

고신뢰성과 저위상잡음을 갖는 전압제어 발진기의 설계 및 제작

Design of Voltage Controlled Oscillator with High Reliability and Low Phase Noise

류근관*

(Keun-Kwan, Ryu)

요약

본 논문에서는 낮은 위상잡음과 고신뢰성을 갖는 전압제어 발진기를 비선형 설계하였으며 그 위상잡음을 Lesson식과 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 전압제어 발진기의 위상잡음을 개선하기 위하여 유전체 공진기와 결합하는 마이크로 스트립 라인을 고임피던스 변환기를 이용함으로써 공진회로의 Q값이 그대로 능동소자에 전달되도록 하였다. 또한 worst case 해석 및 part stress 해석을 수행함으로써 전압제어 발진기의 신뢰도를 높였다. 제작된 전압제어 발진기는 0~12 V의 제어전압에서 0.56 MHz/V의 튜닝대역을 가지고 있으며 160 mW의 DC 전력을 소모한다. 또한 -116.5 dBc/Hz @100KHz와 -96.51 dBc/Hz @10KHz의 우수한 위상잡음 특성과 7.33 dBm의 출력을 얻었다.

Abstract

The VCO(Voltage Controlled Oscillator) with low phase noise and high reliability is implemented using nonlinear design, and its phase noise characteristics are compared with that of Lesson's equation. The microstripline coupled with dielectric resonator is realized as a high impedance inverter to improve the phase noise, and the quality factor of resonator circuit can be transferred to active device with the enhanced the loaded quality factor. The worst case and part stress analyses are achieved to obtain the high reliability of VCO. The developed VCO has the oscillating tuning factor of 0.56MHz/V for the control voltage range of 0~12V. This VCO requires the DC power of 160mW. The phase noise characteristics exhibit good performances of -96.51dBc/Hz @10KHz and -116.3dBc/Hz @100KHz, respectively. And, the output power of 7.33 dBm is measured.

Key Words : VCO, phase noise, reliability, high impedance

I. 서론

최근 상업용 무선통신의 발달에 힘입어 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 소자로 여겨지고 있으며 위상잡음 특성 및 신뢰성이 주요 관건이 된다. 뿐만 아니라 전체 시스템의 소형화 및 가격 절감에 국부발진기의 영향력이 크므로 이에 대한 연구가 주를 이루어

* 회 원 : 한밭대학교 전자공학과 전임강사

† 논문접수일 : 2003년 11월 10일

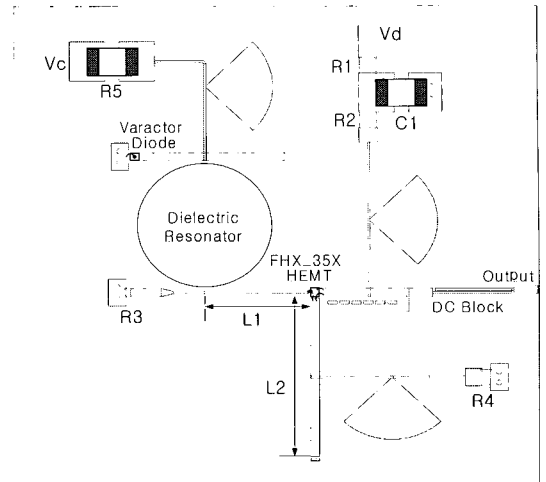
진행되고 있다[1].

이러한 국부발진기는 고안정의 reference에 위상을 고정시키는 방식으로 X-band용 국부발진기의 구조로는 현재까지 상용화된 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 방법으로는 X-band의 VCO를 구현하고 SPD를 이용하여 위상고정하는 방식이 사용되기도 한다[3,4].

이러한 phase locking 회로는 이미 범용화 되어 Ku-band 대역에서도 구현되고 있으므로 결국 국부발진기의 핵심 요소인 전압제어 발진기를 어떻게 설계하는가에 달려있다고 하겠다. 특히, reference를 이용한 위상고정 발진기의 경우 loop 대역 내의 위상잡음은 reference의 위상잡음에 의존하지만 loop 대역 밖의 위상잡음은 전압제어 발진기의 위상잡음이 그대로 나타나므로 전압제어 발진기의 위상잡음을 개선하는 것은 바로 통신시스템의 성능개선과 밀접한 관계에 있다. 본 논문에서는 전압제어 발진기의 위상잡음을 개선하기 위하여 유전체 공진기와 결합하는 마이크로스트립 라인을 high impedance inverter로 구현하였으며, 고신뢰성을 확보하기 위해 초고주파 발진기 회로에 삽입되는 능동 및 수동 소자에 대한 part stress 및 worst case 해석을 수행하였다.

II. 저위상잡음 전압제어 발진기의 설계

SPD를 이용한 X-band용 국부발진기를 개발하기 위한 전압제어 발진기를 설계하고자 발진기의 중심주파수는 9.8GHz로 설정하였다. 그리고 회로의 무게와 크기를 줄이기 위해 유전율 9.9의 알루미늄 기판에 설계하였으며 sheet저항과 SMT capacitor 부품을 사용하였다. 또한 전압제어 발진기의 위상잡음을 개선하기 위해 TE_{018} mode의 유전체 공진기를 사용하였다. 유전체 공진기를 이용한 발진기는 여러 가지 장점을 가지고 있지만, 특히 주파수 안



〈그림 1〉 전압제어 발진기의 구조

정성 및 carrier 근처의 위상잡음이 우수하여 상업용으로 널리 사용되고 있다.

그림 1은 본 논문에서 설계하고자 하는 전압제어 발진기의 구조를 보여주고 있다. 구조는 직렬 레환형 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 있으며, BJT의 경우 carrier근처의 위상잡음은 우수하나 DC전력소모가 크고 출력전력이 작다는 단점이 있다. 이에 반해 GaAs FET의 경우 낮은 DC전력소모, 온도에 대한 주파수 안정성, 선형적 튜닝 및 높은 RF 출력전력을 얻을 수 있다[3].

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 방식으로 flicker 잡음을 상쇄 시키는 경우가 있다[5]. 그러나 통신시스템에서 국부발진기의 경우 부피, 질량, 소모전력 등의 제한적 요소가 많기 때문에 이러한 방법을 사용하기에는 부적당하다. 본 논문에서

서는 유전체 공진기가 가지고 있는 Q값이 손실 없이 발진기의 능동소자에 전달될 수 있도록 공진기 필터의 Q값을 우수하게 유지하여 능동소자에 전달되는 기법을 이용하였다.

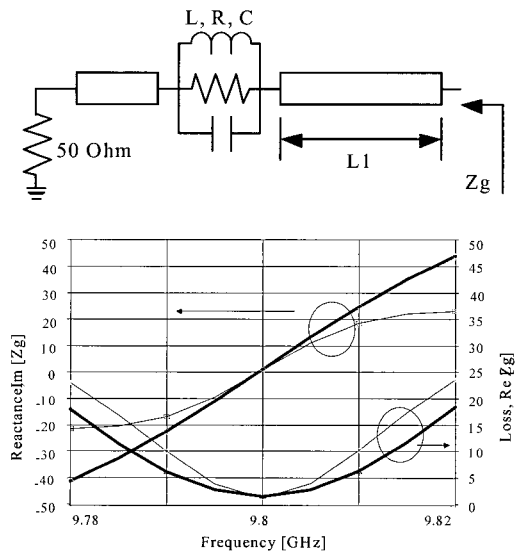
일반적인 발진기에 주로 사용되는 유전체 공진기는 크기가 작고 온도 변화에 안정하며 높은 양호도(Q factor)를 갖는다. 본 논문에서는 Trans-tech사에서 제공하는 유전체 공진기 D8733-0245-Y-101을 모델링하여 공진회로로 이용하였다. 이는 유전율이 30이고 unloaded Q가 10,000(@10GHz)의 제원을 갖고 있다. 유전체 공진기가 마이크로스트립라인과 결합하였을 때 그림 2와 같이 R, L, C 직렬 공진회로로 등가화할 수 있으며 대역저지필터로서 원하는 주파수를 충분히 되반사시켜야 한다. 대역저지필터의 반사손실과 반사선택도는 부하로 전달되는 에너지와 위상잡음 특성에 영향을 끼치며 공진기의 Q-factor와 직접적인 관계가 있다. 따라서 발진기의 선형설계 뿐 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 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 2의 그래프는 공진기와 결합하는 마이크로스트립라인의 특성임피던스에 따른 Z_g 의 궤적을 시뮬레이션한 것이다. 특성임피던스 50 ohms의 마이크로스트립라인을 이용한 경우보다 특성임피던스 80 ohms의 마이크로스트립라인을 이용한 경우가 공진주파수 근처에서 reactance, $\text{Im}(Z_g)$ 성분 변화의 기울기가 급격하고 loss, $\text{Re}(Z_g)$ 성분이 작음을 알 수 있다. 이러한 현

상은 공진회로가 능동소자를 포함한 부하와 series 연결되었을 때 external Q가 크게 되어 결과적으로 loaded Q를 크게 만들게 되고, loaded Q의 상승은 발진기의 발진주파수 근처의 위상잡음 특성이 개선됨을 의미한다[6].

이와 같이 모델링된 유전체 공진기와 능동소자를 기반으로 CAD 프로그램인 Libra 6.1을 이용하여 먼저 사용하고자 하는 알루미늄 기판에 대한 전송선로의 50Ω폭과 λ/4 길이 등을 최적화 하였다. 그림 1의 직렬케환형 구조에서 게이트와 공진기 사이의 거리 L1과 케환 요소인 개방 스텐브 L2를 이용하여 발진기의 발진조건을 만족시켰으며 최종적으로 부회로를 첨가하여 발진가능성을 예측하였다. 이러한 선형설계를 바탕으로 HB(Harmonic Balance)기법을 이용하여 발진기의 비선형 모의실험을 하였다. 또한 소자의 비선형 모델을 통해 출력, 고조파 특성, 정상상태에서의 주파수 변동 및 위상잡음 특성 등을 얻었다. 이와 같은 비선형 설계결과 중심주파수 9.8GHz인 발진기는 8V, 20mA의 바이어스 조건하에서 11.0dBm의 출력과 -19dBc이하의 고조파 억압 특성을 갖게 됨을 예측하였다.



〈그림 2〉 Microstrip 라인과 결합한 유전체 공진기의 등가회로와 공진주파수 근처에서의 Z_g 의 궤적

III. Worst case 및 Part Stress 해석

전압제어 발진기의 신뢰성을 고려할 때 발진기의 구동 전압과 전류는 정격 전압, 전류보다 충분히 작아야 한다. 하지만 위상잡음은 일반적으로 구동전압에 비례하여 개선되기 때문에 구동전압과 위상잡음 성능사이에는 trade-off 관계에 있다. 따라서 고신뢰성과 낮은 위상잡음을 갖는 전압제어 발진기를 얻기 위해서는 worst case 해석 및 part stress 해석의 필요성이 대두된다.

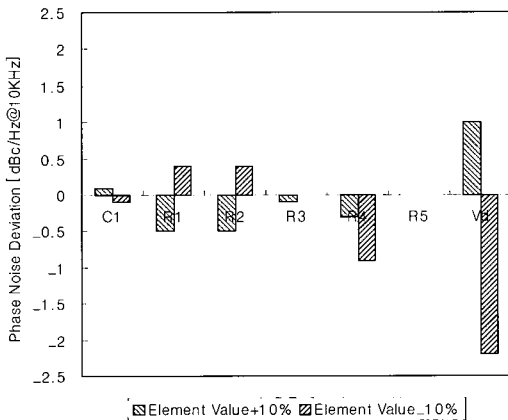
그림 3은 발진기 회로에 사용되는 lumped element의 tolerance 및 바이어스 변화에 의한 위상잡음 변화 특성인 worst case 해석 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Lumped element의 값 및 바이어스 전압이 ±10% 변화할 때 중심주파수로부터 10KHz 떨어진 지점에서 최고 3.2dBc/Hz의 위상잡음 변화를 나타내고 있어 매우 안정된 위상잡음을 얻을 것으로 예측되었다. 그림 3에서 나타난 바와 같이 V_D 의 값이 작을 때 위상잡음이 향상됨을 알 수 있으나, 전체 국부발진기 시스템에서 전압제어 발진기의 전압, 전류 규격이 정해져 있으므로 이에 대한 위상잡음 변화만을 예측하였다.

다음의 표 1은 전압제어 발진기 회로에 삽입되는 능동 및 수동소자에 대한 part stress 해석을 수행한 결과이다. 초고주파 회로가 군사용 혹은 space

〈표 1〉 전압제어 발진기의 part stress 해석

Ref.	Part		Stress Para.	Max Spec. Rating	Max Derating Value	Part Stress Value	
	Style	Value				Applied Stress	Stress Ratio
TR1	HEMT		Vds	4V	3.2	3	75%
			Vgs	-3V	-2.4	-0.2	6.7%
			Pt	290mW	87	51	17.6%
VD1	Diode		Vbr	30V	19.5	12	40%
R1	Sheet	100Ω	Power	100mW	50	40	40%
R2	Sheet	100Ω	Power	100mW	50	40	40%
R3	Sheet	50Ω	Power	50mW	25	0	0%
R4	Sheet	50Ω	Power	100mW	50	20	20%
R5	Chip	1kΩ	Power	50mW	25	0	0%
C1	Chip	1000pF	Voltage	50V	25	6	12%

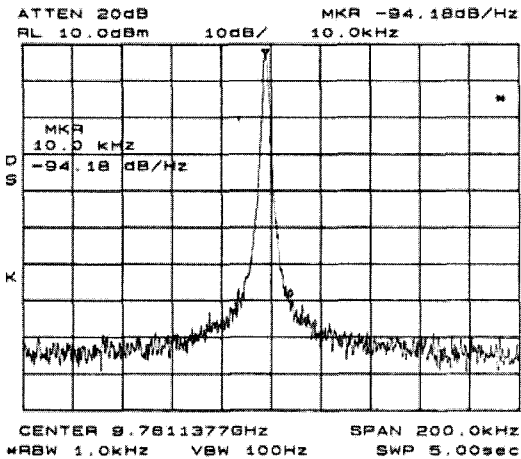
용으로 사용될 경우 능동 및 수동소자의 정격에 비해 충분히 낮은 stress를 가할 필요가 있다. HEMT의 derating 값은 전류 및 전압에 대해 80%와 전력에 대해 30%가 요구된다. 또한 저항 및 캐패시터의 경우 전력 및 전압에 대해 각각 50%의 derating 값이 요구되며 바랙터 다이오드의 경우 전압의 65%의 derating 값이 요구된다. 표 1의 해석결과에서 나타난 바와 같이 각각의 part는 최대 derating 값에 대하여 충분한 margin을 가지고 있으므로 매우 신뢰성이 높을 것으로 생각된다.



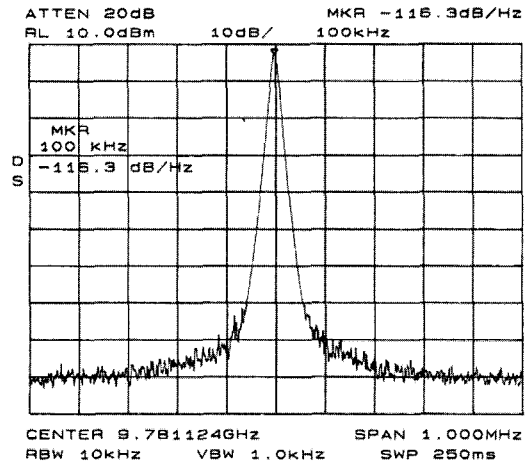
〈그림 3〉 Lumped element 변화에 따른 위상잡음의 변화

IV. 제작 및 시험결과

앞서 기술한 방법을 이용하여 9.8GHz의 전압제어 발진기를 유전율 9.9, 두께 15mils의 알루미늄 기판에 thin film 공정을 이용하여 제작하였다. 설계에 사용된 능동소자인 HEMT는 fujitsu사에서 제공하는 FHX35X의 bare chip이며, epoxy를 이용하여 기판에 장착하고 마이크로스트립라인과 gold wire bonding하여 연결하였다. 전압제어 발진기의 크기는 22mm X 22mm이고 DC전원은 8V, 20mA를 필요로 한다. 위상잡음은 HP8564E spectrum analyzer를 이용하여 측정하였으며 그림 4와 5에 나타낸



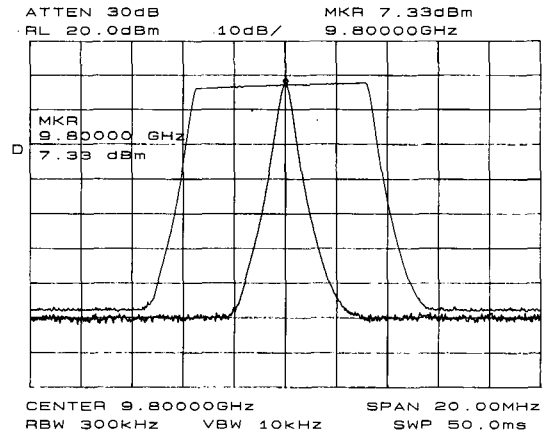
〈그림 4〉 위상잡음 특성 (@10KHz)



〈그림 5〉 위상잡음 특성 (@100KHz)

바와 같이 $-94.18\text{dBc}/\text{Hz}$ @10KHz 및 $-116.3\text{dBc}/\text{Hz}$ @100KHz로 매우 우수한 특성을 얻었다. 이는 기존의 상용품에 비해 매우 우수한 특성을 나타내는 것이며 위상잡음 측정기를 이용하여 측정할 경우 2~4dBc/Hz정도 더 우수하게 나타날 것으로 생각된다. 특히, 100KHz의 offset 점에서의 위상잡음 특성은 PLL과 연동하여 위상고정 발진기를 제작할 경우 loop 대역 밖의 위상잡음으로 나타날 것이므로 매우 낮은 위상잡음 특성을 갖는 위상고정 발진기의 전압제어 발진기로 사용이 가능할 것으로 보인다. 전압제어 발진기의 튜닝범위는 제어전압 0~12V에서 $0.56\text{MHz}/\text{V}$ 의 특성을 가지고 있다. 발진범위에서의 출력전력은 $7.33\text{dBm} \pm 0.7\text{dB}$ 의 평탄도 특성을 얻었으며 이를 그림 6에 나타내었다. 표 2는 제작된 VCO의 전기적 성능 및 설계목표를 나

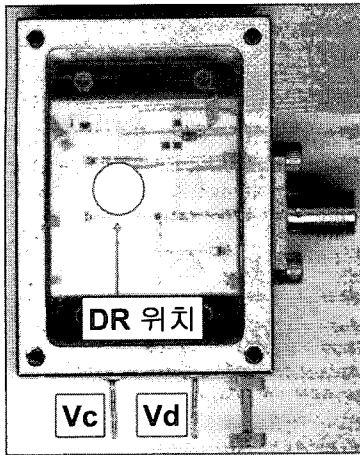
타내며 그림 7은 제작된 전압제어 발진기의 실물 사진을 보여주고 있다.



〈그림 6〉 전압제어 발진기의 주파수 동조

〈표 2〉 제작된 전압제어 발진기의 전기적 성능

Performance	Requirement	Measurement	Compliance
Supply Voltage [V]	8	8	C
Supply Current [mA]	20	20	C
Output Power [dBm]	7.0 ± 1.0	7.0 ± 1.0	C
Control Voltage [V]	0 ~ 12	0 ~ 12	C
Operating Frequency Range [MHz/V]	>0.3	0.56	C
Phase Noise @ 10KHz [dBc/Hz]	-93	-94.18	C
Phase Noise @ 100KHz [dBc/Hz]	-95	-116.3	C
Harmonics @ 2fo [dBc]	-15 Typical	<-15	C



〈그림 7〉 전압제어 발진기의 실물사진

GaAs HEMT를 이용하여 중심주파수 9.8GHz, 출력전력 $P_{out}=10dBm$, 소자의 noise figure $F=1.2dB$, corner frequency $F_c=100KHz$, Loaded $Q_L=50$ 일 때, 다음의 식(2)와 같이 Lesson's equation을 이용하여 계산할 경우 위상잡음은 $-95.4dBc/Hz @10KHz$ 와 $-122.8dBc/Hz @100KHz$ 을 각각 얻을 수 있다. 이는 본 논문에서 제작된 전압제어 발진기의 위상잡음 특성과 매우 잘 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, $Q_L = \frac{\pi f_c d\Phi}{360df}$ 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 oscillator 이다.

V. 결 론

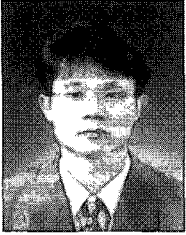
본 논문에서는 저위상잡음을 가지며 고신뢰성의 전압제어 발진기를 비선형 설계하고 제작하였다. 낮은 위상잡음의 발진기를 위해 유전체 공진기의

Q값이 능동소자에 그대로 전달되도록 high impedance line을 이용하여 기존의 설계방식에 따른 발진기의 위상잡음에 비해 약 10dB 정도의 위상잡음 개선 효과를 얻었다. 또한 전압제어 발진기에 사용되는 능동 및 수동소자의 part stress 해석을 수행하였으며 소자의 tolerance 및 바이어스의 변화에 대한 worst case 해석을 수행하였다. 제작된 전압제어 발진기는 PLL 구동회로와 연동하여 고안정의 위상고정 발진기에 사용할 수 있으며 본 논문의 전압제어 발진기 설계기법은 다양한 통신시스템의 신호원 설계에 응용할 수 있다.

참고문헌

- [1] J. Perez, P. Dorta, 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.
- [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] J.K.A. Everard and C. Broomfield, "Flicker noise removal in microwave oscillators using GaAs Based feedforward amplifier", *2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition*, pp.156-160, 2001.
- [6] 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.

〈저자 소개〉



류 근 관(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 능동회로(MMIC, Hybrid) 설계, 안테나 설계