

# 무선 CATV를 위한 PLL 발진기 설계 및 제작 연구

정희원 장준혁\*, 이용덕\*, 류근관\*\*, 이민희\*\*, 오일덕\*\*\*, 홍의석\*

## A study on the PLL oscillator for Wireless CATV

Jun-Hyuk Jang\*, Yong-Deuk Lee\*, Keun-Kwan Ryu\*\*, Min-Hee Lee\*\*, Eel-Deok Oh\*\*\*,  
Ui-Seok Hong\*, *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 SPD(Sampling Phase Detector)를 이용한 위상고정 방법의 무선 CATV용 위상 고정 유전체 공진 발진기(PLDRO)를 설계·제작하였다. 이 발진기는 하이브리드 형태인 12.875 GHz의 VCDRO(Voltage Controlled Dielectric Resonator Oscillator)와 완충 증폭기, 방향성 결합기, 주파수 체배기, 샘플링 위상 검출기, 루프 필터, 기준 주파수 발진기, VHF 증폭기로 구성되어 있다. 위상 고정 유전체 공진 발진기의 발진출력은 25.75 GHz에서 1.17 dBm, 기본주파수 억압 -27.83 dBc로 안정된 위상고정 상태를 나타내었다. 이때의 위상잡음은 -101.7 dBc/Hz @ 100KHz로 측정되었다.

### ABSTRACT

In the thesis, Design and implementation of PLDRO(Phase Locked Dielectric Resonator Oscillator) with the sampling phase detector are presented for the Wireless CATV system. A high stability and low phase noise are obtained. The module consists of an 12.875 GHz VCDRO(Voltage Controlled Dielectric Resonator Oscillator), buffered amplifier, 10 dB directional coupler, frequency doubler, sampling phase detector, loop filter and VHF amplifier, which are integrated into miniaturized hybrid circuit. The module achieves stable locked state and exhibits output power of 1.17 dBm at 25.75 GHz, -27.83 dBc fundamental frequency suppression and -101.7 dBc/Hz phase noise at 100 KHz offset frequency from carrier.

### 1. 서 론

최근 정보화와 더불어 통신기술의 비약적인 발전으로 인하여 방송과 통신의 융합이 가속화되고 있는 상황이다. 그 중 방송분야의 기술발전은 크게 디지털화, 고선명화, 다채널화, 양방향화 등 네 가지로 집약될 수 있으며, 향후 진정한 양방향 멀티미디어 서비스의 실현을 위한 해결책으로 광대역 무선 시스템의 무선 CATV가 가장 강력한 후보로 등장하고 있다. 광대역 무선 시스템은 고속 데이터 전송

및 다양한 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있다. 광대역 무선 시스템의 실현방안으로 국내에서는 광대역 무선 가입자망으로 B-WLL이 개발중이며 시스템에서 발진기의 경우 어떠한 경우에 있어서도 주파수를 일정하게 고정시키거나 적절한 양만큼 변화시켜야 하므로 상황에 따라 보정해 나갈 수 있는 위상고정 방법의 사용이 요구된다. 무선 CATV용 송수신기 국부발진기의 위상잡음 규격은 -100 dBc @ 100 KHz이다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 무선 CATV 시스템 전체의 bit error rate에 영향을 미칠 국부 발진기의 위상잡음

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

\*\* 광운대학교 전자통신공학과

\*\*\* 대전산업대학교 전자공학과

논문번호 : 99514-1230, 접수일자 : 1999년 12월 30일

\* 본 연구는 1999년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임. (과제번호 : 986-0800-004-2)

개선 및 주파수 안정도를 보장하기 위하여 위상고정 방식을 이용한 전압제어 발진기, 완충 증폭기, 방향성 결합기, 주파수 체배기와 가격이 저렴하고 구조가 간단한 샘플링 위상 비교기를 사용하여 무선 CATV용 송수신기의 국부발진기의 위상잡음특성의 규격에 만족하여 상용화할 수 있는 위상고정 발진기를 설계 및 제작하였다<sup>[2]</sup>.

## II. 위상고정 유전체 공진 발진기

위상고정 루프는 고주파의 위상잡음을 줄일 수 있는 가장 효과적인 방법이며 이는 전압제어 발진기의 출력 신호를 제한시켜 기준 주파수와 비교함으로써 위상을 동기 시키는 전자식 제한 루프 시스템이다.

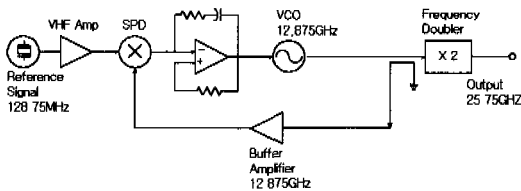


그림 1. PLDR의 시스템 구성도

그림 1은 위상고정 루프의 구성도를 보이고 있다. 위상고정 발진기의 전체 성능은 주로 전압제어 발진기의 특성에 의해 결정된다 할 수 있으므로 전압제어 발진기의 공진부는 유전체 공진기로 설계하여 온도 안정성 및 잡음특성을 개선할 수 있는 구조를 택했으며 바랙터 다이오드를 이용하여 주파수를 동조 시켰다. 기준 주파수 128.75 MHz와 발진주파수 12.875 GHz를 비교하기 위해 10 dB 방향성 결합기와 SPD를 이용하였으며 SPD의 출력전압을 여과하여 전압제어 발진기의 주파수 조정 전압으로 입력시키기 위해 능동 루프 필터를 사용하였다. 방향성 결합기에서 SPD로 공급되는 전력이 SPD의 동작조건을 만족시키고 스푸리어스 특성을 개선하기 위해서 12.875 GHz의 완충증폭기를 설계하였으며 주파수 체배기를 통해서 최종 출력을 얻었다<sup>[3][4]</sup>.

본 논문에서 구현한 VCDRO는 초고주파 비선형 설계 tool인 HP-EEsof사의 Libra ver. 6.1을 이용하여 library에서 지원하는 비선형 모델로 설계를 하였다.

표 1은 사용한 DR의 specification이고 능동소자로는 저 잡음 지수를 갖고 위상잡음을 최소화할 수

표 1. DR(Dielectric Resonator)의 제원

Part Number	Dimension (mm)	Temperature Coefficient	Q - factor	비유전율 $\epsilon_r$
DRD015	직경:5.06	$\pm 2$ ppm/ $^{\circ}$ C	15,000 min	27.9 $\pm$ 5
B□022	두께:2.24			

있으며 부성저항을 쉽게 얻을 수 있는 발진기 전용 소자인 GaAs MESFET인 HP Avantek사의 ATF-13786을 이용하였다. 기판은 비유전율  $\epsilon_r=2.6$ , 높이  $H=0.54$  mm, 동판 두께  $T=0.018$  mm Chukoh사의 Teflon 기판을 사용하였다. 그림 2에서는 전압제어 유전체 공진 발진기의 구조를 나타내고 있는데 단일 발진기를 먼저 설계한 후 공진기 부분에 동조 마이크로스트립 라인을 추가한 형태이다. 이때 마이크로스트립 라인에 결합한 공진기는 대역 통과 필터 특성을 갖게 된다.

초기 발진조건은

$$R_e [ Z_{out} ] < 0 \tag{1}$$

$$I_m [ Z_{out} ] = - I_m [ Z_L ] \tag{2}$$

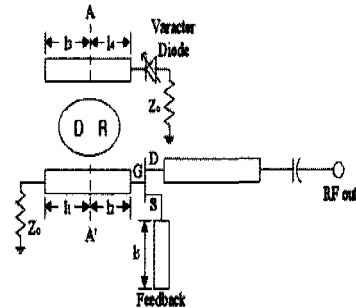


그림 2. VCDRO의 구조

식 (1), (2) 에서 실수부는 부성저항 값을 나타내며 허수부는 0을 나타낸다.  $l_1, l_2,$  와  $l_3$ 의 길이를 조절하여 위상조건과 부성저항 발생조건을 만족할 수 있다. 그림 2에서는 유전체 공진부의 AA'면에서 최대의 자기적 결합이 일어나도록  $\lambda_g/4$  길이의  $l_1$ 과  $l_2$ 를 조절하였으며  $l_3$ 는 충분한 부성저항을 얻을 수 있도록  $\lambda_g/4$  길이의 개방 스테브를 이용하여 길이를 조정하여 정합하였다. 즉, FET의 게이트 단을 바라본 반사계수가 최대가 되도록  $l_3$ 를 최적화하고 공진기의 결합선로 길이  $l_1$ 과  $l_2$ 를 조절함으로써 발진 주파수를 쉽게 조절할 수 있도록 부성저항 대역폭을 충분히 넓게 설계하였다. 또한 드레인단에서

능동소자를 바라본 반사계수가 가장 크도록 출력단을 정합 하였다. 또한  $l_3$ 과  $l_4$ 의 길이 변화에 따라 공진 주파수가 변화를 일으키므로 이를 조절하여 발진 주파수에 맞도록 조절하였다.

발진기는 초기 설계한 비선형 해석을 통해 기본 주파수 출력특성을 해석하였다. 그림 3은 DRO의 simulation 결과로 비선형 해석에 의한 고조파 스펙트럼으로 기본주파수 12.875 GHz에서 약 11.7 dBm의 출력과 약 50 dBc의 2차 고조파 억압특성과 안정한 발진을 하고 있음을 보이고 있다

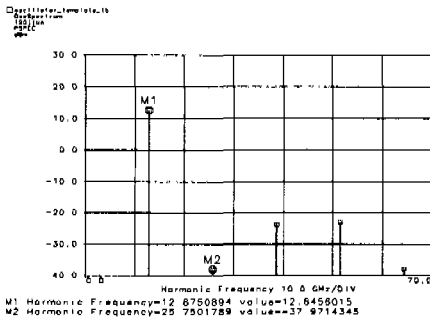


그림 3. VCDRO 전력 스펙트럼

전압제어 발진기의 주파수 동조방법에는 기계적 동조와 전기적인 동조법이 있는데 PLL 시스템과 같은 응용에서는 주파수를 전기적으로 동조할 필요가 있다. 본 논문에서는 낮은 위상잡음과 빠른 튜닝 속도, 낮은 튜닝 전력을 갖는 바랙터 다이오드를 이용한 동조 방법을 사용하였다<sup>[5]</sup>. 유전체 공진기 결합구조에 두 개의 마이크로스트립을 두어 상호인덕턴스( $L_m$ )와 상호캐패시턴스( $C_m$ )을 변화시켜 발진 주파수를 변화시킬 수 있다. 그림 4는 바랙터다이오드를 이용한 전기적 동조 방법을 보이고 있다. 유전체 공진기의 공진 주파수를 가변 시키기 위해서는 다음 식으로 표현된다. AA'에서 바랙터 다이오드를 들여다본 입력 임피던스는

$$\sqrt{Z_{in}(1/j\omega C_v)} = Z_o, \quad Z_{in} = \omega N_o^2 C_v \quad (3)$$

$L_t = Z_o^2 C_v$  로 치환하면

$$Z_{ab} = (j\omega L_t / N_1^2) \quad (4)$$

$L_t' = L_t / N_1^2$  이며  $N_1$ 은 이상적인 변압기의 권선비이다. 그리고 총 인덕턴스는

$$L_{eq} = L_e // L_t' = L_e L_t' / (L_e + L_t') \quad (5)$$

유전체 공진기의 새로운 공진주파수를 구하면

$$\omega_o' = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C_e}} \approx \omega_o \left(1 + \frac{N_1^2 L_e}{2 Z_o^2 C_v}\right) \quad (6)$$

한편, 바랙터 캐패시턴스  $C_v$ 는

$$C_v = \frac{C_{j0}}{(1 + V_j/V_j)^M} \quad (7)$$

여기서  $V_j$ : 확산 포텐셜

$C_{j0}$ : zero-bias 접합 캐패시턴스

$M$ : PN 접합에 따른 계수

이므로  $M=1$ 인 경우라면

$$\omega_o' = \omega_o \left[1 + \frac{N_1^2}{2 Z_o C_{j0}} (1 + V_j/V_j)\right] \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_o} \approx \frac{N_1^2 L_e}{2 Z_o C_v} \quad (9)$$

로 표현되며, 따라서 동조된 새로운 발진주파수를 얻을 수 있다.

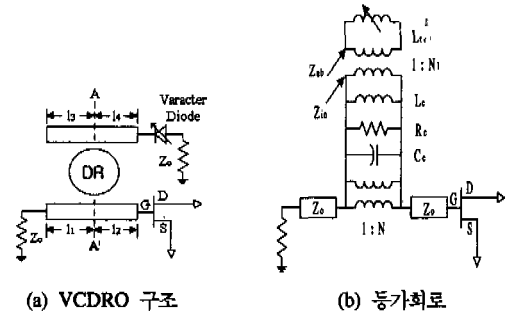


그림 4. 유전체공진기의 동조 메카니즘 모델

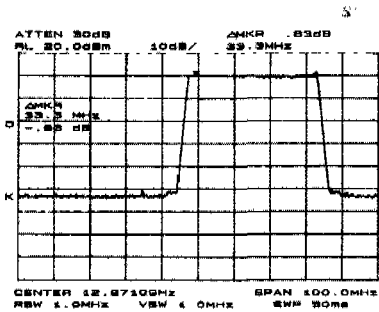


그림 5. 12.875 GHz VCDRO의 동조 범위

그림 5는 실제 제작된 12.875 GHz 전압제어 유전체 공진 발진기의 동조 스펙트럼을 보이고 있다. 동조 대역폭은 33.3 MHz를 나타내었으며 동조 대역

내에서 약  $\pm 0.4$  dBm의 출력 변화를 나타내었다.

본 논문에서 이용한 샘플링 위상 검출기는 Alpha사의 SPD3472-018이며 샘플링 위상 검출기는 SRD(Step Recovery Diode), Coupling Capacitor, Microwave Mixer Diode로 구성되어 있다. SRD에 기준 입력신호가 들어오면 사이클의 반주기가 순방향일 때 전류는 한쪽에서 다른 한쪽으로 흐르게 된다. 역 전압이 인가되면 전류는 더 이상 흐르지 않고 접합 면에 축적되어 있던 전하가 역으로 매우 빨리 흐르게 되어 전류 펄스가 형성된다. 이 전류 펄스는 고조파를 만들어 내어 기준 주파수와 고조파적으로 연관된 주파수의 합성을 이룬다<sup>[6][7]</sup>. 기본 주파수 12.875 GHz와 기준 주파수 128.75 MHz의 100번째 고조파 성분을 서로 비교하여 위상을 고정시키도록 하였다.

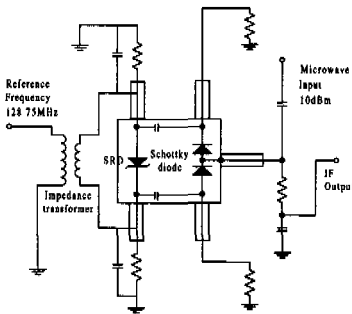


그림 6. 샘플링 위상 검출기 회로

그림 6에서는 샘플링 위상 검출기 회로이고 기준 주파수는 128.75 MHz이며 microwave input power는 10 dBm 이상을 사용하였다.

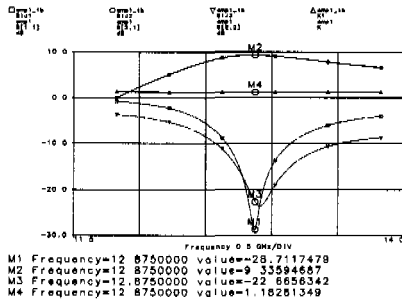


그림 7. 완충 증폭기의 선형이득 및 반사손실

발진기의 부하변화에 대한 격리도 및 충분한 전력을 얻기 위하여 유전체 공진 발진기와 샘플링 위상 비교기 사이에 완충 증폭기를 삽입하여 일정한 전력을 샘플링 위상 비교기에 공급하여 위상비교기

이득을 일정하게 유지하였다. 그림 7은 완충 증폭기의 선형 시뮬레이션 결과로 증폭기의 안정계수는 1보다 크고 입력력 정합특성은 20 dB 이상 감쇄량이 얻어지도록 최적하였으며 증폭기 이득은 약 9.34 dB를 얻도록 설계하였다.

주파수 체배기는 유전체 공진 발진기의 12.875 GHz의 발진 출력을 2배배 하여 25.75 GHz의 출력을 얻는 기능을 하며 능동소자의 비선형성을 이용하므로 게이트와 드레인의 바이어스 동작점을 B급 증폭기와 같은 조건으로 하였다.

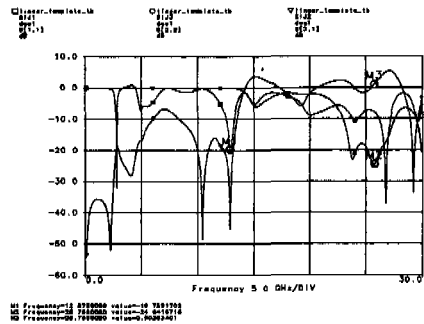


그림 8. Doubler의 선형이득 및 반사손실

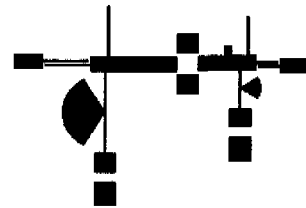


그림 9. Doubler의 회로도

그림 8은 주파수 체배기의 입력력 정합특성을 보이고 있으며 그림 9는 주파수 체배기의 회로로써 입력정합회로, 출력 정합회로, 외부 개환망인 길이의 개방형  $\lambda/4$  스텐브와 HEMT로 구성하였다. 능동소자로는 저잡음이며 12.875 GHz에서 9.5 dB의 소신호 이득을 갖는 Alpha사의 AFP02N3 HEMT를 이용하였다. 출력단에 있는 기본주파수  $\lambda/4$  길이 개방형 스텐브는  $2f_0$ 에서  $\lambda/2$ 가 되어 RF 개방회로로 동작하고  $f_0$ 에서 RF 단락회로로 동작하여 출력단에서 기본주파수인  $f_0$ 를 제거하여 기본주파수 억압특성을 향상시켰다. 주파수 체배기의 입력단은 입력 주파수인 12.875 GHz에서 반사계수를 -20 dB를 얻었으며, 출력단은 입력신호가 체배되어 손실 없이 전송되도록 25.75 GHz에 정합시켰다.

### III. PLDRO의 실험 및 결과

위상고정 유전체 공진 발진기는 전압제어 유전체 공진 발진기와 위상고정 소스 부분을 따로 제작하였으며 케반 루프 부분을 연결하여 샘플링 위상검출기에 전압제어 발진기의 신호가 전달되도록 하였다.

그림 10과 11은 free running 상태의 VCDRO와 위상고정 VCDRO(10 KHz Span)의 출력 스펙트럼을 각각 비교하였다. 그림 10은 25.75 GHz에서 위상이 고정되기 전의 -1.50 dBm과 그림 12는 위상이 고정된 후 1.17 dBm의 출력을 나타내고 있으며 위상이 고정되었을 때 개선된 출력특성을 보이고 있다. 그림 12는 위상고정 유전체 공진 발진기의 전체 주파수 응답 특성으로 -27.83 dBc 의 우수한 기본주파수 억압특성을 보이고 있다. 그림 13은 위상고정 유전체 공진 발진기의 위상잡음 특성으로 span 1MHz에서 -101.7 dBc/Hz @ 100 KHz 의 측정 결과로 위상이 고정된 후 위상잡음이 개선되어지는 것을 보여주고 있다. 그림 14는 실제 제작된 위상고정 유전체 공진 발진기의 실물 사진을 보여주고 있다.

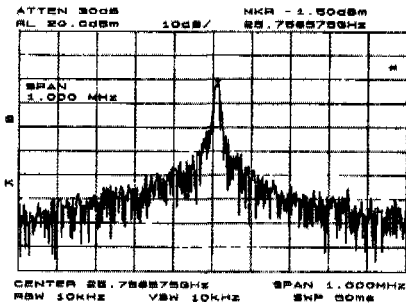


그림 10. Free running (Span=1MHz)

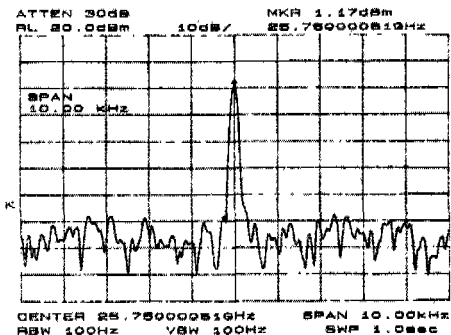


그림 11. PLDRO의 주파수 응답(Span=10 KHz)

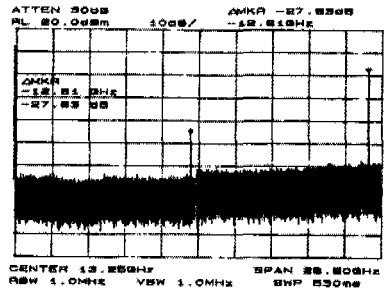


그림 12. PLDRO의 기본주파수 억압 특성

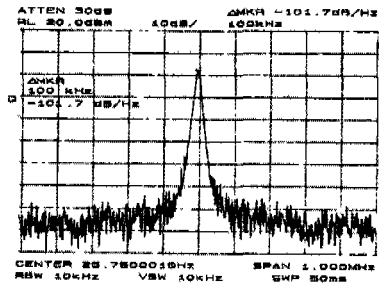


그림 13. 위상잡음 특성(offset freq.=100 KHz)

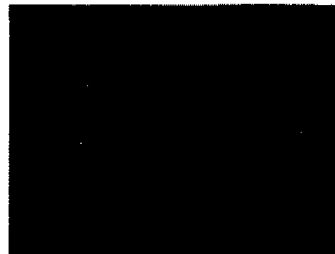


그림 14. PLDRO의 실물사진

### IV. 결론

본 논문에서는 샘플링 위상 검출기(Sampling Phase Detector)를 이용한 위상고정루프 기법을 도입하여 무선 CATV 송수신기 시스템용 국부발진기의 위상잡음 규격 특성을 만족하여 상용화 될 수 있는 낮은 위상잡음과 높은 주파수 안정 특성을 갖는 위상고정 유전체 공진 발진기를 설계 및 제작하였다. 이 국부발진기는 하이브리드 형태의 12.875 GHz의 전압제어 유전체 공진 발진기, 완충증폭기, 주파수 체배기, 10 dB 방향성 결합기, 샘플링 위상 검출기, 기준 주파수 발진기, VHF 증폭기, 루프 필터로 구성되어 있다.

발전 출력은 기본 주파수인 12.875 GHz에서 10

