

# PLL을 이용한 K-band용 발진기에 관한 연구

정희원 이용덕\*, 장준혁\*, 류근관\*\*, 이기학\*, 홍의석\*

## A study on the PLL oscillator for K-band

Yong-Deuk Lee\*, Jun-Hyuk Jang\*, Keun-Kwan Ryu\*\*, Ki-Hak Lee\*, Ui-Seok Hong\*

Regular Members

### 요 약

본 논문에서는 새로운 동조형태 방법을 사용한 위상고정 루프(PLL : Phase Locked Loop)의 케환 성질을 이용하여 K-band용 위상고정 hair-pin 공진 발진기(PLHRO)를 설계 및 제작하였다. 24.42 GHz 위상고정 Hair-pin 공진 발진기는 반송주파수로부터 100 KHz, 10 KHz 떨어진 곳에서 각각 -86.6 dBc/Hz, -76.5 dBc/Hz의 위상잡음 특성을 나타내었고 출력은 -0.6 dBm이었다. 또한 -23 dBc이하의 기본 주파수 억압특성과 -65 dBc 의 스퓨리어스 잡음 특성을 나타내었다. 완충증폭기를 포함한 24.42 GHz 위상고정 hair-pin 공진 발진기는 반송주파수로부터 100 KHz, 10 KHz 떨어진 곳에서 각각 -77.34 dBc/Hz, -72 dBc/Hz의 위상잡음 특성을 나타내었고 출력은 5.6 dBm이었다.

### ABSTRACT

In this paper, a PLHRO(Phase Locked Hair-pin Resonator Oscillator) for K-band is designed with the feedback property of PLL(Phase Locked Loop) using a new tuning mechanism. The proposed PLHRO generates the output power of -0.6 dBm at 24.42 GHz, and has the phase noise of -86.6 dBc/Hz at 100 KHz and -76.5 dBc/Hz at 10 KHz offset from carrier frequency, and has suppression characteristics of -23 dBc and spurious noise of -65 dBc. Buffered 24.42 GHz PLHRO generates the output power of 5.6 dBm at 24.42 GHz and has the of a phase noise of -77.34 dBc/Hz at 100 KHz and -72 dBc/Hz at 100 KHz offset from carrier frequency.

### I. 서 론

발진기는 RF 신호를 변·복조 할 때 효율과 안정성 확보에 가장 큰 영향을 미치는 회로이다. 시스템에서 가장 중요한 문제는 국부발진기의 주파수 안정도(frequency stability)이며 본 논문에서는 높은 주파수 안정도 및 낮은 위상잡음의 PLHRO(Phase Locked Hair-pin Resonator Oscillator)를 설계 및 제작하였다. 전압제어발진기의 공진부는 안정성이 뛰어나며 온도 변화에 따른 영향이 적고 Q값이 높은 유전체 공진기를 많이 이용하였으나 최근 RF부

품들의 소형화, 경량화, 고집적화, 경제성 등의 요구에 따라 hair-pin과 같은 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)화 하기에 적합한 평면 구조의 공진기로 대체되고 있는 추세이다<sup>[1]</sup>. 기존의 일반적인 PLL(Phase Locked Oscillator)은 분주기나 Coupler, 완충 증폭기등의 주변회로가 추가로 사용되어 제조원가가 높아지며 소형화가 힘들다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 발진기를 두 개 사용하여 12.21 GHz의 발진기는 SPD(Sampling Phase Detector)의 Microwave Input으로 사용할 수 있으므로 부품의 크기를 현저히 줄일 수 있으며 원하는 주파수인 24.42 GHz는 발진기에 2차 고조파 정합회

\* 광운대학교 전자공학과 초고주파연구실(ushong@daisy.kwangwoon.ac.kr)

\*\* 광운대학교 전자통신공학과

논문번호 : 99515-1230, 접수일자 : 1999년 12월 30일

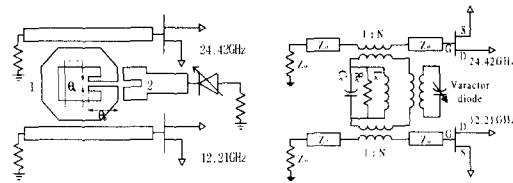
\* 이 논문은 1999년도 광운대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었음

로를 삽입하여 기본 주파수를 억압하고 2차 고조파 성분을 증대시키도록 하였다. 즉, 기본 주파수를 억압시키기 위해 발진기의 출력단에 기본 주파수의  $\lambda/4$ 에 해당하는 마이크로스트립 라인을 이용한 트랩(Trap)을 첨가하여 12.21 GHz 신호를 전기적으로 단락시켰다.

## II. 전압제어 발진기 설계

본 논문에서 구현한 발진기회로는 직렬캐환형이며 게이트단의 전송선로와 결합한 hair-pin 공진기는 대역저지필터로서 원하는 주파수를 충분히 되반사시켜야 한다<sup>[2]</sup>. 대역저지필터의 반사손실과 반사선 태도는 부하로 전달되는 에너지와 위상잡음 특성에 영향을 끼치며 이는 또한 공진기의 Q-factor와 직접적인 관계가 있다. 따라서 발진기의 선형설계 뿐 아니라 출력과 위상잡음 등을 예측하는 비선형설계시 실제 사용되는 hair-pin 공진기의 정확한 구현이 반드시 필요하다. 일반적인 hair-pin 공진기에 비해 작고 좋은 Q값 특성을 갖는 Sagawa가 제안한 공진기를 사용하였다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서 제안한 주파수 동조 형태는 12.21 GHz 발진기와 24.42 GHz 발진기를 동시에 주파수를 변화시킬 수 있는 특징이 있으며 크기를 현격히 줄일 수 있는 장점이 있다.



(a) 공진기 구조 (b) 등가회로

그림 1. 새로운 동조형태의 hair-pin 공진기

전압제어 발진기의 주파수 동조방법에는 기계적 동조와 전기적인 동조법이 있는데 PLL 시스템과 같은 응용에서는 주파수를 전기적으로 동조할 필요가 있다. 이때 낮은 위상잡음과 빠른 튜닝속도, 낮은 튜닝 전력을 갖는 바랙터 다이오드를 이용한 동조 방법을 사용하였다. 그림 1(a)에서 보듯이  $\theta_1$ 의 간격과  $\theta_2$  길이에 따라 공진주파수가 예민하게 변화한다. Hair-pin 공진기의 공진 주파수를 전기적으로 변화시키는 동조방법은 다음식으로 표현된다. 그림 1(b)의 공진기에서 바랙터 다이오드를 들여다 본 임피던스는

$$\sqrt{Z_{in}(1/j\omega C_v)} = Z_0, \quad Z_{in} = \omega N_1^2 C_e \quad (1)$$

이며  $L_i = Z_0^2 C_e$ 로 치환하면

$$Z_{ob} = (j\omega L_i / N_1^2) \quad (2)$$

$L_i' = L_i / N_1^2$ 이며  $N_1$ 은 이상적인 변압기의 권선비이며 총 인덕턴스는

$$L_{et} = L_e \parallel L_i' = L_e L_i' / (L_e + L_i') \quad (3)$$

이다. 따라서 Hair-pin 공진기의 새로운 공진주파수를 구하면

$$\omega_o' = \frac{1}{\sqrt{L_{et} C_e}} \approx \omega_o \left(1 + \frac{N_1^2 L_e}{2 Z_0^2 C_v}\right) \quad (4)$$

한편, 바랙터 캐패시턴스  $C_v$ 는

$$C_v = \frac{C_{jv}}{(1 + V_r/V_j)^M} \quad (5)$$

여기서  $V_j$  : diffusion potential

$C_{jv}$  : zero-bias junction capacitance

$M$  : PN 접합에 따른 계수

$M=1$ 인 경우라면 식 (4)는

$$\omega_o' = \omega_o \left[1 + \frac{N_1^2}{2 Z_0^2 C_{jv}} (1 + V_r/V_j)\right] \quad (6)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_o} \cong 1 + \frac{N_1^2 L_e}{2 Z_0^2 C_v} \quad (7)$$

로 표현되며, 따라서 동조된 새로운 주파수를 얻을 수 있다.

일반적으로 발진기는 내부 증폭기, 공진기, 정제환 회로 등으로 이루어진다. 초기 발진은 능동소자에 공급되는 DC전력이 변하여 노이즈 레벨에서 발진이 시작되며 발진 출력은 점점 성장하여 정상상태에 이르러 안정된 정현파를 만들어낸다. 이때 소자는 RF전력을 생성함으로 부성저항을 가져야 한다<sup>[3]</sup>. 트랜지스터는 2-단자망으로 보고 해석하면 편리하다. 그림 2는 2-단자망 발진기 모델을 보이고 있는데 공진부와 출력 정합회로로 나눌 수 있다. 또한 발진기 회로에서는 어느 한 단자에서 발진을 한다면 동시에 또다른 한쪽 단자에서도 발진이 일어나야 한다. 안정화 계수가 1보다 작아야 하며 만약 1

보다 크다면 공동단자를 바꾸어 주거나 정제환회로를 첨가하면 된다. 그림 2와 같은 2-단자망 발진기 모델은 공진회로와 출력정합회로 등으로 구성되며 소신호에 의한 발진 조건은 다음과 같다.

발진조건1 :  $K < 1$  ( $K$ =stability factor)

발진조건2 :  $\Gamma_{in} \Gamma_G = 1$  (8)

발진조건3 :  $\Gamma_{out} \Gamma_L = 1$

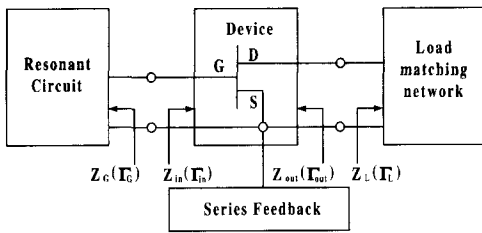


그림 2. 2-단자망 발진기 모델

소신호에 의한 식 (8)의 발진조건 3가지를 모두 만족하여 발진이 시작되면 발진기의 출력전력이 증가하게 된다. 이렇게 되기 위해서는 다음 식 (9)의 두 조건이 필요하다.

$$|R_{out}(V, \omega_0)| > 1.2 R_L(\omega_0) \tag{9}$$

$$X_{out}(V, \omega_0) + X_L(\omega_0) = 0$$

전압제어 발진기는 Libra6.1로 simulation 하였고 능동소자로는 저잡음 지수를 가지며 위상잡음을 최소화할 수 있는 GaAs MESFET인 HP Avantek의 ATF13786을 이용하였으며 주파수 동조를 위한 바랙터 다이오드는 넓은 동조범위와 낮은 직렬저항을 갖는 M/A-COM사의 MA46410을 이용하였다. 출력전력을 높이기 위한 증폭기는 Alpha사의 AFPO2N3를 사용하였고 비유전율  $\epsilon_r=2.6$ , 높이=0.54 mm 동박두께=0.018 mm인 테프론 기판을 사용하여 PLHRO를 설계 및 제작하였으며 스퍼리어스 및 히스테리시스를 억제하기 위하여 전송 선로의 끝단을 50  $\Omega$ 로 종단 시켰다.

그림 3은 설계한 12.21 GHz hair-pin 공진 발진기의 발진출력을 나타내는 것으로써 기본주파수의 전력은 10.3 dBm을 보이고 있고 약 32 dBc이상의 제 2 고조파 억압특성을 갖도록 설계하였다. 그림 4는 설계된 hair-pin 공진 발진기의 발진출력으로 24.42 GHz에서 2.62 dBm의 출력 전력과 약 24.6 dBc이상의 기본주파수 억압을 갖도록 하였다.

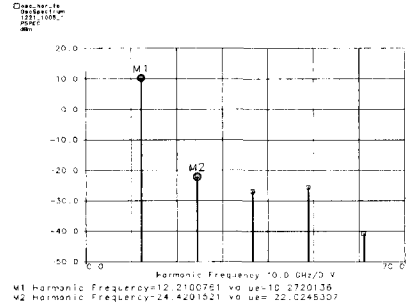


그림 3. 12.21 GHz 발진기의 전력 스펙트럼

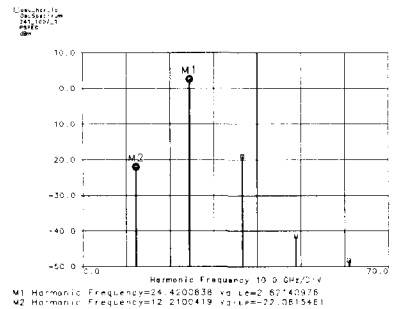


그림 4. 24.42 GHz 발진기의 전력 스펙트럼

위상고정 발진기는 안정적인 주파수를 얻기 위한 방법중의 하나로서 그림 5는 본 논문에서 구현한 위상고정 루프의 구성도를 보이고 있다. 위상고정 루프는 기준발진기(Reference Oscillator), 샘플링 위상 검출기(Sampling Phase Detector), 루프 필터 (Loop Filter) 그리고 전압제어 hair-pin 공진 발진기(VCHRO)로 구성되어 있다.

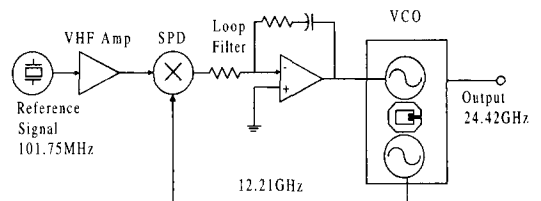


그림 5. PLHRO의 구성도

기준 신호는 TCXO(Temperature Compensation Crystal Oscillator)와 같이 주파수 안정도가 우수하고 위상잡음이 매우 좋아야 한다. 본 논문에서는 101.75 MHz의 수정 발진기를 주문 제작하여 사용하였으며 5 V 인가전압에 대해 약 7 dBm의 출력을 나타내었다. 그러나 기준 신호가 샘플링 위상 검출기를 동작시키기 위해서는 20~37 dBm 정도의 전력이 필요하므로 VHF 대역의 증폭기를 첨가하여 20 dBm

이상의 전력을 얻을 수 있도록 기준 발진기의 신호를 증폭하였다. 최대 동작주파수가 18 GHz까지인 SPD는 Alpha사의 SPD3472-018을 사용하였으며 내부에는 SRD(Step Recovery Diode)와, Capacitor, Schottky diode로 구성되어 있다<sup>[4][5]</sup>. 루프 필터는 위상 검출기의 출력 전압으로부터 잡음과 고조파 성분을 제거하여 평균 DC 전압을 발생시키며 포착(Capture) 및 고정범위(Lock Range), 대역폭(Bandwidth) 그리고 과도 응답(Transient Response)등과 같은 루프의 동적 성능(Dynamic Performance)을 결정한다. 본 논문에서는 능동 RC 필터를 사용하였으며 루프전달함수는 식 (10)과 같다.

$$H(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

$\omega_n$  : 루프의 특성 주파수,  
 $\zeta$  : 감쇠율(Damping Factor)

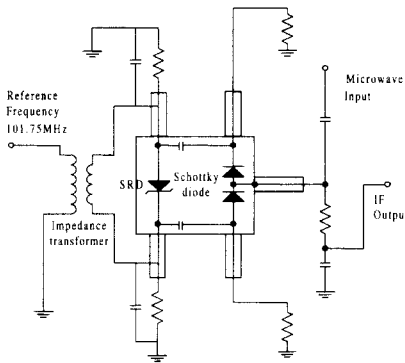
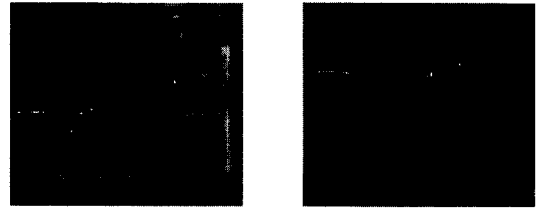


그림 6. 샘플링 위상 비교기 회로

그림 6은 샘플링 위상 비교기의 회로이며 샘플링 위상 비교기에서는 12.21 GHz 발진기에서 얻은 마이크로웨이브 출력신호와 발룬(Balun)으로 연결된 기준 신호가 입력된다. 샘플링 위상 비교기는 SRD (Step Recovery Diode), 2개의 쇼트키 다이오드, 결합 캐패시터로 구성되어 있다. 이것은 마이크로웨이브 발진기의 위상 비교 회로에 사용하도록 되어있는 것으로 샘플링 위상 비교기에 입력된 기준 주파수 101.75 MHz는 SRD에서 고조파 성분을 발생하게 한다. 이는 SRD에 입력된 기준 신호의 AC 순방향 반주기 동안에 전하를 충전하여 AC 역방향 반주기 동안 방전하게 된다. 이러한 SRD의 과도기 상태동안 기준 입력 신호의 주기와 같은 에지(edge)를 발생시킨다. 결합 캐패시터는 에지를 날카로운 임펄스 신호로 변화시키고, 이것을 쇼트키 다이오드

쌍으로 보낸다. 쇼트키 다이오드 쌍에서 마이크로웨이브 신호를 매우 짧은 시간 동안 샘플링하고 IF 필터를 통하여 출력을 얻는다.

### III. 제작 및 측정



(a) 마이크로웨이브 부분 (b) 위상고정 부분

그림 7. PLHRO 사진

그림 7은 VCO(Voltage Controlled Oscillator)와 위상고정소스 부분의 실물 사진이다. 측정장비는 HP사의 HP8563B 스펙트럼 analyzer를 이용하여 측정하였으며 바랙터 다이오드는 0 V에서 3.4 V까지 가변하면서 주파수와 출력의 변화를 측정하였다.

그림 8은 전체 12.21 GHz에서의 출력스펙트럼으로 14 dBm이고 위상잡음특성은 100 KHz offset 주파수 에서 -90.8 dBc/Hz를 나타내고 있다. 그림 9는 전압 제어 발진기의 동조된 스펙트럼으로 2.4 V에서 중심 주파수 12.21 GHz에 동조되었다. 12.23 MHz의 동조 대역폭을 나타내었으며 출력대역폭 내에서 ±0.15 dB의 출력 변화를 나타내었다.

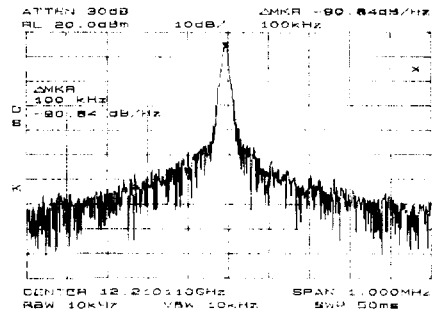


그림 8. 12.21 GHz 위상 잡음 특성

그림 10은 Free running 상태에서의 출력 전력과 위상잡음특성을 보이고 있는데 100 KHz offset 주파수에서 78.5 dBc/Hz를 나타내고 있다. 그림 11은 전압 제어 발진기의 동조된 스펙트럼으로 2.4V에서 중심 주파수 24.42 GHz에 동조되었다. 대역폭은 20.5 MHz의 동조 대역폭을 나타내었으며 출력대역

폭 내에서  $\pm 0.33$  dB의 매우 평탄한 출력 변화를 나타내었다. 그림 12는 위상이 고정되었을 때의 출력 스펙트럼으로 span 1 MHz에서 매우 안정한 주파수를 볼 수 있다. 그림 13에서는 -24 dBc의 기본 주파수 억압특성을 나타낸다. 그림 14는 완충증폭기를 첨가하지 않았을 때의 출력 스펙트럼과 phase noise이며 그림 15는 완충증폭기를 첨가하였을 때의 phase noise이다. 완충증폭기를 첨가하였을 때 phase noise가 다소 나빠진 점을 볼 수 있다.

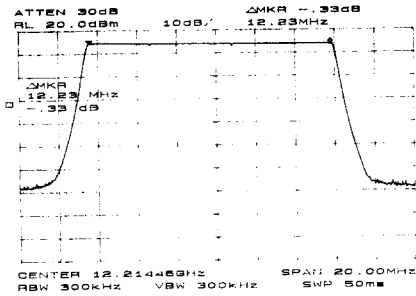


그림 9. 12.21 GHz 동조 스펙트럼

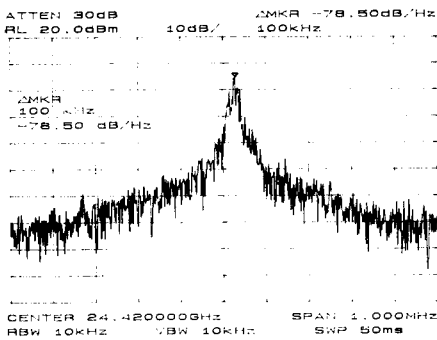


그림 10. 24.42 GHz Free running 상태 출력

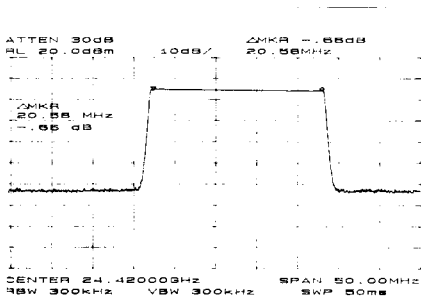


그림 11. 24.42 GHz 동조 스펙트럼

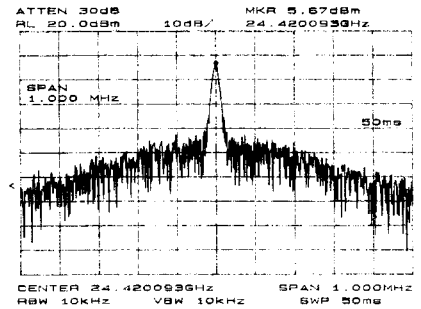


그림 12. PLHRO의 출력 스펙트럼

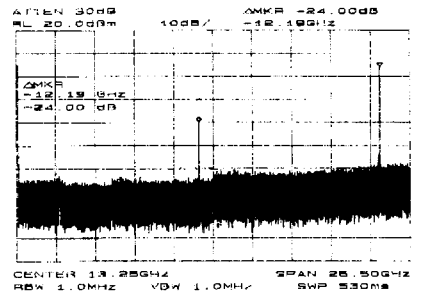


그림 13. PLHRO의 기본 주파수 억압특성

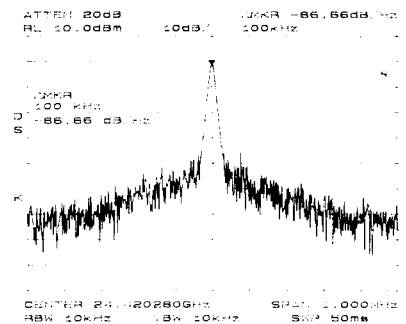


그림 14. PLHRO의 phase noise

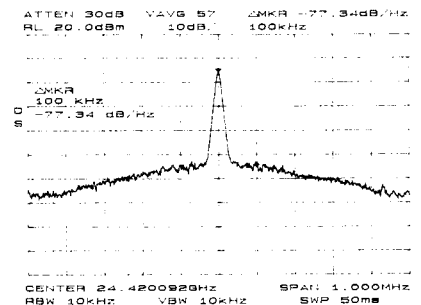


그림 15. Buffered PLHRO의 phase noise

#### IV. 결론

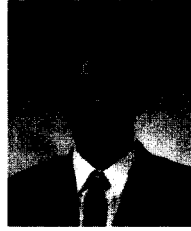
본 논문에서는 GaAs MESFET와 PHEMT를 이용하여 Buffered PLHRO와 바랙터 다이오드를 이용하여 전기적으로 발진주파수를 동조할 수 있도록 한 전압제어 발진기를 설계 및 제작하였다. 측정된 중심주파수(24.42 GHz)에서는 5.67 dBm의 출력전력과 24 dBc의 기본주파수 억압 특성을 얻었으며 발진기의 중요한 특성인 위상잡음은 발진기 자체만을 측정하였을 때는 -86.66 dBc/Hz로 좋은 특성을 나타내었지만 완충증폭기를 첨가한 경우에는 100 KHz offset 주파수에서 -77 dBc/Hz, 10 KHz offset 주파수에서 -72 dBc/Hz로 위상잡음이 다소 나빠지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 문제는 package형태의 소자를 사용하지 않고 chip형태의 소자를 사용하여 제작한다면 phase noise를 좋게 할 수 있을 것이다. 바랙터 다이오드의 가변 전압에 따른 발진 주파수의 동조 대역폭은 20.56 MHz로 동조대역 내에  $\pm 0.33$  dBm 평탄한 출력전력특성을 얻었다 설계 제작된 PLHRO는 향후 출력전력을 향상시키고 위상잡음을 개선시키면 광대역 무선 시스템용 국부발진기의 신호원으로 사용할 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] Morikazu Sagawa, K. Takahashi, and M. Makimoto "Miniaturized Hairpin Resoantor Filter and Their Application to Receiver Front-End MIC's," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 37, No 12, pp. 1991-1996, Dec., 1989
- [2] A. Poducameni and L.A. bermudez, "Large Signal Design of GaAs FET Oscillator using Input Dielectric Resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 31, No. 4, pp.358-361, April, 1983.
- [3] E. Holtzman, *Solid-state microwave power oscillator design*, Artech House, Boston. London, chap. 3, 1992.
- [4] Alpha Semiconductor Division, *Sampling phase detectors*, Data Sheet, Mar., 1990.
- [5] Metelics corporation, *The sampling phase detector*, Application Note, Apr., 1990.

이 용 덕(Yong-Deuk Lee)

정회원



1998년 2월 : 대전산업대학교

전자 공학과 졸업

2000년 2월 : 광운대학교 전파

공학과 공학석사

2000년 3월 ~ 현재 : 광운대학교

전파공학과 박사과정

<주관심 분야> 초고주파 회로설계, 위성통신

장 준 혁(Jun-Hyuk Jang)

정회원



1998년 2월 : 한남대학교 전자

공학과 졸업

2000년 2월 : 광운대학교 전파

공학과 공학석사

2000년 3월 ~ 현재 :

(주)세원텔레콤 주임연구원

<주관심 분야> 초고주파 회로설계, MMIC

이 기 학(Ki-Hak Lee)

정회원



1969년 2월 : 광운대학교 무선

통신공학과 졸업

2000년 2월 : 연세대학교 전자

공학과 공학석사

1978년 4월 ~ 현재 : 안양과학

대학 교수

<주관심 분야> 초고주파 회로설계, 안테나 측정

류 근 관(Keun-Kwan Ryu)

한국통신학회논문지 제25권 제2A호 참조

홍 의 석(Ui-Seok Hong)

한국통신학회논문지 제25권 제2A호 참조