

낮은 위상잡음을 갖는 위성중계기용 Engineering Model 발진기의 비선형 설계

Nonlinear Design of Engineering Model Oscillator with a Very Low Phase Noise for Satellite Transponder

이문규 · 류근관 · 염인복 · 이성팔

Moon-Que Lee · Keun-Kwan Ryu · In-Bok Yeom · Sung-Pal Lee

요 약

본 논문에서는 Ku대역 위성중계기에 사용되는 저위상잡음 특성을 갖는 Engineering Model 전압제어 발진기를 비선형 설계방법으로 설계하였다. 제작한 발진기의 발진주파수는 0~5 V의 제어전압으로 1,745~1,755 MHz의 발진범위를 갖는다. 공급전력은 5V, 6.9 mA를 요구한다. 제작한 발진기의 위상잡음은 -114 dBc/Hz @10 kHz offset, -131 dBc/Hz @100 kHz offset을 갖고 출력전력으로 5 dBm을 얻었다.

Abstract

An engineering model VCO with a good phase noise for Ku-band satellite transponder is designed using a nonlinear design methodology. It generates frequencies from 1,745 and 1,755 MHz with control voltages from 0 to 5 V DC. This unit requires 7 mA of current from 5 V DC supply voltage. Phase noise characteristics of the manufactured VCO exhibit -114 dBc/Hz @10 kHz offset and -131 dBc/Hz @100 kHz offset and its output power is 5 dBm.

I. 서 론

국내 무궁화 위성의 성공적인 발사와 더불어 위성통신시대가 열린 이래 국내외에서 위성통신 분야가 눈부시게 발전을 하고 있고, 세계의 위성 선진국들은 위성통신의 중요성을 인식하고 관련 핵심 기술 및 상용 시스템을 활발히 개발하고 있다. 특히 다양한 기능의 서비스에 관련하여 고성능의 위성중계기용 RF 핵심 부품의 국내 개발이 절실히 요구되고 있다.

Ku 대역 중계기는 14 ~ 14.5 GHz의 입력주파수를 1.748 GHz의 LO를 이용하여 12.252 ~ 12.752 GHz의 주파수 대역으로 하향 변환하여 중계하는

시스템이다. 중계기의 이득은 100 dB 이상이고, 잡음지수는 2.2 dB 이하이다.

Ku 대역 위성 중계기용 LO에 사용되는 VCO는 LO의 위상잡음과 밀접한 관련이 있는 LO의 핵심 소자이다. 위성중계기 부품으로 사용되는 VCO는 우주환경에서 10년 이상의 동작을 보장하는 신뢰성과 높은 수준의 위상잡음이 요구된다. 이를 만족하기 위해서는 우주환경에서 혹은 상업용으로 철저하게 검증된 VCO의 구조를 채택하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 출력전력과 저주파 잡음의 상향변환을 최적화하는 비선형 설계방법을 제시하고 이를 이용하여 Ku대역 위성중계기의 Engineering Model LO의 VCO를 설계하였다.

II. 설계 VCO의 구조

위성부품의 신뢰성을 고려할 때 발진기의 구동전압과 전류는 정격 전압과 전류보다 충분히 작아야 한다. 하지만 위상잡음은 일반적으로 구동전압에 비례하여 개선되기 때문에 구동 전압과 위상잡음 성능 사이에는 trade off 관계에 있다. 본 논문에서 설계하고자 하는 VCO의 중심 주파수는 1748MHz이므로, 회로의 크기와 무게를 줄이기 위해 SMT 부품을 사용하고, 위상잡음특성을 개선하기 위해 TEM mode의 유전체 공진기를 사용한다. 그림 1은 설계하려는 발진기의 구조를 보여주고 있다. 발진기의 구조는 상용부품으로 널리 사용되어 검증된 회로이다. 그림에서 Q1은 발진부의 트랜지스터이고 Q2는 Buffer 증폭기로 동작을 한다. 발진부는 컬렉터 부분이 접지된 Colpitts 형태의 발진기로 볼 수 있다.

회로에서 저항 RE는 BJT의 에미터의 전류를 안정화시키는 목적으로 사용되는 저항이다. CBE와 CE는 트랜지스터에 부성저항을 만들기 위한 커패시터이다. 그림 1에서 RE는 CB5와 CB6 커패시터를 이용하여 bypass 시켰다. 일반적으로 알려진 최대 발진 가능 주파수는 RE를 바이패스 하지 않은 경우 능동소자의 최대 발진 가능 주파수에 비해 현저히 감소하게 된다^[1]. RE를 bypass하지 않은 경우, RE로 인한 최대 발진 가능 주파수의 저하를 막기 위해서는 RE의 값을 증가시켜야 한다. 이 경우 RE

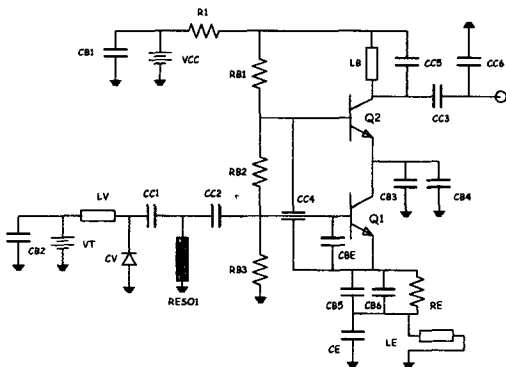


그림 1. VCO의 구조
Fig. 1. VCO circuit diagram.

에 의한 DC 전압강하가 커져 발진부의 트랜지스터에 전달되는 전압이 작아지게 된다. 또한 RE는 출력 부하에 병렬로 연결되어 있기 때문에 트랜지스터에서 생성된 발진 전력은 출력 부하 뿐 아니라 RE에서도 소비가 된다. 이러한 이유로 인해 RE에 의한 발진 성능 저하 효과를 개선하기 위해 CB5와 CB6을 이용하여 RF bypass하고, TR의 Emitter단의 정제환효과는 CE와 LE를 이용하여 구현하였다^{[2],[3]}.

III. 발진기의 비선형 설계

3-1 저주파 잡음의 상향 변환을 고려한 능동소자 분석

본 장에서는 비선형 설계방법을 이용하여 출력전력과 위상잡음의 특성을 고려한 RF의 동작점을 설정하고, 제한조건에 맞추어 제한회로를 설계한다. 그림 2는 그림 1의 발진기부분을 간략화하여 다시 그린 것이다. 그림 2에서 발진기의 성능은 능동소자의 단자 전압과 전류(V_1, V_2, I_1, I_2)에 의해 결정이 된다. 따라서 단자 전압과 전류에 대한 최적화된 값을 구하여 이를 부하조건에 맞추어 부하를 구현하면 발진기의 최적설계가 이루어진다. 그림 3은 그림 2와 같은 발진기의 단자 전압과 전류를 최적화 하기 위해 그림 1의 Colpitts구조에 대한 발진부의 능동소자의 단자 전압과 전류를 구하기 위한 그림이다. 여기서 $P_m(f_0)$ 는 발진기의 제한전력파를 의미하고 $P(\delta f_0)$ 는 능동소자에서 발생하는 $1/f$ 잡음의 전력을 의미한다. Si-BJT의 저주파 잡음원의 spectral den-

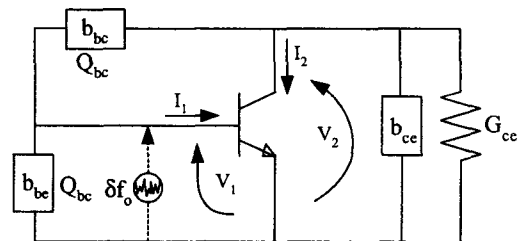


그림 2. 유한한 Q를 갖는 소자와 부하로 구성된 고려한 발진기의 구조
Fig. 2. An oscillator composed of finite Q elements and a load.

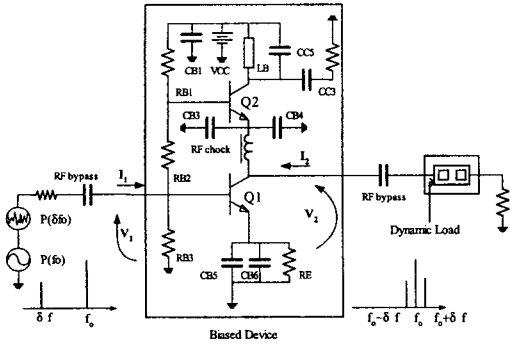


그림 3. 발진기의 출력전력과 저주파 잡음의 상향변환의 효과를 최적화하기 위한 구조
 Fig. 3. Schematic for optimization of output power and noise up-conversion effect.

sity는 다음 식으로 표현할 수 있다^[4].

$$S(f) = (KF)IB^{AF} df/F_c \quad (1)$$

여기서, KF = 프리커 잡음 상수, AF = 프리커 잡음의 지수승의 항, IB = 베이스 전류의 직류 크기, F_c = 프리커 잡음의 corner 주파수.

위상잡음의 발생 경로는 저주파(1/f, flicker) 잡음과 캐리어의 곱에 의한 전력 혼합 효과 이외에 하모닉 주파수와 하모닉 주파수근처의 위상잡음에 의해 발생될 수 있으나, 주된 성분은 저주파 잡음과 캐리어의 곱으로 생각할 수 있고 이에 대한 영향은 그림 3의 구조를 이용하여 분석할 수 있다.

그림 4는 그림 3에서 $P_{in}(f_0)$ 를 증가시켰을 때 base-emitter사이의 전압에 대한 예측되는 발진 출력전력을 보여주고 있다. 예측되는 발진출력전력은 $|v_{be}|$ 가 증가함에 따라 증가하다 $|v_{be}|$ 가 0.75V 근처를 지나면서 감소됨을 알 수 있다. 이는 base-emitter사이의 Schottky diode junction의 turn-on과 관계가 있는 것으로 생각된다. 그림 5는 $|v_{be}|$ 에 대한 바이어스 전류의 변화를 보여주고 있다. 바이어스 전류는 입사전력 ($P_{in}(f_0)$)에 따라 비례하여 증가하다 $|v_{be}|$ 가 turn-on되면 포화됨을 알 수 있다. 그림 6은 저주파 잡음과 캐환전력과의 혼합(Mixing)에 의한 주파수 up-conversion의 크기와 예측 발진 출력전력의 비를 비교한 그래프이다. 저주파 잡음의

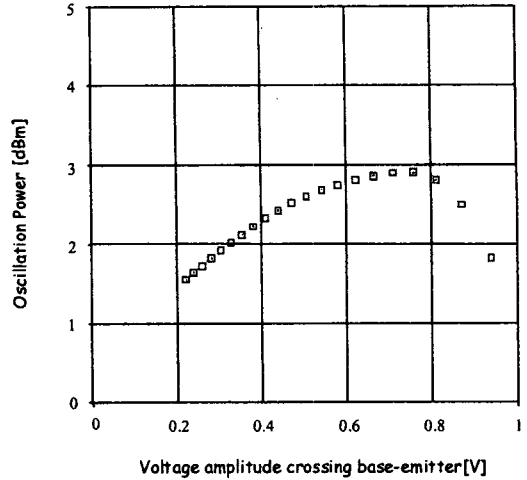


그림 4. RF drive level에 대한 발진기의 예측 출력 전력 ($\Gamma_l = 0.71 \angle 32^\circ$)
 Fig. 4. The predicted oscillation power versus RF drive level ($\Gamma_l = 0.71 \angle 32^\circ$).

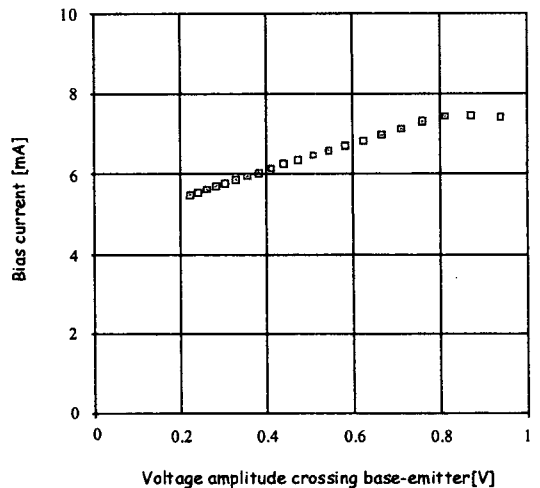


그림 5. RF drive level에 대한 발진기의 바이어스 전류 ($\Gamma_l = 0.71 \angle 32^\circ$)
 Fig. 5. The bias current versus RF drive level ($\Gamma_l = 0.71 \angle 32^\circ$).

upconversion도 마찬가지로 $|v_{be}|$ 가 turn-on될 때까지 예측 발진 출력전력의 증가로 인해 C/N비가 개선되다 $|v_{be}|$ 가 turn-on되면 발진 출력전력의 감소로 인해 C/N비가 악화된다.

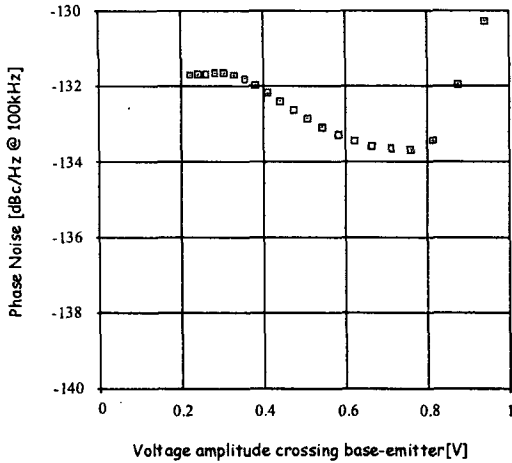


그림 6. RF drive level에 대한 위상잡음 ($P(\delta f_0) = -50\text{dBm}@100\text{kHz}$, $\Gamma_l = 0.71 \angle 32^\circ$)

Fig. 6. The phase noise versus RF drive level ($P(\delta f_0) = -50\text{dBm}@100\text{kHz}$, $\Gamma_l = \Gamma_l = 0.71 \angle 32^\circ$).

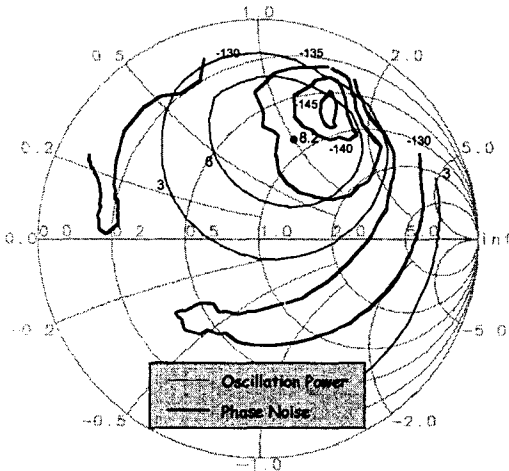


그림 7. 출력전력과 저주파잡음의 상향변환이득 곡선 ($|v_{be}| = 0.725$)

Fig. 7. Contours of output power and up-conversion of the low frequency noise ($|v_{be}| = 0.725$).

예측 발진 전력과 저주파 잡음에 의한 C/N비는 그림 3의 능동소자의 dynamic load의 변화에 의해서도 영향을 받는다. 그림 7은 $|v_{be}|=0.725$ 일 때 dynamic load에 대한 출력전력과 C/N비의 변화를

보여주고 있다. 그림 7에서 알 수 있듯 출력전력과 C/N비의 contour는 최적점이 일치하지 않아 적당한 trade-off가 필요하다.

3-2 케환회로 구현 및 회로의 민감도 해석

앞의 과정을 통해 능동소자의 입력과 출력 단에서의 전류, 전압을 구하면, 케환회로의 값을 결정할 수가 있다^{[5]~[8]}. Gilmore의 식을 비롯한 지금까지 유도된 케환회로의 식은 부하의 Q를 무한히 크다고 가정을 하고 유도된 식이다. 현실적으로는 마이크로 스트립으로 구현한 공진기나 부하는 실수부와 허수부의 비가 5~20정도로 작다. 따라서 기존의 케환회로에 대한 유도식으로 케환회로를 구현하는 경우에는 출력전력이 작아지거나, 소신호 발진조건을 만족하지 않을 수 있다. 부하의 Q값을 정확히 고려하는 것은 발진 가능성과 발진 출력을 예측하는 데 있어서 중요하다.

그림 2의 구조와 같은 Colpitts형 발진기에서 케환소자의 $Q(\text{Im}[Y]/\text{Re}[Y])$ 값이 주어졌을 때, 단자 전압과 전류로부터 다음과 같이 어드미턴스를 얻을 수가 있다^[9].

$$b_{be} = \frac{\alpha_f'(Q_{bc}y_i' + y_i') + \alpha_f''(Q_{bc}y_i' - y_i')}{\alpha_f'(1 - Q_{bc}/Q_{be}) + \alpha_f''(1/Q_{be} - Q_{bc})} \quad (2)$$

$$b_{bc} = \frac{1}{|a_f|^2} \{-\alpha_f'(y_i' + b_{be}) + \alpha_f''(y_i' - b_{be}/Q_{be})\} \quad (3)$$

$$Y_{ce} = \frac{1}{a_f} \{-\Delta_y + \alpha_b b_{be}(1/Q_{be} + j)\} \quad (4)$$

여기서,

$$y_1 = \frac{I_1}{V_1}, \quad (5)$$

$$y_2 = \frac{I_2}{V_2}, \quad (6)$$

$$\alpha_f = -1 + \frac{V_2}{V_1} = -1 + A_v, \quad (7)$$

$$\alpha_b = -1 + \frac{V_1}{V_2} = -1 + \frac{1}{A_v}, \quad (8)$$

$$\Delta_y = y_1 \times \alpha_b - y_2 \times \alpha_f. \quad (9)$$

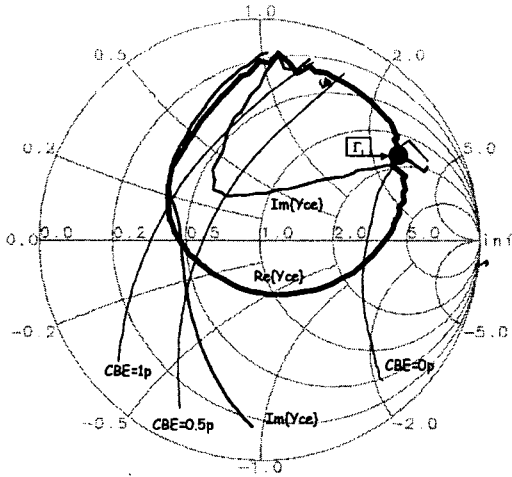


그림 8. Y_{ce} and CBE contours
 Fig. 8. Y_{ce} and CBE contours.

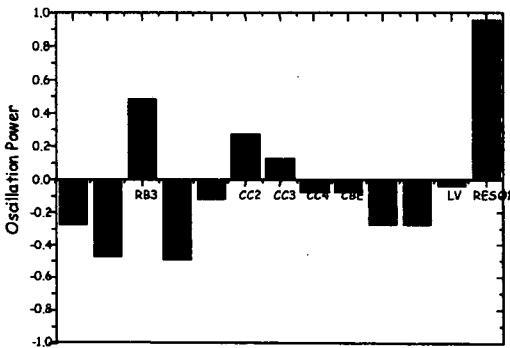


그림 9. 각 부품의 10% 변화에 대한 출력 전력 변화
 Fig. 9. Output power versus 10% variation of circuit elements.

부하의 Q 값을 고려한 설계식을 사용하여 능동소자의 능동부하(dynamic load)를 구하기 위해 로드풀을 수행하면 능동부하에 대한 궤환 임피던스 contour곡선을 얻을 수 있다. 그림 1의 회로구조에서는 CBE는 discrete 값으로 0 pF나 0.5 pF, 0.75 pF, 1 pF정도를 취할 수 있다. Y_{ce} 의 경우에는 CC4와 Q2의 입력임피던스에 의해 취할 수 있는 값이 제한을 받는다. 그림 8은 CBE값과 Y_{ce} 의 contour를 보여주고 있다. CBE의 값으로 open(0pF)을 취하는 경우, 출력전력과 C/N비를 고려하여 dynamic load로 $\Gamma_1 = 0.71 \angle 32^\circ$ 를 선택하였다. buffer로 이용되

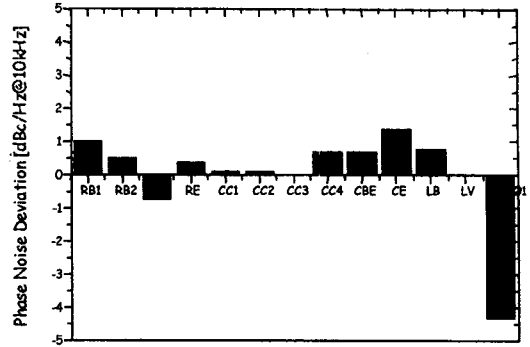


그림 10. 각 부품의 10% 변화에 대한 10kHz offset에서의 위상잡음 전력 변화
 Fig. 10. Phase noise at 10kHz offset versus 10% variation of circuit elements.

는 Q2의 전력이득이 $|S_{21}|^2 = 1.2$ dB로 그림 8로부터 예측되는 전력에 1 dB 정도의 출력전력을 얻을 수가 있다.

설계된 회로에서 발진성능과 각 부품과의 연관성을 알아보기 위해 부품의 값에 10%를 증가시켰을 때의 발진성능을 모의 시험하였다. 발진전력에 대해서는 그림 9에서 보이는 것처럼 바이어스 저항의 영향(RB1, RB2, RB3, RE)과 공진기의 길이에 민감한 영향을 얻었다. 발진전력과 공진기의 길이와의 관계에서는, 10%의 공진기 길이 변화가 공진 주파수를 변화시켜 b_{oe} 를 변화시키기 때문인 것으로 생각된다. 그림 10은 위상잡음과 각 부품과의 관계를 보여주고 있다. 위상잡음은 공진기와 바랙터 다이오드 주변의 결합회로, 바이어스회로 등 거의 모든 부품과 관계가 있음을 알 수가 있다. 이외에 발진 가능 영역의 변화는 CC1과 공진기에 민감한 변화를 보였다.

IV. 실험 결과

앞서 기술한 방법을 이용하여 1.748 GHz의 위성 증계기용 Engineering Model VCO를 제작하였다. 설계에 사용된 Si-BJT는 $f_T = 4$ GHz($V_{CE} = 3$ V, $I_C = 7$ mA)의 특성을 갖는다. 위상잡음을 개선하기 위해 사용한 동축형 유전체 공진기의 상대 유전율은 88, 단면의 크기는 3×3 mm²를 갖고 loaded Q값

은 300이다. DC전원은 (5V, 6.9 mA)를 선택하였다. 기판은 0.38mm 두께의 Rogers사의 TMM3을 가지고 설계를 하였다. 발진기의 발진범위는 0~5V 제어 전압에 대해 처음 설계 목표인 1,745~1,755 MHz이고 출력전력은 전 발진 범위에서 5 dBm ± 0.2 dB이내로 제작되었다. 위상잡음은 HP-4352B 위상잡음측정기를 이용하여 측정하였고, 결과는 -114 dBc/Hz @10 kHz offset과 -132 dBc @100 kHz offset로 매우 우수하였다(그림 12).

BJT의 corner frequency = 5.6 kHz, Noise Figure

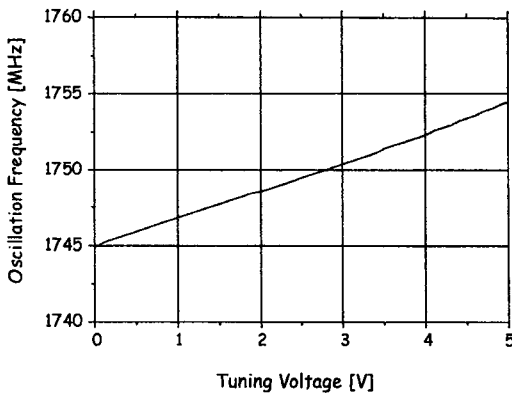


그림 11. 제어전압에 대한 발진주파수 변화($V_{cc}=5V$, $V_t = 0\sim 5V$)

Fig. 11. Oscillation frequencies versus tuning voltage ($V_{cc}=5V$, $V_t = 0\sim 5V$).

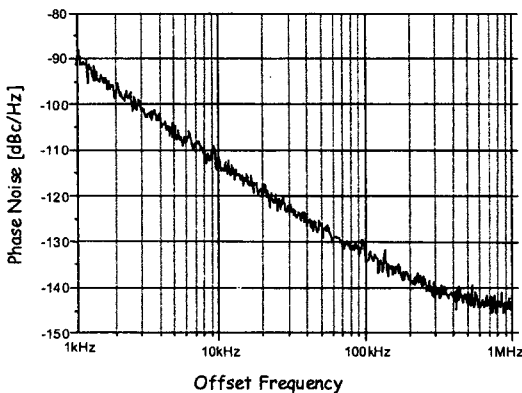


그림 12. 제작된 VCO의 위상잡음 특성(발진주파수 = 1,748 MHz)

Fig. 12. Measured phase Noise of the fabricated VCO($f_0 = 1,748$ MHz).

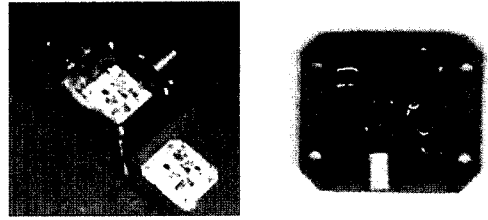


그림 13. 제작된 VCO의 실물사진

Fig. 13. Photograph of the fabricated VCO.

=1.4 dB, feedback되는 전력 =10.2 dBm ($|v_{be}|=0.725$), 발진기의 Loaded $Q=7.7$ 일 때 아래의 Leeson Model로 부터 계산된 위상잡음은 -103 dBc/Hz @10 kHz이다.

$$S_{\phi} = \left[1 + \left(\frac{f_0}{2f_m Q_L} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{f_{corner}}{f_m} \right) \left(\frac{FKT}{2P_s} \right) \quad (10)$$

여기서,

f_0 : oscillation frequency

f_c : corner frequency

f_m : offset frequency

F : large signal noise figure

P_s : power feedback into transistor

Q_L : loaded quality factor of oscillator

Leeson Model과 측정값과의 차이는 Leeson Model의 경우 발진기의 위상잡음을 예측하는데 회로의 Q_L 가 중요하지만 Q_L 를 명확하게 정의하고 구해내기가 어렵기 때문인 것으로 생각된다. 여기에서는 발진기의 unload Q 를 구하는데 다음의 식을 사용하였다.

$$Q_L = \frac{\pi f_0 d\phi}{360 df} \quad (11)$$

표 1은 제작한 VCO의 전기적인 성능표이다. 그림 13은 제작한 회로의 실물사진을 보여주고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 비선형 발진기의 설계기법 및 소자의 Q 값을 고려한 임피던스 구현방법을 이용하여

표 1. 제작된 VCO의 스펙 및 제작 특성

Table 1. Specification and measured performance.

Parameter	Specification	Measured performance
Supply Voltage [V]	5	5
Supply Current [mA]	15 Max	6.9
Control Voltage Range [V]	0~5	0~5
Operating Frequency Range [MHz]	1748±5	1748±5
Output Power [dBm]	5±2	5.2
Phase Noise at 100Hz [dBc/Hz]	-	
Phase Noise at 1kHz [dBc/Hz]	-85	-89
Phase Noise at 10kHz [dBc/Hz]	-108	-114
Phase Noise at 100kHz [dBc/Hz]	-130	-131
Phase Noise at 1MHz [dBc/Hz]	-133	-145
Harmonics [dBc]	-15 Typical	-15

Ku 대역 위성중계기용 LO의 핵심소자인 VCO를 설계하고 제작하였다. 발진기의 설계로는 저주파 잡음의 상향변환이 작은 능동부하곡선을 선택하여 저위상잡음을 갖는 설계 방법을 적용하였다. 논문의 설계기법은 Q값이 상대적으로 작아 이 영향을 고려해야 하는 MMIC형 발진기 등의 발진 전력과 위상잡음의 최적화에 이용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] K.-W. Yeom, "An investigation of the high-frequency limit of a miniaturized commercial voltage-controlled oscillator used in 900-MHz-band mobile communication handset," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-46, no. 8, pp.1165-1168, Aug., 1998.
- [2] Moon-Que Lee and Sangwook Nam, "An Improved Voltage Controlled Oscillator for Mobile Communication Systems," *Asia Pacific Microwave Conference Proceedings*, pp. 151-154, vol. 1., 1998.
- [3] Moon-Que Lee, Sangwook Nam, "Nonlinear design of low phase noise voltage controlled oscillator," *29th European Microwave Conference Digest*, vol. 2, pp. 384-387, Oct., 1999.
- [4] "1/f noise characteristics influencing phase noise," California Eastern Laboratories application note-an1026(www.cel.com).
- [5] R. J. Gilmore, and F. J. Rosenbaum, "An analytic approach to optimum oscillator design using S-parameters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-31, no. 8, pp. 633-639, Aug., 1983.
- [6] K. M. Johnson, "Large signal GaAs MESFET oscillator design," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, no. 3, pp. 217-227, Mar., 1979.
- [7] K. L. Kotzebue, "A technique for the design of microwave transistor oscillator," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, no. 7, pp. 719-721, July, 1984.
- [8] Moon-Que Lee, Seung-June Yi, Sangwook Nam, Youngwoo Kwon, Kyung-Whan Yeom, "High-Efficiency Harmonic Loaded Oscillator with Low Bias Using a Nonlinear Design Approach," *IEEE Trans. Microwave theory and Techniques*, vol. 47, no. 9, pp. 1670-1679, Sep., 1999.

이 문 규



1988~1992년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학사)
1992~1994년: 서울대학교 전자공학과(공학석사)
1994~1999년: 서울대학교 전기공학부(공학박사)
1994년~현재: 한국전자통신연구원 무선방송연구소

[주 관심분야] 마이크로파 / 밀리미터파 능동 (MMIC, Hybrid) 및 수동 부품 회로 설계, (국부)발진기의 비선형 최적 설계
E-mail : mqlee@hanmail.net

염 인 복



1990년: 한양대학교 전자공학과(공학사)
1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 위성 RF부품연구팀장 선임 연구원
1992년 9월~1995년 5월: 무궁화 위성 현장교육 참여(영국 Matra Ma rconi 사)

[주 관심분야] 위성통신중계기, MMIC 회로, 필터설계

류 근 관



1988년 3월~1992년 2월: 광운대학교 전자통신공학과(공학사)
1992년 3월~1994년 2월: 광운대학교 전자통신공학과(공학석사)
1994년 3월~2000년 2월: 광운대학교 전자통신공학과(공학박사)
2000년 3월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 안테나, EMI/EMC 등

이 성 팔

1978년: 서울대학교 전기공학과(공학사)
1980년~현재: 한국전자통신연구원, 위성통신시스템연구부 책임연구원
1986년: Polytechnic Institute od New York 전기전자공학과(공학석사)
1990년: Polytechnic Institute od New York 전기전자공학과(공학박사)

[주 관심분야] 위성통신시스템