

Ka-band 위성 증계기용 저위상잡음 국부발진기의 설계 및 제작

Design of Local 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 증계기용 국부발진기의 EM(Engineering Model)을 설계 및 제작하였다. 루프 대역 밖의 위상잡음을 개선하기 위해서 고임피던스 변환기를 이용한 낮은 위상잡음의 전압제어 발진기를 설계하고 샘플링위상비교기(Sampling Phase Detector)를 사용하여 전압제어 발진기를 고안정의 OCXO(Oven Controlled Crystal Oscillator)에 위상 고정시킴으로써 루프 대역 내의 위상잡음을 개선하였다. 개발된 국부발진기는 43.83 dBc 이상의 고조파 억압특성을 가지고 있으며 공급전력은 15 V, 160 mA를 필요로 한다. 위상잡음은 $-102.5 \text{ dBc/Hz @} 10 \text{ KHz}$ 와 $-104.0 \text{ dBc/Hz @} 100 \text{ KHz}$ 의 특성을 나타내며 출력전력은 $-20 \sim +70^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 $13.50 \text{ dBm} \pm 0.33 \text{ dB}$ 의 특성을 얻었다.

Abstract

The EM(Engineering Model) LO(Local Oscillator) is designed for Ka-band satellite transponder. The VCO(Voltage Controlled Oscillator) is implemented using a high impedance inverter coupled with dielectric resonator to improve the phase noise performance out of the loop bandwidth. The phase of VCO is locked to that of a stable OCXO(Oven Controlled Crystal Oscillator) by using a SPD(Sampling Phase detector) to improve phase noise performance in the loop bandwidth. This LO exhibits the harmonic rejection characteristics above 43.83 dBc and requires 15 V and 160 mA. The phase noise characteristics are performed as -102.5 dBc/Hz at 10 KHz offset frequency and -104.0 dBc/Hz at 100 KHz offset frequency, respectively, with the output power of $13.50 \text{ dBm} \pm 0.33 \text{ dB}$ over the temperature range of $-20 \sim +70^\circ\text{C}$.

Key words : LO, Phase Noise, Ka-band Transponder

I. 서 론

최근 위성통신 및 상업용 무선통신의 발달에 힘입어 마이크로웨이브 송수신기의 기술적 발전을 가져왔으며 그 사용 주파수 또한 S-band(2~4 GHz)에서 Ku-band(12~14 GHz) 및 Ka-band(26.5~40 GHz)

로 확대되고 있다. 이러한 통신시스템에 사용되는 국부발진기는 전체 시스템의 안정성에 가장 큰 영향을 미치므로 매우 중요한 RF부품으로 여겨지고 있고 주파수 안정성 및 위상잡음 특성이 주요 관건이 된다. 뿐만 아니라 전체 시스템의 소형화 및 가격 절감에 국부발진기의 영향력이 크므로 이에 대

한국전자통신연구원 통신위성개발센터(Communications Satellite Development Center, ETRI)

· 논문 번호 : 20020226-026

· 수정완료일자 : 2002년 4월 15일

한 연구가 주를 이루어 진행되고 있다^[1].

통신방송위성의 개발에 대한 세계의 선진국들은 위성통신의 중요성을 인식하고 중계기의 핵심부품 및 상용 시스템을 활발히 개발하고 있으나 국내의 경우 위성중계기의 RF핵심부품 개발이 절실히 요구된다. Ka-band 위성 중계기는 30.6~31.0 GHz의 입력주파수를 9.8 GHz의 국부발진기를 이용하여 20.8~21.2 GHz의 주파수 대역으로 하향 변환하는 중계 시스템이다. 중계기의 이득은 55 dB이고 잡음 지수는 2.3 dB가 요구된다.

위성중계기 부품으로서 요구되는 국부발진기의 요구사항으로는 우주환경에서 10년 이상의 동작을 보장하는 신뢰성과 매우 낮은 위상잡음이 중요하다. 이를 만족시키기 위해서는 우주환경에서 혹은 상업용으로서 철저히 검증된 전압제어 발진기 및 위상 고정 발진기의 구조를 채택하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 출력전력과 저주파 잡음의 상향변환을 최적화하는 전압제어 발진기의 비선형 설계방법을 제시하고 이를 이용하여 Ka-band 위성 중계기의 EM 국부발진기를 설계 및 제작하였다.

II. 위상고정 발진기의 구조

위성중계기 및 무선통신용 국부발진기를 위한 구조로는 현재까지 상용화된 PLL 칩을 사용하여 1~2 GHz 대역에서 위상 고정시킨 후에 체배기, 증폭기, 필터 등을 거쳐 X-band의 신호원을 얻는 방법이 있다^{[2][3]}. 그러나 이러한 경우 여러 단의 증폭기 및 체배기를 사용해야 하므로 능동소자의 수를 증가시켜 신뢰성을 떨어뜨리는 원인이 될 수 있다. 뿐만 아니라 증폭 및 체배시 발생하는 고조파 성분을 제거하기 위해서 필터를 여러 단 사용해야 하므로 국부발진기의 부피 및 무게를 증가시키게 된다. 또 다른 방법으로는 X-band의 전압제어 발진기를 구현하고 샘플링위상비교기를 이용하여 위상고정하는 방식이 사용되기도 한다^{[4]~[6]}.

본 논문에서는 후자의 방식을 이용하여 그림 1과 같이 Ka-band 위성 중계기용 국부발진기를 개발하고자 한다. 국부발진기는 전압제어 발진기, 완충증폭기, 저역통과필터, 방향성 결합기 등의 RF 부분과 감쇠기, UHF대역 증폭기, 샘플링위상비교기, 루프

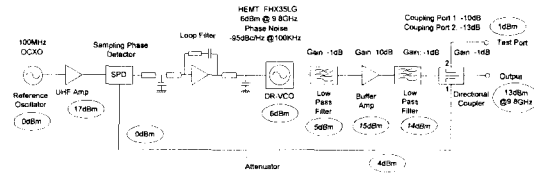


그림 1. 국부 발진기의 구성도

Fig. 1. The block diagram of LO.

필터, 바이어스회로 등의 위상고정회로 부분으로 구성되어 있다. 그림 1에서 각각의 부회로에 대한 이득을 표시하였으며 기준주파수는 100 MHz를 이용하고 RF 출력단자에서 13 dBm의 출력과 test단자에서 1 dBm의 출력을 얻을 수 있도록 구성하였다.

III. 전압제어 발진기의 비선형 설계

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 취사선택 관계에 있다. 그림 1과 같은 국부발진기의 구성도에서 설계하고자 하는 전압제어 발진기의 중심주파수는 9.8 GHz이고 회로의 무게와 크기를 줄이기 위해 SMT부품을 사용하였다. 또한 전압제어 발진기의 위상잡음을 개선하기 위해 $TE_{01\delta}$ mode의 유전체 공진기를 사용하였으며 murata사에서 제공하는 유전체 공진기 DRD065 BC-028B를 모델링하여 공진회로로 이용하였다. 이는 유전율이 27.9이고 Qu가 7,000의 제원을 갖고 있다. 그림 2는 전압제어 발진기의 구조를 보여주고 있으며 이미 상업용 및 위성용으로 널리 사용하여 그 구조가 검증된 회로인 직렬 케환형 발진기를 채택하였다. 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 캐리어 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 소자

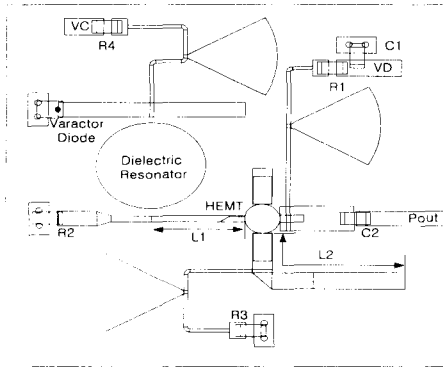


그림 2. 전압제어 발진기의 구조
Fig. 2. The structure of VCO.

로서 사용하기에 적당하다^[4].

초고주파 발진기의 위상잡음 특성에 영향을 주는 주요 요인으로는 반도체 소자의 플리커 잡음, 대신 호 조건에서의 잡음지수 및 공진기의 필터 특성 등 여러 가지 요소가 있다. 상향 변환된 플리커 잡음을 줄이는 방법으로는 낮은 잡음의 능동소자 선택, 높은 Q 공진기 사용, 적당한 바이어스 설정 등 일반적인 사항 이외에 외부 케환회로 삽입방식이나 feed forward amplifier 방식으로써 플리커 잡음을 상쇄시키는 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 Q 값을 손실없이 발진기의 능동소자에 전달될 수 있도록 공진기 필터의 Q값을 우수하게 유지하는 기법을 이용하였다.

유전체 공진기가 마이크로스트립라인과 결합하였을 때 그림 3과 같이 R, L, C 직렬 공진회로로 등가화할 수 있으며 대역저지필터로서 원하는 주파수를 충분히 되반사시켜야 한다. 대역저지필터의 반사 손실과 반사선택도는 부하로 전달되는 에너지와 위상잡음 특성에 영향을 끼치며 공진기의 Q와 직접적인 관계가 있다. 따라서 발진기의 선형설계 뿐 아니라 출력과 위상잡음 등을 예측하는 비선형설계시 실제 사용되는 유전체 공진기의 정확한 모델링이 필요하다. 그림 3과 같이 모델링한 공진회로의 설계 결과 공진주파수인 9.8 GHz에서 약 -0.5 dB의 우수한 반사선택도를 얻었다.

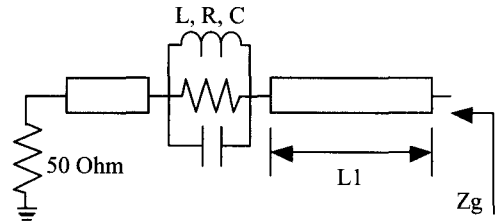


그림 3. 마이크로스트립라인과 결합한 유전체 공진기의 등가회로

Fig. 3. The equivalent circuit of dielectric resonator coupled with microstripline.

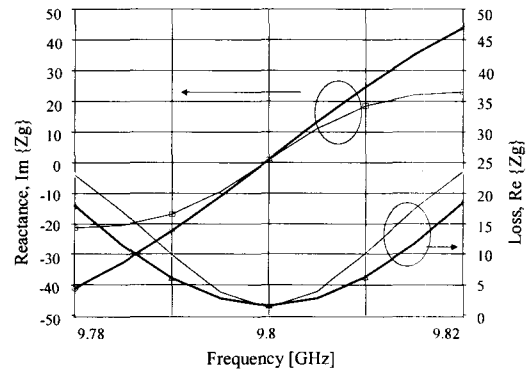


그림 4. 공진주파수 근처에서 Zg의 궤적

Fig. 4. Z_g curves for around resonant frequency (Thin lines: 50 Ω microstripline coupling, Thick lines: 80 Ω microstripline coupling).

그림 4는 공진기와 결합하는 마이크로스트립 라인의 특성임피던스에 따른 Z_g 의 궤적을 시뮬레이션한 결과이다. 일반적으로 사용되는 특성임피던스 50 Ω 인 마이크로스트립 라인을 이용한 경우보다 특성임피던스 80 Ω 의 마이크로스트립 라인을 이용한 경우가 공진주파수 근처에서 $\text{Im}(Z_g)$ 성분 변화의 기울기가 급격하고 $\text{Re}(Z_g)$ 성분이 작음을 알 수 있다. 이러한 현상은 공진회로가 능동소자를 포함한 부하와 직렬연결되었을 때 공진주파수 근처에서 Q_e 가 크게 되어 Q_L 를 크게 만들고 발진기의 위상잡음 특성이 개선됨을 의미한다^[7].

이와 같이 모델링된 유전체 공진회로와 능동소자를 기반으로 CAD 프로그램인 Libra 6.1을 이용하여 먼저 사용하고자 하는 TMM3기판에 대한 전송선로의 50 Ω 폭과 $\lambda/4$ 길이 등을 최적화 하였다. 그림 2

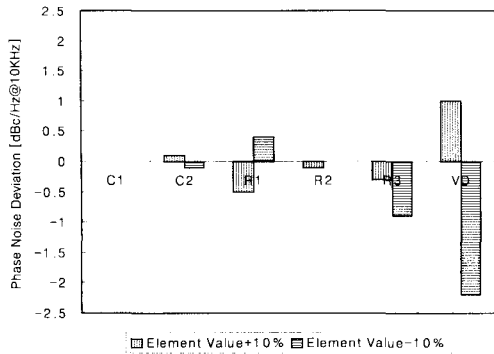


그림 5. 집중소자 및 바이어스 변화에 따른 위상잡음의 변화

Fig. 5. Deviation of phase noise vs. tolerance of elements.

의 직렬케환형 구조에서 게이트와 공진기 사이의 거리 L1과 케환 요소인 개방 스테브 L2를 이용하여 발진조건을 만족시켰으며 최종적으로 부회로를 첨가하여 발진가능성을 예측하였다.

이러한 선형설계를 바탕으로 HB(Harmonic Balance)기법을 이용하여 발진기의 비선형 설계를 하였다. 또한 소자의 비선형 모델을 통해 발진기의 출력, 고조파 특성, 정상상태에서의 주파수 변동 및 위상잡음 특성 등을 시뮬레이션하였다. 설계 결과 중심주파수 9.8 GHz인 발진기는 8 V, 17 mA의 바이어스 조건하에서 11.0 dBm의 출력과 -19 dBc이하의 고조파 억압 특성을 얻었다. 그림 5는 회로에 사용되는 집중소자의 오차 및 바이어스 변화에 의한 위상잡음 특성의 변화를 본 것으로 집중소자의 값 및 바이어스 전압이 ±10 % 변화할 때 중심주파수로부터 10 KHz 떨어진 지점에서 최대 3.2 dBc/Hz의 위상잡음 변화를 나타내고 있다. 그림 5에서 보듯이 VD의 값이 작을 때 위상잡음이 향상됨을 알 수 있으나 전체 국부발진기 시스템에서 전압제어 발진기의 전압, 전류 규격이 정해져 있으므로 이에 대한 위상잡음 변화만을 예측하였다.

IV. 위상고정 발진기의 설계

앞에서 서술한 전압제어 발진기를 포함하여 그림 1과 같은 구성으로 위상고정 발진기를 설계하였다.

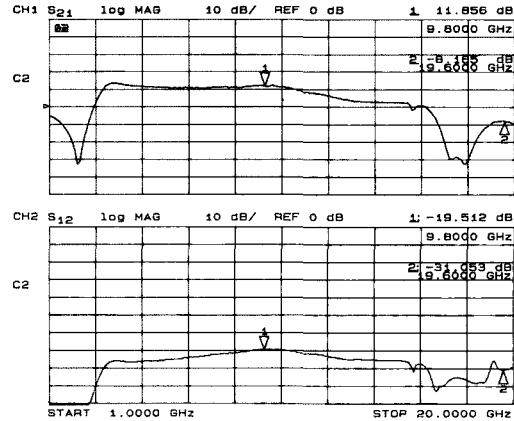


그림 6. 완충증폭기의 이득 및 분리도 특성

Fig. 6. S_{21} and S_{12} for buffer amplifier.

위상고정 발진기는 전압제어 발진기, 저역통과필터, 완충증폭기 및 방향성 결합기의 RF부분과 감쇠기, UHF대역 증폭기, 샘플링위상비교기, 루프필터 및 바이어스회로의 위상고정회로 부분으로 구성되어 있다. 전압제어 발진기의 출력 전력은 6 dBm 정도로서 13 dBm의 최종 출력을 내기 위해서 완충증폭기를 이용하였다. 완충증폭기는 Fujitsu사의 FHX35X 칩소자를 이용하였고 평형증폭기로 구성하여 단일 증폭기에 비해 1 dB를 3 dB 높였으며 입출력 반사계수 특성을 향상시켰다. 완충증폭기에 대한 이득 및 분리도 특성의 측정결과를 그림 6에 나타내었다.

하향수신변환기의 IF 주파수(20.8~21.2 GHz) 및 RF 주파수(30.6~31.0 GHz)에 인접해 있는 국부발진기의 2차 및 3차 고조파를 억제하기 위해서 저역통과필터를 전압제어 발진기와 완충증폭기 다음 단계에 각각 삽입하였다. 마이크로스트립라인을 이용한 저역통과필터는 저지대역에서 주기적으로 나타나는 불요특성으로 인해 3차 및 5차 고조파가 나타나게 되는데 이를 제거하기 위해서 3차 및 5차에 해당하는 $\lambda/4$ 의 trap회로를 저역통과필터의 양 단자에 삽입함으로써 전체 국부발진기의 고조파 성분을 억압하도록 하였다. 저역통과필터의 삽입손실 및 고조파 억압특성에 대한 측정 결과를 그림 7에 나타내었다.

또한 국부발진기의 최종출력 이외에 test 단자 출력 및 샘플링위상비교기 단자입력을 위해 3개의 결합라인을 이용한 방향성 결합기를 설계하였다. 방향

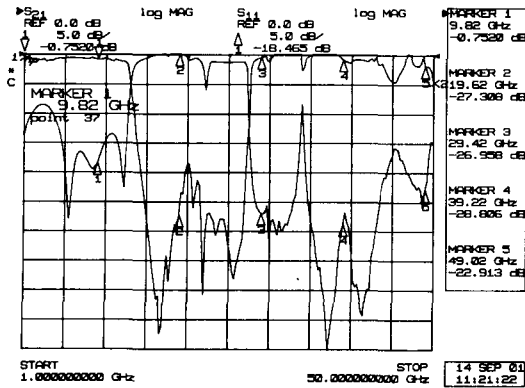


그림 7. 저역통과필터의 삽입손실 및 고조파 억압 특성

Fig. 7. Insertion loss and harmonics suppression for LPF.

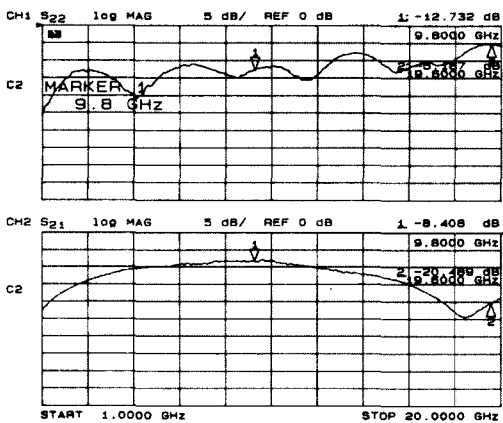


그림 8. 방향성 결합기의 반사계수 및 결합 특성

Fig. 8. Reflection coefficient and coupling ratio of SPD port for directional coupler.

성 결합기의 주라인은 국부발진기의 출력단자에 연결되어 있고 -10 dB의 결합계수에 의해 샘플링위상비교기의 RF단자와 -13 dB의 결합계수에 의해 test단자에 각각 연결하였다. 그림 8은 방향성 결합기에서 샘플링위상비교기의 RF 단자에 입력하기 위한 -10 dB 결합기의 측정결과를 나타낸 것이다.

한편 기준주파수는 CTI에서 제공하는 100 MHz의 OCXO를 이용하여 외부에서 인가하도록 하였으며 이를 UHF대역 증폭기에서 증폭하여 샘플링위상비교기의 기준주파수 입력 요구조건인 17 dBm 이

상이 되도록 하였다. 샘플링위상비교기는 두 개의 쇼트키 다이오드, 한 개의 SRD(Step Recovry Diode) 및 두 개의 캐패시터로 구성되어 있다. 기준주파수는 샘플링위상비교기 내의 SRD 및 두 개의 캐패시터를 통해 수많은 고조파를 발생하게 된다. 그 중 98 번째의 고조파 성분이 전압제어 발진기의 주파수 성분과 쇼트키 다이오드에서 위상 비교하게 된다. 쇼트키 다이오드에서의 위상 비교는 주파수 혼합기의 동작원리와 같으므로 $\cos(\theta_{VCO} - \theta_{Reference})$ 의 에러 전압과 $\cos(2\omega_0 t + \theta_{VCO} + \theta_{Reference})$ 의 2차 고조파 전압이 발생하게 된다. 루프필터는 능동 저역통과필터로서 2차 고조파 성분을 제거하고 에러전압만을 여과 및 증폭하여 전압제어 발진기의 제어전압으로 사용하게 되고 이러한 기능을 계속 반복하여 전압제어 발진기의 주파수가 고안정의 OCXO 주파수에 위상고정하게 된다. 이때 루프필터의 대역폭은 OP amp의 RC 시정수 값에 의해 결정되는데 본 논문에서는 위상중계기용 국부발진기의 성능 규격을 고려하여 루프필터의 대역폭을 60 KHz로 하였다. 또한 샘플링위상비교기 주변회로 구성시 sweep기능을 추가하여 국부발진기의 위상고정이 풀렸을 때 전압제어 발진기의 제어전압 단자에 sweep전압을 공급하여 OCXO의 위상에 고정되도록 하였다. 그 밖의 RF 회로 및 OP amp의 전원을 위해 레귤레이터 회로와 능동바이어스 회로를 구성하였다.

V. 제작 및 시험결과

앞서 기술한 방법을 이용하여 설계된 9.8 GHz의 전압제어 발진기를 유전율 3.27, 두께 15 mils의 TMM3 기판에 제작하였으며 완충증폭기, 저역통과필터 및 방향성 결합기를 15 mils의 알루미늄 기판에 제작하였다. 또한 샘플링위상비교기 주변회로 및 루프필터 회로를 FR4 기판에 제작하여 기구물 내에서 RF회로와 분리하여 집적화시켰다. 전압제어 발진기 설계에 사용된 능동소자인 HEMT는 Fujitsu사에서 제공하는 FHX35X계열의 FHX35LG를 사용하여 EQM(Engineering Qualified Model) 또는 FM (Flight Model) 제작시 up-screening이 가능하도록 하였으며 완충증폭기에 사용된 소자는 FHX35X를 그대로 사용하였다. 국부발진기의 전체 체적은 103

mm×73 mm×17 mm이고 무게는 144 g 이하이다. DC전원은 15, -8 V를 필요로 하며 160 mA이하의 전류를 소비하고 있어 전체 전력소모는 2.6 W 이하로서 상용제품으로 제공되는 것과 비교하면 소비전력이 매우 낮다.

개발된 국부발진기의 출력전력 및 위상잡음 특성은 HP8565E 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였으며 그림 9에 13.5 dBm의 출력전력을 나타내고 있어 설계규격 13 dBm±1 dB의 특성을 만족한다. 그림 10은 위상잡음 특성으로 -104 dBc/Hz@100 KHz의 특성을 얻었으며 실선이 설계규격을 나타내고 있어 전대역에서 설계규격을 만족하고 있음을 보여준다. 이는 기존의 상용품에 비해 매우 우수한 특성을 나타내는 것이며 위상잡음 측정기를 이용하여 측정할 경우 2~3 dBc/Hz 정도 더 우수하게 나타날 것으로 생각된다. 국부발진기의 고조파 및 불요잡음 억제 특성은 각각 43.83 dBc 및 70 dBc 이상으로 이를 그림 11에 나타내었다. 개발된 국부발진기는 -20~+70 °C의 온도범위에서 특성변화를 관찰하였으며 ±0.33 dBm의 출력전력 변동 및 최대 ±2 dBc/Hz의 위상잡음 변화를 가지고 있어 온도변화에 대해 매우 안정된 특성을 나타내고 있다. 그림 12는 온도변화에 대한 기본 주파수 출력 및 고조파 출력 변화에 대한 그림을 나타내고 있으며 그림 13은 온도변화에 대한 위상잡음 변화 특성을 나타내고 있다. 그림 14는 개발한 국부발진기의 실물사진을 보여주고 있으며 표 1은 전기적 성능을 나타내고 있다.

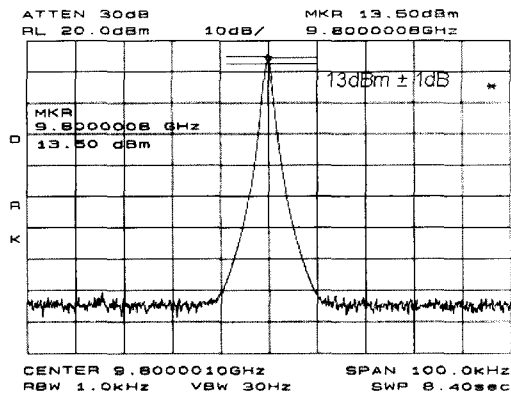


그림 9. 출력전력 특성
Fig. 9. Output power characteristics.

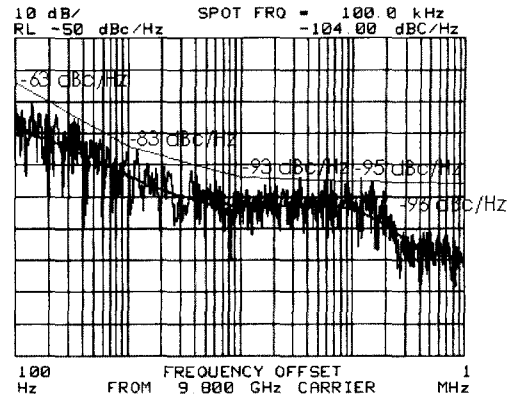


그림 10. 위상잡음 특성
Fig. 10. Phase noise characteristics.

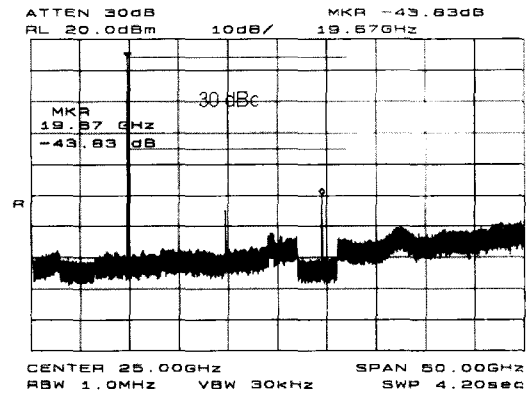


그림 11. 고조파 억압특성
Fig. 11. Harmonic suppression characteristics.

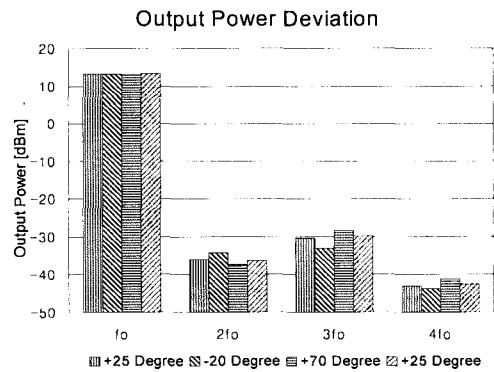


그림 12. 온도변화에 대한 출력변화 특성
Fig. 12. Output power deviation for temperature variation.

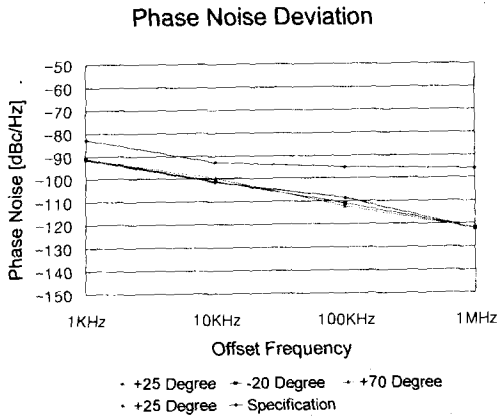


그림 13. 온도변화에 대한 위상잡음변화 특성
Fig. 13. Phase noise deviation for temperature variation.

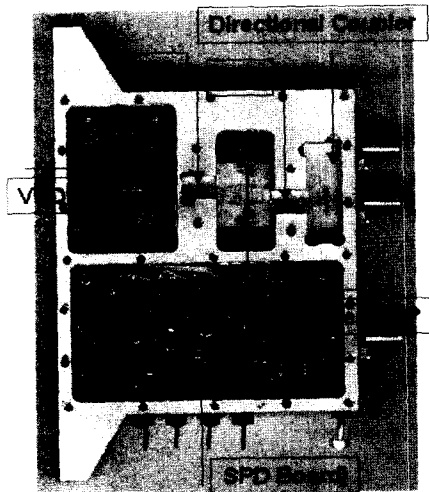


그림 14. Ka-band 위성중계기용 국부발진기의 EM 모델
Fig. 14. EM LO for Ka-band transponder.

VI. 결 론

본 논문에서는 낮은 위상 잡음을 갖는 Ka-band 위성 중계기용 국부발진기를 개발하였다. 고안정의 발진기를 위해 유전체 공진기의 Q값이 능동소자에 그대로 전달되도록 유전체 공진기와 결합하는 마이크로스트립 라인을 고임피던스 라인으로 설계함으로써 기존의 특성임피던스 50 Ω의 마이크로스트립

표 1. 개발된 국부발진기의 전기적 성능

Table 1. Electrical performance of LO.

Parameter	Requir.	Meas.	Comp.
Frequency [GHz]	9.8	9.8	C
Supply Voltage [V]	15, -8	15, -8	C
Supply Current [mA]	200, 20	<160, 20	C
Output Power [dBm]	13 ±1	13.50 ±0.33	C
Test Port Power [dBm]	-	1	C
Phase Noise at 100 Hz [dBc/Hz]	-63	-77	C
Phase Noise at 1 kHz [dBc/Hz]	-83	-93.5	C
Phase Noise at 10 kHz [dBc/Hz]	-93	-102.5	C
Phase Noise at 100 kHz [dBc/Hz]	-95	-104	C
Phase Noise at 1 MHz [dBc/Hz]	-95	-120	C
Harmonics @2 fo [dBc]	30	43.83	C
Spurious [dBc]	70	>70	C
Source Impedance [Ohm]	50	50	C
Power Consumption [W]	-	<2.6	C
Weight [g]	-	144 g	C
Acceptance Temperature [°C]	-15 ~ 65	-20 ~ 70	C

라인을 이용한 설계방식의 위상잡음에 비해 약 10 dB 정도의 위상잡음 개선 효과를 얻었다. 이와 같은 전압제어 발진기는 위상고정루프 회로와 연동하여 Ka-band 위성 중계기용 고안정의 위상고정 발진기를 구성하였으며 측정결과 Ka-band 위성중계기용 국부발진기의 설계규격을 만족시켰다. 본 논문에서 개발한 국부발진기 및 전압제어 발진기의 설계기법은 다양한 통신시스템의 국부발진기의 설계에 응용할 수 있겠다.

참 고 문 헌

[1] 이문규, 류근관, 염인복, 이성팔, "낮은 위상잡음을 갖는 위성중계기용 Engineering Model 발진기의 비선형 설계", 한국전자과학회논문집, 제 12권 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] T. A. Bos, F. Bayer and U. Lott, "A Low Cost 16.2GHz Phase Locked Oscillator for Wireless LAN", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1395-1398, 1997.
- [4] N. R. Mysoor, "An electronically tuned, stable 8415MHz dielectric resonator FET oscillator for space applications", *Aerospace Applications Conference Digest*, pp. 147-156, 1990.
- [5] 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.
- [6] J. Perez, P. Dorta and F. Sierra, "A Comparison of the Performance of Three Different Phase Locked Phase locked Oscillator Fabricated at 21 GHz", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 305-308, 1992.
- [7] 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.

류근관



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

염인복

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

이문규



1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
 2002년 3월~현재: 서울시립대학교

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

이성팔

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