

위상잡음을 개선한 Ka-band 위성 중계기용 Engineering Model 발진기의 설계

Design of Engineering Model Oscillator with Low Phase Noise for Ka-band Satellite Transponder

류근관 · 이문규 · 염인복 · 이성팔

Keun-Kwan Ryu · Moon-Que Lee · In-Bok Yom · Seong-Pal Lee

요 약

본 논문에서는 Ka-band 위성 중계기용 국부 발진기에 사용하게 될 전압제어 발진기의 EM(Engineering Model)을 비선형 방법으로 설계하였다. 전압제어 발진기의 위상잡음을 개선하기 위하여 공진기로 사용되는 유전체 공진기와 결합하는 마이크로스트립 라인을 high impedance inverter로 구현함으로써 공진회로의 quality factor를 우수하게 유지하여 능동소자에 전달되도록 하였다. 개발된 전압제어 발진기는 0~12 V의 제어전압으로 9.7965~9.8032 GHz의 튜닝범위를 가지며 공급전력은 8 V, 17 mA를 필요로 한다. 제작된 전압제어 발진기의 위상잡음은 -96.51 dBc/Hz @10 KHz와 -116.5 dBc/Hz @100 KHz의 특성을 나타내며 출력전력은 7.33 dBm을 얻었다.

Abstract

The EM(Engineering Model) VCO(Voltage Controlled Oscillator) is nonlinear designed for LO(Local Oscillator) of Ka-band satellite transponder. The microstripline coupled with dielectric resonator is implemented as a high impedance inverter to improve the phase noise, and the quality factor of resonant circuit can be transferred to active device with the enhanced loaded quality factor. The developed VCO has the oscillating tuning range of 9.7965~9.8032 GHz for the control voltage range of 0~12 V. This VCO requires the DC power of 8 V and 17 mA. The phase noise characteristics are -96.51 dBc/Hz @10 KHz and -116.5 dBc/Hz @100 KHz, respectively. And, the output power of 7.33 dBm is measured.

Key words : VCO, phase noise, transponder, Ka-band.

I. 서 론

1990년대 국내 통신방송위성 1, 2, 3호의 성공적인 발사와 상업용 무선통신의 발달과 더불어 마이크로웨이브 transceiver의 기술적 발달을 가져왔으며 그 사용 주파수 또한 S-band(2~4 GHz)에서 Ku-band (12~14 GHz) 및 Ka-band(26.5~40 GHz)로 확

대되고 있다. 이러한 통신시스템에 사용되는 국부발진기는 전체 시스템의 안정성에 가장 큰 영향을 미치므로 매우 중요한 소자로서 여겨지고 있고 동적 영역(operating range) 및 위상잡음 특성이 주요 관건이 된다. 뿐만 아니라 전체 시스템의 소형화 및 가격 절감에 국부발진기의 영향력이 크므로 이에 대한 연구가 주를 이루어 진행되고 있다^[1].

한국전자통신연구원 통신위성개발센터(Communications Satellite Development Center, ETRI)

· 논문 번호 : 20011103-12S

· 수정완료일자 : 2001년 12월 3일

통신방송위성의 개발에 대한 세계의 선진국들은 위성통신의 중요성을 인식하고 증계기의 핵심부품 및 상용 시스템을 활발히 개발하고 있으나 국내의 경우 위성증계기의 RF핵심부품 개발이 절실히 요구된다. Ka-band 위성증계기는 30.6~31.0 GHz의 입력주파수를 9.8 GHz의 LO를 이용하여 20.8~21.2 GHz의 주파수 대역으로 하향 변환하는 증계 시스템이다. 증계기의 이득은 55 dB이고 잡음지수는 2.3 dB이다.

Ka-band 위성 증계기용 LO에 사용되는 VCO는 LO의 위상잡음과 밀접한 관계가 있는 핵심 소자이다. 위성증계기 부품으로서 요구되는 VCO의 요구 사항으로는 우주환경에서 10년 이상의 동작을 보장하는 신뢰성과 매우 낮은 위상잡음이 중요하다. 이를 만족시키기 위해서는 우주환경에서 혹은 상업용으로서 철저히 검증된 VCO의 구조를 채택하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 출력전력과 저주파 잡음의 상향변환을 최소화하는 비선형 설계방법을 제시하고 이를 이용하여 Ka-band 위성증계기의 Engineering Model LO를 위한 VCO를 설계하였다.

II. VCO의 구조

위성부품의 신뢰성을 고려할 때 발진기의 구동 전압과 전류는 정격 전압, 전류보다 충분히 작아야 한다. 하지만 위상잡음은 일반적으로 구동전압에 비례하여 개선되기 때문에 구동전압과 위상잡음 성능 사이에는 trade-off 관계에 있다. 위성 증계기용 LO를 위한 구조로는 현재까지 나와있는 PLL chip을 사용하여 1~2 GHz 대역에서 phase locked시킨 후에 증폭기, 필터, 체배기 등을 거쳐 X-band의 source를 얻는 방법이 있다^[2]. 그러나 이러한 경우 여러 단의 증폭기를 사용함으로써 active device의 수를 증가시켜 신뢰성을 떨어뜨리는 원인이 될 수 있다. 다른 방법으로는 X-band의 VCO를 구현하고 SPD를 이용하여 위상고정하는 방식이 사용되기도 한다^{[3],[4]}.

본 논문에서는 후자의 방식을 이용하여 Ka-band 위성 증계기용 local oscillator를 개발하고자 한다. 따라서 설계하고자 하는 VCO의 중심주파수는 9.8 GHz이고 회로의 무게와 크기를 줄이기 위해 SMT

부품을 사용하였다. 또한 VCO의 위상잡음을 개선하기 위해 $TE_{01\delta}$ mode의 유전체 공진기를 사용하였다. 유전체 공진기를 이용한 발진기는 여러 가지 장점을 가지고 있지만, 특히 주파수 안정성 및 carrier 근처의 위상잡음이 우수하여 상업용으로도 널리 사용되고 있다.

그림 1은 본 논문에서는 설계하고자 하는 VCO의 구조를 보여주고 있다. VCO의 구조는 이미 상업용 및 위성용으로 널리 사용하여 그 구조가 검증된 회로인 직렬 케환형 발진기를 채택하였으며 이는 부하에 따른 발진 주파수의 변동이 적으며 회로가 간단하여 구현하기에 적합한 장점을 가지고 있다. X-band 발진기를 구현하기 위한 능동소자로는 BJT, MESFET 등을 사용할 수 있으며, BJT의 경우 career 근처의 위상잡음은 우수하나 DC전력소모가 크고 출력전력이 작아서 위성용으로는 부적당하다. 이에 반해 GaAs FET의 경우 낮은 DC전력소모, 온도에 대한 주파수 안정성, 선형적 튜닝 및 높은 RF 출력전력을 얻을 수 있어 위성용 소자로서 사용하기에 적당하다^[5].

초고주파 발진기의 위상잡음 특성에 영향을 주는 주요 요인으로는 반도체 소자의 flicker 잡음, 대신 호 조건에서의 잡음지수 및 공진기의 필터 특성 등 여러 가지 요소가 있다. 상향 변환된 flicker 잡음을 줄이는 방법으로는 낮은 잡음의 능동소자 선택, high Q 공진기 사용, 적당한 바이어스 point 설정 등 일반적인 사항 이외에 external feedback 회로 삽입

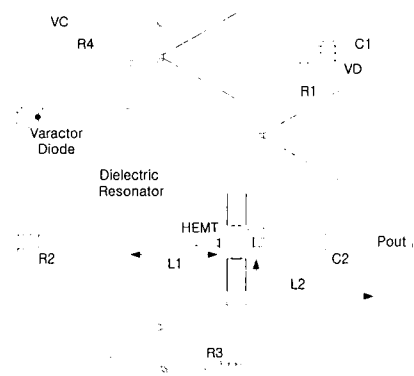


그림 1. VCO의 구조.
Fig. 1. The construction of VCO.

방식이나 feed forward amplifier 방식으로써 flicker 잡음을 상쇄 시키는 경우가 있다. 그러나 위성 탑재용 국부발진기의 경우 부피, 질량, 소모전력 등의 제한적 요소가 많기 때문에 이러한 방법을 사용하기에는 부적당하다. 본 논문에서는 유전체 공진기가 가지고 있는 Q값의 손실 없이 발진기의 능동소자에 전달될 수 있도록 공진기 필터의 Q값을 우수하게 유지하여 능동소자에 전달되는 기법을 이용하였다.

III. 발진기의 비선형 설계

일반적인 발진기에 주로 사용되는 유전체 공진기는 크기가 작고 온도 변화에 안정하며 높은 양호도(Q factor)를 갖는다. 본 논문에서는 muratas에서 제공하는 유전체 공진기 DRD065BC028B를 모델링하여 공진회로로 이용하였다. 이는 유전율이 27.9이고 unloaded Q가 7,000의 제원을 갖고 있다. 유전체 공진기가 마이크로스트립라인과 결합하였을 때 그림 2의 (a)와 같이 R, L, C 직렬 공진회로로 등가화할 수 있으며 대역저지필터로서 원하는 주파수를 충분히 되반사시켜야 한다. 대역저지필터의 반사손실과 반사선택도는 부하로 전달되는 에너지와 위상잡음 특성에 영향을 끼치며 공진기의 Q-factor와 직접적인 관계가 있다. 따라서 발진기의 선형설계뿐 아니라 출력과 위상잡음 등을 예측하는 비선형설계시 실제 사용되는 유전체 공진기의 정확한 모델링이 필요하다. 그림 2의 (a)와 같이 모델링한 공진회로의 설계결과 공진주파수인 9.8 GHz에서 약 -0.5 dB의 우수한 반사 선택도를 얻었다. 이 때 전송선로와의 결합계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_c = \frac{2\pi f_0 L_m^2 Q_u}{2Z_0 L_r} \quad (1)$$

여기서, f_0 는 resonant frequency, L_m 은 mutual inductance, L_r 은 resonant inductance, Q_u 는 unloaded quality factor, Z_0 는 characteristic impedance of transmission line이다. 그림 3은 공진기와 결합하는 마이크로스트립라인의 특성임피던스에 따른 Z_g 의 궤적을 시뮬레이션한 것이다. 특성임피던스 50 ohms의 마이크로스트립라인을 이용한 경우보다 특성임피던스 80 ohms의 마이크로스트립라인을 이용

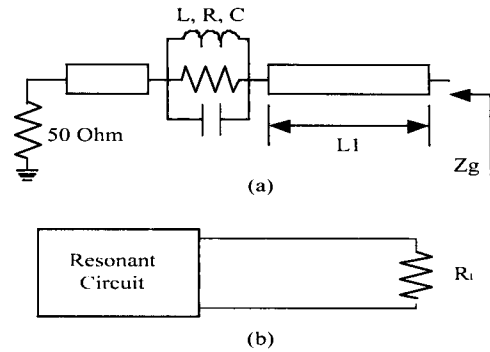


그림 2. (a) Microstrip 라인과 결합한 유전체 공진기의 등가회로, (b) 외부 부하와 연결된 공진회로.

Fig. 2. (a) The equivalent circuit of dielectric resonator coupled with microstripline, (b) The resonant circuit connected with load.

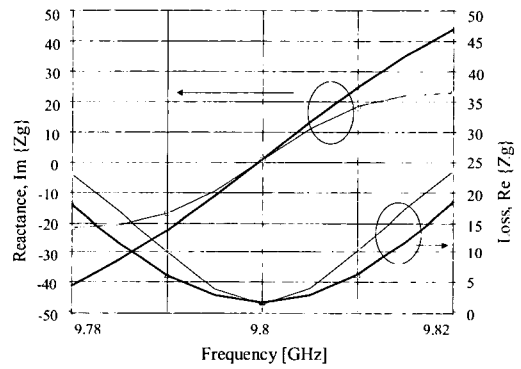


그림 3. 공진주파수 근처에서 Z_g 의 궤적.

Fig. 3. Z_g curves for around resonant frequency (Thin lines: 50 ohms microstripline coupling, Thick lines: 80 ohms microstripline coupling).

한 경우가 공진주파수 근처에서 reactance, $Im(Z_g)$ 성분 변화의 기울기가 급격하고 loss, $Re(Z_g)$ 성분이 작음을 알 수 있다. 이러한 현상은 그림 2의 (b)와 같이 공진회로가 능동소자를 포함한 부하와 series 연결되었을 때 external Q가 크게 되어 결과적으로 loaded Q를 크게 만들게 되고 loaded Q의 상승은 발진기의 위상잡음 특성이 개선됨을 의미한다^[5].

이와 같이 모델링된 유전체 공진기와 능동소자를 기반으로 CAD 프로그램인 Libra 6.1을 이용하여 먼저 사용하고자 하는 TMM3기판에 대한 전송선로의

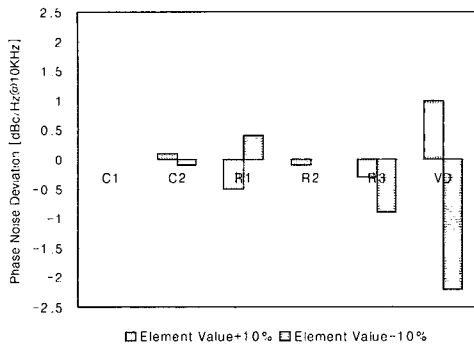


그림 4. Element 변화에 따른 위상잡음의 변화.
Fig. 4. Deviation of phase noise vs. tolerance of elements.

50 Ω 폭과 λ/4 길이 등을 최적화 하였다. 그림 1의 직렬케환형 구조에서 게이트와 공진기 사이의 거리 l1과 케환 요소인 개방 스테브 l2를 이용하여 설계 하였으며 최종적으로 부회로를 첨가하여 발진 가능성을 예측하였다. 이러한 선형설계를 바탕으로 HB (Harmonic Balance) 기법을 이용하여 발진기의 비선형 설계를 하였다. 또한 소자의 비선형 모델을 통해 출력, 고조파 특성, 정상상태에서의 주파수 변동 및 위상잡음 특성 등을 얻었다.

이와 같은 비선형 설계로 부터 중심주파수 9.8 GHz인 발진기는 8 V, 17 mA의 바이어스 조건하에서 11.0 dBm의 출력과 -19 dBc 이하의 고조파 억압 특성을 설계결과로서 얻었다. 그림 4는 회로에 사용되는 lumped element의 tolerance 및 바이어스 변화에 의한 위상잡음 특성의 변화를 예측한 것으로 lumped element의 값 및 바이어스 전압이 ±10 % 변화할 때 중심주파수로부터 10 KHz 떨어진 지점에서 최고 3.2 dBc/Hz의 위상잡음 변화를 나타내고 있다. 그림 4에서 보듯이 VD의 값이 작을 때 위상잡음이 향상됨을 알 수 있으나 전체 LO(Local Oscillator) 시스템에서 VCO의 전압, 전류 규격이 정해져 있으므로 이에 대한 위상잡음 변화를 예측 하였다.

IV. 제작 및 시험결과

앞서 기술한 방법을 이용하여 9.8 GHz의 위성 중

계기용 Engineering Model VCO를 유전율 3.27, 두께 15 mils의 TMM3 기판에 제작하였다. 설계에 사용된 능동소자인 HEMT는 fujitsu사에서 제공하는 FHX35X계열의 packaged device인 FHX35LG를 사용하여 EQM(Engineering Qualified Model) 또는 FM (Flight Model)제작시 up-screening이 가능하도록 하였다. 회로의 크기는 22 mm×22 mm이고 DC전원은 8 V, 17 mA를 필요로 한다. 위상잡음은 HP8564E spectrum analyzer를 이용하여 측정하였으며 그림 5, 6과 같이 -96.51 dBc/Hz @10 KHz 및 -116.5 dBc/Hz @ 100 KHz로 매우 우수한 특성을 얻었다. 이는 기존의 상용품에 비해 매우 우수한 특성을 나타내는 것이며 위상잡음 측정기를 이용하여 측정할 경우 3~5 dBc/Hz 정도 더 우수하게 나타날 것으로 생각된다. VCO의 튜닝범위는 제어전압 0~12 V에서 9.7965~9.8032 GHz이고 발진범위에서의 출력전력은 7.33 dBm± 0.7 dB의 평탄도 특성을 얻었으며 이를 그림 7에 나타내었다. 표 1은 제작된 VCO의 전기적 성능 및 compliance를 나타내며 그림 8은 제작된 VCO의 실물사진을 보여주고 있다. GaAs HEMT를 이용하여 중심주파수 9.8 GHz, 출력전력 Pout=10 dBm, 소자의 noise figure F=1.2 dB, corner frequency Fc=100 KHz, Loaded QL=50일 때, 다음의 식(2)와 같이 Lesson's equation을 이용하여 계산할 경우 위상잡음은 -95.4 dBc/Hz @10 KHz와 -122.8 dBc/Hz @100 KHz을 얻을 수 있다. 이는 본 논문에서 제작된 VCO의 위상잡음 특성과 거의 일치함을 알 수 있다.

$$S_{\phi}(f_m) = \left[1 + \left(\frac{f_0}{2 \cdot f_m \cdot Q_L} \right)^2 \right] \cdot \left(1 + \frac{f_c}{f_m} \right) \cdot \left(\frac{F \cdot KT}{2 \cdot P_s} \right) \quad (2)$$

여기서, $Q_L = \frac{\pi f_0 d \Phi}{360 df}$ 이고

f_0 : oscillation frequency

f_c : corner frequency

f_m : offset frequency

F : large signal noise figure

P_s : power feedback into FET

Q_L : loaded quality factor of oscillator이다.

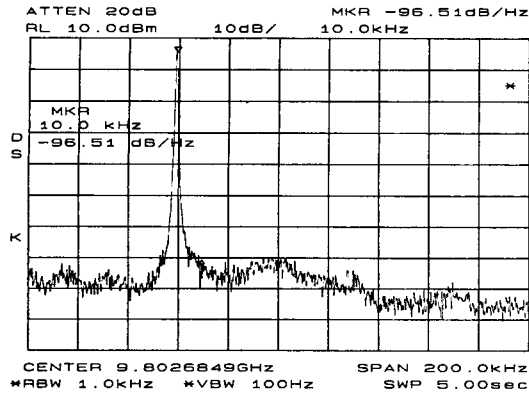


그림 5. 위상잡음 특성(@10 KHz).
Fig. 5. Phase noise characteristics(@10 KHz).

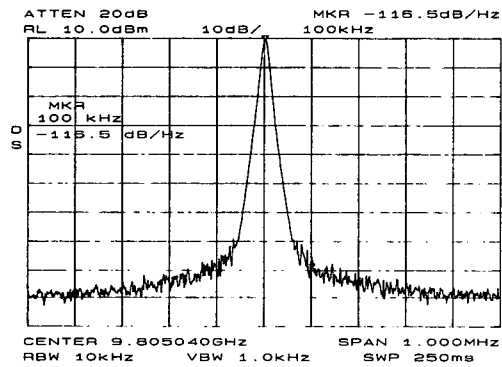


그림 6. 위상잡음 특성(@100 KHz).
Fig. 6. Phase noise characteristics(@100 KHz).

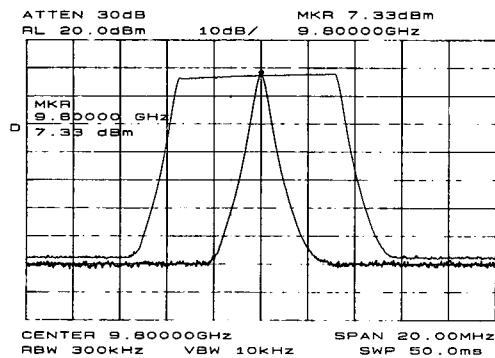


그림 7. VCO의 주파수 동조.
Fig. 7. Frequency tuning of VCO.

표 1. 개발된 VCO의 전기적 성능.

Table 1. Electrical performance of VCO.

Performance	Spec.	Meas.	Comp.
Supply Voltage [V]	8	8	C
Supply Current [mA]	20	17	C
Output Power [dBm]	7.0 +/-1.0	7.33 +/-0.7	C
Control Voltage [V]	0 ~ 12	0 ~ 12	C
Operating Frequency Range [GHz]	9.798 ~ 9.802	9.7965 ~ 9.8032	C
Phase Noise at 100Hz [dBc/Hz]	-63	-	-
Phase Noise at 1KHz [dBc/Hz]	-83	-	-
Phase Noise at 10KHz [dBc/Hz]	-93	-96.51	C
Phase Noise at 100KHz [dBc/Hz]	-95	-116.5	C
Harmonic @ 2fo [dBc]	-15 Typical	<-15	C

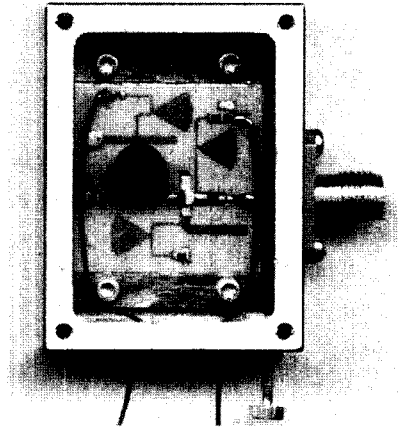


그림 8. Ka-band 위성중계기용 VCO의 EM모델.
Fig. 8. EM VCO for Ka-band satellite transponder.

V. 결 론

본 논문에서는 Ka-band 위성 중계기용 LO(Local Oscillator)를 위한 VCO를 발진기의 비선형 설계기법을 이용하여 개발하였다. 고안정의 발진기를 위해 유전체 공진기의 Q값이 능동소자에 그대로 전달되도록 high impedance line을 이용하여 기존의 설계 방식에 따른 위상잡음에 비해 약 10 dB 정도의 위상잡음 개선 효과를 얻었다. 개발된 VCO는 PLL 구동회로와 연동하여 Ka-band 위성 중계기용 고안정

의 위상고정 발진기에 사용할 수 있겠으며 본 논문의 VCO 설계기법은 다양한 통신시스템의 신호원 설계에 응용할 수 있겠다.

참 고 문 헌

- [1] 이문규, 류근관, 염인복, 이성팔, "낮은 위상잡음을 갖는 위성중계기용 Engineering Model 발진기의 비선형 설계," 한국전자과학회논문집, 제12권 4호, pp.622-629, 2001.
- [2] E. A. Craig, and J. E. Mulholland, "Stable X-band local oscillator", *Applied Microwave and Wireless*, Summer, pp.65-76, 1995.
- [3] N. R. Mysoor, "An electronically tuned, stable 8415MHz dielectric resonator FET oscillator for space applications," *Aerospace Applications Conference Digest*, pp.147-156, 1990.
- [4] B. Hitch, and T. Holden, "Phase locked DRO/CRO for space use", *Proceedings of the 1997 IEEE Frequency Control International Symposium*, pp.1015-1023, 1997.
- [5] M. Q. Lee, K. K. Ryu, and I. B. Yom, "Phase noise reduction of microwave HEMT oscillators using a dielectric resonator coupled by a high impedance inverter", *ETRI Journal*, vol. 23, no. 4, pp.199-201, 2001.

류 근 관



1992년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)
 1994년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2000년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 (공학박사)
 2000년 3월~현재 : 한국전자통신

연구원 통신위성개발센터 선임연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로(MMIC, Hybrid) 설계, 안테나 설계

염 인 복

1990년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1990년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원, 위성RF부품연구팀장
 1992년 9월~1995년 5월 : 무궁화 위성 현장교육 참여 (영국 Matra Marconi사)
 [주 관심분야] 위성통신중계기, MMIC회로, 필터 설계

이 문 규



1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
 1999년 2월~현재 : 한국전자통신

연구원 통신위성개발센터 선임연구원

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

이 성 팔

1978년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1980년~현재: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 책임연구원
 1986년 : Polytecnic Institute of New York 전기전자공학과 (공학석사)
 1990년: Polytecnic Institute of New York 전기전자공학과 (공학박사)
 [주 관심분야] 위성통신시스템