

# 위상고정루프를 이용한 낮은 위상 잡음 특성을 갖는 발진기 설계 및 제작

† 박창현\* · 김장구\*\* · 최병하\*\*\*

\*국립목포해양대학교 해양전자·통신공학과, \*\*일본 동경공업대학 물리전자시스템창조,  
\*\*\*국립목포해양대학교 해양전자·통신공학과 교수

## Design and Fabrication of on Oscillator with Low Phase Noise Characteristic using a Phase Locked Loop

† Chang-Hyun Park\*, Jang-Gu Kim\*\*, Byung-Ha Choi\*\*\*

\*Division of Marine Electronic & comm. Eng, Mokpo National Maritime University, Mokpo 571-2, Korea  
\*\*Department of Electronics and Applied Physics, Japan, Tokyo Institute of Technology  
\*\*\*Division of Marine Electronic & comm. Eng, Mokpo National Maritime University, Mokpo 571-2, Korea

**요 약 :** 본 논문에서는 부정저항 특성을 갖는 발진기 이론을 적용하여 직렬 케환형 유전체 공진 발진기를 구성하고 바랙터 다이오드를 삽입하여 전압 제어 유전체 공진 발진기를 제작한 후, 샘플링 위상 비교기와 루프 필터를 결합한 PLL방식을 도입하여 고안정 주파수 발생기인 위상고정 유전체 공진형 발진기를 설계 및 제작하였다. 설계 제작한 PLDRO는 주파수 12.05 GHz에서 13.54 dBm의 출력 전력을 얻었으며, 이때의 주파수 가변 동조 범위는 중심 주파수에서 약  $\pm 7.6$  MHz 이며, 전력 평탄도는 0.2 dBm으로서 매우 우수한 선형 특성 결과를 얻었다. 또한 데이터 전송시 오율특성에 상당한 영향을 미치는 위상 잡음은 반송파로부터 100 kHz 떨어진 offset 지점에서 -114.5 dBc/Hz를 얻었다. 고조파 억압 특성은 2 차 고조파에서 -41.49 dB 이하의 특성을 나타내었다. 이러한 특성은 위상고정을 하기 전의 전압 제어 발진기보다 더욱 향상된 특성을 보였으며, 종전의 PLDRO보다 위상 잡음과 전력 평탄도변을 개선시킬 수가 있었다.

**핵심용어 :** 전압 제어 발진기, 위상고정 유전체 공진형 발진기, 샘플링 위상 비교기, 루프 필터, 위상 잡음, 위상고정루프

**Abstract :** In this paper, we designed VCO(voltage controlled oscillator) that is composed of a dielectric resonator and a varactor diode, and the PLDRO(phase locked dielectric resonator oscillator) that is combined with the sampling phase detector and loop filter. The results at 12.05 GHz show the output power is 13.54 dBm. frequency tuning range approximately  $\pm 7.5$  MHz, and power variation over the tuning range less than 0.2 dB, respectively. The phase noise which effects on bits error rate in digital communication is obtained with -114.5 dBc/Hz at 100 kHz offset from carrier, and The second harmonic suppression is less than -41.49 dBc. These measured results are found to be more improved than those of VCO without adopting PLL, and the phase noise and power variation performance characteristics show the better performances than those of conventional PLL.

**Key words :** VCO, PLDRO, Sampling phase detector, Loop filter, Phase noise, PLL

## 1. 서 론

모든 통신 시스템에 필수적으로 사용되는 발진기는 통신용량이 증가함에 따라 보다 높고 안정된 발진주파수를 필요로 하고, 주위 온도 변화에 안정되고 낮은 위상잡음 특성을 가지며 소형화된 발진기가 요구된다. 최근에는 Ku-Band에서 통신 위성을 이용하여 데이터, 음성, 영상 등의 디지털 신호를 송수신하고 있으며, 이러한 디지털 통신 시스템, 특히 위상변조 방식을 사용하는 통신 시스템에서는 마이크로웨이브 장치내의 국부 발진기의 주파수 안정도 및 위상잡음 특성이 전체 시

스템의 데이터오율(Bit Error Rate)특성에 중대한 영향을 끼친다. 이러한 통신 시스템의 국부 발진기로는 수정 발진기를 사용하여 여러 단 체배하는 것이 있으나, 그러한 장치는 복잡하고 부피가 클 뿐만 아니라 주파수 안정도가 떨어지고 잡음이 많은 단점이 있다. 한편 BJT 발진기는 낮은 위상잡음과 높은 DC-RF 변환효율을 갖고 있기 때문에 거의 10 GHz 이하의 주파수에서 많이 이용되고 있으나, 높은 주파수에서는 성능저하로 인해 MESFET, 또는 HEMT를 이용한다. Gunn 발진기는 IMPATT 발진기에 비해 FM 잡음이 작다는 장점을 지닌 반면 효율과 출력이 떨어지는 단점이 있다<sup>[1]</sup>.

† 교신저자 : 박창현(정회원), ls8088@mmu.ac.kr, 061)240-7117  
\*\* 정회원, jgkim9541@mmu.ac.kr 81)080-6545-2724  
\*\*\* 종신회원, antenna@mmu.ac.kr 061)240-7117

발진기의 공진회로를 구성하는 수동소자로는 마이크로스트립, 유전체 공진기가 있으며 유전체 공진기는 도파관에 비하여 부피가 작고 온도 변화에 따른 공진 주파수 변화가 매우 적을 뿐만 아니라 가격이 저렴하여 안정화를 요구하는 MIC 발진기의 주파수 결정소자로 직접 사용되고 있다. 그러나 일반적으로 유전체 공진기의 주파수 안정도는 수  $ppm/^{\circ}C$ 이므로 데이터 신호의 송수신용으로는 부적합하다. 따라서 데이터 신호의 송수신을 위해서는 발진 주파수가 보다 안정되고 위상 잡음을 줄여야 할 필요가 있다. 이에 고안정도를 얻기 위한 최근의 기술 동향은 높은 Q값을 가진 유전체 공진기를 이용하여 마이크로웨이브 주파수대역에서 전압제어 유전체 공진 발진기를 만들고 샘플링 위상비교기를 이용하여 VHF 대역의 수정발진기신호에 위상을 고정시키는 위상고정 유전체 공진형 발진기가 소개되고 있다<sup>[2],[3]</sup>.

본 논문에서는 부성저항 특성을 갖는 발진기 이론을 적용하여 직렬 궤환형 유전체 공진 발진기를 구성하고 바랙터 다이오드를 삽입하여 전압 제어 유전체 공진 발진기를 제작한 후, 샘플링 위상비교기와 루프 필터를 결합한 PLL방식을 도입하여 고안정 주파수 발생기인 위상고정 유전체 공진형 발진기를 설계 및 제작하였다.

## 2. 위상고정 유전체 공진형 발진기

위상고정 유전체 공진형 발진기(PLDRO)는 기본적인 동작 원리가 PLL과 유사한 일종의 주파수 궤환회로로서, 기준 신호의 위상과 유전체 공진형 발진기의 출력 신호 위상을 동기시키는 회로이다. 유전체 공진형 발진기의 발진 주파수를 안정화시키기 위한 위상고정 유전체 공진형 발진기는 다음과 같은 4가지 요소로 구성되며 본 논문에서 제작된 시스템 구성도는 Fig. 1과 같다.

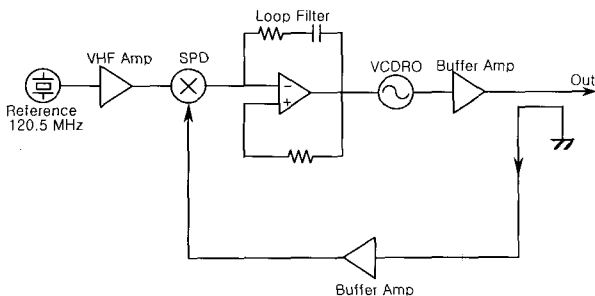


Fig. 1 Block diagram of the PLDRO

Fig. 1의 4가지 구성은 기준 발진기와 샘플링 위상 비교기, 루프 필터, 전압 제어 유전체 공진 발진기로 구성된다. 위상고정 유전체 공진형 발진기를 구현하기 위해서는 우선적으로 마이크로웨이브 주파수 대역의 유전체 공진형 발진기를 설계 후, 제어 전압에 의해 주파수 변화가 일어나도록 마이크로스트립 라인과 바랙터 다이오드를 이용하여 전압제어 유전체 공

진형 발진기를 설계한다.

전압제어 유전체 공진형 발진기의 주파수 궤환을 위해 결합기를 설계하며 위상비교를 위한 샘플링 위상비교기 회로에서는 최대 위상비교 전압이 얻어지도록 한다. 루프 필터의 RC 시정수 값을 결정하여 최종적으로 전압제어 유전체 공진형 발진기의 신호가 위상 고정되도록 한다. 기준 신호는 TCXO(Temperature Compensation Crystal Oscillator)와 같은 높은 주파수 안정도와 우수한 위상잡음 특성을 가져야 한다. 본 논문에서는 120.5 MHz의 수정 발진기를 사용하였고, 그 출력 신호가 작아 샘플링 위상 비교기에 직접 사용할 수가 없으므로 VHF 대역의 증폭기를 구현하여 약 13 dBm 이상의 출력을 얻었다. 그리고 페라이트 코어를 이용하여 발진을 제작하였으며 이것은 불균형한 수정 발진기 부분과 균형한 샘플링 위상 비교기 부분을 연결하기 위한 것이다.

### 2.1 전압 제어 유전체 공진형 발진기

본 논문에서 사용되는 소자로서는 NEC사의 NE32584C MESFET으로서 제조사에서 제공하는 비선형 파라미터를 이용하였고, 주파수 가변에 사용되는 바랙터 다이오드는 M/A COM사의 MA-46451, 유전체 공진기로서는 아이텍사의 IDR03을 사용하였다. 설계에 사용된 회로 설계 시뮬레이터는 Agilent사의 Advanced Design System(ADS)를 이용하여 최적화하였다.

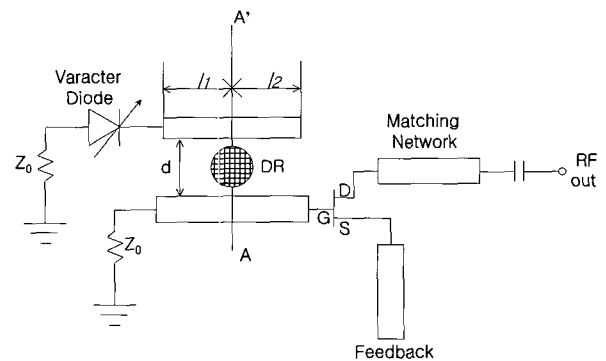


Fig. 2 Configuration of VCDRO

전압 제어 유전체 공진형 발진기의 일반적인 구조는 주파수 전압 제어부, 공진부, 증폭 소자, 최대의 파워를 갖도록 설계하는 출력 매칭회로 그리고 바이어스 회로로 구성되어있으며, 구조는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서의 DR은 두 개의 마이크로스트립 라인과 동시에 자기적 결합을 일으킨다. 이는 대역저지필터의 역할을 하며 길이  $l_1, l_2$ 는  $\lambda/4$ 를 유지하여 AA'면에서 최대 자기 결합을 갖도록 하였다. 결합면에서 바라본 입력 임피던스는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Z_{in} = j\omega Z_0^2 C_v v(t) \quad (1)$$

이때, 변환 인덕턴스  $L_t = Z_0^2 C_v v(t)$  이고,  $AA'$ 에서 바라본 임피던스

$$Z_{AA'} = (j\omega L_t / N_1^2) \quad (2)$$

바랙터에 의한 식 (2)의 입력 인덕턴스 변화는 이상적인 변압기를 통해서 공진회로의 총 인덕턴스  $L_{et}$ 를 다음 식(3)과 같이 변화시킨다.

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

그리고 전달 인덕턴스  $L_t'$ 은 다음 식 (4)와 같다.

$$L_t' = L_t / N_1^2 \quad (4)$$

여기서  $N_1$ 은 이상적인 변압기의 권선비이다. 그러므로 총 인덕턴스의 변화로 기존의 공진 주파수  $\omega_0$ 는 새로운 공진 주파수  $\omega_o'$ 에서 공진이 일어난다.

$$\omega_o' = \frac{1}{\sqrt{L_{et} C_e}} \cong \omega_o \left\{ 1 + \frac{N_1^2 L_e}{2Z_0 C_v v(t)} \right\} \quad (5)$$

식 (5)에서 공진기와 마이크로 스트립 라인의 결합을 증가시키면 이상적인 변압기의 권선비  $N_1$ 이 증가한다. 따라서 바랙터에 의한 영향이 증가되어 공진주파수의 변화 대역폭이 넓어짐을 알 수 있다.  $\beta$ 와 Quality factor와의 관계는 다음 식 (6)과 같이 된다(khanna and Garault, 1983).

$$Q_u = Q_L(1 + \beta) = \beta Q_e \quad (6)$$

그리고 등가 모델 파라미터 값  $R, L, C$  값은  $\beta$  와  $\omega_0$ 의 관계로서 다음 식 (7)과 같다(Gonzalez, 1997).

$$R = 2Z_0\beta, L = \frac{R}{Q_u\omega_0}, C = \frac{Q_u}{\omega_0 R} \quad (7)$$

초기 발진을 하기 위한 조건은  $S_{11}$ 의 크기가 1보다 커야하며, 칩의 발진가능성을 분석한 결과 발진조건을 만족하지 못하였다. 따라서 안정한 발진 조건을 만족하기 위해서는 소스 측에 케환(feedback)회로를 추가하여야 한다. 케환에는 직렬 케환과 병렬 케환이 있는데 본 논문에서는 직렬 케환 방식으로 개방 스타트브를 달았다. 케환을 추가한 결과 원하는 주파수에서  $S_{11}$ 의 크기가 1보다 크고 위상은 0도로서 Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 발진조건을 만족하였다.

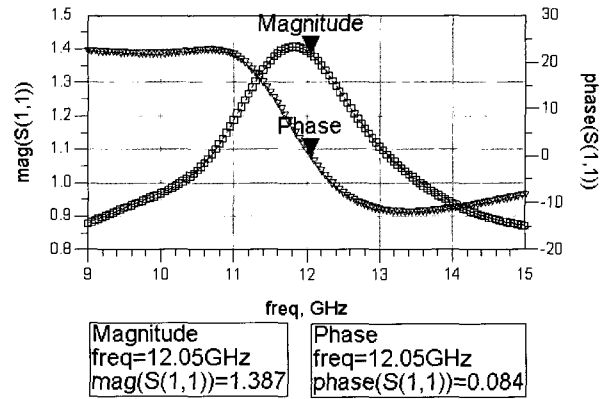


Fig. 3 Oscillation test

부하 정합 회로는 설계 주파수에서 최대의 전력을 얻을 수 있도록 결정하여야 하며 부하 임피던스는 일반적으로 다음의 식 (8)으로서 결정된다<sup>[6]</sup>.

$$R_L(\omega_o) + jX_L(\omega_o) = -\frac{R_{IN}(0, \omega_o)}{3} - jX_{IN}(0, \omega_o) \quad (8)$$

소신호 파라미터에 의해 설계된 발진기 회로에서 계산된 부하 임피던스  $Z_L$ 을 50  $\Omega$ 과 정합이 되도록 오픈 스타트브를 사용한 출력 정합 회로를 구성한 후, 발진 특성 예측을 하기 위하여 ADS를 이용하여 하모닉 발란스 시뮬레이션을 하였다.

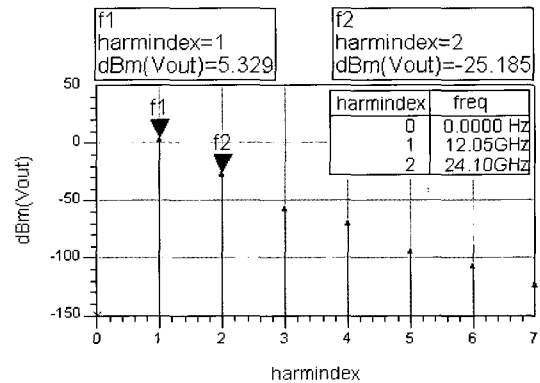


Fig. 4 Output characteristics

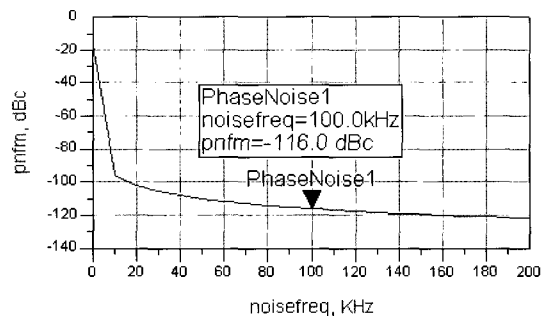


Fig. 5 Phase noise

설계된 VCDRO의 시뮬레이션 결과 출력 특성은 12.05 GHz에서 약 5.33 dBm, 고조파 응답은 기본 주파수 대비 -30.51 dBc, 그리고 위상 잡음은 100 kHz offset 주파수에서 -116 dBc/Hz를 얻었다.

### 2.2 샘플링 위상 비교기

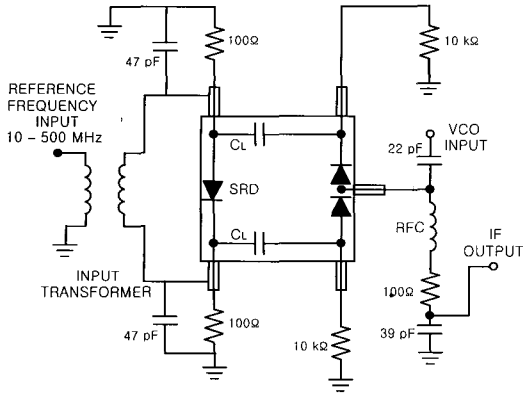


Fig. 6 Sampling phase detector

샘플링 위상 비교기에서는 -10 dB 방향성 결합기에서 얻은 마이크로웨이브의 출력 신호와 발진으로 연결된 기준 신호가 입력된다. 샘플링 위상 비교기의 내부에는 고조파를 발생하는 SRD(Step Recovery Diode)가 있어 120.5 MHz의 기준신호의 100번째 고조파 성분과 전압제어 유전체 공진형 발진기에서 발생한 마이크로웨이브 신호가 샘플링 위상비교기에 인가되어 위상 비교하게 된다. Fig. 6은 본 논문에서 사용한 샘플링 위상 비교기로서, 부품화 되어있는 Skywork사의 SPD1103-111을 사용하였다. 샘플링 위상 비교기는 마이크로웨이브 입력과 기준 신호가 동시에 존재하는 경우에만 두 신호의 위상차인 IF 출력 전압이 얻어진다.

### 2.3 완충 증폭기

전압 제어 발진기 출력단과 샘플링 위상 비교기 사이에는 완충 증폭기를 삽입하여, 일정한 전력을 샘플링 위상 비교기에 공급하여 위상 비교기 이득을 일정하게 유지하였고, 또 최종 출력 단에서의 완충 증폭기는 출력 전력을 일정하게 유지시켜 주었다.

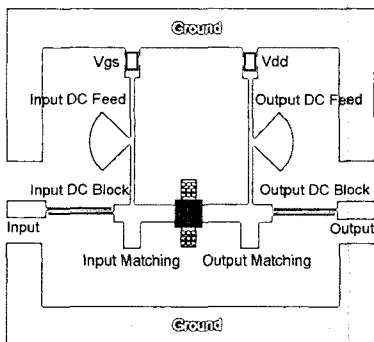


Fig. 7 Layout of the buffer amplifier

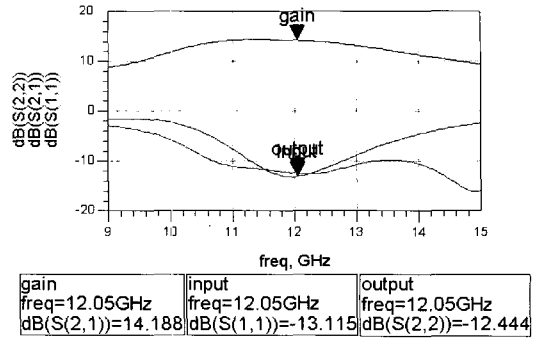


Fig. 8 Simulated results of the buffer amplifier

완충 증폭기에 사용한 GaAs FET 소자는 NEC사의 NE450284로서 12 ~ 26 GHz주파수 대역에서 잡음 특성과 이득 특성이 우수한 소자이다. Fig. 7은 완충 증폭기의 레이아웃 그림이다. Fig. 8은 완충 증폭기의 시뮬레이션 결과로서 이득은 약 14.19 dB, 입·출력 반사손실은 각각 -13.12 dB, -12.44 dB로서 매우 양호한 특성을 얻었다.

## 3. 제작 및 측정 결과

설계에서 최적화시킨 위상 고정 전압 제어 유전체 발진기는 사진 식각 부식 방법으로 TACONIC사의 RF-35 기판을 이용하여 제작하였고, 이를 측정하기 위하여 Agilent사의 스펙트럼 분석기 E4407B, Anritsu사의 벡터 회로망 분석기 37169A 및 전원 공급기를 이용하여 전압 제어 유전체 공진형 발진기 부분과 완충 증폭기 부분을 각각 측정을 한 다음 전체적인 측정을 하였다.

### 3.1 전압 제어 유전체 공진형 발진기 측정

전압 제어 유전체 공진형 발진기의 바이어스 조건은 게이트 전압이 -0.3 V이고 드레인 전압은 2 V, 그리고 전류는 25 mA이다. 또한 바랙터 다이오드는 가변 특성이 좋은 M/A COM사의 MA46451을 사용하였다. 전압 제어 유전체 공진형 발진기의 주파수 특성은 중심 주파수 12.05 GHz에서 약 5.88 dBm이 측정되었으며, 설계치와 비교할 때 매우 유사한 특성을 얻었다. Fig. 9는 발진기의 출력 주파수 특성을 나타낸다.

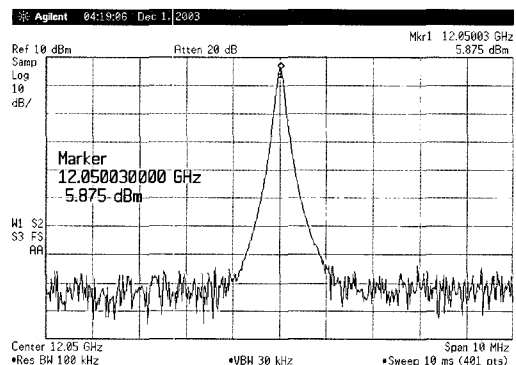


Fig. 9 Frequency characteristics

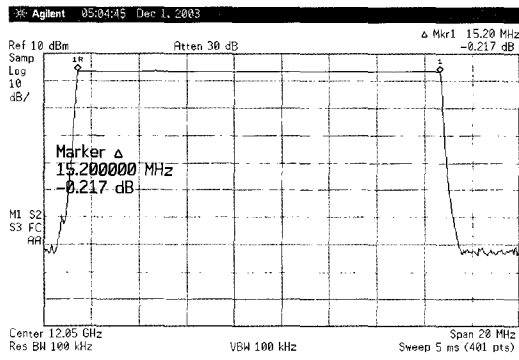


Fig. 10 Tuning spectrum of DRVCO

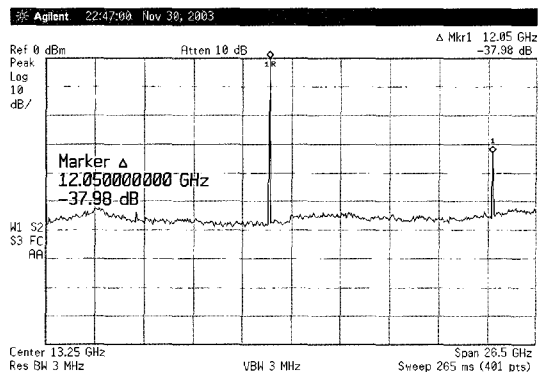


Fig. 13 Harmonic characteristics

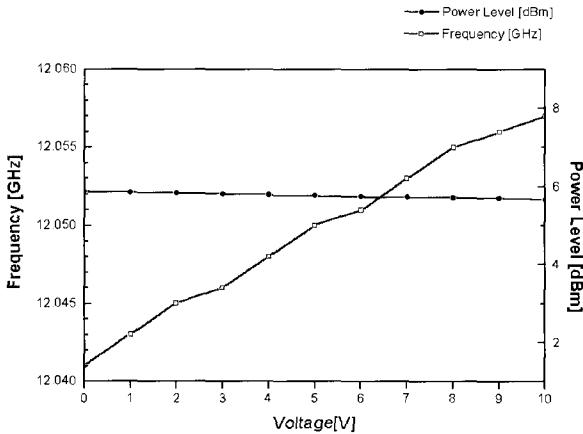


Fig. 11 Output power and frequency response as a function of tuning voltage

바랙터 다이오드에 인가되는 전압이 5 V를 중심으로 0 V에서 10 V까지 가변 될 때 주파수 동조범위는 약 15 MHz로 Fig. 10에서 보여주며, Fig. 11에서는 주파수 제어 전압을 0 V에서 10 V까지 변화시켰을 때의 주파수 변화와 출력 변화를 그래프 상에 나타낸 것이다. 동조 스펙트럼은 그래프에서 보여주듯이 전력 평탄도가 약 0.2 dB로 매우 우수한 선형 특성을 보이고 있다. 시스템의 전체적인 잡음 특성과 BER에 영향을 주는 발진기의 위상 잡음을 측정 한 결과 100 kHz offset 주파수에서 약 -107 dBc/Hz로서 측정되었으며, 고조파 억압 특성은 2차 고조파에서 약 -37.98 dBc로 설계치보다 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

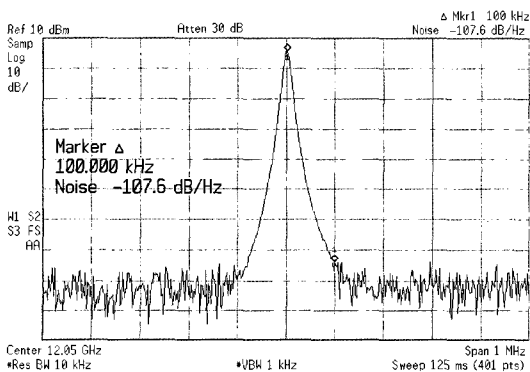


Fig. 12 Phase noise characteristics

### 3.2 완충 증폭기 측정

완충 증폭기는 드레인 전압이 2 V이고 전류는 20 mA의 바이어스 조건에서 Anritsu사의 벡터 회로망 분석기 37169A를 이용하여 측정하였다. 측정 결과 Fig. 14에서 보여주듯이 이득은 중심 주파수 12.05 GHz에서 약 14.68 dB를 얻을 수 있었으며, 입·출력 반사 손실은 각각 -14.68 dB와 -19.51 dB로 각각 측정되었다. Fig. 15에서는 완충 증폭기의 입력 전력 대비 출력 전력을 표시하였다.

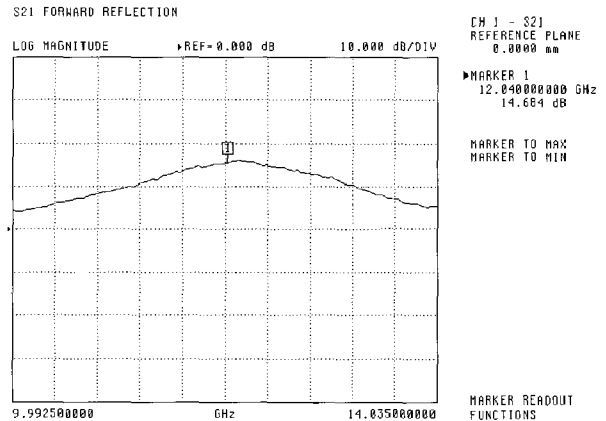


Fig. 14(a) Gain

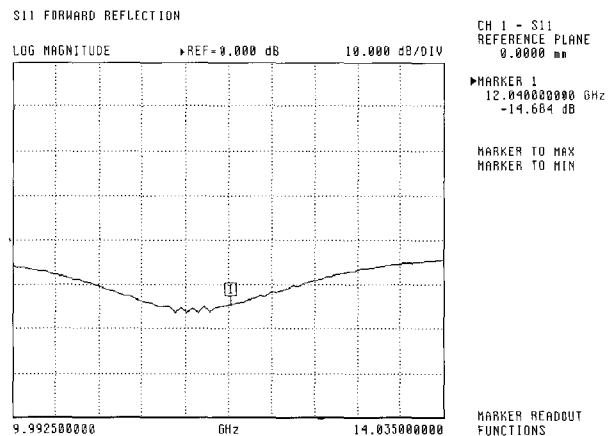


Fig. 14(b) Input return loss

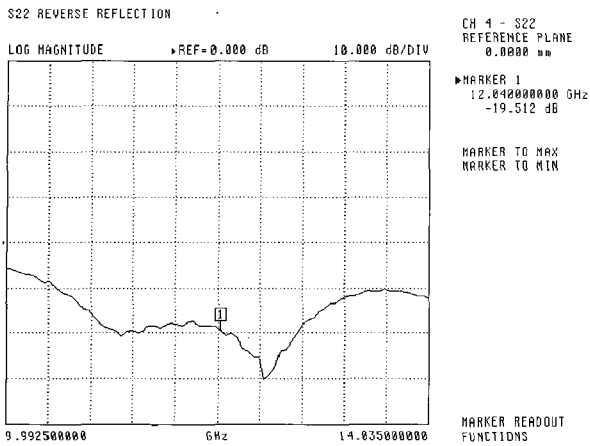


Fig. 14(c) Output return loss

Fig. 14 Characteristics of the buffer amplifier

### 3.3 위상 고정 유전체 공진 발진기 측정

위상 고정 유전체 공진형 발진기의 구성으로는 전압 제어 유전체 공진형 발진기, 샘플링 위상 비교기, 루프 필터, 그리고 완충 증폭기와 VHF대역의 증폭기, 바이어스회로로 구성되어 있으며, Fig. 16는 PLDRO의 출력 주파수 특성을 측정된 결과이다. Fig. 17은 위상이 고정된 PLDRO의 위상 잡음을 측정된 결과로서 중심 주파수 12.05 GHz에서 측정된 위상 잡음은 100 kHz offset에서 약 -114 dBc/Hz로 더욱 안정된 위상 잡음 특성을 나타냄을 알 수가 있다.

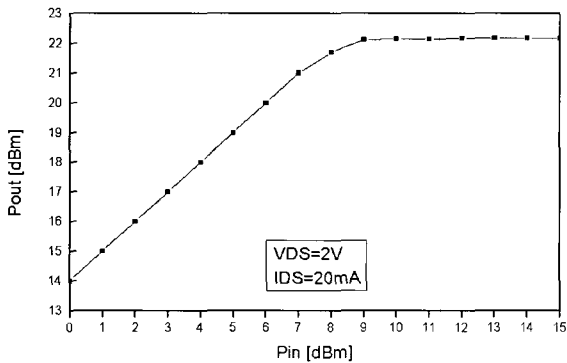


Fig. 15 Output power characteristic versus input power

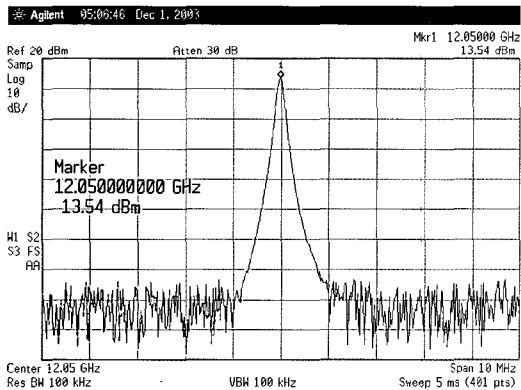


Fig. 16 Frequency characteristics of the PLDRO

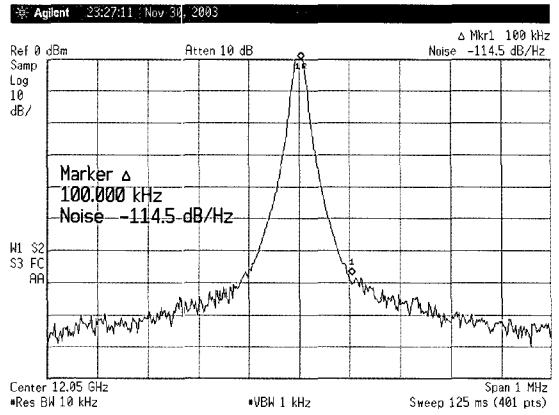


Fig. 17 Phase noise of the PLDRO

Fig. 18은 발진기의 고조파를 측정된 것으로, 기본 주파수와 2차 고조파와의 억압 특성은 -41.49 dB로 매우 우수한 성능을 보이고 있으며, 이러한 특성은 완충 증폭기의 정합회로 및 바이어스 조정으로 향상된 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

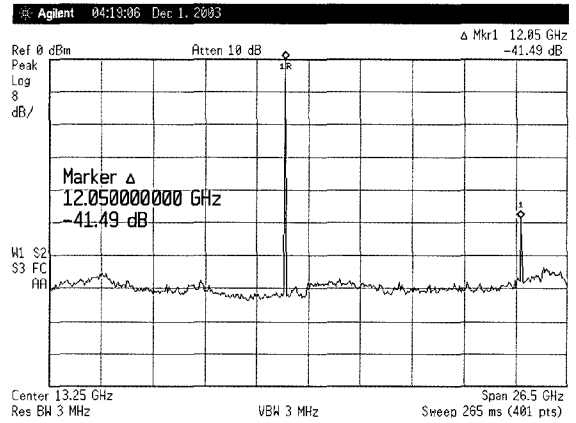


Fig. 18 Harmonic characteristics of the PLDRO

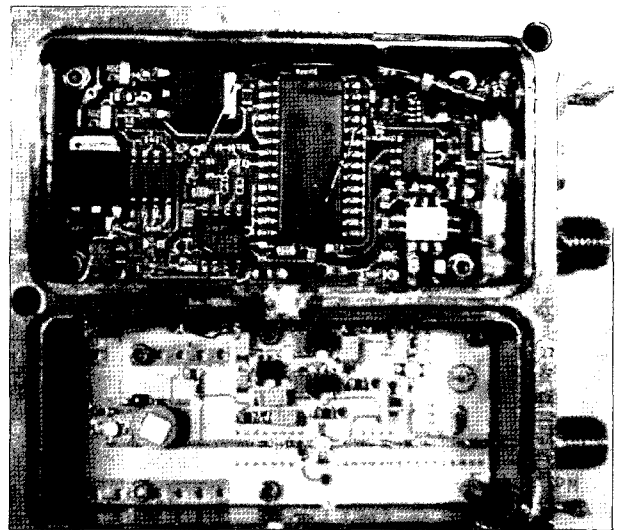


Fig. 19 Photograph of the Fabricated PLDRO

## 4. 결 론

본 논문에서는 낮은 위상잡음 특성을 가지면서 매우 안정된 주파수 발진을 하기 위한 위상고정 유전체 공진형 발진기를 설계 및 제작하였다. 이를 위하여 전압 제어 유전체 공진형 발진기에 샘플링 위상 비교기를 첨부하여 위상고정 유전체 공진형 발진기를 설계 및 제작하는데 주요 목표를 두었다. 설계 제작한 위상고정 유전체 공진형 발진기는 설계 주파수 12.05 GHz에서 13.54 dBm의 출력 전력을 얻었으며, 이때의 주파수가변 동조 범위는 중심 주파수 12.05 GHz에서 약  $\pm 7.6$  MHz 이고, 전력 평탄도는 0.2 dB로서 매우 우수한 선형 특성 결과를 얻었다. 또한 데이터 전송시 BER 특성에 상당한 영향을 미치는 위상 잡음은 반송파로부터 100 kHz 떨어진 offset 지점에서 -114.5 dBc/Hz을 얻었다. 고조파 특성은 2차 고조파에서 -41.49 dBc이하의 억압 특성을 나타내었다. 이러한 특성은 위상고정을 하기 전의 전압 제어 유전체 공진형 발진기보다 더욱 향상된 특성을 보였으며, 종전의 PLDRO보다<sup>[7][8]</sup> 위상잡음에서는 약 20dBc의 개선 효과를 가졌으며, 전력 평탄도에서도 개선시킬 수가 있었다. 또한 뒷단에 주파수 체배기를 사용한다면 더욱 높은 마이크로파 대역에서 안정된 신호원으로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 성혁제, 손병문, 최근석(2000), "위상고정 회로를 이용한 X-band DRO 설계 및 제작에 관한 연구", 한국전자과학기술논문지, 11권, 5호, pp. 715-722.
- [2] 주한기, 장동필(1999), "20GHz 고정국용 위상고정 VCDRO" 한국전자과학기술논문지, 10권, 6호, pp. 816-824.
- [3] Gonzalez, G. (1997), "Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design" *Prentice-Hall Inc.*
- [4] Gamma Microwave Inc.(1988), "Ruggedized Phase Locked Oscillator for military Application" *Microwave Journal*, pp. 197-199.
- [5] Gamma Microwave Inc. (1988), "18 to 23GHz Phase Locked Oscillator", *Microwave Journal*, pp. 182-183.
- [6] Holzman, E. (1992), "Solid State Microwave Power Oscillator Design" *Artech House.*
- [7] Inder Bahl and Parakash Bharia (1988), *Microwave Solid State Circuit Design*, John Willey & Son, New York.
- [8] Khanna, A. and Garault, Y. (1983), "Determination of Loaded, Unloaded, and External Quality Factors of a Dielectric Resonator Coupled to a Microstrip Line", *IEEE MTT-31*, No. 3.

---

원고접수일 : 2006년 11월 27일

원고채택일 : 2007년 1월 5일