

저역 및 고역 통과필터 종속연결형 950~2150MHz 가변대역통과필터의 설계

正會員 신 재 준*, 구 경 현*

Design of 950~2150MHz Tunable Bandpass Filter by Cascading Low and High Pass Filters

Jae Jun Shin*, Kyung Heon Koo* *Regular Members*

※본 연구는 정보통신부의 핵심기술개발사업 연구 결과의 일부임.

요 약

본 논문에서는 사용자 정의 바랙터 다이오드 모델을 이용하여 광대역 가변대역통과필터의 체계적인 설계방법을 제시하고자 하였다. 가변대역통과필터는 저역통과필터와 고역통과필터가 종속으로 연결된 구조를 이용하여 설계하였다. 설계된 가변대역통과필터는 950~2150MHz의 주파수 범위에서 삽입손실이 $2.7 \pm 0.2\text{dB}$, 영상주파수 리젝션이 $37.1 \pm 5.0\text{dB}$ 이었으며, 제작된 필터는 삽입손실이 $4.5 \pm 1.0\text{dB}$, 영상주파수 리젝션이 $32.1 \pm 2.2\text{dB}$ 이다. 본 연구의 결과는 위성방송 수신기 튜너용의 광대역 필터 및 통신기기용 가변대역필터로 이용 가능하다.

ABSTRACT

In this paper, a systematic design method of broadband tunable bandpass filter is presented by using user defined varactor diode model. The tunable bandpass filter is constructed as the cascade connection of low pass filter and high pass filter. The designed filter shows the characteristics of $2.7 \pm 0.2\text{dB}$ insertion loss and $37.1 \pm 5.0\text{dB}$ image rejection over the 950~2150MHz frequency range, and the experimental results have $4.5 \pm 1.0\text{dB}$ insertion loss and $32.1 \pm 2.2\text{dB}$ image rejection. The results of the research can be used for the broadband tunable filter of DBS tuner and communication instruments.

*인천대학교 공과대학 전자공학과
論文番號: 97004-0108
接受日字: 1997年 1月 8日

I. 서 론

복수개의 위성에서 오는 다양한 주파수의 위성신호를 수신하고 하나의 개발 모델로 세계 각국의 주파수 사양을 만족할 수 있도록 위성방송 수신기용 튜너의 동작 주파수는 더욱 넓어지고 있다. 1990년대 초에는 0.95~1.75GHz 대역의 위성방송 수신기용 튜너 IC가 개발되었고, 현재에는 2GHz대로 동작주파수 대역이 넓어지고 있으며, 주파수 변환부를 MMIC로 구현한 제품이 발표되고 있다.^[1-3] 튜너의 초단에 사용되는 가변대역필터는 영상주파수 억압을 위한 고역통과필터 또는 저역통과필터가 이용되었으며, 결합 전송선로의 결합 특성을 이용하거나, 마이크로스트립라인을 이용한 설계 결과가 발표되었다.^[4] 이 본 논문에서는 체계적인 가변대역통과필터의 설계법을 제시하기 위하여 저역통과필터와 고역통과필터를 중속 연결하는 구조를 이용하였으며 기존의 필터보다 넓은 950~2150MHz 동작주파수 범위를 갖는 가변대역통과필터를 설계하였다. 가변대역통과필터는 바랙터 다이오드의 집합 커패시턴스가 인가된 전압에 비례하여 변화하는 특성을 이용하여 통과대역의 중심주파수를 변화시켰으며 튜너의 주요 요구 사양인 영상 주파수 리젝션 특성이 30dB 이상이 되도록 설계하였다.

II. 가변대역통과필터의 설계

2.1 가변대역통과필터의 역할

가변대역통과필터는 광대역 시스템에서 선택도를 결정하는 주요 부분으로 원하는 신호대역을 통과시키고 영상주파수(image frequency)에 의해 생기는 영상잡음 영향을 제거하며 인접 채널(adjacent channel) 간섭에 대한 영향을 줄이기 위하여 사용된다. 영상주파수는 LO 신호와 RF 신호사이의 주파수 차이만큼 LO 신호의 반대편에 생기는 신호로, LO 주파수가 RF 주파수보다 높은 경우 $f_{IF} = f_{LO} - f_{RF}$ 이므로 $f_{image} = f_{RF} + 2f_{IF}$ 가 된다.

영상주파수의 잡음이나 원하지 않는 신호는 믹서단 출력에서 신호와 함께 IF 주파수로 변환되므로 영상주파수 리젝션(image frequency rejection)을 위해 RF 증폭기와 믹서 사이에 필터를 삽입하게 된다. 예로 위성방송 수신기용 튜너는 광대역의 신호주파수중

원하는 채널만 선택하여야 하므로 가변대역통과필터는 넓은 주파수 범위를 커버해야 하고, 각각의 원하는 협대역 신호를 선택적으로 수신하며 그신호의 영상주파수 성분을 제거하는 역할을 하게된다. 위성방송 수신기용 튜너는 최소 30dB 이상의 영상주파수 리젝션 특성을 필요로 한다.

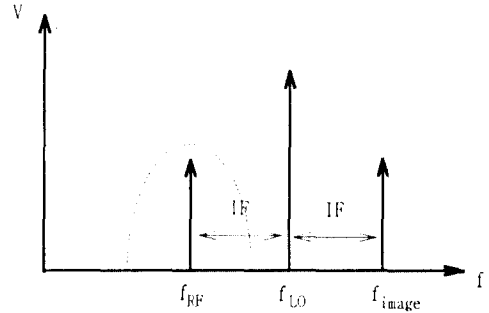


그림 1. 영상 주파수 응답
Fig. 1 Image frequency response

2.2 바랙터 다이오드의 모델링

가변대역통과필터의 설계에는 바랙터다이오드, ME-SFET 등 능동소자의 특성이 인가전압에 의해 변화되는 것을 이용할 수 있다.^[6] 이 본 논문에서는 바랙터다이오드의 집합커패시턴스가 인가전압에 반비례하여 변화하는 특성을 이용하였다.

가변대역통과필터 설계에는 도시바사의 ISV186 바랙터 다이오드를 사용하였다. ISV186 바랙터 다이오드는 1~25V의 전압을 인가함으로써 0.7~4.5pF의 집합 커패시턴스 변화값을 갖는다. 본 논문에서는 바랙터 다이오드를 모델링하기 위하여 마이크로파회로

표 1. ISV186 바랙터 다이오드의 전기적 특성
Table 1. The electrical characteristics of the ISV186

특 성	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Reverse Voltage	30			V
Reverse Current			10	nA
Maximum Capacitance	3.31		4.55	pF
Minimum Capacitance	0.66		0.82	pF
Capacitance Ratio	4.5	5.2	6.0	
Series Resistance		1.2	2.0	Ω

시뮬레이터인 HP-Eesof사의 MDS를 사용하였다.^[15] 설계에 사용된 ISV186 바랙터 다이오드의 전기적 특성 및 인가전압에 따른 등가회로의 커패시턴스 및 저항치의 변화를 표 1과 그림 2, 3에 나타내었다.

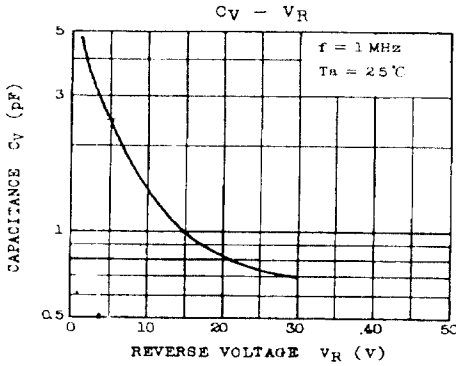


그림 2. ISV186의 C_V - V_R 특성
Fig. 2 C_V - V_R characteristics of ISV186^[8]

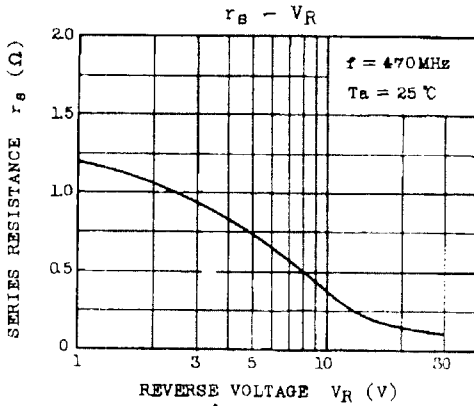


그림 3. ISV186의 r_s - V_R 특성
Fig. 3 r_s - V_R characteristics of ISV186^[8]

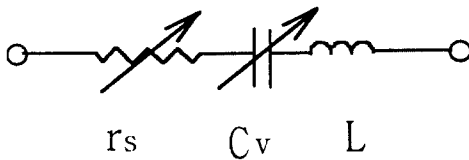
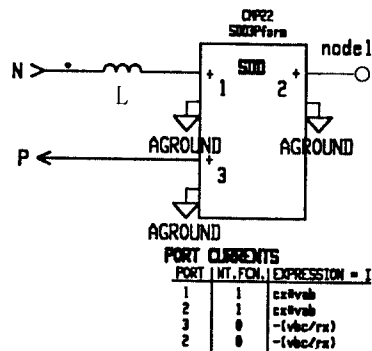


그림 4. 바랙터 다이오드의 등가회로모델
Fig. 4 Equivalent circuit model of varacter diode

바랙터 다이오드를 그림 4와 같이 인가된 전압에 따라 변화값을 갖는 가변 커패시턴스와 가변저항 그리고 일정한 값을 갖는 인덕턴스의 직렬회로로 모델을 정하였으며, 회로 설계를 위해 등가회로를 MDS의 SDD(Symbolically Defined Device)를 이용하여 모델링하였다.

SDD는 각 포트의 전압과 전류의 관계식을 사용자가 정의함으로써 임의의 비선형 모델을 만들어 회로 설계에 이용할 수 있다. 그림 5는 바랙터 다이오드의 등가회로를 전압과 전류의 관계식과 모델 파라미터를 변수로 하여 모델링하기 위한 스키매틱 심볼이다. 전압에 따라 변화값을 갖는 저항과 커패시터를 표시한 3-포트 SDD와 고정값을 갖는 인덕턴스의 직렬회로로 바랙터 다이오드를 모델링하였다.

SDD 모델에서 독립적으로 변화하는 저항과 커패시터 두 개의 비선형 요소가 직렬로 연결되어 있으므로, 포트의 전압과 전류의 관계식으로 비선형 요소들을 표현하기 위해서는 두 비선형 요소 사이에 노드를 필요로 하게된다. 따라서 그림 5에서와 같이 두 번째 포트를 하나의 내부 노드로 이용한 3-포트 모델을 사용하여 구성하였다. 또한 커패시턴스를 나타낸 식은 바랙터 다이오드의 접합커패시턴스 공식을 기본으로



```

EQUATION cx=c(vbias)
EQUATION c(vbias)=2.9e-10/(((10-vbias)/0.81)^1.62)
EQUATION rx=r(vbias)
EQUATION r(vbias)=0.99*(7.6/(3.5-vbias))^0.98)
EQUATION vab=v1-v2
EQUATION vbc=v2-v3
    
```

그림 5. 바랙터 다이오드의 SDD 스키매틱 심볼
Fig. 5 SDD schematic symbol for varactor diode

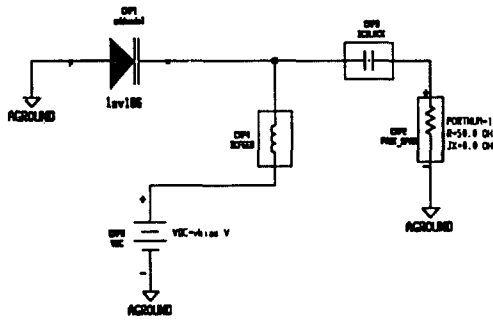


그림 6. 바랙터 다이오드 등가모델의 시뮬레이션 회로도
Fig. 6 Simulation circuit for varactor diode equivalent model

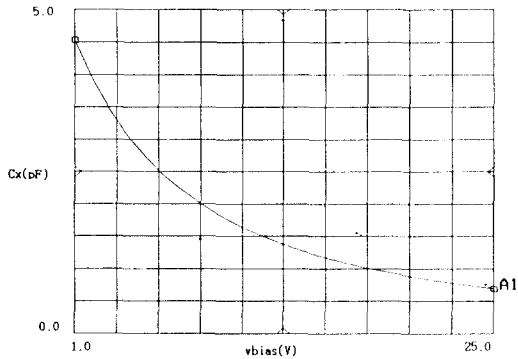


그림 7. 바랙터 다이오드의 커패시턴스 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation results of the varactor diode capacitance

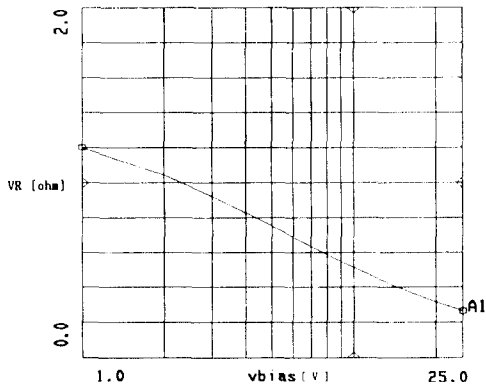


그림 8. 바랙터 다이오드의 저항 시뮬레이션 결과
Fig. 8 Simulation results of the varactor diode resistance

변수들을 커브 피팅(curve fitting)하는 방법으로 데이터복상의 커패시턴스값과 일치시켰으며, 저항은 데이터복상의 곡선 모양을 나타내는 함수를 바탕으로 식을 유도하였다.

SDD로 모델링한 모델의 특성을 확인하기 위한 시뮬레이션 회로도 및 시뮬레이션 결과를 그림 6, 7, 8에 나타내었다. 그림에서 인가된 전압에 따라 모델링된 바랙터 다이오드의 커패시턴스와 내부저항이 데이터 북의 제시 특성과 동일하게 나타나는 것을 볼 수가 있다.

2.3 가변저역통과필터의 설계

먼저 950-2150MHz 주파수의 신호에서 950MHz 대역을 수신하기 위해 중심주파수가 950MHz, 대역폭이 100MHz인 대역통과필터를 설계하고자 차단주파수가 1GHz인 저역통과필터를 설계하고 바랙터 다이오드의 커패시턴스를 변화시키며 차단주파수를 변화시켰다. 저역필터는 영상 주파수 리젝션 특성을 고려하여 통과 대역에서의 평탄한 특성보다는 저지대역에서의 높은 roll-off 특성을 얻을 수 있는 체비셰프 필터 모델을 선택하였다. 위성방송 수신기용 튜너에서는 영상 주파수가 신호 주파수보다 IF주파수(대부분 479.5MHz가 이용됨)의 2배인 959MHz 만큼 높은 1909MHz이므로 950MHz의 신호 주파수에서 영상 주파수 리젝션 특성이 $f/f_c = 2$ 에서 최소 40dB 이상을 얻기 위해서는 그림 9에 보는 것과 같이 최소 5단 필터를 필요로 하게 된다.

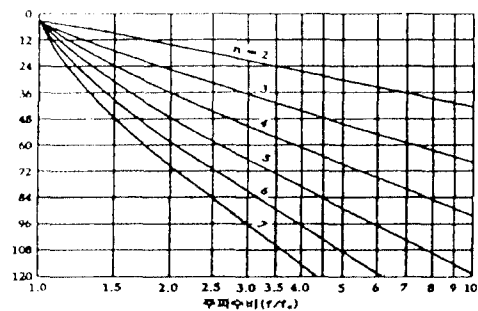


그림 9. 1.0dB 리플의 필터 원형의 감쇠 특성^[10]
Fig. 9 Attenuation versus normalized frequency for 1.0dB equal-ripple filter prototypes^[10]

필터 설계 이론을 이용하여 해석적으로 설계한 저역통과필터의 회로를 그림 10에 나타내었다. 소스와 로드 임피던스는 모두 50Ω이다. 저역통과필터는 바랙터 다이오드의 수를 줄이고, 하나의 바이어스 전압을 바랙터 다이오드에 인가해 같은 커패시턴스값으로 변환시키는 것을 고려하여 3개의 직렬 L과 대칭되는 원형 소자값(Prototype element)을 갖는 2개의 병렬 C 구조로 선택하여 설계하였다. 차단주파수가 975MHz일때, 원형 소자값을 스케일링한 결과 L1, L3는 18nH, L2는 25nH이고, 커패시턴스값은 3.5pF으로 선정한 바랙터 다이오드로 구현 가능한 값이다. 바랙터 다이오드에 3V에서 25V의 전압을 인가함으로써 커패시턴스를 0.7-3.5pF 까지 변화시킨 경우의 필터 특성 변화를 그림 11에 나타내었다. 앞에서 정의한 바랙터 다이오드의 SDD 모델을 이용하면 인가 전압을 독립변수로하여 가변필터의 특성을 쉽게 유도할 수 있다. 커패시턴스의 변화에 따라 차단 주파수가 962MHz-2.25GHz 까지 변화하는 것을 볼 수가 있으며, 저역통과필터의 영상주파수 감쇠 특성이 1GHz 근방에서는 45dB, 2GHz에서는 35dB이상됨을

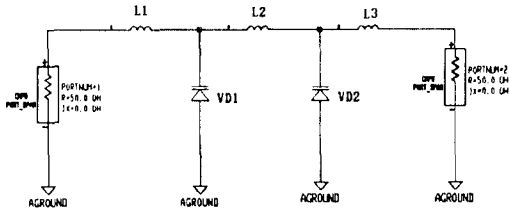


그림 10. 가변저역통과필터의 회로도
Fig. 10 Circuit schematic of tunable low-pass filter

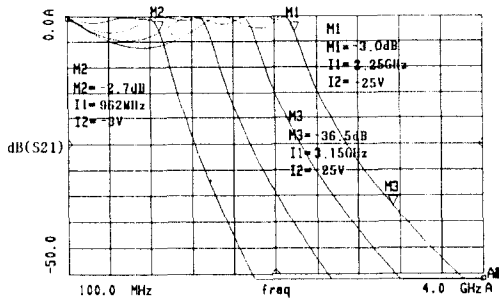


그림 11. 가변저역통과필터의 시뮬레이션 특성
Fig. 11 Simulation characteristics of tunable low-pass filter

볼수 있다. 기존의 튜너용 가변필터에서는 영상주파수 리젝션 기능만을 강조하는 경우 저역통과필터만을 사용하는 경우가 있으며, 따라서 설계된 필터는 영상제거 특성을 만족하는 튜너용 저역필터로 사용 가능하다.

2.4 가변고역통과필터의 설계

고역통과필터는 저역통과필터와 같은 roll-off 특성을 갖도록 5단 필터로 설계하였다. 대역통과필터의 대역폭을 고려하여 먼저 900MHz의 차단주파수를 갖는 고역통과필터를 설계한 후 커패시턴스 값을 변화시켜 차단주파수를 변화시키도록 설계하였다. 고역통과필터는 먼저 저역통과필터의 원형회로를 설계한 후 식(1)을 이용하여 원형회로 소자를 변환하여 설계하였다.

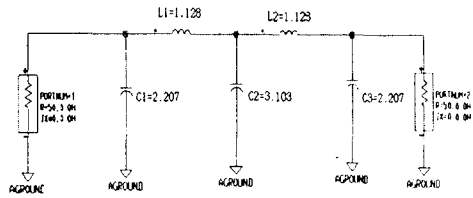
$$C'_k = \frac{1}{R_0 \omega_c L_k} \tag{1}$$

$$L'_k = \frac{R_0}{\omega_c C_k}$$

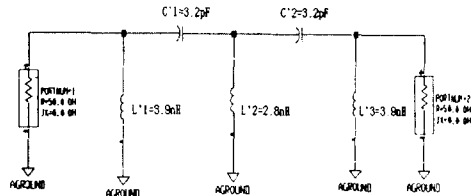
이때 R_0 는 50Ω, ω_c 는 $2\pi f_c = 5.65 \times 10^9$, L_k , C_k 는 1.0dB 리플 5단 필터의 원형소자값이고, L'_k , C'_k 는 스케일링한 소자값이다.

그림 12에서와 같이 고역통과필터도 저역통과 설계시와 마찬가지로 바랙터 다이오드의 수를 줄이고, 하나의 바이어스 전압으로 같은 커패시턴스값으로 바랙터 다이오드를 변환시키기 위해 먼저 3개의 병렬 C와 2개의 직렬 L 구조를 갖는 원형회로를 선택한 후 식 (1)의 변환공식을 이용하여 L은 C로 바꾸고, C는 L로 바꾸어 스케일링 과정을 거쳐 결과적으로는 2개의 직렬 C와 3개의 병렬 L을 갖는 5단 고역통과필터를 설계하였다.

그림 13에 구현된 가변고역통과필터의 회로도를 나타내었다. 시뮬레이션 특성을 그림 14에 나타내었다. 그림 14에서 바랙터 다이오드에 3~25V의 역바이어스 전압을 인가하여 커패시턴스의 값이 3.2pF에서 0.7pF까지 변화함에 따라 차단 주파수가 923MHz-2.09GHz까지 변화하는 것을 볼 수가 있다. 여기서 설계된 필터는 영상주파수 리젝션 특성이 37dB 이상으로 만일 LO를 RF 주파수보다 낮은 주파수를 설정하는 경우 영상주파수 특성을 제거하는 독립적인 필터로 사용



(a) 원형 회로



(b) 스케일링된 회로

그림 12 고역통과필터의 설계
Fig. 12 Design of high-pass filter

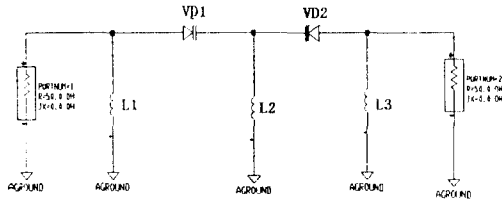


그림 13 가변고역통과필터의 회로도
Fig. 13 Circuit schematic of tunable high-pass filter

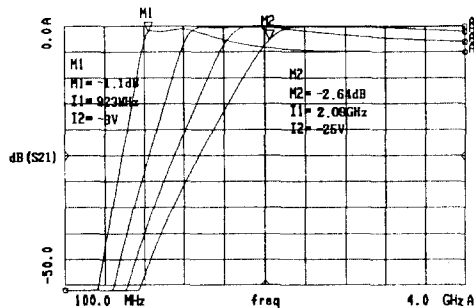


그림 14 가변고역통과필터의 시뮬레이션 특성
Fig. 14 Simulation characteristics of tunable high-pass filter

가능함을 알 수 있다.

2.5 가변대역통과필터의 설계

본 연구에서는 대역통과필터를 설계된 저역통과필터와 고역통과필터를 종속연결하여 구성하고자 하였다. 이 방식은 대역통과필터를 직접 구성하는 것보다 사용소자의 수가 증가하나 넓은 대역을 커버하는 가변필터의 경우 설계목표 및 회로소자의 초기치 설정이 명확하다는 장점이 있다. 가변대역통과필터의 회로도도 그림 15와 같다. 회로소자치의 최적화 과정을 거쳐 얻은 필터의 통과대역 특성을 그림 16에 나타내었다.

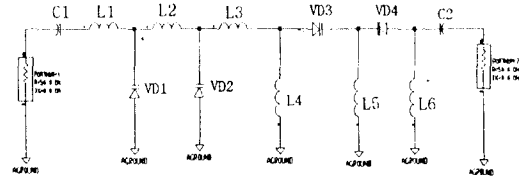


그림 15. 가변대역통과필터의 회로도
Fig. 15 Circuit schematic of tunable bandpass filter

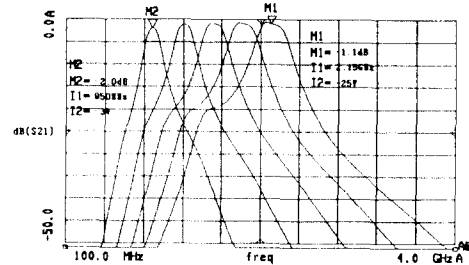


그림 16. 가변대역통과필터의 시뮬레이션 특성
Fig. 16 Simulation characteristics of tunable bandpass filter

실제 제작한 회로가 설계 특성과 유사한 특성을 갖도록 하기 위하여 회로에 사용한 인덕터소자를 유한한 Q값을 갖는 인덕터모델을 사용하여 칩인덕터에 의한 특성 변화를 고려하고, 회로를 구현할시 생기는 패드의 영향을 고려하기 위하여, 회로에 마이크로스트립라인을 부가하여 해석한 회로도를 그림 17에 제시하였다. 그림 18은 그림 17 회로의 특성 곡선이다.

본 연구에서는 2GHz 이상에서도 60이상의 Q를 갖는 CoilCraft사의 2.0×1.2mm 크기의 인덕터인 0805CS Series를 이용하였다. 설계된 가변대역통과필터는 바랙터 다이오드의 커패시턴스가 0.7~4pF 범위에서 중심주파수 가변범위가 945-2136MHz이고, 영상주파수 리제션 특성은 1GHz에서는 42dB, 2GHz 근방에서는 32dB 이상된다.

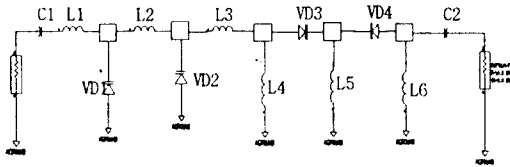


그림 17. 기생성분을 고려한 가변대역통과필터의 회로도
Fig. 17 The tunable filter circuit schematic considering parasitic components

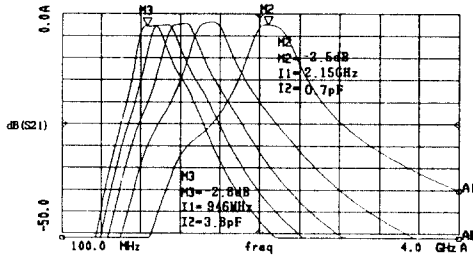


그림 18. 기생성분을 고려한 가변대역통과필터의 시뮬레이션 특성

Fig. 18 Simulation characteristics of tunable filter considering parasitic components

III. 가변대역통과필터의 제작 및 실험

비유전율이 4.5이고, 두께가 1.0mm인 FR-4 기판에 제작된 가변대역통과필터의 패턴도를 그림 21에 보였다. 칩인덕터는 2GHz 이상에서 60 이상의 Q값을 갖는 CoilCraft사의 0805CS series를 사용하였다.

그림 20은 제작된 가변대역통과필터를 HP8720 백터 네트워분석기로 측정 한 결과이다. 바랙터다이오드에 인가하는 전압을 3.0V에서 25V까지 변화시킴에 따라 중심주파수가 950MHz에서 2100MHz로 변화하

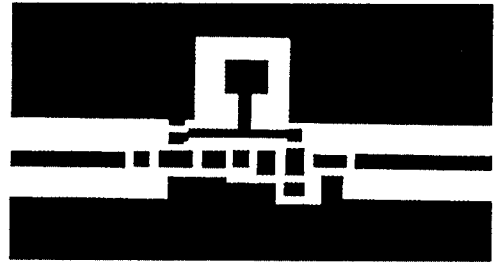


그림 19. 가변대역통과필터의 패턴도
Fig. 19 Layout of tunable bandpass filter

는 것을 알 수 있으며, 영상 주파수 리제션은 950MHz에서는 30.3dB, 2100MHz에서는 34dB로 전체 대역에서 30dB 이상이고 입력 리턴로스 특성은 전체 대역에서 15dB 이상 되었다. 측정결과 동작주파수는 950~2100MHz로 설계치인 950~2150MHz와 다소 차이가 나는데 이것은 바랙터 다이오드의 모델링에 따른 오차와 칩인덕터의 고주파 특성에 기인한 것으로 추정된다.

그림 21에 측정치와 설계치를 비교하기 위하여 SDD를 이용하여 설계된 가변대역통과필터의 S21과 S11을 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다. 그림 20과 그림 21에서 볼 수 있듯이 측정치와 설계치가 유사하게 나타남을 알 수 있다.

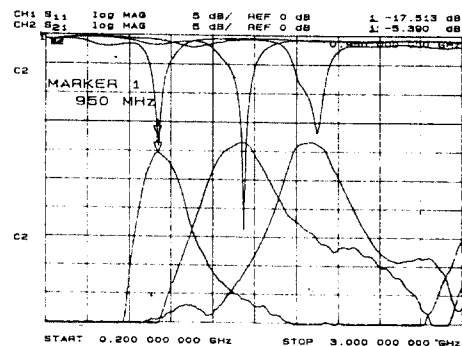


그림. 20 제작된 가변대역통과필터의 특성
Fig. 20 The characteristics of the fabricated tunable band-pass filter

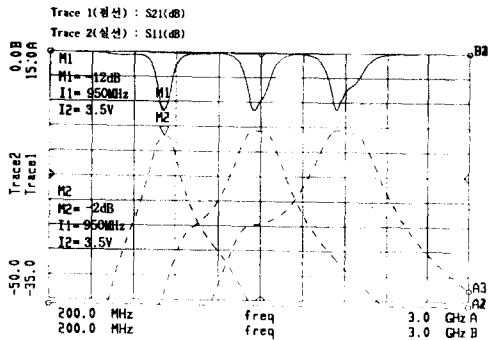


그림. 21 설계된 가변대역통과필터의 특성
Fig. 21 The characteristics of the designed tunable band-pass filter

IV. 결 론

본 논문에서는 L-밴드 가변대역필터의 체계적인 설계방법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 가변대역필터를 저역통과필터와 고역통과필터를 종속연결하는 구조로 모델링하여 설계 및 제작을 수행하였다. 설계된 가변대역통과필터의 주파수 가변 범위는 950~2150MHz 이며, 삽입 손실은 $2.7 \pm 0.2\text{dB}$, 영상주파수 리젝션은 $37.1 \pm 5.0\text{dB}$ 이다. 제작한 가변대역통과필터의 특성을 측정된 결과 삽입 손실은 $4.5 \pm 1.0\text{dB}$ 이며, 영상 주파수 리젝션 특성은 전 주파수 대역에서 $32.1 \pm 2.2\text{dB}$, 입력리턴로스는 15dB이상의 특성을 갖는다. 2GHz 이상에서 동작하는 가변대역필터의 정확한 설계를 위해서는 바랙터 다이오드 및 칩인덕터의 정확한 모델링이 요구된다. 본 논문의 결과는 대역폭이 더욱 증대된 위성방송 수신기용 튜너 개발에 직접 이용될수 있고 응용이 증대하고 있는 L-밴드대 통신기용 가변대역필터 설계에 유용하게 사용될수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

1. A. Yamamoto, M. Katagishi and K. Sakuta, "A Compact satellite 1GHz tuner with GaAs ICs," IEEE Trans. on Consumer Electronics, Vol. 35, No. 3, pp. 397-405, August, 1989.

2. H. Inamori, A. Matsuoka, N. Nemoto and Y. Watanabe, "A 2GHz down converter IC fabricated by an advanced Si bipolar process," IEEE Trans. on Consumer Electronics, Vol. 36, No. 3, pp. 707-711, August, 1990.
3. Anadigics data book(Your GaAs IC Source), 1995, Anadigics.
4. Mitsuo Makimoto and Morikazu Sagawa, "Varactor tuned bandpass filters using microstripline ring resonator," IEEE, MTT-S Digest, pp. 411-414, 1986.
5. 박병호, 정용채, 윤상원, 장익수, "VHF 마이크로스트립 가변대역통과 여파기의 설계," 마이크로파 및 진파 진과 학술 발표회 논문집, pp. 97-100, 1991.
6. S. R. Chandler, I. C. Hunter and J. G. Gardiner, "Active varactor tunable microwave filters," 23rd European Microwave Conference Proceedings, pp. 244-245, 1993.
7. V. Aparin, P. Katzin, "Electronically tuned L-S band filters", Applied Microwave & Wireless, pp. 42-49, fall, 1994.
8. Toshiba data book(High Frequency Surface Mount Devices), 1990.
9. Anadigics data book(Your GaAs IC Source), 1995, Anadigics.
10. 박영기, RF 회로 설계, 우신, 1993
11. David M. Pozar, Microwave Engineering, Addison-Wesley, 1990.
12. Sachihito Toyoda, "Variable bandpass filters using varacter diodes," IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., vol. MTT-29. No. 4, pp. 356-363, April, 1981.
13. A. Madjr, B. Evenor and E. Gertel, "A novel 2-4GHz multi-passband tunable and gain controlled miniature active equalizer," IEEE, MTT-S Digest, pp. 451-454, 1991.
14. 신재준, 김정업, 양운근, 구경현, "위성방송 수신기 튜너용 광대역 증폭기와 가변대역필터의 설계," 한국통신학회 하계학술발표회 논문집, pp. 226-229, 1996.
15. MDS 6.01 Manual, HP-EEsof.



신 재 준(Jae Jun Shin) 정회원

1968년 6월 10일생

1995년 2월: 인천대학교 공과대학
전자공학과 졸업(공학
학사)

1997년 2월: 인천대학교 대학원 전
자공학과 졸업(공학
석사)

1997년~현재: 대우통신(주) 종합연구소 재직중

※주관심분야: RF 회로 설계, 이동 및 위성통신 시스템

구 경 현(Kyung Heon Koo)

정회원

한국 통신학회 논문집 22권 1호 (1997. 1) 참조

현재: 인천대학교 전자공학과 부교수 재직중

※주관심분야: 선형, 고효율 RF/MW 회로 설계 및
측정, 전파 통신 시스템 분석등임.