평탄도를 얻는 방법으로 설계하는데 비하여, 트랜스버설 필터는 능동소자를 통과하는 신호의 진폭과 위상을 특정 주파수 대역에서만 통과대역을 갖도록 설계를 하게 된다.

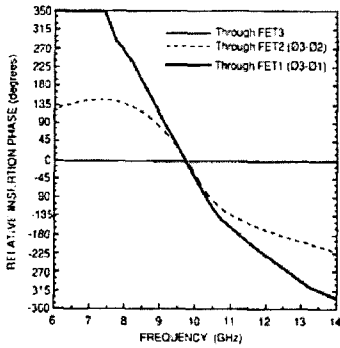
설계방법은 대역통과 필터의 차단주파수에 맞게 저역통과 필터와 고역통과 필터의 차단주파수를 설



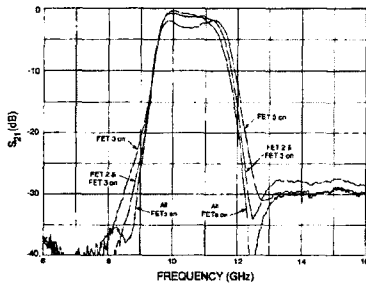
[그림 26] 90도 위상 변위기를 저역통과형과 고역 통과형으로 구현한 트랜스버설형 대역통과 필터

정한다. 저역과 고역통과 필터에서 요구되는 shunt 커패시턴스와 인덕턴스의 값은 수동소자와 FET의 능동소자를 이용하여 구현한다. 이때 FET를 통과하는 신호의 위상은 대역통과 필터의 중심주파수에서는 동위상이 되게 하고 대역밖의 주파수에서는 위상이 서로 어긋나게 되어 필터의 skirt 특성을 개선한다. [그림 26]은 Shindler가 1989년에 발표한 논문의 구조를 보여주고 있다^[23]. [그림 27]은 FET를 통과하는 위상의 값을 보여주고 있다. 위상은 중심주파수인 10 GHz에서는 동위상이 되지만 대역폭 밖에서는 위상이 어긋나게 되어 전달특성이 나빠지게 된다. 위상과 저역통과와 고역통과에서 요구되는 값을 맞추기 위해 FET의 gate를 scaling하여 사용한다. [그림 28]은 측정 결과를 보여주고 있다. FET를 동작시킴에 따라 skirt 특성이 개선됨을 알 수 있다.

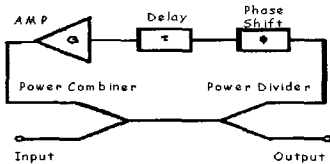
[그림 29]과 [그림 30]은 회귀형 (Recursive) 필터의 블록도와 마이크로파 영역에서의 구현의 예를 보이고 있다^[24].



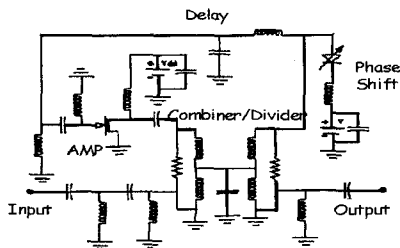
[그림 27] [그림 26]의 FET를 지나는 신호의 상대적인 위상



[그림 28] [그림 26]의 구조의 대역통과 필터 특성



[그림 29] 회귀필터의 구조



[그림 30] 1차 회귀필터의 MMIC 구현

III. 능동 필터의 잡음과 비선형성

마이크로파 능동필터에서는 능동 소자로 인한 잡음과 비선형 특성이 중요하다. 잡음성능은 잡음파(noise wave)를 이용하여 해석하는 방법이 제안이 되었다^[25]. 또한 부성저항을 공진기에 결합시키는 구조에 대한 잡음지수의 증가에 대해서도 비교한 연구결과가 발표가 되었다. Zaitsev는 부성저항회로의 잡음성질을 잡음평가지수 M 으로 다음과 같이 표현하였다^[26].

$$M = -\frac{C}{kT(1-|S|^2)} \quad (7)$$

여기서, C 는 부성저항회로에서 만들어지는 잡음 전력밀도, S 는 부성저항회로의 복소반사계수이다.

능동 공진기의 잡음 전류 밀도를 M 을 이용하여 표현하면

$$T^2 = -\frac{4kT(1+M)}{R_{loss}} \quad (8)$$

위의 식에서 $M \gg 1$ 인 경우에는 공진기의 잡음은 부성저항회로의 잡음특성에 의해 결정이 되고, $M \ll 1$ 인 경우에는 수동 공진기의 잡음지수에 의해 결정이 된다. 따라서 능동공진기의 잡음 특성을 최소화 하는 것은 R_{loss} 와 이를 보상하는 부성 회로의 구조에 의한 M 을 최소화 하는 것으로 이해할 수 있다. Zaitsev는 여러 가지 부성저항회로에 대해 수동공진기만으로 구성된 필터에 비교하였을 때의 잡음지수 저하를 모의 시험을 하였던 데 결과는 다음과 같다.

<표 1>의 결과를 보면 Itoh 구조나, Cruchon 구조의 경우 잡음 측면에서는 최적화 되고 있지 않음을 알 수 있다. 이것은 Itoh 구조나 Cruchon의 경우 Ezzedine과 Zaitsev구조에 비해 추가적인 잡음원(저항)을 가지고 있는데, 이것이 잡음지수의 악화에 영향이 있을 것으로 생각된다.

마이크로파 능동필터는 수동 필터와는 달리 능동

소자로 인해 비선형 효과가 나타나게 된다. 특히 멀티톤 시스템의 경우에는 상호 변조특성과 IP_3 특성 등이 시스템 성능과 밀접한 관련이 있으므로 이에 대한 연구가 최근에 많이 수행되어졌다.

Hunter (그림 31)의 능동 대역통과와 대역 저지 필터에 대한 IM을 다음과 같이 제시하였다^[29].

$$IP_3 \propto 16 \log_{10} n + 20 \log_{10} \delta BW + 20 \log_{10} \delta I_c + 12.3 \log_{10} \delta Q_u \quad (9)$$

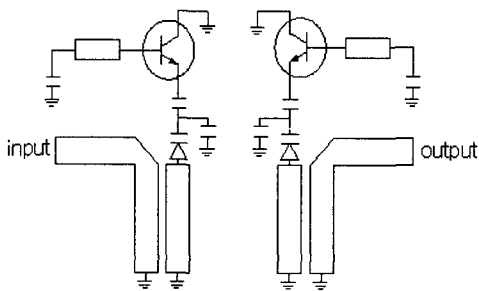
여기서, n 은 필터의 차수, δBW 는 대역폭의 변화, δI_c 는 바이어스 전류 변화, δQ_u 는 무부하 공진기의 Q값 변화이다.

따라서, 능동필터에서 비선형 특성은 Hunter에 의하면 대역폭이 반으로 줄면 IP_3 는 6 dB가 저하되

<표 1> 몇 가지 능동 필터의 구조에 대한 잡음지수 평가^[27]

능동 필터의 구조	Minimum NF	NF degradation
이상적인 MAF	3.9 dB	-
Itoh [그림 13]	5.1 dB	1.2 dB
Cruchon [그림 17]	8.6 dB	4.7 dB
Ezzedine ^[28]	4.5 dB	0.6 dB
Zaitsev ^[26]	4.1 dB	0.2 dB

MAF : microwave active filter



[그림 31] 가변 능동 대역 통과 필터

는 것을 알 수 있다.

능동필터에서 비선형성을 개선하기 위해서는 능동소자에 인가되는 전력의 크기가 균일하지 않으므로 이를 개선할 필요가 있다. 일반적으로 Chebyshev 대역통과 필터는 대역폭의 모서리 주파수에서 두 번째 공진기에 가장 큰 전압이 인가되는 것으로 알려져 있다. Ernst는 이점을 착안하여 공진기에 균일한 전압이 인가될 수 있는 prototype LPF를 유도하여 필터 내에서 전압이 피크가 생기지 않도록 하여 비선형 특성을 개선할 수 있는 필터를 발표하였다^{[30],[31]}.

IV. 결 론

본 고에서는 마이크로파 능동 필터에 대한 회로의 구조와 잡음과 비선형 특성에 관한 연구 동향을 살펴보았다. 초기의 능동 필터의 연구가 주로 저주파 필터 기법을 이용하거나, 부성저항을 공진기에 결합하는 다양한 방법들에 대한 연구에서 최근 연구는 시스템에서 요구되는 잡음특성이나 혼변조 등의 비선형 특성들이 연구가 되어지고 있다. 향후 무선단말기의 연구 방향이 SoC (System on Chip)와 SDR로 볼 때 마이크로파 필터는 이러한 연구 방향과 잘 부합하여 지속적으로 연구가 수행되어질 것으로 예상된다. 또한 하이브리드 방식에 있어서도 초협대역 필터의 구현 시에도 Q값을 보상하는 기법을 이용하여 적용하는 방법이 주목을 받을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] S. E. Sussman-Fort, "Computer-simulated design of an active microwave all-pass network", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 27, pp. 1023-1025, Dec. 1979.

-
- [2] R. R. Bonetti, A. E. Williams, "An octave-band MMIC active filter", in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 823-826, May 1990.
- [3] R. R. Bonetti, A. E. Williams, T. Duong, R. Gupta and R. Mott, "An MMIC active filter with 60-dB rejection", in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1195-1198, June 1992.
- [4] S. E. Sussman-Fort, "A realization of a GaAs microwave active filter", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, pp. 1524-1526, Oct. 1990.
- [5] S. E. Sussman-Fort, "A realization of a GaAs FET microwave active filter", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, no. 10, pp. 1524-1526, Oct. 1990.
- [6] J. H. Sinsky, C. R. Westgate, "A new approach to designing active MMIC tuning elements using second-generation current conveyors", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.* vol. 6, pp. 326-328, 1996.
- [7] F. J. Rosenbaum, R. O. Gregory, W. D. Richard, W. Ou, F. G. Kuhns and T. M. Trimble, "An MMIC twin-tee active bandpass filter", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 1, pp. 361-364, June 1993.
- [8] U. Karacaoglu, I. D. Robertson, "MMIC active bandpass filter using negative resistance elements", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 1, pp. 135-138, May 1995.
- [9] J.-R. Lee, Y.-H. Chun and S.-W. Yun, "A novel bandpass filter using active capacitance", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 3, pp. 1747-1750, 2003.
- [10] D. K. Adams, R. Y. C. Ho, "Active filters for UHF and microwave frequencies", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 17, no. 9, pp. 662-670, Sep. 1969.
- [11] R. Senani, "Floating immittance realization: Nullor approach", *Electron Lett.*, vol. 24, pp. 403-405, Aug. 1988.
- [12] S. Hara, T. Tokumitsu, T. Tanaka and M. Aikawa, "Broad-band monolithic microwave active inductor and application to a wideband amplifier", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 1, pp. 107-110, May 1998.
- [13] B. Madrangeas, B. Jarry, P. Guillon, J. Larroque, B. Theron and D. Parise, "Three-pole dielectric resonator microwave bandpass active filter", *IEE Proceedings H, Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 139, no. 2, pp. 205-207, April 1992.
- [14] U. Karacaoglu, I. D. Robertson, "MMIC active bandpass filters using varactor-tuned negative resistance elements", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 12, pp. 2926-2932, Dec. 1995.
- [15] C.-Y. Chang, T. Itoh, "A varactor-tuned, active microwave band-pass filter", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 1, pp. 499-502, May 1990.
- [16] Y. Yamamoto, K. Kawasaki and T. Itoh, "A MESFET-controlled X-band active bandpass filter", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 1, no. 5, pp. 110-111, May 1991.
- [17] F. Mahe, G. Tanne, E. Rius, C. Person, S. Toutain, F. Biron, L. Billonnet, B. Jarry and P.

-
- Guillon, "Electronically switchable dual-band microstrip interdigital bandpass filter for multi-standard communication applications", *Proc. 30th European Microwave Conf. Paris*, Oct. 2-6, 2000.
- [18] H. Trabelsi, C. Cruchon, "A varactor-tuned active microwave bandpass filter", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 2, no. 6, pp. 231-232, June 1992.
- [19] M. R. Moazzam, A. H. Aghvami, "Analysis and design of a novel microwave active filter", *IEEE AP-S Society, International Symposium Antennas and Propagation Digest.*, vol. 1, pp. 230-233, 24-28 June 1991.
- [20] Young-Hoon Chun, Sang-Won Yun and Jin-Koo Rhee, "Active impedance inverter: analysis and its application to the bandpass filter design", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 3, 2-7, Page(s): 1911-1914, June 2002.
- [21] W. Mouzannar, H. Ezzedine, H. L. Billonnet, B. Jarry and P. Guillon, "Millimeter-wave band-pass filter using active matching principles", *MIA-ME '99. Proceedings of the IEEE-Russia Conference High Power Microwave Electronics: Measurements, Identification, Applications*, 1999. 21-23, Page(s): 11-14, Sept. 1999.
- [22] W. Jutzi, "Microwave bandwidth active transversal filter concept with MESFETs", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 19, no. 9, pp. 760-767, Sep. 1971.
- [23] M. J. Schindler, Y. Tajima, "A novel MMIC active filter with lumped and transversal elements", *IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium Digest*, 12-13, pp. 57-60, June 1989.
- [24] C. H. Lee, S. Han and J. Laskar, "GaAs MESFET dual-gate mixer with active filter design for Ku-band applications", *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, pp. 203-206, 1999.
- [25] S. Wedge, D. Rutledge, "Wave techniques for noise modeling and measurement", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, pp. 2004-2012, 1992.
- [26] A. Zaitsev, B. Kapilevich, L. Billonnet, B. Jarry and P. Guillon, "Negative resistance optimized in noise for losses compensation in microstrip resonators", *2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 3, 20-25, pp. 1577-1580, May 2001.
- [27] A. Zaitsev, B. Kapilevich, "Comparison of noise properties of various microwave active filters", *Microwave Electronics: Measurements, Identification, Application Conference*, 2001. MEMIA 2001, 18-20, pp. 92-98, Sept. 2001.
- [28] H. Ezzedine, L. Billonnet, B. Jarry and P. Guillon, "Optimization of noise performance for three first-order microwave active recursive filters topologies", *High Power Microwave Electronics: Measurements, Identification, Applications*, 1999. *MIA-ME '99. Proceedings of the IEEE-Russia Conference*, 21-23, pp. 113-120, Sept. 1999.
- [29] I. C. Hunter, S. R. Chandler, "Intermodulation distortion in active microwave filters", *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 145, no. 1, pp. 7-12, Feb. 1998.
- [30] C. Wang, K. A. Zaki, "Analysis of power handling capacity of band pass filters", *2001*

IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, vol. 3, 20-25, pp. 1611-1614, 2001.

- [31] C. Ernst, V. Postoyalko, R. Parry and I. C. Hunter, "Filter topology with minimum peak stored energy", *2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 3, 20-25, pp. 1631-1634, 2001.

≡ 필자소개 ≡

이 문 규



1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)

1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)

1999년 2월~2002년 2월 : 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원

2002년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 조교수

[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 능동(MMIC, Hybrid) 및 수동 부품회로 설계, (국부)발진기의 비선형 최적 설계