

위상잡음을 개선한 Ka-band 위성 중계기용 Engineering Model 발진기의 설계

°류근관, 이문규, 염인복, 이성팔

한국전자통신연구원 위성RF부품연구팀, 대전 유성구 가정동 161번지

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

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

ETRI(Electronics and Telecommunications Research Institute), E-mail: kkryu@etri.re.kr

ABSTRACT

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 0~12V의 제어전압으로 9.7965~9.8032GHz의 발진범위를 갖으며 공급전력은 8V, 17mA를 필요로 한다. 제작된 전압제어 발진기의 위상잡음은 -96.51dBc/Hz @10KHz와 -116.5dBc/Hz @100KHz의 특성을 나타내며 출력전력은 7.33dBm을 얻었다.

I. 서론

1990년대 국내 통신방송위성 1, 2, 3호의 성공적인 발사와 상업용 무선통신의 발달과 더불어 마이크로웨이브 transceiver의 기술적 발달을 가져왔으며 그 사용 주파수 또한 S-band(2-4GHz)에서 Ku-band(12-14 GHz) 및 Ka-band(26.5-40GHz)로 확대되고 있다. 이러한 통신시스템에 사용되는 국부발진기는 전체 시스템의 안정성에 가장 큰 영향을 미치므로 매우 중요한 소자로서 여겨지고 있고 동적영역(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].

통신방송위성의 개발에 대해서 세계의 선진국들은 위성통신의 중요성을 인식하고 중계기의 핵심부품 및 상용 시스템을 활발히 개발하고 있으나 국내의 경우 위성중계기의 RF핵심부품의 개발이 절실히 요구된다. Ka-band 위성중계기는 30.6~31.0GHz의 입력주파수를 9.8GHz의 LO를 이용하여 20.8~21.2 GHz의 주파수 대역으로 하향 변환하여

중계하는 시스템이다. 중계기의 이득은 55dB이고 잡음지수는 2.3dB이다.

Ka-band 위성 중계기용 LO에 사용되는 VCO는 LO의 위상잡음과 밀접한 관계가 있는 핵심 소자이다. 위성중계기 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 최적화하는 비선형 설계방법을 제시하고 이를 이용하여 Ka-band 위성중계기의 Engineering Model LO를 위한 VCO를 설계하였다.

II. VCO의 구조

위성부품의 신뢰성을 고려할 때 발진기의 구동 전압과 전류는 정격 전압전류보다 충분히 작아야 한다. 하지만 위상잡음은 일반적으로 구동전압에 비례하여 개선되기 때문에 구동전압과 위상잡음 성능사이에는 trade-off 관계에 있다. 위성 중계기용 LO를 위한 구

조로는 현재까지 나와있는 PLL chip을 사용하여 1~2GHz 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 방식으로는 X-band의 VCO를 구현하고 SPD를 이용하여 위상고정방식이 사용되기도 한다[3,4].

본 논문에서는 후자의 방식을 사용하여 Ka-band 위성 중계기용 local oscillator를 개발하고자 한다. 따라서 설계하고자 하는 VCO의 중심주파수는 9.8GHz이고 회로의 무게와 크기를 줄이기 위해 SMT 부품을 사용하였다. 또한 VCO의 위상잡음을 개선하기 위해 TE_{018} 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 설계하려는 VCO의 구조를 보여주고 있다. VCO의 구조는 이미 상업용 및 위성용으로 널리 사용하여 그 구조가 검증된 회로인 직렬 레한형 발진기를 채택하였으며 이는 부하에 따른 발진 주파수의 변동이 적으며 회로 간단하여 구현하기에 적당한 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[3].

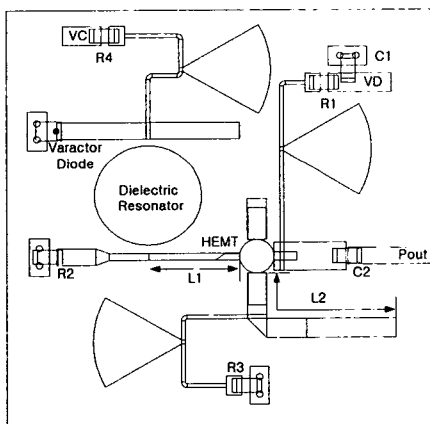


그림 1. VCO의 구조

초고주파 발진기의 위상잡음 특성에 영향을 주는 주요 요인으로는 반도체 소자의 flicker 잡음, 대신호 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 삽입방식이나 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 murata사에서 제공하는 유전체 공진기 DRD065BC028B를 모델링하여 공진회로로 이용하였다. 이는 유전율이 27.9이고 unloaded Q가 7,000의 제원을 갖고 있다. 유전체 공진기가 마이크로 스트립라인과 결합하였을 때 그림 2와 같이 R, L, C 직렬 공진회로로 등가화할 수 있으며 대역저지필터로서 원하는 주파수를 충분히 되반사 시켜야 한다. 대역저지필터의 반사손실과 반사선택도는 부하로 전달되는 에너지와 위상잡음 특성에 영향을 끼치며 공진기의 Q-factor와 직접적인 관계가 있다. 따라서 발진기의 선형설계 뿐 아니라 출력과 위상잡음 등을 예측하는 비선형설계 시 실제 사용되는 유전체 공진기의 정확한 모델링이 필요하다. 그림 2는 마이크로스트립선로와 결합한 유전체 공진기를 나타내고 있으며 설계결과 공진주파수인 9.8GHz에서 약 -0.5dB의 우수한 반사선택도를 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. 따라서 유전체 공진기와 결합하는 마이크로스트립 라인의 폭이 좁을수록 특성임피던스가 커지지만 이에 따른 상호인덕턴스가 커지게 되어 전체적인 결합계수가 커져 강한 결합이 발생하게 된다. 이러한 인덕턴스의 상승은 공진회로가 능동소자를 포함한 부하와 series 연결되었을 때 external Q를 크게 하여 결과적으로 loaded Q를 크게 만든다. 이러한 loaded Q의 상승은 발진기의 위상잡음 특성의 개선에 직접적인 영

항을 주게 된다[5].

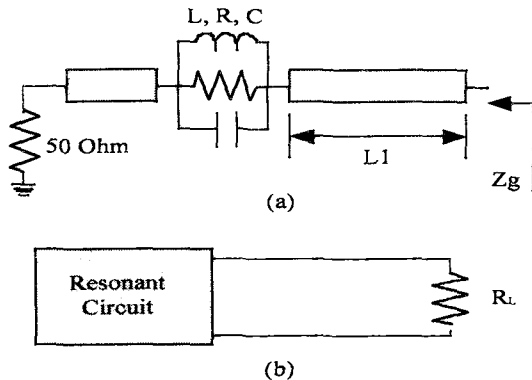


그림 2. (a) Microstrip 라인과 결합한 유전체 공진기의 등가회로, (b) 외부 부하와 연결된 공진회로

이와 같이 모델링된 유전체 공진기와 능동소자를 기반으로 CAD 프로그램인 Libra 6.1을 이용하여 먼저 사용하고자 하는 TMM3기판에 대한 전송선로의 50Ω 폭과 λ/4 길이 등을 최적화 하였다. 그림 1의 직렬케환형 구조에서 게이트와 공진기 사이의 거리 l1과 제한 요소인 개방 스텐드 l2를 이용하여 설계하였으며 최종적으로 부회로를 첨가하여 발진가능성을 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 9.8GHz인 발진기는 8V, 17mA의 바이어스 조건에서 11.0dBm의 출력과 -19 dBc이하의 고조파 억압 특성을 설계결과로서 얻었다. 그림 3은 회로에 사용되는 lumped element의 tolerance 및 바이어스 변화에 의한 위상잡음 특성의 변화를 본 것으로 lumped element의 값 및 바이어스 전압이 ±10% 변화할 때 중심주파수로부터 10KHz 떨어진 지점에서 최고 3.2dBc/Hz의 위상잡음 변화를 나타내고 있다.

IV. 제작 및 시험결과

앞서 기술한 방법을 이용하여 9.8GHz의 위성 중계기용 Engineering Model VCO를 유전율 3.27, 두께 15mils의 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 22mm X 22mm이고 DC 전원은 8V, 17mA를 필요로 한다. 위상잡음은 HP8564E spectrum analyzer를 이용하여 측정하였

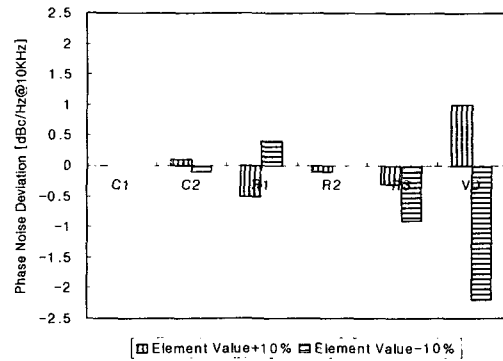


그림 3. Element 변화에 따른 위상잡음의 변화

으며 그림 4, 5와 같이 -96.51dBc/Hz @10KHz 및 -116.5dBc/Hz @100KHz로 매우 우수한 특성을 얻었다. 이는 기존의 상용품에 비해 매우 우수한 특성을 나타내는 것이며 위상잡음 측정기를 이용하여 측정할 경우 3~5dBc/Hz정도 더 우수하게 나타날 것으로 생각된다. VCO의 발진범위는 제어전압 0~12V에서 9.7965~9.8032GHz이고 발진범위에서의 출력전력은 7.33dBm±0.7dB의 평탄도 특성을 얻었으며 이를 그림 6에 나타내었다. 표1은 제작된 VCO의 전기적 성능을 나타내며 그림 7은 실물사진을 보여주고 있다. GaAs HEMT를 이용하여 중심주파수 9.8GHz, 출력전력 Pout=10dBm, 소자의 noise figure F=1.2dB, corner frequency Fc=100KHz, Loaded QL=50일 때, 다음의 식(2)와 같이 Lesson's equation을 이용하여 계산할 경우 위상잡음은 -95.4dBc/Hz @10KHz와 -122.8dBc/Hz @100KHz를 얻을 수 있다.

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

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

f_0 : oscillation frequency

f_c : corner frequency

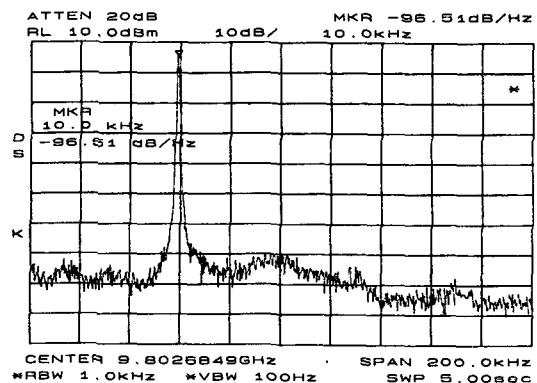


그림 4. 위상잡음 특성(@10KHz)

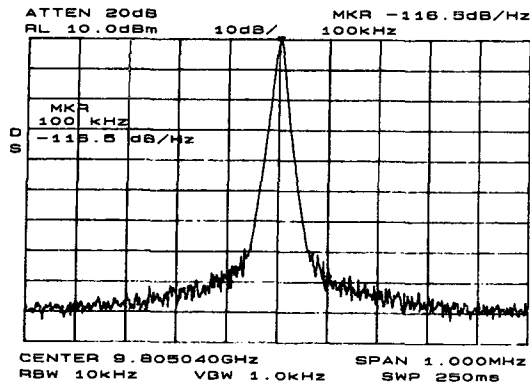


그림 5. 위상잡음 특성(@100KHz)

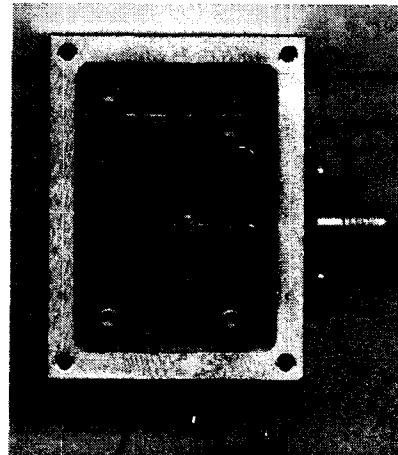


그림 7. Ka-band 위성중계기용 VCO의 EM모델

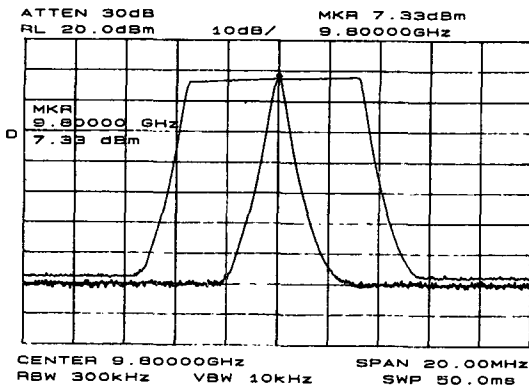


그림 6. VCO의 주파수 동조

표 1. 개발된 VCO의 전기적 성능

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

f_m : offset frequency

F : large signal noise figure

P_s : power feedback into FET

Q_L : loaded quality factor of oscillator 이다.

V. 결 론

본 논문에서는 Ka-band 위성 중계기용 Local Oscillator를 위한 VCO를 발진기의 비선형 설계기법을 이용하여 개발하였다. 고안정의 발진기를 위해 유전체 공진기의 Q값이 능동소자에 그대로 전달되도록 high impedance line을 이용한 강한 결합을 이용하여 기존의 설계방식에 따른 위상잡음에 비해 약 10dB 정도의 위상잡음 개선 효과를 얻었다. 개발된 VCO는 PLL 구동회로와 연계하여 Ka-band 위성 중계기용 고안정의 위상고정 발진기에 이용할 수 있겠다.

참고문헌

- [1] 이문규, 류근관, 염인복, 이성팔, "낮은 위상잡음을 갖는 위성중계기용 Engineering Model 발진기의 비선형 설계," 한국전자파학회논문집, 제12권 4호, pp.622-629, 2001.
- [2] Craig, E.A. and Mulholland, J.E., "Stable X-band local oscillator," *Applied Microwave and Wireless*, Summer, pp.65-76, 1995.
- [3] Mysoor, N.R., "An electronically tuned, stable 8415MHz dielectric resonator FET oscillator for space applications," *Aerospace Applications Conference Digest*, pp.147-156, 1990.
- [4] Hitch, B. and Holden, T., "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, 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, Dec. 2001.