K 밴드 FET 주파수 3체배기 설계

배성호°, 전영훈, 윤상원
서강대학교 전자공학과 초고주파 연구실
TEL : 02-713-8512 / FAX : 02-713-8512

The Design of FET Frequency Tripler for K Band

Sung-Ho Bae°, Young-Hoon Chun, Sang-Won Yun
Dept. of Electronics Eng., Sogang Univ.
E-mail : rf_man77@hotmail.com

Abstract

A 7/21GHz frequency tripler, using a commercially available packaged pHEMT, was designed and fabricated on 15mil RO3003 substrate. Frequency conversion is realized using the third harmonic current of an class B amplifier with rejection feedback at fundamental with optimum load conductance at the third harmonic. The fabricated frequency tripler has achieved a conversion loss of 0.7dB for an input power of 0dBm at 21GHz. The experimental results show good agreement with the harmonic balance simulation.

I. 서 론

수십 GHz 이상에서 발진하는 주파수 합성기를 만드는 방법에는 직접 만드는 방법과 낮은 주파수를 기본 주파수로 하여 체배시켜 만드는 방법이 있다. 직접 만들 경우 높은 주파수에서 공진기가 상대적으로 낮은 Q를 갖게 되므로 위상 잡음이 나쁘고, 위상 고정을 시키기가 어려운 단점이 있는 반면 체배 방식을 이용하면 좋은 위상 잡음 특성과 위상 고정을 쉽게 할 수 있는 장점이 있다.

이러한 주파수 대역에서 사용할 수 있는 주파수 체배기는 크게 비선형 저항 특성을 이용하는 다이오드 체배기와 드레인 전류의 비선형적인 특성을 이용하는 FET 체배기로 나뉘어진다. FET 체배기는 다이오드 체배기에 비해 높은 변환 효율과 입, 출력 정합회로를 용이하게 구성할 수 있다는 장점이 있어 널리 사용되어 왔다[1][2]. 그러나 이러한 FET 체배기도 체배수가 높아지면 효율이 크게 떨어지며 수십 GHz 이상의 주파수 3체배는 증폭단 없이 변환 이득을 얻기 어렵다[3][4]. 따라서 FET를 이용한 고효율의 주파수 3체배에 관한 연구는 지금도 계속되고 있으며 출력단의 기본 주파수 제거에 의한 3체배 효율의 증가를 강조하고 있다[5][6][7].

본 논문에서는 간단한 구조의 기본 주파수 피드백 회로를 통해 21GHz 대역에서 최소 변환 손실을 갖는 주파수 3체배기를 패키징된 pHEMT를 사용하여 제작하였다.

II. 본 론

1. 주파수 3체배기 설계

FET 주파수 체배기 설계시 주요 고려 사항은 FET의 동작점과 입, 출력 정합회로이다. 특히, 드레인의 N차 고조파 전류를 결정하는 동작점과 드레인에서 N차 고조파 출력 신호를 결정하는 출력 정합회로가 고효율의 체배기 설계에 중요한 변수가 된다.

1-1. 동작점

일반적으로 MESFET나 HEMT의 대신호 모델링에서 체배를 일으키는 비선형 요인은 pinch-off 근처에서의 드레인 전류의 clipping, 비선형 trandconductance(g_m), 게이트 소스 비선형 커패시터 Cgs, 드레인 소스 비선형 커패시터 Cds이다. 특히 드레인 전류의 clipping에 의한 비선형성이 주파수 체배에 가장 크게 기여하며, Vgs에 의한 동작점이 체배기 설계에 있어 중요한 요소가 된다.

$$I_N = \frac{4I_{\max}}{\pi}\left(\frac{t_0}{T}\right)\left|\frac{\cos(N\pi t_0/T)}{1-(2Nt_0/T)}\right| \quad (1)$$

conduction angle $\theta = 2\pi t_0/T$

I_N은 N차 고조파 드레인 전류이며 conduction angle이 80° 일 때 3차 고조파 전류가 최대가 된다. 그러나 이러한 class C 동작점에서는 g_m이 작아져 이득이 감소되며, 270° overdriven angle을 갖는 class A 동작점은 g_m의 감소 없이 최대 3차 고조파 전류[6]를 얻을 수 있으나 큰 입력 신호가 들어갈 경우 게이트에 과전류가 흘러 소자가 파괴될 위험이 있다. 따라서 θ가 180° 인 pinch-off 동작점이 3체배를 위한 안정적인 동작점이 된다.

그림 1은 Fujitsu사의 pHEMT 소자인 FHX35LG가 V_{gs}=-0.7, V_{ds}=2V의 pinch off에 바이어스된 K 밴드 주파수 3체배기의 블럭도이다.

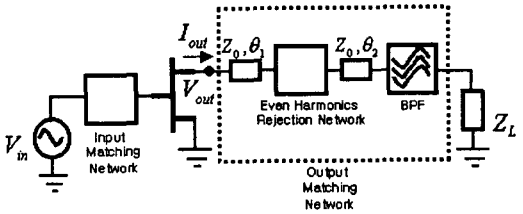

그림 1 주파수 3체배기 블럭도

1-2. 입, 출력단의 구성

주파수 체배기 설계에서 출력정합이 입력정합에 비해 중요하며 이는 드레인 출력 임피던스에 의해 N차 고조파의 출력 신호가 결정되기 때문이다. 그림 1에서 입력 주파수가 f_1일 때 입력 신호는 식 (2)와 같고 출력 신호는 식 (3)와 같이 표현된다. 이때 N차 고조파 출력 임피던스는 식 (4)와 같다.

$$V_{in}(t) = V_{in_1}\cos(w_1 t) \quad (2)$$

$$V_{out}(t) = \sum_{N=0}^{\infty} V_{out_N}\cos(Nw_1 t + \phi_N) \quad (3)$$

$$Z_{out_N} = \frac{V_{out_N} e^{j\phi_N}}{I_{out_N} e^{j\theta_N}} \quad (4)$$

여기서 $Real|Z_{out_N}|>0$이 만족될 때 안정적인 주파수 체배가 이루어지며 최대 3차 고조파 변환은 3차 고조파를 제외한 모든 고조파와 기본 주파수가 드레인에서 단락되고 3차 고조파 출력 임피던스 Z_{out_3}가 최적의 임피던스를 가질 때이다. 식 (4)의 드레인 출력 임피던스는 게이트 피드백 크기를 결정하며, 특히 기본 주파수의 게이트 피드백이 다른 고조파의 게이트 피드백에 비해 3차 고조파 출력신호에 더 큰 영향을 미친다. 따라서 출력 정합회로는 3차 고조파의 최적 임피던스를 가지며 기본 주파수가 드레인에 단락 되도록 설계하여야 한다.

그림 1의 출력 정합회로는 위상천이기, 짝수차 고조파 제거를 위한 $\lambda_{f_2}/4$ 개방 스터브, 3단

coupled line 대역통과 여파기로 구성되었다. 출력단에 coupled line 대역통과 여파기의 사용은 기본 주파수의 피드백을 용이하며 이는 기본 주파수에 대해 여파기의 입력 임피던스는 reactance 성분만을 가지므로 전송선로의 위상조절 만으로 간단하게 드레인이 기본 주파수에서 단락되는 피드백 회로를 구성할 수 있기 때문이다. 짝수차 고조파 제거를 위한 $\lambda_{f_2}/4$ 개방 스터브는 드레인과 대역통과 여파기 사이에 놓이며 위상 천이기의 위상각 θ_1과 θ_2에 의해 드레인의 출력 임피던스가 결정된다. 따라서 θ_1과 θ_2는 드레인에서 기본 주파수를 최대한 억압하고 3차 고조파에 대해 최적의 임피던스를 갖도록 결정하였다. 이때 출력 정합회로는 기본 주파수와 3차 고조파에 영향을 받으므로 최소 변환 손실을 갖는 위상각 θ_1, θ_2에서 주파수 대역폭은 줄어들게 된다.

입력 정합회로는 전형적인 주파수 체배기의 입력 정합회로로 기본 주파수를 제외한 모든 고조파를 제거하고 기본 주파수에 대한 입력 embedded 임피던스가 50Ohm이 되도록 구성하였다. 입력 정합회로 내에서 짝수차 고조파는 바이어스 회로에 의해 제거되었고 3차 이상의 홀수차 고조파는 $\lambda_{f_3}/4$ 개방 스터브를 통해 제거되었다.

전체 설계는 Agilent사의 ADS2002에 제공하는 FHX35LG 대신호 모델을 이용하여 harmonic balance 해석을 통해 이루어졌으며, θ_1, θ_2 변화에 따른 입력 정합회로의 수정을 반복함으로써 3체배기가 최소 변환 손실을 갖도록 최적화되었다.

2. 제작 및 측정 결과

설계된 K 밴드 주파수 3체배기는 유전율 3, 두께 15mil인 Rogers사의 RO3003 기판위에 제작되었다.

제작된 3체배기는 7GHz 입력 주파수에서 0dBm이 인가될 때 0.7dB의 최소 변환 손실을 가지며 5dBm 이상이 인가될 때 20.5 ~ 21.7GHz의 1dB 대역폭을 갖는다. 그림2는 입력 전력에 따른 3차 고조파의 출력 특성으로 harmonic balance 해석을 통한 결과와 측정결과를 비교한 것이며 그림 3은 제작된 주파수 3체배기의 입력 주파수 변화에 따른 3차 고조파의 대역폭을 나타낸다.

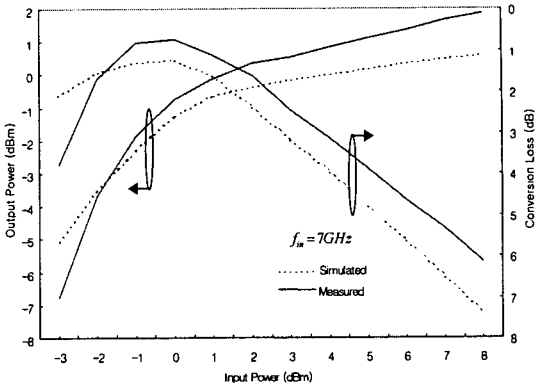

그림 2 입력 전력에 따른 3차 고조파 출력과 변환 손실

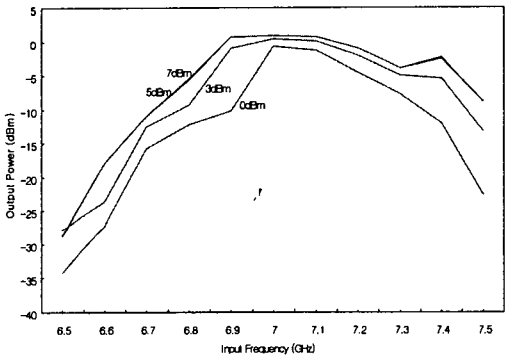

그림 3 입력 전력에 따른 주파수 대역폭의 변화

그림 4은 5dBm 입력 신호가 인가될 때 입력 주파수 변화에 따른 기본 주파수와 2, 3차 고조파의 출력 스펙트럼을 나타낸다. 제작된 주파수 3체배기는 5dBm 입력일 때 20.5 ~ 21.7GHz내에서 5.3dB 이하 3차 고조파의 변환 손실을 가지며, 기본 주파수는 38dBc, 2차 고조파는 32dBc 이하의 제거 특성이 갖는다.

위상 잡음 특성을 측정하기 위해 입력 신호원으로 Anristu사의 683698B 신호발생기를 사용하였고 표 1은 체배기에 인가되기 전과 후의 위상 위상 잡음 특성을 나타낸다. 제작된 주파수 3체배기의 출력 위상 잡음은 20logN에 따른 9.54dB 보다 최

대 1.16dB 더 증가하였다. 그림 5는 제작된 K 밴드 주파수 3체배기의 실물 사진이다.

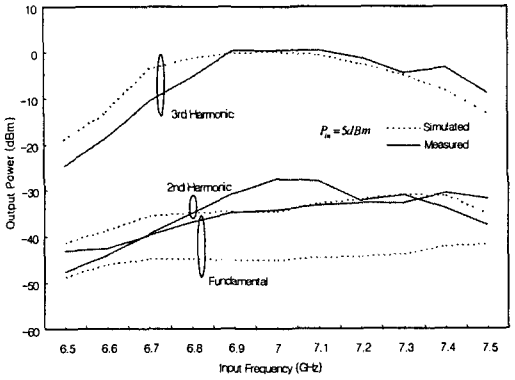

그림 4 입력 주파수 변화에 따른 출력 고조파의 변화

입력 주파수 (GHz)	6.8	7	7.2
인가 전 위상잡음 (dBc/Hz@10kHz)	-95.9	-95.6	-95.3
인가 후 위상잡음 (dBc/Hz@10kHz	-86	-85.8	-84.6

표 2 위상 잡음 특성

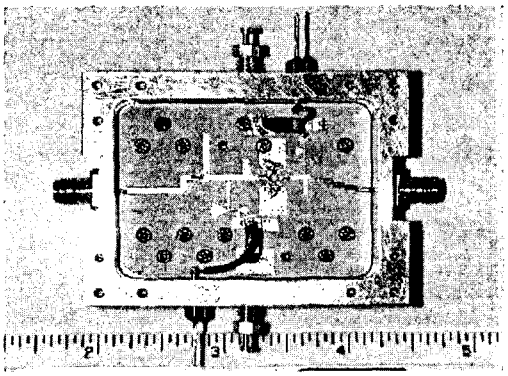

그림 5 주파수 3체배기 실물 사진

III. 결 론

높은 차수의 체배는 효율이 떨어지며 FET를 이용하더라도 수십 GHz 이상에서 3체배는 변환이득을 얻기 어렵다.

본 논문에서는 21GHz에 최소 변환 손실을 갖도록 주파수 3체배기를 설계하였다. 안정적인 동작을 위해 class B 동작점을 사용하였고 피드백에 의해 기본 주파수가 드레인에서 단락되어 3차 고조파가 최소 변환손실을 갖도록 하였다. 제작된 주파수 3체배기는 0dBm 입력일 때 21GHz에서 0.7dB의 최소 변환 손실을 가지며, 5dBm 입력일 때 4.3dB의 변환 손실과 1.2GHz의 1dB 대역폭을 갖는다. 3체배된 출력의 위상잡음은 이론적인 값에 비해 1.16dB 더 증가하였다.

주파수 3체배기는 패키징된 소자를 사용하여 MIC로 제작되었으며 추후에 MMIC로 제작될 경우 더 높은 주파수에서 변환이득을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Hirota, T., and H. Ogawa, "Uniplanar Monolithic Frequency Doublers," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 37, No. 8, Aug. 1989.

[2] Yanev, A, S., B. N. Todorov, and V. Z. Ranev, "A Broad-Band Balanced HEMT Frequency Doubler in Uniplanar Technology," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 46, No. 12, Dec. 1998.

[3] Jhon E. Penn, "Power Efficient MMIC Frequency Triplers," Microwave Journal June 2001.

[4] Inder Bahl and Parkash Bhartia, Microwave Solid State Circuit Design, Addison Wesley, 2003.

[5] Guohao Zhang, Roger D. Pollard and Chrisopher M. Snowden, "A Novel Technique for HEMT Tripler Design," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Vol. II, June 1996.

[6] Fudem, H., and E. C. Niehenke, "Novel Millimeter Wave Active MMIC Tripler," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Vol. II, June 1998.

[7] Bouidiaf, A., D. Bachelet, and C. Rumelhard, "A High-Efficiency and Low-Phase-Noise 38GHz pHEMT Tripler," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 48, No. 12, Dec. 2000.