

## 광학적으로 구동되는 위상배열 안테나 시스템을 위한 Injection-locked 발진기의 설계 및 제작

正會員 李秀烈\*\*, 李柱悅\*\*, 李斗漢\*\*, 洪義錫\*

A Design of Injection-locked Oscillator for optically fed Phased-array antenna systems

Su Yeol Lee\*\*, Joo Yeol Lee\*\*, Du Han Lee\*\*, Ui-Seok Hong\* Regular Members

### 要 約

본 논문에서는 광신호 처리를 이용한 위상배열 안테나용 Injection-locked 발진기(ILO)를 제작하였다. MESFET와 HEMT로써 2단 광대역 증폭기를 구성하였고, 케환소자로서 유전체공진기를 사용하여 11GHz의 발진주파수와 월등히 개선된 AM, FM 및 PM 잡음특성을 얻었다. 또한 ILPLO(Injection-Locked Phase-Locked-Oscillator)와 위상변조기에 이용될 수 있는 전압제어 ILO를 제작하여 측정하였다. 이러한 기법으로 구현된 ILO는 MMIC 제작에도 유용하다.

### ABSTRACT

In this paper, ILO(Injection-locked Oscillator) for optically fed Phased-array antenna systems was developed. The circuit, which utilizes MESFET and HEMT two-stage wideband amplifier and dielectric resonator for feedback element, was designed at 11GHz and provided significantly reduced AM, FM and PM noise degradation. In addition, a VCILO(Voltage-Contrnolled ILO) for ILPLO(Injection-Locked Phase-Locked-Oscillator) and Phase-Modulator is implemented and measured. The ILO's realization with this technique is useful in MMIC.

\*Department of Radio Science & Engineering,  
Kwangwoon Univ.

\*\*Department of Electronic & Communication  
Engineering, Kwangwoon Univ.

論文番號 : 95230-0703

接受日字 : 1995年 7月 3日

## I. 서 론

현재 각국에서 경쟁적으로 통신위성을 보유하게 됨에 따라 인접지역간의 전파간섭으로 인한 영향을 최소화하기 위하여 방사패턴은 물론 빔의 방향(beam pointing)을 엄격히 규제하고 있다. 이에 따라 선택된 지역 내에 빔의 방사전력을 최대화 시키고, 인접지역에 미치는 전력을 최소화시키는 빔 형성을 위해 위상배열 안테나가 필요하게 되었다. 위상배열 안테나의 개념은 여러 개의 초고주파 발진소자(microwave oscillators)를 배열함으로써 공간 전력결합(spatial power combining)을 통한 높은 출력의 코히런트 신호원을 만드는 것이다. 이러한 개념들이 현실적으로 가능하게 된 것은 solid state power amplifier, monolithic microwave integrated circuit 등의 GaAs를 기초로 한 초고주파 발진소자, 디지털 소자등이 개발되었기 때문이다. 최근에는 초고속 fiber-optic(FO)링크를 이용한 전력분배기술이 개발되고 있다. 그 일련의 연구 중 하나로서 본 논문에서는 각 T/R모듈의 주파수와 위상동기를 보장하고, 광학적으로 구동되는 능동 위상배열 안테나에서 고속 fiber-optic링크와 T/R 모듈사이의 효율적인 인터페이스 역할을 하는 IL(injection-locked) 발진기를 구현함이 목표이다. 먼저 설계요구사항을 정의하고 요구사항을 만족하도록 ILO를 설계하고 회로 시뮬레이션을 통하여 최적의 설계변수를 구하고 실제로 구현하여 발진기의 성능을 분석하였다.

2장에서는 ILO의 본 논문에서 제작된 two-stage transmission-type ILO에 대한 수학적 해석을 하였다.

3장에서는 설계요구사항을 제시하고 단계별로 설계되는 ILO 각 부분의 설계과정과 이에 해당하는 시뮬레이션의 결과들을 제시하였다. 4장에서는 3장에서 설계된

각 부분별의 최적화를 통하여 구현한 발진기를 측정하여 분석하였다. 5장에서는 결론을 맺고 앞으로의 남은 연구과제를 제시하였다.

## II. 위상배열 안테나용 ILO의 해석

### 2-1. 위상배열 안테나 시스템

앞으로의 통신위성 시스템과 이미지 전송 시스템에 사용되는 T/R(Transmit/Receive)모듈에는 대량의 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)로 구성되는 Large-aperture phased-array 안테나가 중요한 역할을 할 것으로 예측할 수 있다. 이런 안테나는 신속한 beam-hopping 을 요구하는 통신위성에 유용하게 활용될 것이다.

그림 1은 그 실례를 보이고 있다. CPU(Central Processing Unit)로부터의 마이크로웨이브 RF신호는 광신호에 의해 변조된 후 FO(Fiber-Optic)네트워크를 통해 각각의 T/R모듈로 공급된다. 이때 p-i-n photodiode등의 detector로써 광변조된 마이크로웨이브 신호를 복조할 수 있다. 이러한 광변조 신호는 매우 미약하며 잡음의 영향을 많이 받고 있다. 따라서 미약한 광신호를 고전력, 저잡음 마이크로웨이브 신호로 변환해 주는 회로부가 요구된다. 즉 FO링크와 T/R모듈 사이의 효율적인 인터페이스 역할을 할 수 있는 새로운 부품의 개발이 절실하다. 본 논문에서 개발된 ILO는 이러한 요구에 부합하는 성능규격을 갖도록 설계되었다.

그림 2는 패치 안테나를 공진기로 사용하는 발진기의 드레인 전압(Vpd)를 변화시키므로써 free-running주파수를 변화시켜 각 발진기간의 위상조절과 그에 따른 빔 스캐닝을 할 수 있는 능동 위상배열 안테나를 나타내고 있다. 이 방법은 기존의 위상천이기(phase shifters)를 별도로 사용하는 방법보다 훨씬 간단한 회

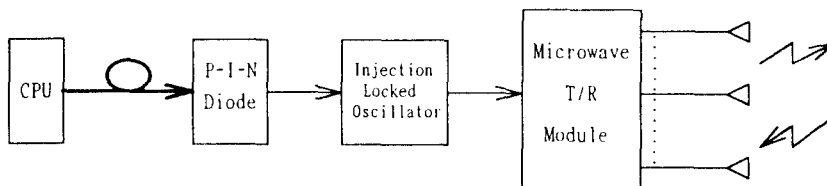


그림 1. FO 네트워크를 이용한 위상배열 안테나 시스템의 블럭도  
Fig. 1. Block diagram of phased-array antenna systems including FO network

로를 가능케한다<sup>[1]</sup>. 이러한 능동 위상배열 안테나의 입력 port에 본 논문에서 제안된 ILO의 안정된 신호를 reference 신호로서 입력하여 구동시킬 수 있다.

2.2 Injection-locked 발진기

1920년대에 Van Der Pol<sup>[2]</sup>에 의해 최초로 이론이 정립된 injection locking은 1946년 Aller<sup>[3]</sup>에 의해 전자회로 발진기의 locking phenomena에 관한 이론으로 더 한층 정립되었고 negative resistance injection-locked oscillator를 개발한 kurokawa<sup>[4]</sup>에 의해 실험적인 결과가 수학적 표현으로 설명됨이 증명되었다. 일반적으로 ILO(Injection -Locked Oscillator)는 free-running 발진기의 입력단에 locking 신호인 외부 RF신호를 인가하므로써 안정된 신호를 얻을 수 있다.

외부에서 공급되는 RF 신호는 일반적으로 출력신호보다 10dB 정도 낮은 신호레벨로 인가되며 이러한 형태로 구성된 발진기는 여러가지 중요한 이점을 얻을 수 있다. 그 첫번째로 free-running 발진기에서 얻을 수 없는 우수한 AM, FM, 그리고 PM 잡음 특성을 얻을 수 있다. 또한 매우 안정된 외부신호가 인가된다면 그 발진기는 안정화되면서 그 출력신호 레벨도 증폭이 되는 장점을 갖는다. ILO의 injection-locking gain은 입력 locking signal의 전력레벨에 대한 ILO의 출력레벨의 비로써 표현된다. 이득이 낮으면 injection-locking BW가 늘어나며, 반대로 이득이 높아지면 injection-locking BW가 작아진다.

ILO의 power-added efficiency는 다음과 같이

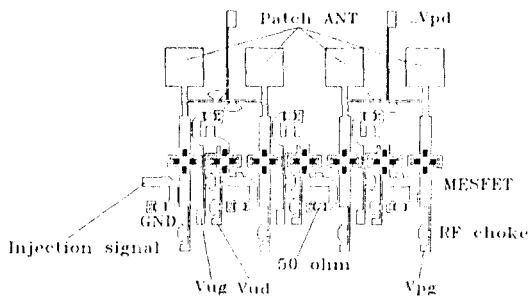


그림 2. ILO를 이용한 능동 위상배열 안테나  
Fig. 2. Active phased-array antenna using ILO

$$\eta_a = \frac{P_o - P_i}{P_a} \tag{1}$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서  $P_o$ 는 ILO의 출력 전력레벨,  $P_i$ 는 locking 신호의 전력레벨이며  $P_{dc}$ 는 인가되는 DC 전력을 나타낸다.

ILO를 구조적으로 분류한다면 reflection-type injection-locking과 transmission-type injection-locking으로 구분할 수 있다. 1979년 Tajima와 Mishima에 의해 도입된 transmission-type ILO는 GaAs FET와 같은 three-terminal device를 적용하기가 용이하고, RF power 출력단과 locking signal 입력단이 분리되었기 때문에 reflection-type에 비해 우수한 성능을 갖고 있으며, 일반적으로 보다 넓은 locking range를 갖고있다.

본 논문에서는 transmission-type injection-locking의 일종인 two-stage injection-locked oscillator를 이용하였다. 이는 two-stage ILO가 phase-locked loop를 결합하기 위해 가장 적당한 구조이므로 이를 선택한 동기이기도 하다.

2.3 Two-stage transmission-type ILO

본 논문에서 제안된 ILO의 형태를 그림 3에서 보이고 있다. 1단에 사용되는 소자는 저잡음 소자 즉, HEMT를 이용하여 선형증폭 동작하에서 우수한 잡음 특성을 갖게 하고 2단에 사용되는 소자는 고이득을 갖는 소자를 사용하여 높은 출력을 얻게되며, 궤환요소로 사용되는 유전체공진기는 발진을 유도하고 주파수를 결정하는 요소로 사용된다. 그림 3은 발진기의 locking BW를 표현하기 위해 각각의 변수를 나타내고 있다. 이 ILO의 출력이 그림 2의 injection signal 포트에 입력되는 것이다.

각 단의 전압을  $V_1, V_2, V_3$ 로 나타내고 발진기 입력단에서의 결합계수를  $b_{ci}$ , 발진기 출력단에서의 전압계수를  $b_{co}$ 로 표현할 수 있다. 이때 유전체 공진기의 외부 양호도(external Q-factor)를  $Q_{ext}$ 로 나타낸다. 그리고 각 단의 증폭기가 비선형 동작을 한다고 볼때 일반적인 전력급수의 2개항으로 표현된다.

$$V_2 = A_{10}(1-n_{13}V_1^2)V_1 \tag{2}$$

$$V_3 = A_{20}(1-n_{23}V_2^2)V_2 \tag{3}$$

여기서  $A_{10}$ 과  $A_{20}$ 은 각 단의 전압이득이며  $n_{13}$ 과  $n_{23}$

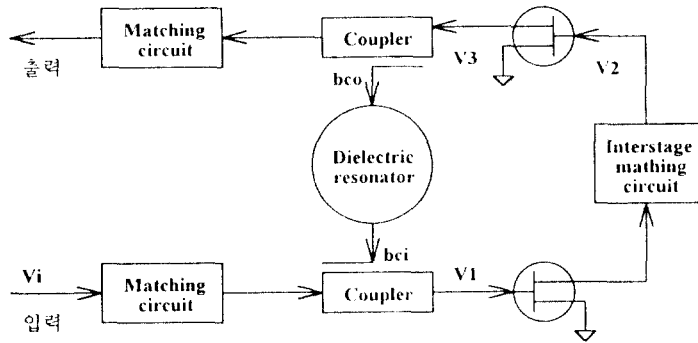


그림 3. Two-stage transmission-type ILO  
Fig. 3. Two-stage transmission-type ILO

은 전력급수의 3차항 계수이다.

식(5)와 식(6)을 결합하면 전체 전압 전송이득(voltage transfer gain)을 구할 수 있는데 이 식은

$$V_3 = A_0(1-n_3V_1^2)V_1 \tag{4}$$

로써 나타내며 여기서  $A_0 = A_{10}A_{20}$ 이고  $n_3 = n_{13}n_{23}A_{10}^2$ 이다.

유전체 공진기는 다음과 같이 표현된다.

$$D = D_r + jD_i = \frac{1 - j2Q_{ext}\delta}{1 + (j2Q_{ext}\delta)^2} = \frac{1}{1 + j2Q_{ext}\delta} \tag{5}$$

공진기의 공진주파수  $f_r$ 로 부터 주파수 편차는

$$\delta = \frac{f - f_r}{f_r} \tag{6}$$

로 표현되므로 port 1의 케환전압과 injection 전압의 합은

$$V_1 = V_3b_c(D_r - jD_i) + V_{ir} + jV_{ii} \tag{7}$$

이며  $bc = bc_{in}bc_o$ 는 전체 케환 결합인자이며  $V_{ir}$ 과  $V_{ii}$ 는 injection 신호전압의 실수와 허수값이 된다. Free-running 조건하에서는  $V_{ir} = V_{ii} = 0$ 이고 free-running 발진주파수는 유전체공진기의 공진주파수와 같게된다. 그러므로 식(7)로부터  $\delta = 0$ ,  $D = 1$ ,  $V_1 = V_3b_c$ 이 됨을 알 수 있고 injection 신호의 위상은 아래식과 같게된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{-b_c V_3 D_i}{V_{ir}} \right) \tag{8}$$

Injection 신호의 위상을  $-\pi/2$ 부터  $+\pi/2$ 까지  $180^\circ$ 로 변화시킬 때 locking BW의 결정이 가능하게된다.  $\theta = \pm\pi/2$ 일때 식(8)은  $V_{ir} = 0$ 이 되어야한다.  $\delta = \delta_m$ 일때, 즉  $f$ 가 break lock 주파수  $f_m$ 일때 식(7)의 허수부분은

$$V_3 b_c \frac{2Q_{ext}\delta_m}{1 + (2Q_{ext}\delta_m)^2} - V_{ii} = 0 \tag{9}$$

가 된다. 만약  $\delta_m$ 이 매우 작다고 가정하면 식(9)는

$$2V_3 b_c Q_{ext}\delta_m \approx V_{ii} \tag{10}$$

로 됨을 알 수 있으며 대역폭 B는  $2\delta_m$ 에 의해

$$B = 2\delta_m \approx \frac{1}{Q_{ext}b_c} \frac{V_{ii}}{V_3} \tag{11}$$

이 되며  $V_{ir} = 0$ 이기 때문에

$$\frac{V_{ii}}{V_3} = \sqrt{\frac{P_i}{P_o}} \tag{12}$$

표현된다. 그러므로,

$$B \approx \frac{1}{Q_{ext}b_c} \sqrt{\frac{P_i}{P_o}} \tag{13}$$

임을 알 수 있다. Locking BW는 케환결합인자  $b_c$ 에 반비례하고,  $b_c$ 는 전압이득  $A_0$ 에 반비례한다. 결과적으로 locking BW는 전압이득이 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 이로써 2단 증폭기를 이용하여 이득을 높여주

는 타당성이 증명된다.

### III. 설계 및 제작

제안된 ILO를 구현하기 위해서 우선적으로 마이크로 웨이브 주파수 대역의 2단 증폭기를 설계한 후, 마이크로 스트립 라인과 유전체 공진기간의 역위상 커플링 (antiphaseal coupling) 관계를 이용병렬케한 회로부를 설계하였다. 또한 3-terminal MESFET 바랙터를 이용하여 ILPLO 및 위상변조기에 이용할 수 있는 전압 제어 ILO를 제작하였다.

일반적인 마이크로파 발진기를 설계하는 과정은 제조 회사로부터 주어지는 data sheet상의 S-parameter로부터 smith chart상에서 부정저항을 갖는 발진기의 설계로 시작된다. 본 연구에서도 이러한 이론을 적용하는 한편, 상용마이크로웨이브 시뮬레이터인 독일 Jansen Microwave사의 LINMIC+/N과 미국 HP사의 MDS

b.o6.01을 이용하여 ILO를 설계 및 시뮬레이션 하였고 최적화하여 실제 제작하였다.

전압제어 발진기는 그 발진주파수가 제어전압에 대해 선형적으로 변화하는 것이 가장 중요하다. 뿐만 아니라 위상 안정도가 좋아야 하며 이득계수가 K0가 크고 주파수 조정이 용이해야 하며 저가(low cost)이어야한다. 그러므로 이 조건을 만족시키기 위해 VCILO에 MESFET 바랙터의 새로운 활용을 제안하였다.

ILO에 마이크로스트립 라인과 MESFET 바랙터를 삽입하여 전압제어 주파수 변화부를 설계한다. 전압에 대한 주파수 변동이 선형이도록 하기 위해 MESFET 바랙터의 리액턴스 전압  $V_{gr}$ 이 소자의  $V_{gso}$ (gate to source breackdown 전압)과  $V_{gdo}$ (gate to drain breackdown 전압)이하이도록 유지하여야 한다. ILPLL 발진기에 사용될 VCILO는 전압에 대한 주파수 변화가 선형적이어야만 주위 온도가 변화해도 기준 신호를 추적할 수 있다. 따라서 두 마이크로스트립 선로간

Injection-locked Oscillator Schematic

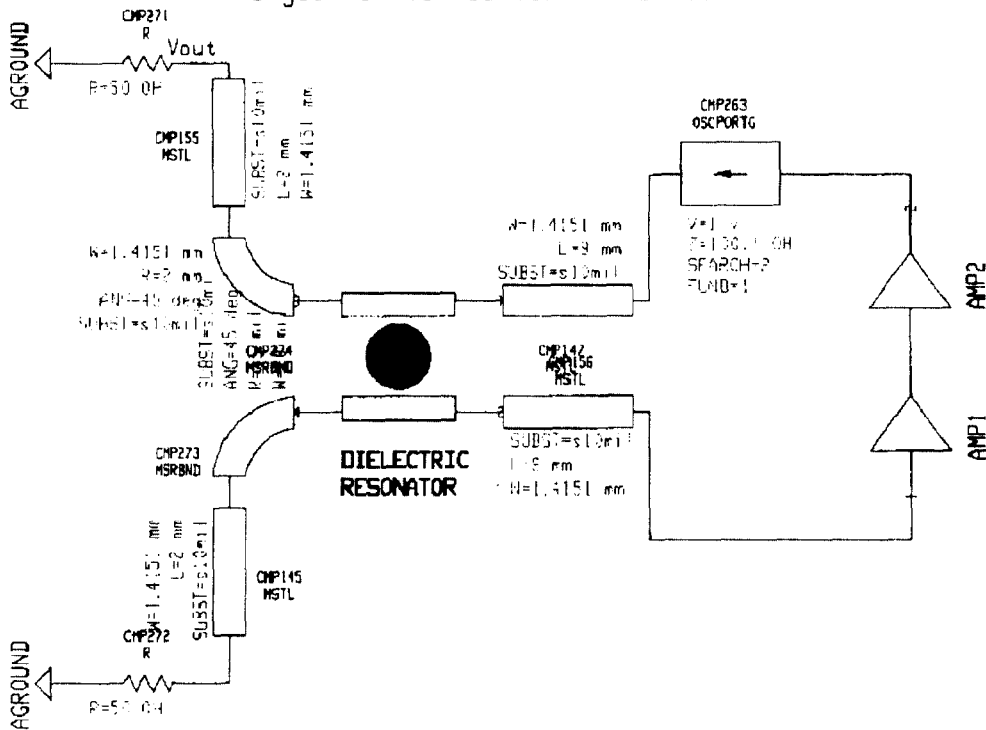


그림 4. ILO를 시뮬레이션 하기 위한 ILO의 블록도  
Fig. 4. Block diagram of the ILO for simulation

의 간격  $d$ 는 공진 주파수의 선형적 변화에 영향을 끼치므로 선로 간격을 여러가지로 달리하여 제어 전압에 대한 공진주파수를 측정하여 MESFET 바랙터와 유전체 공진기 사이에 알맞은 Coupling 이 이루어지도록 조정한다. 이때 최적의 커플링을 구함으로써 넓은 locking range 와 향상된 위상잡음 특성을 얻을 수 있다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 MDS에서 시뮬레이션을 하기 위한 회로 schematic을 작성하여 ILO의 설계를 시작하였다. 여기서 병렬 유전체 공진기 회로부, HEMT AMP부, MESFET AMP부등 3개의 심볼을 사용하여 회로를 간략화시켰고 마이크로스트립과 유전체 공진기의

커플링은 transformer로써 등가 모델을 구하여 시뮬레이션 하였다.

1단 증폭기부는 선형 증폭기로서 동작하게 되므로, 일반적인 MESFET보다 noise figure(NF) 특성이 좋은 HEMT를 저잡음 바이어스 조건하에서 사용하였다. 실제 사용된 HEMT로는 Fujitsu사의 HEMT인 FHX05L이고, 2단 증폭기부에는 잡음지수가 낮으면서 출력력이득이 9dB 정도로 다른 FET보다 우수한 Avantek사의 ATF13036을 사용하였다. 여기서 voltage control을 위한 MESFET 바랙터 회로부는 생략하였다.

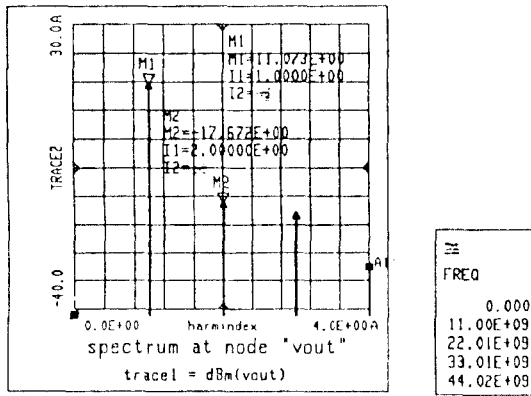


그림 5-(a). ILO의 비선형해석 결과치  
Fig. 5-(a). Nonlinear simulated output spectrum of the ILO

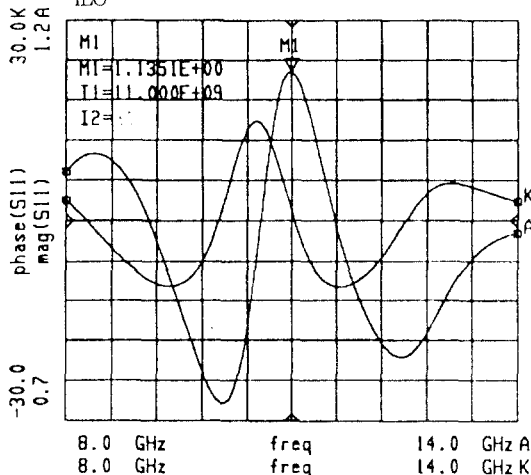


그림 5-(b). 11 GHz에서의 발진가능성  
Fig. 5-(b). Oscillation possibility at 11GHz

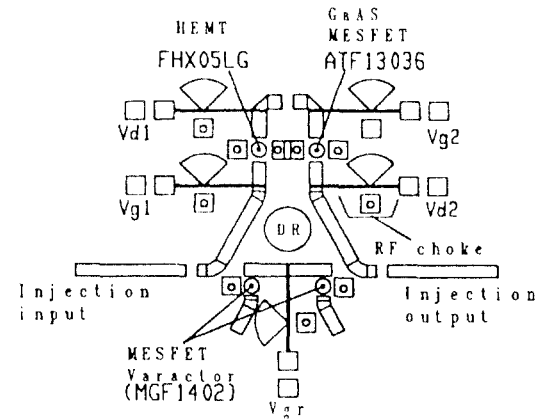


그림 6. MESFET 바랙터를 장착한 ILO의 회로도  
Fig. 6. Circuit layout of the ILO with MESFET varactor

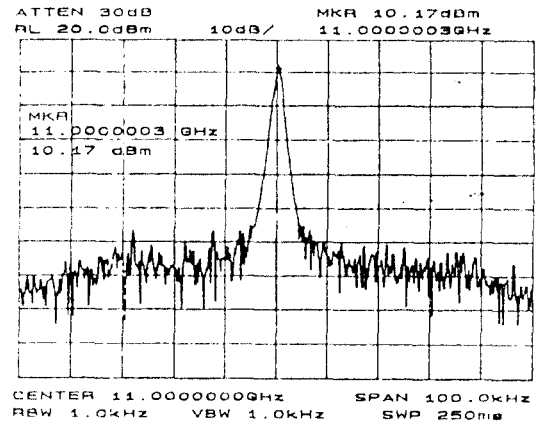


그림 7. Free-running 모드 일때의 주파수스펙트럼  
Fig. 7. Frequency spectrum at free-running mode

그림 5-(a)는 MDS를 이용하여 HB(harmonic balance)방법으로 시뮬레이션한 주파수 스펙트럼을, 그림 5-(b)는 11GHz에서의 발진가능성을 보여주고 있다. 이것을 기초로해서 그림 6은 MESFET 바랙터를 장착한 VCILLO의 회로도를 나타내고 있다.

#### IV. 실험 및 분석

먼저 ILO에 injection 신호를 인가하지 않고 injection port에 50Ω으로 종단시킨 후, 2개의 MESFET 바랙터에 전압을 인가하지 않은 상태인 free-running 모드에서 각 증폭기단의 Vds, Ids가 2.5V, 20mA가 되도록 인가전압을 가변시켜 스펙트럼 아날라이저로 측정했다. 네트워크 아날라이저로 측정된 2단 증폭기의 이득은 약 18dB 이었다. 그림 7은 SPAN이 100KHz일 때의 free-running 모드 측정 스펙트럼이며 11.000GHz 에서 출력이 10.17dBm의 결과를 얻었다. 제조회사에서 준 유전체 공진기 DRD050UE022A의 특성은 공진주파수가 10.54~11.46GHz임을 고려할 때 설계값과 동일한 11GHz에서 발진하도록 유전체 공진기의 위치를 조정하여 측정하였다. 그림 8에서 보듯이 injection-locking모드로 동작하였을 때, 정확히 11GHz, -10dBm의 injection 신호에 고정되어 10.83dBm의 출력과 11GHz에서 42Hz의 offset이 일어나는 것을 관찰하였다. short term stability가 불안정한 상태인 free-running 모드에서의 주파수 안

정도와 출력레벨이 개선됐음을 알 수 있고 injection 신호에 대한 출력전력의 이득이 20dB 정도이므로 우수한 injection gain 특성을 나타냈다.

광학적 급전(Optical feeding)을 위해서는 광신호를 injection 신호로 사용하여 p-i-n photodiode 를 통해 광전변환 후 ILO에 주입해야 한다. 그러나 실험비용에 대한 상당한 제약이 있어 이것에 대한 등가적인 정합 회로만 구성하여 Network analyzer HP8510C를 사용하여 injection 신호를 주입하였다. Injection 신호에 대한 locking BW는 약 7MHz 정도였다. 진폭변조 억압(AM compression)특성을 측정하기 위해 injection 신호를 -20dBm에서 -5dBm까지 가변시켜 입력하였을때 출력 power가 거의 일정함을 볼 수 있었고 출력 스펙트럼의 양쪽 sideband 레벨이 같음을 보아 위상변조 역시 free-running 모드에 비해 매우 감소되었음을 알 수 있다.

VCILLO의 동작을 위해서는 유전체 공진기와 2개의 MESFET바랙터와 결합된 마이크로스트립의 미세한 조정이 요하게 된다. 이는 부전압을 인가함에 따라 charge depletion 영역이 게이트와 소오스 사이의 캐패시턴스 Cgs와 게이트와 드레인 사이의 캐패시턴스 Cgd를 생성시키므로써 이 두 캐패시턴스로 작용케하는 합인 게이트 depletion 캐패시턴스 Cg를 MESFET 바랙터의 dominant 캐패시턴스로 작용케하는 요인이 된다. Vgr에 부전압을 가할수록 depletion width가 증가하나, pinch off이하일 때 depletion width가

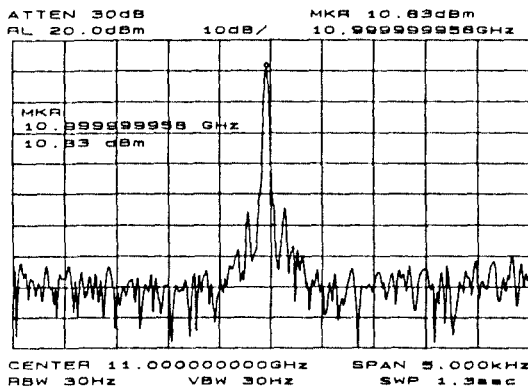


그림 8. Injection-locking 모드 일때의 주파수스펙트럼  
Fig. 8. Frequency spectrum at Injection-locking mode

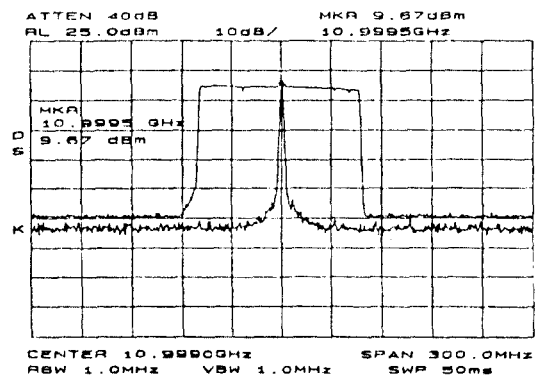


그림 9. VCILLO의 주파수 튜닝 스펙트럼  
Fig. 9. Frequency tuning spectrum of VCILLO

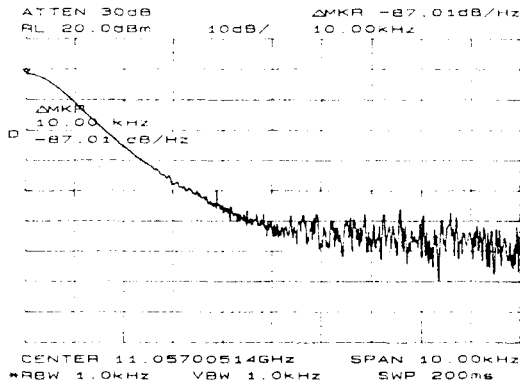


그림 10. ILO의 위상잡음 특성  
Fig. 10. Phase noise characteristics of ILO

거의 증가하지 않으며 이때  $C_g$ 가 매우 작고 변화가 거의 없다. 그러므로 data sheet에 주어진 MGF1402의  $V_{gso}$ 와  $V_{gdo}$ 가  $-6V$ 이므로 약  $-5.0V$  이하의  $V_{gr}$ 에서는  $C_g$ 의 변화가 거의 없게 되므로 MESFET 바랙터로 인가되는 전압변화 레벨을  $-5.0V$ 에서  $0V$ 로 조정해 주면 된다. 그림 9에서는 VCILO의 주파수 튜닝 대역 폭을 보이고 있다. 중심 주파수  $11GHz$ 를 중심으로 약  $110MHz$ 의 주파수 변화를 보이고 있다. 그림 10은 injection locking 모드에서의 PM noise 특성을 나타내고 있다. 네트워크 아날라저로부터 입력되는 신호 자체가  $10KHz$  offset에서  $-90dBc/Hz$ 의 잡음 레벨을 갖는 것을 고려할때, injection locking 모드에서의 잡음 특성은 injection 신호의 잡음레벨에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 표 1에서는 본 논문에서 설계 및 제작된 ILO 과 VCILO에 대한 성능규격을 나타내고 있다.

## V. 결 론

본 논문에서 제안된 ILO는 FO와 마이크로웨이브용 T/R 모듈 사이의 효율적인 인터페이스 역할을 한다. 또한 VCILO는 국부발진기 및 위상 변조기에도 이용될 수 있으며 PLL을 부가하므로써 주파수 동기 특성 뿐만

표 1. Performance Specification

Frequency range	11.00 GHz
Locking range(-10 dBm의 injection 신호에 대해)	7 MHz
Tuning range (VCO에서)	110 MSz
Power Output	$>10$ dBm
Injection Gain (-10 dBm의 injection 신호에 대해)	20 dB
Harmonic below carrier	-45 dBc
Phase Noise (10 KHz)	-85 dBc/Hz

아니라 더욱 안정된 위상잡음 특성도 얻을 수 있다. 또한 회로의 전체 Q(Quality factor)값을 증가시키는 유전체공진기 대신 마이크로스트립 라인 및 능동 레관소자를 이용하여 더욱 넓은 locking range를 얻으므로써 밀리미터웨이브 대역에서의 응용을 위한 subharmonic injection-locked 발진기를 구현할 수 있다.

## 참고문헌

1. Tatsuo Itoh et al., "A unilateral injection-locking type active phased array for beam scanning." 1994 IEEE MTT-S International Microwave Symp. digest, pp.1231-1234.
2. van der Pol, B., "Forced oscillators in circuit with nonlinear resistance." Phil. Mag., Vol. 3, pp.65-80, Jan. 1927
3. Adler, R., "A study of locking phenomena in oscillators," Proc. IRE, Vol. 34, No. 6, pp.351-357, June. 1946
4. Kurokawa, K., "Injection locking of microwave solid-state oscillators." Proc. IEEE, Vol. 61, No. 10, pp.1386-1410, Oct. 1973





李秀烈(Su Yeol Lee) 정회원

1970년 6월 2일생  
1994년 2월 : 광운대학교 전자통신 공학과 졸업(공학사)  
1994년 3월~현재 : 광운대학교 대학원 전자통신공학과 석사과정 재학중

※주관심 분야 : MIC 및 MMIC 설계, 비선형 초고주파회로의 해석 및 설계



李柱悅(Joo Yeol Lee) 정회원

1964년 3월 13일생  
1990년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)  
1992년 2월 : 광운대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사)

1992년 3월~현재 : 광운대학교 대학원 전자통신공학과 박사과정 재학중

※주관심 분야 : MIC 및 MMIC 설계, 비선형 초고주파회로의 해석 및 설계, VSAT 설계등



李斗漢(Du Han Lee) 정회원

1963년 6월 5일생  
1988년 2월 : 광운대학교 전자통신 공학과 졸업(공학사)  
1990년 2월 : 광운대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사)

1994년 2월 : 광운대학교 대학원 전자통신공학과 박사과정 수료

※주관심 분야 : MIC 및 MMIC회로 설계, Antenna & Propagation, 이동 및 위성통신

洪義鎰(Ui-Seok Hong)

정회원

1946년 1월 16일생  
1968년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)  
1973년 9월 : 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)  
1982년 11월 : 독일 Aachen공대 전자공학과 졸업(공학박사)  
1983년 1월~1992년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 교수  
1992년 2월~현재 : 광운대학교 전파공학과 교수  
1984년 3월~현재 : 한국통신학회 업무이사  
1988년 3월~현재 : 국가기술제도 전문위원  
1989년 1월~1991년 12월 : 대한전자공학회 편집위원