

P-HEMT의 비선형해석에 의한 저위상잡음 분석 및 마이크로파 발진기 설계

김성용* · 강문형* · 이영철*

*경남대학교

Analysis of low Phase Noise by Nonlinear parameters of P-HEMT and Microwave Oscillator design

Seong-yong Kim* · Mun-hyung Kang* · Young-Chul Rhee*

*Kyungnam University

E-mail : micropt@mail.kyungnam.ac.kr

요 약

본 논문은 마이크로파발진기의 위상잡음 특성에 영향을 미치는 P-HEMT의 비선형 파라미터를 선정하고, 3개의 비선형 파라미터와 최소 위상잡음을 분석하였다. 분석된 P-HEMT가 저 위상잡음을 가지는 최적의 바이어스 동작점을 선정하여, 선정된 바이어스 동작점에서 두 가지 형태의 발진기를 설계하므로써 발진기의 물리적 구조에 의한 위상 잡음의 영향을 비교하고 위상잡음의 감소방안을 제시하였으며, 이를 이용하여 ku-대역 위상동기유전체공진 발진기를 설계 제작하였다.

I. 서 론

음성신호를 중심으로 전송하던 아날로그 통신 방식에서 정보통신기술의 발전에 따라 통신 서비스의 다양함으로 인해 대용량의 데이터와 영상신호 등 멀티미디어 신호를 전송하는 무선 디지털 통신 방식으로 변화되었다[1]. 이러한 통신 시스템은 대용량의 정보를 고속으로 전송하기 위해 QPSK나 QAM과 같은 디지털 변조 방식을 사용하므로 사용 주파수 대역에서 효율적인 스펙트럼 활용으로 인접신호와의 페이딩에 의한 영향이 작고, 고속 전송에 따른 시스템의 높은 안정성과 신뢰도를 요구하고 있다[2]. 디지털 통신 시스템의 상·하향변환기에서 사용되는 디지털 변조 신호는 마이크로파 및 밀리미터파의 반송파에 의하여 전송되므로 하향변환기의 국부발진기의 성능이 기저대역 신호와의 C/N_0 와 BER의 특성에 큰 영향을 미치므로 국부발진기에서 발생하는 위상잡음에 대한 분석과 감소 방안에 대한 많은 연구가 필요하게 되었다. 따라서 마이크로파 및 밀리미터파 대역을 사용하는 디지털 통신 시스템의 하향변환기에 적용되는 국부발진기는 낮은 위상잡음과 주파수와 온도변화에 안정적인 발진을 출력하는 위상고정 발진기(PLO : phase locked oscillator)를 사용하여 고안정 마이크로파 발진기를 설계한다. PLO 각 부분에서의 위상잡음 영향 중 발진기에서의 위상 잡음이 가장 크게 영향을 미치며, 발진기에 이용된 P-HEMT에 의해서 발생하거나, 발진기 설계 구조에서 발생된다. 마이크로파 발진기의 위상잡음모델인 Leeson의 위상잡음 모델[3]에 의하면 플리커

잡음으로서 이는 디지털 무선 통신의 위상잡음 발생요인이 된다. 마이크로파 발진기를 구성하는 P-HEMT의 특성에 의하여 주파수 성분과 관련된 등가 파라미터는 등가회로의 비선형 커패시턴스(C_{gs} , C_{gd})와 전달 컨덕턴스(gm)이므로 이들 비선형 파라미터를 중심으로 능동 소자를 비선형 분석하여야 하며, 본 논문에서는 P-HEMT의 비선형 해석에 TOM 모델[4,5]을 이용하여, 바이어스에 대한 I-V특성곡선 분석 및 S-파라미터를 해석하고 최적화된 비선형 등가 파라미터를 구하여 저위상잡음 특성을 나타내는 Ku-대역에서의 마이크로파 유전체 발진기를 설계 함으로서 발진기 구조에 의한 위상잡음을 감소할 수 있는 방안에 대해서 연구하였다.

II. 마이크로파 발진기의 위상잡음과 P-HEMT 비선형 파라미터 분석

마이크로파 발진기에서 발생하는 위상잡음은 무선통신시스템의 하향변환기의 성능을 떨어지게 하므로, 그 출력 발진신호는 최대한 안정되도록 하기 위해서 위상고정루프를 사용하게 되며, 저위상 잡음 성분을 가지도록 하기위해 VCO는 유전체 공진기의 높은 Q값에 의해 위상잡음을 감소시킬 수 있는 전압제어 유전체 공진 발진기(VT-DRO)를 이용하게 된다. 위상고정유전체공진 발진기(PLDRO)의 기준 주파수 발진기와 위상잡

출기에서 발생하는 위상잡음성분과 루프 필터에 의한 위상잡음 성분, 전압제어 유전체 공진 발진기에서의 위상잡음성분이 전체 루프를 통해 최종 출력 위상잡음으로 나타나게 된다. 발진기의 위상잡음을 분석하기 위해 이용되는 Leeson's 모델식을 이용하며, 발진기의 위상잡음은 공진부의 Q 값, 신호전압의 전력, 입력신호 전압의 전력, P-HEMT에서 재 생성되는 리액티브 전력과 함께 잡음지수(NF:Noise Figure)에 영향을 받게 된다 [3].

$$L(f_m) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\omega^2}{4\omega_m^2} \left(\frac{P_{in}}{\omega_o W_e} + \frac{1}{Q_{unt}} + \frac{P_{sig}}{\omega_o W_e} \right)^2 \right] \times \left(1 + \frac{\omega_c}{\omega_m} \right) \frac{NF K T_e}{P_{avg}} \quad \text{dBc/Hz} \quad (1)$$

Leeson's 모델에 의해 저 위상잡음을 가지는 발진기를 설계하기 위해서는 무 부하 공진계수 Q를 크게 하고, 최대 리액티브 에너지 및 P-HEMT가 포화상태에서 동작하지 않도록 하고 낮은 잡음지수와 위상변동이 작은 P-HEMT를 사용하여야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 P-HEMT의 비선형 분석에 의한 바이어스 동작점 선정과 높은 Q값을 가지는 유전체공진기(DR)를 이용한 발진기인 DRO를 이용하여야 한다. 잡음지수는 유전체 공진 발진기에 이용되는 P-HEMT에 대부분 의지하게 된다. VT-DRO에 이용되는 능동 소자는 선정된 바이어스 동작 점에 의해 비선형파라미터들이 일정한 값으로 결정되어지고, 이러한 비선형파라미터들에 의해 P-HEMT의 잡음지수가 결정되어진다. 이 잡음 지수는 식(1)에 의해 위상잡음 값에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 발진기에서 사용되는 P-HEMT는 마이크로파 및 RF에서 사용되는 FET로 대신 모델과 소신호 모델을 통한 S파라미터의 변화와 비선형함수의 변화에 대한 전류와 임피던스 변화로 인해 발진 주파수와 이득, 잡음 지수, 위상잡음에 영향을 미치게 되므로 P-HEMT의 비선형 해석을 통해 비선형 함수를 분석하여야 한다[6]. 능동 소자의 비선형 모델링에는 해석적 방법과 데이터에 근거한 방법[7]으로 구분되어지며, 본 논문에서는 해석적 모델 중 P-HEMT의 핀치오프 전압 이상에서 해석 가능하고 온도변화에 대한 비선형 파라미터의 변화 관계를 해석할 수 있는 TOM 모델을 사용하였다[7]. 그림 1은 TOM 모델에서 분석되는 P-HEMT의 소신호 등가 회로를 나타내었으며, 비선형동작 해석은 모델링 소자의 비선형 파라미터를 이용하여 DC 파라미터 모델링, AC 파라미터 모델링 과정을 거치게 된다. TOM 모델에서 분석된 비선형 파라미터 중 위상잡음에 영향을 미치는 파라미터는 게이트단의 입력 바이어스 전압 V_{gs} 와 드레인단의 입력바이어

스 V_{ds} 의 변화에 대해서 변화되는 성분인 비선형 커패시턴스 C_{gd} , C_{gs} 와 전달 컨덕턴스 g_m 으로 선정하였다.

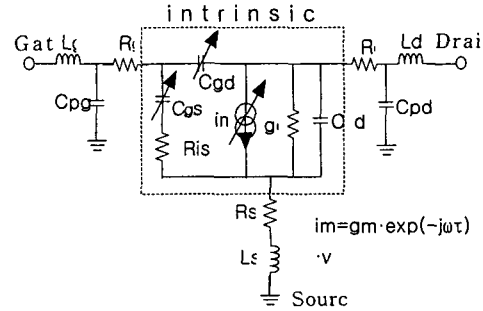


그림 1. P-HEMT의 소신호 비선형 등가회로

비선형 파라미터인 C_{gs} 와 C_{gd} , g_m 의 값들은 P-HEMT의 내부 등가 잡음회로에서의 잡음 전류원들에 영향을 주게 되며, 이 게이트와 드레인 잡음원은 식(2)로 주어진다[8].

$$\overline{i_g^2} = 4kTR \Delta f \frac{\omega^2 C_{gs}^2}{g_m}, \quad \overline{i_d^2} = 4kTg_m P \Delta f \quad (2)$$

수식은 Leeson's 모델에서 제시하는 위상잡음에 대한 정의에 이용되어 발진기에서 발생하는 위상잡음을 분석할 수 있다.

III. 비선형 모델링된 P-HEMT를 이용한 전압제어유전체 공진 발진기의 설계 및 특성비교

본 논문에서는 비선형 파라미터의 위상잡음에 대한 영향을 분석하기 위하여 Agilent사의 AT-36077 소자를 TOM 모델로 비선형 파라미터 C_{gs} 와 C_{gd} , g_m 을 중심으로 분석하고, 이에 따른

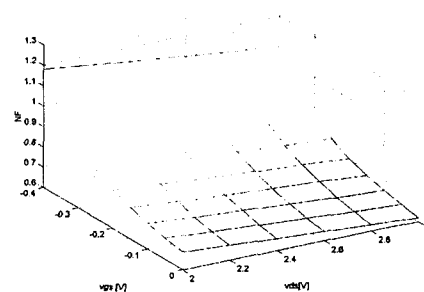


그림 2. 비선형 분석된 P-HEMT의 잡음지수 변화

P-HEMT의 잡음지수를 이용하여 Leeson's 모델에 의한 저위상잡음과 적절한 출력 전력을 가지는 바이어스 동작점을 선정하도록 하였다. 그림 2는 비선형 분석과정을 거친 P-HEMT의 잡음지수의 변화를 나타내었다. 최적의 바이어스 동작점을 가지는 P-HEMT를 이용하여 그림3과 같이 Ku-band 전압제어-유전체 공진 발진기를 게이트 전압제어 유전체 공진 발진기 형태로 설계하였으며, P-HEMT는 큰 부성저항과 작은 위상변동성분을 갖도록 구성할 수 있는, 소스-접지 구조를 이용하였다. 이에 비해 드레인-접지 구조는 C_{gs} 의 값이 크기 때문에 발진기가 매우 불안하여 비교적 큰 출력 레벨을 발생한다. 그러나 하모닉 발진 신호 성분도 증가하므로 위상잡음이 나쁜 단점이 있다[9].

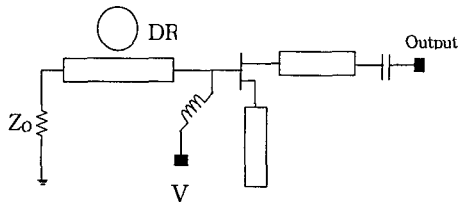
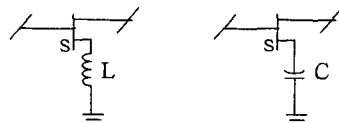


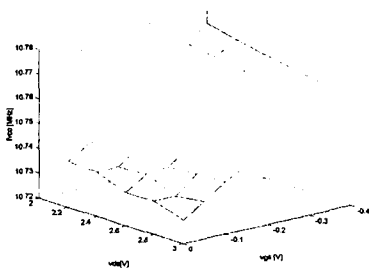
그림 3. 게이트바이어스전압 튜닝방식의 VT-DRO

전압제어-유전체 공진 발진기를 비선형 해석된 P-HEMT를 이용하여 저위상잡음을 가지는 바이어스점을 그림4과 같이 A, B 형태의 두 구조에 대해 동일하게 선정하여 설계하여, 전압제어-유전체 공진 발진기의 물리적 구조에 의한 위상 잡음 영향을 분석하였다. 그림 5 a, b)는 각 구조에 대한 출력 발진 파수를 나타낸 것이다.

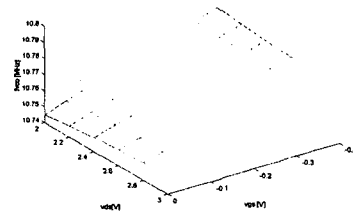


(a) L성분 (b) C성분

그림 4. 두 가지 형태의 feedback 구조

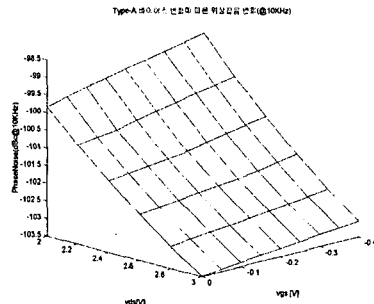


(a) L성분을 가진 구조

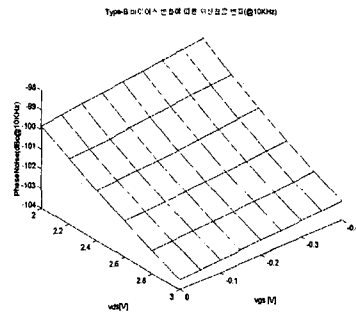


(b) C성분을 가진 구조

그림 5. 출력 발진 주파수 변화



(a) L성분을 가진 구조



(b) C성분을 가진 구조

그림 6. 출력 위상 잡음 변화 (@ 10kHz)

P-HEMT의 비선형 해석에 의한 동일한 바이어스 동작점에서 설계된 두 형태의 전압제어-유전체 공진 발진기가 그림 6에서 보듯이 L성분과 C성분을 가지는 피드백 구조에서 10 kHz 오프셋 주파수에서 10 dBc가량 차이 나는 것을 알 수가 있으며, 물리적 구조가 위상잡음에 영향을 미치는 것을 알 수가 있다. 그림 7은 DR공진부의 Q값변화에 따른 위상잡음 차이를 보이며, Q의 값이 높아질수록 위상잡음특성이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

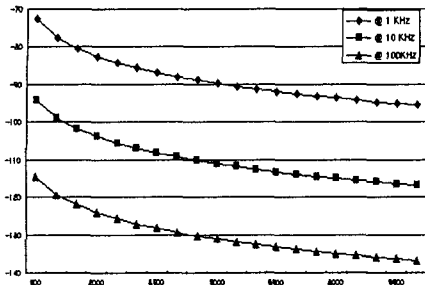


그림 7. Q값 변화에 따른 위상잡음 변화

유전체 공진 발진기의 위상잡음은 DR공진부의 Q값의 변화와 발진기의 물리적 구조에 의해서 변화되는 것을 보았다. 본 논문에서는 이를 바탕으로 하여 P-HEMT의 비선형 분석에 의한 바이어스 동작점인 $V_{ds}=3V$, $V_{gs}=0V$, $I_{ds}=28mA$ 에서 동작하는 Ku-Band VT-DRO를 설계하였으며, 이 때 사용된 기판은 유전율 2.5, $t=0.508mm$, $H=0.018mm$ 인 테프론 기판을 이용하였으며, 유전체 공진기는 Trans-Tech사의 8700시리즈로 Q값이 10000을 가진다. 설계된 VT-DRO를 사용하여 PL-DRO를 설계하였다. VT-DRO에 의한 발진주파수는 분주기인 HMC 365S8G을 이용하여 4분주 된후, PLL IC로 입력된다. MC12179 IC의 내부에 256분주기가 내장되어 있으며 고안정 PLDRO를 설계하기에 적합한 소자이다. 크리스탈 발진기를 사용하여 외부에서 10.47MHz의 기준주파수를 생성하여 DRO에 의해 $10.75GHz/1024=10.47MHz$ 로 분주된 주파수와 위상을 비교하여 오차신호를 생성하고 이 오차신호는 charge pump에 의해 펄스신호로 출력된다. PLDRO에 적용되는 루프 필터는 PLL IC 내부에서 charge pumping작용에 의하여 OP앰프를 사용한 능동필터를 사용하지 않고 수동필터를 사용하여 제작할 수 있다. 그림 8은 제작된 PL-DRO의 실물 사진이다.

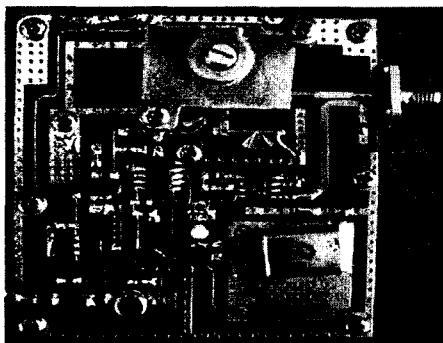


그림 8. PL-DRO의 실물사진

V. 결 론

본 논문에서는 마이크로파 발진기가 저위상 잡음특성을 가지도록 하기 위해서, 발진기에 이용되는 P-HEMT에 대해서 TOM 모델을 이용하여 비선형 해석하였다. 해석된 비선형 모델을 통하여 바이어스 변화에 따른 비선형 파라미터인 비선형 커패시턴스 C_{gs} , C_{gd} 와 전달 컨덕턴스 g_m 을 Leeson's 모델을 이용하여 위상잡음에 영향을 미치는 것을 모의실험을 통해 확인하였으며, 마이크로파 발진기의 설계 구조가 위상 잡음에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 마이크로파 발진기를 설계시 위상 잡음을 감소시키기 위해서는 발진기에 이용되는 P-HEMT의 비선형 분석에 의한 저위상 잡음을 가지는 바이어스 동작점을 선정하여야 하며, Leeson's 모델에서 보인바와 같이 Q가 매우 높은 DR을 이용한 공진부 구성을 하여야 하며, 동일한 바이어스 동작점에 대해서도 물리적 구조에 따라 위상잡음 값이 영향을 받으므로 최적의 구조를 선택하여야 한다.

참고문헌

- [1] Mark Kolber, "Predict Phase-noise Effects in Digital Communication Systems", Microwave&RF, sept.1999
- [2] W.P.Robins, "Phase noise in signal source", IEE Telecommunication series 9,1991
- [3] Ulrich L Rohde, "Microwave and Wireless Synthesizers", Jhon Wiley & Sons, INC , 1997
- [4] CEL "Design Considerations for a Ku-Band DRO in Digital Communication Systems", NEC Application Note, AN1035, 1999
- [5] Hermann Statz, Paul Newman, IRL W. Smith, Robert A. Pucel, Hermann A. Haus "GaAs FET Device and Circuit Simulation in SPICE", IEEE Transaction on Electron Devices No.2 , Feb. 1987
- [6] Venceslav F. Kroupa, Noise Properties of PLL systems, IEEE ransaction on Communication Vol. COM-30. Oct. 1987
- [7] Edmar Camargo "Design of Frequency Multipliers and Harmonic Oscillator", Artech House., 1998
- [8] Ali Hajimari and Thomas H.Lee, The Design of Low Noise Oscillators,Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [9] Dan H. Wolaver, Phase-Locked Loop Circuit Design, Prentice-Hall, 1991.