

저위상잡음을 갖는 X-band용 위상고정 유전체 공진 발진기의 설계 및 제작

류근관*

Design of Phase Locked Dielectric Resonator Oscillator with Low Phase Noise for X-band

Keun-Kwan Ryu*

요 약

본 논문에서는 X-band용 저위상잡음을 갖는 위상고정 유전체 공진 발진기를 설계 및 제작하였다. 위상고정 유전체 공진 발진기의 루프대역 내의 위상잡음을 개선하기 위해서 샘플링위상비교기(Sampling Phase Detector)를 사용하여 전압제어 유전체 공진 발진기를 고안정의 기준주파수에 위상 고정시켰으며 루프대역 밖의 위상잡음을 개선하기 위해서 고임피던스 변환기를 이용한 낮은 위상잡음의 전압제어 발진기를 설계하였다. 제작된 위상고정 유전체 공진 발진기는 51.67dBc의 고조파 억압특성을 가지고 있으며 공급전력은 1.95W 이하를 필요로 한다. 위상잡음은 상온에서 -107.17dBc/Hz @10KHz와 -113.0dBc/Hz @100KHz의 우수한 특성을 나타내었으며 출력전력은 -20~+70℃의 온도 범위에서 13.0dBm±0.33dB의 안정된 특성을 나타내었다.

ABSTRACT

The PLDRO(Phase-Locked Dielectric Resonator Oscillator) with low phase noise is designed for X-band. The phase of VCDRO(Voltage Controlled Dielectric Resonator Oscillator) is locked to that of a high stable reference oscillator by using a SPD(Sampling Phase Detector) to improve phase noise performance in the loop bandwidth. And, the VCDRO is implemented using a high impedance inverter coupled with dielectric resonator to improve the phase noise performance out of the loop bandwidth. This PLDRO exhibits the harmonic rejection characteristics of 51.67dBc and requires below 1.95W. The phase noise characteristics are performed as -107.17dBc/Hz at 10KHz offset frequency and -113.0dBc/Hz at 100KHz offset frequency, respectively, at ambient. And, the output power of 13.0dBm±0.33dB is measured over the temperature range of -20~+70℃.

키워드

PLDRO, VCDRO, Phase Noise, X-band

1. 서론

정보화 시대의 발달에 힘입어 상업용 무선통신의 발전과 마이크로웨이브 송수신기의 기술적 발전을 가져왔으며 그 사용 주파수 또한 S-band(2-4GHz)에서 Ku-band(12-14GHz) 및 Ka-band

(26.5-40GHz)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 영향력

* 한밭대학교 전자공학과

접수일자 : 2003. 11. 14

이 크므로 이에 대한 연구가 주를 이루어 진행되고 있다[1].

무선통신용 위상고정 발진기를 위한 구조로는 현재까지 상용화된 PLL 칩을 사용하여 1~2GHz 대역에서 위상 고정시킨 후에 체배기, 증폭기, 필터 등을 거쳐 X-band의 위상고정 발진기를 얻는 방법이 있다[2-3]. 또 다른 방법으로는 X-band의 전압제어 발진기를 구현하고 샘플링 위상비교기를 이용하여 위상고정하는 방식이 사용되기도 한다[4-6].

본 논문에서는 고안정의 소스원을 실현시키기 위해 후자의 방식인 샘플링위상비교기를 이용하여 루프대역 내의 위상잡음을 개선하고 고임피던스의 마이크로스트립을 사용하여 저위상잡음의 전압제어 유전체 공진 발진기를 설계하여 루프 대역 밖의 위상잡음을 개선한 X-band용 위상고정 유전체 공진 발진기를 설계 및 제작하고자 한다.

II. 위상고정 유전체 공진 발진기의 설계

2.1 전압제어 유전체 공진 발진기의 설계

위상고정 유전체 공진 발진기는 그림 1과 같이 전압제어 유전체 공진 발진기, 완충증폭기, 저역통과필터, 방향성 결합기, 감쇠기 등의 마이크로웨이브 부분과 기준주파수, UHF대역 증폭기, 샘플링위상비교기, 루프필터, 바이어스회로 등의 위상고정회로 부분으로 구성되어 있다. 위상고정 유전체 공진 발진기의 루프 대역 밖의 성능은 전압제어 유전체 공진 발진기의 특성에 의해 결정되므로 전압제어 유전체 공진 발진기의 공진기는 Q_u 가 높은 유전체 공진기를 사용하였으며 바랙터 다이오드를 이용하여 발진주파수를 동조시켰다. 표 1은 본 논문에서 사용한 유전체 공진기의 제원을 나타낸다.

전압제어 유전체 공진 발진기의 구조는 직렬 케환형 발진기를 선택하여 부하에 따른 발진 주파수의 변동이 적고 회로가 간단하여 구현하기에 적합하도록 하였다. X-band 발진기를 구현하

기 위한 능동소자로는 BJT, MESFET 등을 사용할 수 있으나 BJT에 비해 낮은 DC전력소모, 온도에 대한 주파수 안정성, 선형적 튜닝 및 높은 RF 출력전력을 얻을 수 있는 GaAs FET 계열인 fujitsu사의 FHX35X HEMT를 이용하였다.

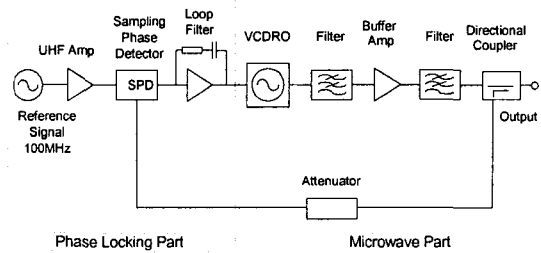


그림 1. 위상고정 유전체 공진 발진기의 구성도
Fig. 1. The block diagram of PLDRO

표 1. 유전체 공진기의 제원
Table 1. Specification of DR(Dielectric Resonator)

Part Number	Dimension (mm)	Temperature Coefficient	Q_u	ϵ_r
DRD065 BC028B	직경 : 6.50 ± 0.05 높이 : 2.88 ± 0.05	ppm/ $^{\circ}C$	15,000	27.9 ± 0.5

유전체 공진기가 마이크로스트립라인과 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 와 직접적인 관계가 있다. 따라서 발진기의 선형설계 뿐만 아니라 출력과 위상잡음 등을 예측하는 비선형설계시 실제 사용되는 유전체 공진기의 정확한 모델링이 필요하다. 그림 2와 같이 모델링한 공진회로의 설계결과 공진주파수인 9.8GHz에서 약 -0.5dB의 우수한 반사선택도를 얻었다. 그림 2의 아래 그래프는 공진기와 결합하는 마이크로스트립라인의 특성임피던스에 따른 Z_g 의 궤적을 시뮬레이션한 결과이다. 일반적으로 사용되는 특성임피던스 50 Ω 인 마이크로스트립라인을 이용한 경우보다 특성임피던스 80 Ω 의 마이크로스트립라인을 이용한 경우가 공진주파수 근처에서 $Im(Z_g)$ 성분 변화의

기울기가 급격하고 $Re(Z_g)$ 성분이 작음을 알 수 있다. 이러한 현상은 공진회로가 능동소자를 포함한 부하와 직렬연결 되었을 때 공진주파수 근처에서 Q_e 가 크게 되어 Q_L 를 크게 만들고 발진기의 위상잡음 특성이 개선됨을 의미한다.

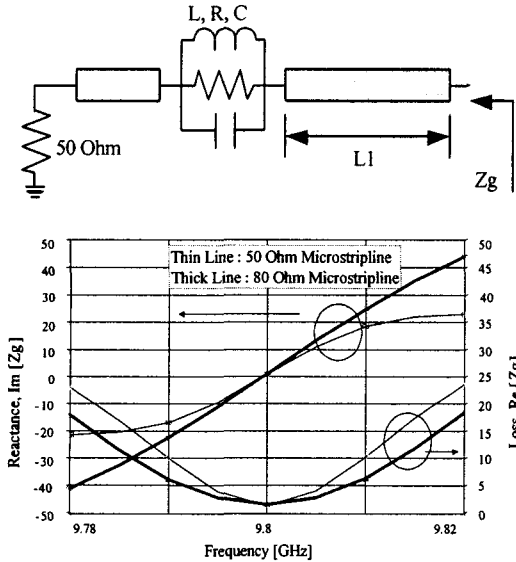


그림 2. 마이크로스트립라인과 결합한 유전체 공진기의 등가회로 및 공진주파수 근처에서 Z_g 의 궤적
Fig. 2. The equivalent circuit of dielectric resonator coupled with microstripline and Z_g curves for around resonant frequency (Thin lines: 50 Ω microstripline coupling, Thick lines: 80 Ω microstripline coupling)

또한, 유전체 공진기가 그림3과 같이 두 개의 마이크로스트립라인과 결합되어 있을 경우 바랙터 다이오드의 캐패시턴스를 가변시켜 공진 주파수를 동조시킬 수 있다. 이때 새로운 공진 주파수, ω_0' 를 구하면

$$\omega_0' = \frac{1}{\sqrt{L_{et}C_e}} \cong \omega_0 \left(1 + \frac{N_i^2 L_e}{2Z_0^2 C_v} \right), \quad (1)$$

$$L_{et} = L_e \parallel (L_i / N_i^2)$$

혹은

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \cong \frac{N_i^2 L_e}{2Z_0^2 C_v} \quad (2)$$

와 같다[7]. 여기서, C_v 는 바랙터 다이오드의 유효 캐패시턴스이다[7].

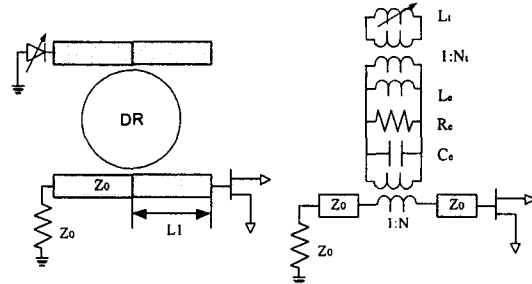


그림 3. 유전체 공진기의 동조 모델
Fig. 3. Tuning mechanism of dielectric resonator

위와 같은 공진회로 설계와 발진기의 직렬케 환형 구조에서 게이트와 공진기 사이의 거리 L_1 과 케환 요소인 개방 스텐브를 이용하여 발진조건을 만족시켰다. 이러한 선형설계를 바탕으로 HB(Harmonic Balance)기법을 이용하여 발진기의 비선형 설계를 하였다. 또한 능동소자 비선형 모델을 통해 발진기의 출력, 고조파 특성, 정상 상태에서의 주파수 변동 및 위상잡음 특성 등을 시뮬레이션하였다. 설계 결과 중심주파수 9.8 GHz인 발진기는 5V, 20mA의 바이어스 조건하에서 11.0dBm의 출력과 -19dBc이하의 고조파 억압 특성을 얻었다.

2.2 기타 마이크로웨이브 회로의 설계

전압제어 유전체 공진 발진기의 출력단 뒤에는 완충증폭기를 설계하여 부하 변동에 따른 유전체 공진 발진기의 pulling figure 특성이 향상되도록 하였다. 완충증폭기의 능동소자도 Fujitsu사의 FHX35X HEMT를 이용하였고 평형증폭기로 구성하여 단일증폭기에 비해 P1dB를 3dB 높였으며 입출력 반사계수 특성을 향상시켰다.

또한 위상고정 유전체 공진 발진기의 2차 및 3차 고조파를 억제하기 위해서 저역통과필터를 전압제어 발진기와 완충증폭기 다음 단에 각각 삽입하였다. 마이크로스트립라인을 이용한 저역 통과필터는 저지대역에서 주기적으로 나타나는

불요특성으로 인해 3차 및 5차 고조파가 나타나게 되는데 이를 제거하기 위해서 3차 및 5차에 해당하는 $\lambda/4$ 의 trap회로를 저역통과필터의 양단에 삽입함으로써 3차 및 5차의 고조파 신호를 전기적으로 단락시켰다.

전압제어 유전체 공진 발진기의 최종출력 port 이외에 샘플링위상비교기의 입력을 위해 결합라인을 이용한 방향성 결합기를 설계하였다. 방향성 결합기의 주라인은 위상고정 유전체 공진기의 출력단에 연결되어 있고 -10dB의 결합계수에 의해 검출된 신호는 샘플링위상비교기의 microwave 입력단에 연결하였다. 표 2는 microwave 부분의 각 회로들의 설계 및 측정결과를 요약한 것이다.

표 2. 각 부회로의 측정 결과
Table 2. Test results for sub-circuits

Parameter	Frequency	Output Power	Tuning Range	Phase Noise
VCDRO	9.8GHz	7.0dBm	6.7MHz (0~12V)	-116.3dBc/Hz @100KHz
Parameter	Gain	S11	S22	PIdB
Buffer AMP	11.8dB	<-15dB	<-13dB	17.0dBm
Parameter	Insertion Loss	S11	Harmonic Rejection	Harmonic Rejection
LPF	0.7dB	<-18dB	-26.9dB @3fo	-22.9dB @5fo
Parameter	Insertion Loss(S21)	Coupling factor(S31)	S22	S33
Directional Coupler	1.6dB	-8.4dB	<-13dB	<14dB

2.3 위상고정 회로의 설계

그림 4는 샘플링위상비교기 회로를 보여주고 있다. 샘플링위상비교기는 두 개의 쇼트키 다이오드, 한 개의 SRD(Step Recovery Diode) 및 두 개의 캐패시터로 구성되어 있다. 기준주파수는 샘플링위상비교기 내의 SRD 및 두 개의 캐패시터를 통해 수많은 고조파를 발생하게 된다. 기준주파수는 CTI에서 제공하는 100MHz의 OCXO를 이용하여 외부에서 인가하도록 하였으며 이를 UHF대역 증폭기에서 증폭하여 샘플링

위상비교기의 기준주파수 입력 요구조건인 17dBm이상이 되도록 하였다. 이 기준 주파수의 고조파 중 100번째의 고조파 성분이 전압제어 유전체 공진 발진기의 주파수 성분과 쇼트키 다이오드에서 위상을 비교하게 된다. 쇼트키 다이오드에서의 위상 비교는 주파수 혼합기의 동작 원리와 같으므로 IF 주파수의 에러전압과 고조파 전압이 발생하게 된다. 루프필터는 능동 저역통과필터로서 고조파 성분을 제거하고 에러전압만을 여과 및 증폭하여 전압제어 유전체 공진 발진기의 제어전압으로 사용하게 되고 이러한 기능을 계속 반복하여 전압제어 유전체 공진 발진기의 주파수가 고안정의 기준 주파수에 위상 고정하게 된다. 이때 루프필터의 대역폭은 OP amp의 RC 시정수 값에 의해 결정되는데 본 논문에서는 위상잡음의 최적화를 고려하여 루프필터의 대역폭을 40KHz로 하였다. 또한 샘플링위상비교기 주변회로 구성시 sweep기능을 추가하여 위상고정 유전체 공진 발진기의 위상고정이 풀렸을 때 전압제어 유전체 공진 발진기의 제어전압 단자에 sweep전압을 공급하여 기준 주파수의 위상에 고정되도록 하였다.

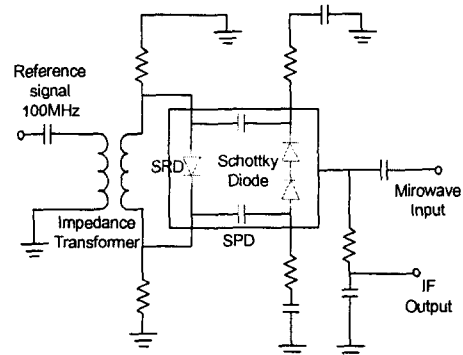


그림 4. 샘플링 위상비교기의 회로
Fig. 4. Circuit of sampling phase detector

III. 제작 및 시험결과

3.1 위상고정 유전체 공진 발진기의 제작

X-band용 전압제어 유전체 공진 발진기를 비

못하여 완충증폭기, 지역통과필터 및 방향성 결합기를 유전율 9.9, 두께 15mils인 알루미늄 기판에 thin film 공정을 이용하여 제작하였다. 또한 샘플링위상비교기 주변회로 및 루프필터 회로를 FR4 기판에 제작하여 기구물 내에서 RF회로와 분리하여 집적화시켰다. 전압제어 유전체 공진 발진기 및 완충증폭기 설계에 사용된 능동 소자인 HEMT는 fujitsu사에서 제공하는 FHX-35X계열의 FHX35X를 사용하였다. 위상고정 유전체 공진 발진기의 전체 체적은 96mm X 78.4mm X 31.5mm이고 무게는 235g 이하이다. DC전원은 15, -8V를 필요로 하며 전체 전력소모는 1.95W 이하로서 상용제품으로 제공되는 것과 비교하면 소비전력이 매우 낮다.

3.2 위상고정 유전체 공진 발진기의 실험결과

제작된 위상고정 유전체 공진 발진기의 출력 전력 및 위상잡음 특성은 HP8565E 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였으며 그림 5와 6에 13.0dBm의 기본 주파수 출력전력과 고조파 억압특성을 나타내고 있고 그림 7에 -20~+70°C의 온도범위에서 기본주파수 출력 및 고조파 억압 특성변화를 나타내었다. 측정온도 범위에서 ±0.33dBm의 출력변화를 가지고 있어 매우 안정적인 출력특성을 나타내었다. 그림 8은 위상잡음 특성으로 -107.17dBc/Hz @10KHz 및 -113.0 dBc/Hz @100KHz의 특성을 얻었으며 그림 9는 온도변화에 대한 위상잡음의 변화를 나타내는 것으로 최대 ±2.5dBc/Hz의 위상잡음 변화를 가지고 있어 온도변화에 대해 매우 안정된 특성을 나타내고 있다. 이는 기존의 상용품에 비해 매우 우수한 특성을 나타내는 것이며 위상잡음 측정기를 이용하여 측정할 경우 2~3dBc/Hz정도 더 우수하게 나타날 것으로 생각된다. 그림 10은 제작된 위상고정 유전체 공진 발진기의 실물사진을 보여주고 있으며 표3은 전기적 성능을 나타내고 있다.

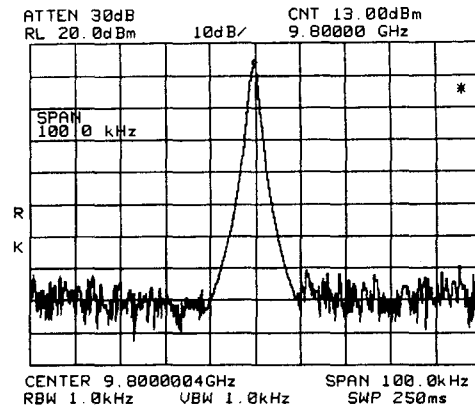


그림 5. 출력전력 특성
Fig. 5. Output power characteristics

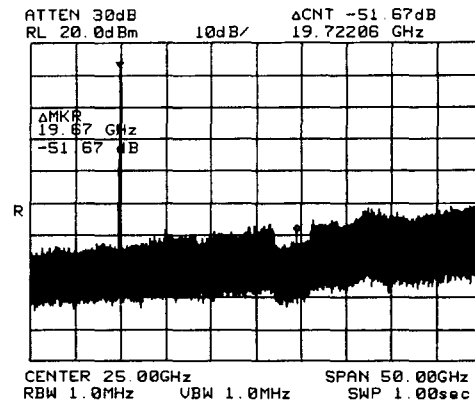


그림 6. 고조파 억압특성
Fig. 6. Harmonic suppression characteristics

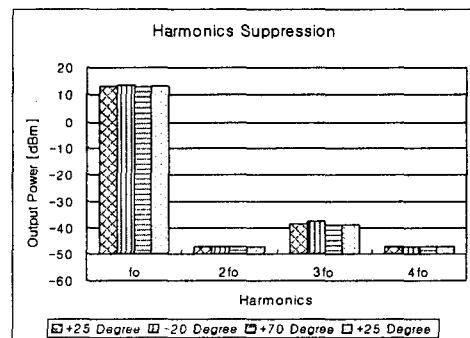


그림 7. 온도변화에 대한 출력변화 특성
Fig. 7. Output power deviation for temperature

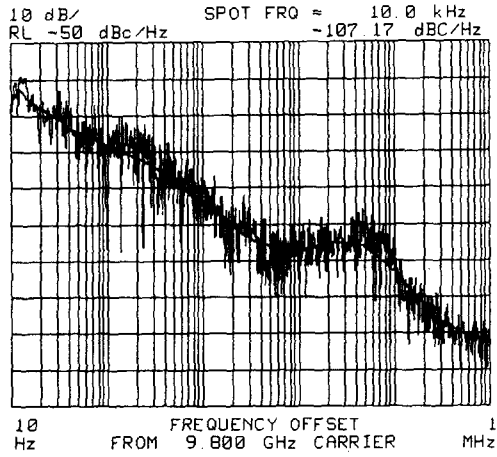


그림 8. 위상잡음 특성
Fig. 8. Phase noise characteristics

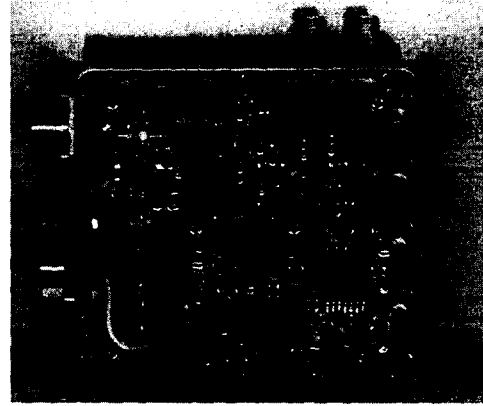


그림 10. X-band용 위상고정 유전체 공진 발전기
Fig. 10. PLDRO for X-band

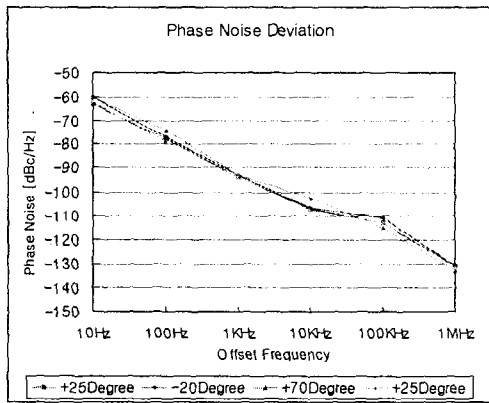


그림 9. 온도변화에 대한 위상잡음변화 특성
Fig. 9. Phase noise deviation for temperature

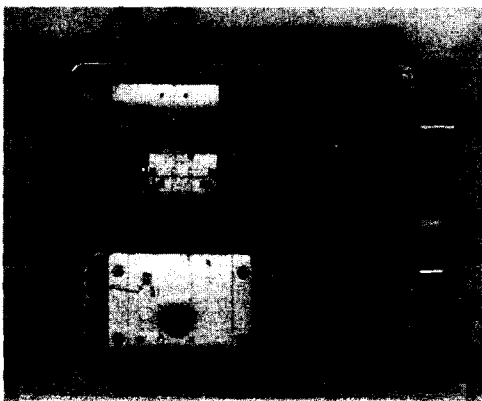


표 3. 제작된 위상고정 유전체 공진 발전기의 성능
Table 3. Electrical performance of PLDRO

Parameter	Measurement
Frequency [GHz]	9.8
Supply Voltage [V]	15, -8
Supply Current [mA]	<130
Output Power [dBm]	13.0±0.33
Phase Noise at 10Hz [dBc/Hz]	-60
Phase Noise at 100Hz [dBc/Hz]	-74
Phase Noise at 1kHz [dBc/Hz]	-93
Phase Noise at 10kHz [dBc/Hz]	-103
Phase Noise at 100kHz [dBc/Hz]	-111
Phase Noise at 1MHz [dBc/Hz]	-131
Harmonics [dBc]	>51
Spurious [dBc]	>70
Source Impedance [Ohm]	50
Power Consumption [W]	<1.95
Weight [g]	235g
Temperature[°C]	-20~70

IV. 결론

본 논문에서는 낮은 위상 잡음을 갖는 X-band 용 위상고정 유전체 공진 발전기를 설계 및 제작 하였다. 고안정의 발전기를 위해 유전체 공진기의 Q값이 능동소자에 그대로 전달되도록 유전체 공진 기와 결합하는 마이크로스트립 라인을 고임피던스

라인으로 설계함으로써 기존의 특성임피던스 50Ω의 마이크로스트립 라인을 이용한 설계방식의 위상잡음에 비해 약 10dB 정도의 위상잡음 개선 효과를 얻었다. 이와 같은 전압제어 유전체 공진 발전기는 샘플링위상비교기의 위상고정루프 회로와 연동하여 X-band용 고안정의 위상고정 유전체 공진 발전기를 구성하였다. 본 논문에서 설계 및 제작된 위상고정 유전체 공진 발전기 및 전압제어 유전체 공진 발전기의 설계기법은 다양한 통신시스템의 소스원 설계에 응용할 수 있겠다.

참고 문헌

- [1] I. Telliez, M. Damiade, P. Savary and P. Bourne, "Millimeter wave phase locked oscillator for mobile communication systems," *IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuit Symposium*, pp.49-52, 1995.
- [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, 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, F. Sierra, "A comparison of the performance of three different phase locked oscillator fabricated at 21 GHz," *IEEE MTT-S Digest*, pp.305-308, 1992.
- [7] C.M. Liu and C.Y. Ho, "On the design of a voltage-tuned push-push dielectric resonator oscillator," *Microwave Journal*, pp. 165-174, June, 1990.

저자 소개



류근관(Keun-Kwan Ryu)

1992년 2월: 광운대학교 전자통신공학과(공학사)

1994년 2월: 광운대학교 전자통신공학과(공학석사)

2000년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과(공학박사)

2000년 3월~2003년 1월 : 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원

2003년 2월~현재 : 한밭대학교 전자공학과 전임강사

※ 관심분야 : 초고주파 수동 및 능동회로(MMIC, Hybrid) 설계