

# 위상잡음 특성을 고려한 Ku-band 용 전압제어 유전체 공진 발진기

유 진혁(劉 珍赫)\* 권 성수(權 成洙)\*, 이 태호(李 泰昊)\*, 나 극 환(羅 克 換)\*  
광운대학교 전자공학과\*

전화:(02)940-5117 Email: jinhyuck@explore.kwangwoon.ac.kr

## Ku-band Voltage Control Dielectric Resonator Oscillator considering Phase Noise

Jin-Hyuck Yu, Sung-Su Kwoun, Tae-Ho Lee, Keuk-Hwan Ra  
Department of Electronics Engineering Kwangwoon University

### 요 약

본 논문에서는 Ku-band용 전압제어 유전체 공진 발진기를 위상잡음 특성을 고려하여 설계하였다. 유전체의 높은 Q값은 좋은 위상잡음특성에 영향을 주나 전압제어를 위해 바랙터 다이오드와 연결된 튜닝 마이크로스트립라인의 길이에 따라 Q값의 변화하고 이로 인해 위상잡음 특성이 변화하므로 이를 고려하여 최적의 튜닝 마이크로스트립라인 길이를 시뮬레이션 결과를 통해 얻은 후 전압제어 유전체 발진기를 설계하였다.

### I. 서론

통신용량의 증가함에 따라 높은 주파수의 발진기의 중요성은 날로 증가하고 있고, 특히 위상 변조 방식을 사용하는 경우의 디지털 통신 시스템의 경우 국부 발진기의 주파수 안정도와 위상잡음 특성은 전체 시스템의 데이터 오율특성에 상당히 중요한 역할을 한다. 디지털 변조에 요구되어지는 BER(Bit Error Rate)를 만족시키기 위한 낮은 위상잡음은 Leeson<sup>[1]</sup>이 제시한 공식에 근거하여 발진기의 loaded Q를 최대화하고, 발진기의 설계 시 낮은 프리커 또는 1/f 잡음을 가진 능동소자를 선택하고, 발진기의 입력부 power를 크게 하고, 바랙터 다이오드를 선택 시 낮은 등가 잡음 저항(equivalent noise resistance)을 가진 다이오드를 선택하며, Ko(voltage tuning gain)을 낮게 유지하는 등의 방법을 고려하여 낮은 위상잡음을 얻을 수 있다. 또한 바랙터 다이오드와 연결된 튜닝 마이크로스트립 라인 길이에 따라서 위상잡음의 변화를 볼 수 있는데, 본 논문에서는 부성저항 특성을 갖는 발진기 이론을 적용하여 직렬

캐환형 유전체 공진 발진기를 설계하였고, 바랙터 다이오드를 삽입하여 전압제어 유전체 공진발진기를 구성하였으며 시뮬레이션을 통해 튜닝 마이크로스트립 라인 길이로써 보다 개선된 위상잡음 특성을 얻을 수 있었다.

### II. 본론

#### 2-1. DRO(Dielectric Resonator Oscillator)의 설계 방법

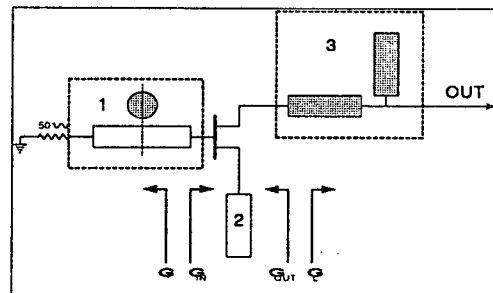


그림.1 2port 발진기의 블록 다이어그램

초고주파 발진기의 정상상태에서 발진조건은 다음과 같다.

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |D|^2}{2|S_{12}||S_{21}|} < 1 \quad (1)$$

$$\Gamma_{IN} \cdot \Gamma_T = 1 \quad (2)$$

$$\Gamma_{OUT} \cdot \Gamma_L = 1 \quad (3)$$

윗식 (2)와(3)은 입력 쪽에서 발진이 일어나면 출력 쪽에서 발진이 일어나고 반대로 출력 쪽에서 발진이 일어나면 입력쪽에서도 발진이 일어남을 의미한다. 이것은  $|\Gamma_{OUT}| > 1$ 이기 위해서 Terminating network의  $Z_T(\Gamma_T)$ 값을 스미트 차트상에  $|\Gamma_T| < 1$ 인 불안정한 영역에서  $\Gamma_T$ 의 한 점을 찍는 이유가 된다. 주파수  $f_0$ 에서의 발진조건은 다음과 같다.

$$|R_{OUT}(V, f_0)| > R_L(f_0) \quad (4)$$

$$X_{OUT}(V, f_0) + X_L(f_0) = 0 \quad (5)$$

식(4)에서  $R_{OUT}$ 은 부성저항을 의미하며, 식(4)는  $|\Gamma_{OUT}| > 1$ 이기 위한 식을 의미한다. 여기서 어떤 전압에서 부성저항  $|R_{OUT}(V, f_0)|$ 의 크기가 부하저항  $R_L$ 보다 크면 잠재적으로 발진이 일어난다.(이 잠재적인 발진을 noise level이라 함) 그리고, 전압의 함수인  $|R_{OUT}(V, f_0)|$ 은 Oscillation power가 증가 할수록 부성저항은 감소한다. 이때 부성저항의 값이 부하저항 보다 작게 되면 발진은 멈추게 되는데, 이 문제는  $V=0$ 인 상태에서의 부성저항의 크기가 부하보다 크게 설계하면 해결할 수 있다. 여기에서 정상상태에서 발진이 멈추지 않고 안정상태의 발진을 위해 다음식이 사용된다.

$$R_L(f_0) = \frac{1}{3}|R_{OUT}(0, f_0)| \quad (6)$$

윗 그림(1)에서 영역1은 발진주파수를 결정하는 역할을 하며 영역2는 불안정한 영역을 늘리기 위한 직렬케환 부분을, 영역3은 최대 Oscillation power를 위한 부분이다. 영역1,2,3을 결정하기 위해 다음의 순서를 따른다.[4]

1. TR생산자가 제공하는 2port S-parameter를 3port S-parameter로 변환시킨다.

3port S parameter의 변환공식 (7)

$$\begin{aligned} S_{11} &= S_{11} + \frac{\sigma_{11}\sigma_{12}}{4-\sigma} & S_{12} &= S_{12} + \frac{\sigma_{11}\sigma_{21}}{4-\sigma} & S_{13} &= \frac{2\sigma_{11}}{4-\sigma} \\ S_{21} &= S_{21} + \frac{\sigma_{21}\sigma_{12}}{4-\sigma} & S_{22} &= S_{22} + \frac{\sigma_{22}\sigma_{21}}{4-\sigma} & S_{23} &= \frac{2\sigma_{22}}{4-\sigma} \\ S_{31} &= \frac{2\sigma_{12}}{4-\sigma} & S_{32} &= \frac{2\sigma_{21}}{4-\sigma} & S_{33} &= \frac{\sigma_{12}}{4-\sigma} \end{aligned}$$

2. 다시 3port S-parameter를 직렬 케환 open stub를 사용하여 불안정 영역이 넓은 2port S-parameter로 변환시킨다. 여기에서 불안정 영역을 넓이기 위해  $Z_3$ 은 matlab과 같은 tool로 프로그래밍하여 값을 얻어야한다.(  $Z_3$ 값에 의해서 그림1의2영역을 설계)

$$\Gamma_3 = \frac{Z_3 - Z_0}{Z_3 + Z_0}$$

$$\begin{aligned} S_{11} &= S_{11} + \frac{S_{13}S_{31}\Gamma_3}{1 - S_{33}\Gamma_3} \\ S_{12} &= S_{12} + \frac{S_{13}S_{32}\Gamma_3}{1 - S_{33}\Gamma_3} \\ S_{21} &= S_{21} + \frac{S_{23}S_{31}\Gamma_3}{1 - S_{33}\Gamma_3} \\ S_{22} &= S_{22} + \frac{S_{23}S_{32}\Gamma_3}{1 - S_{33}\Gamma_3} \end{aligned} \quad (8)$$

3.  $\Gamma_T = \frac{\beta}{\beta+1} e^{j\theta}$ 의 공식에  $\Gamma_T$ 는 새로운 S-parameter에서 입력 쪽 stability circle을 그린 후 불안정 영역에서 안정 영역과 가장 멀리 떨어진 점을 찍는다. ( $\Gamma_T$ 점에 의해 그림3의 영역1부분을 설계)

4. 구해진  $\Gamma_T$ 로서 그림3의 영역3부분을 설계하기 위해  $Z_L$ 값을 구해야 하는데, 이는 다음과 같다.

$$\Gamma_{OUT} \cdot \Gamma_L = 1 \rightarrow \Gamma_L = \frac{1}{\Gamma_{OUT}} = \frac{1 - S_{11} \cdot \Gamma_T}{S_{22} - \Delta \cdot \Gamma_T}$$

$$\Gamma_{OUT} = \frac{S_{22} - \Delta \cdot \Gamma_T}{1 - S_{11} \cdot \Gamma_T}$$

$$Z_{OUT} = Z_0 \cdot \frac{1 + \Gamma_{OUT}}{1 - \Gamma_{OUT}} = R_{OUT} + jX_{OUT}$$

을 이용해  $Z_L = -\frac{R_{OUT}}{3} - jX_{OUT}$  으로  $Z_L$ 을 구한다.

2-2. VCDRO(Voltage Control Dielectric Resonator)의 설계

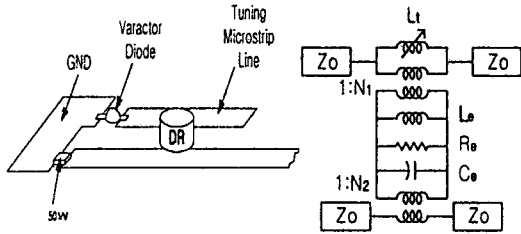


그림 2. (a) 두 마이크로스트립 라인과 동시에 결합한 유전체공진기  
(b) 등가회로

시뮬레이션을 위해 사용된 그림2.(b)의 등가회로는 단일 마이크로스트립라인과 결합된 유전체의 R,LC의 등가회로를 아래 식 (9)~(13)<sup>[2]</sup>을 통해서  $\beta$ 을 구한 후  $Q_u$ 을 계산한 값에 의해 구한 다음 L값을 똑같이 반으로 나눈 값으로서 등가회로를 구성하여 시뮬레이션을 한다.

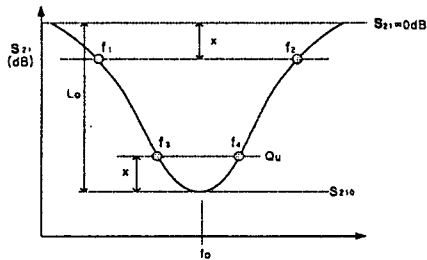


그림 3.공진회로의  $\beta$ (전달계수)와  $Q_u$ 의 측정

$$L_o(dB) = -20 \log |S_{21}| = 20 \log(1 + \beta) \quad (9)$$

$$X(dB) = 3 - 10 \log(1 + 10^{0.1L_o}) \quad (10)$$

$$Q_u = \frac{f_o}{f_2 - f_1} \quad , \quad Q_L = \frac{f_o}{f_4 - f_3} \quad (11)$$

$$Q_u = Q_L(1 + \beta) = \beta Q_L \quad (12)$$

$$R = 2Z_o\beta \quad , \quad L = \frac{R}{Q_u\omega_o} \quad , \quad C = \frac{Q_u}{\omega_o R} \quad (13)$$

전압제어 발진기의 경우 바이어스의 변화에 의해서 바랙터 다이오드로서 발진 주파수를 가변할 수 있는데 한가지 문제점은 아래식(14)에서 알 수 있듯이

$Q_L$ (loaded Q)의 급격한 감소를 피하기 위해서 DR은 마이크로스트립라인과 약하게 결합되어야 한다. 즉  $Q_L$ 은  $\beta$ (coupling coefficient)가 증가할수록 작아지므로  $\beta$ 를 작게 해야한다. 하지만 DR이 마이크로스트립라인과 약하게 결합됨은 발진 주파수의 가변변위가 좁게 된다는 결점이 있다.

$$Q_o = (1 + \beta)Q_L \quad (14)$$

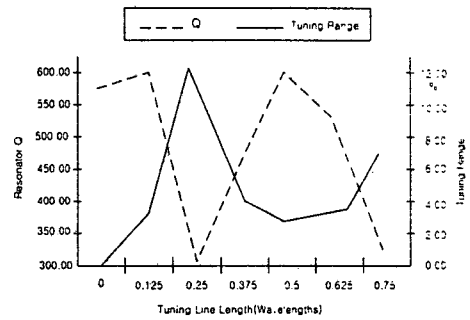


그림 4. 튜닝 마이크로 스트립라인의 길이에 따른  $Q_L$ 값과 발진 주파수의 튜닝 범위

$Q_L$ 의 급격한 감소는 위상잡음 특성이 나빠지는 결과를 초래하는데 그림 2에서 알 수 있듯이 튜닝 마이크로 스트립라인의 길이의 변화로 인해서 공진기의  $Q_L$ 의 변화가 생긴다.<sup>[3]</sup> 튜닝 마이크로스트립라인이  $\frac{1}{2}$ 인 경우  $Q_L$ 값은 커지나 튜닝 범위는 좁게 되므로 DR이 마이크로스트립라인과 결합정도를 높이고,  $\frac{1}{4}$ 인 경우는 반대가 된다.

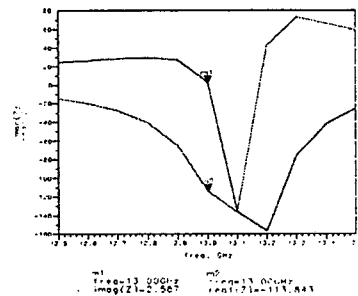


그림 5. 단일 발진기의 발진가능성

그림 5에서는 단일 발진기의 발진가능성을 보여주고, 그림 6에서는 출력 전력레벨을 보여주고 있는데 발진 주파수가 13GHz임을 알 수 있다.

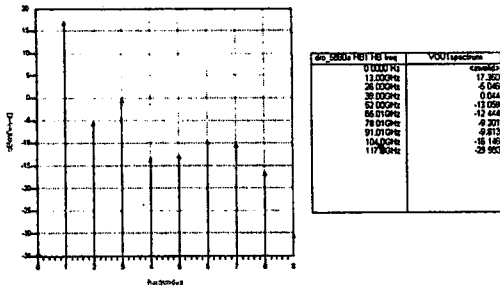


그림 6. 단일 발진기의 출력 전력레벨

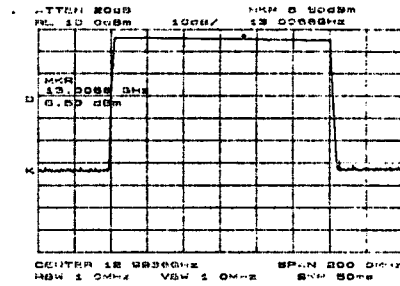


그림 9. VCDRO의 동작 주파수 스펙트럼

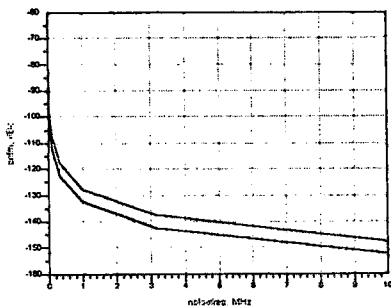


그림 7. 튜닝 마이크로스트립라인이  $\frac{1}{4}$ 인 경우와  $\frac{1}{2}$ 인 경우의 위상잡음 특성

그림 7은 튜닝 마이크로스트립라인의 길이에 따른 위상 잡음 특성을 보여주고 있는데  $\frac{1}{2}$ 인 경우의 위상잡음 특성이  $\frac{1}{4}$ 인 경우의 위상잡음 특성보다 약 -3 dBc/Hz정도의 좋은 특성을 보이고있다.

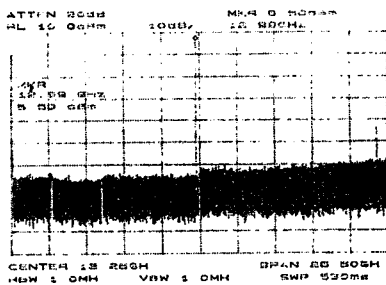


그림 8. VCDRO의 전체 스펙트럼

기판은  $\epsilon_r=2.2$ ,  $H=20\text{mil}$ ,  $T=0.7\text{mil}$ ,  $\text{Rough}=0.07\text{mil}$ ,  $\text{TanD}=0.0009$ 인 Duroid사의 5880을 사용하였고, 능동소자는 ATF-13786을, 그리고 바랙터 다이오드는 Mpluse사의 MP-6304를 사용하였다.

그림 8은 VCDRO의 전체 스펙트럼을 보여주며, 그림 9는 바랙터 다이오드의 인가 전압을 0~16V까지 가변시켜서 약 120MHz의 주파수의 변화와 출력의 변화를 측정하였다.

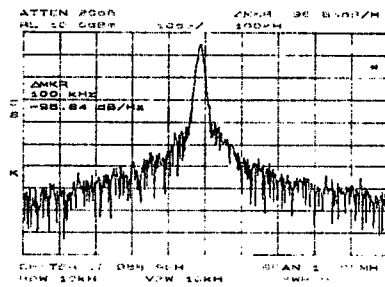


그림 10. 마이크로스트립라인이  $\frac{1}{2}$ 인 경우의 위상잡음 특성

그림 10은 시뮬레이션 결과를 토대로 마이크로스트립라인을  $\frac{1}{2}$ 로 한 경우의 위상잡음 특성을 측정하여 offset 주파수 100KHz에서 약 -97dBc/Hz의 위상잡음을 얻었다.

### III. 결 론

본 논문은 튜닝 마이크로스트립라인의 길이에 따라서 위상잡음의 특성이 변화하는 시뮬레이션 결과를 토대로 VCDRO를 설계, 제작하였으며 위상잡음 특성을 고려하여 공진기로 DR을 사용하였다. 발진주파수 13GHz에서 6.5dBm의 출력레벨을 얻었으며, 바랙터 다이오드의 인가전압을 변화시켜 약 120MHz의 주파수 가변범위를 얻을 수 있었다. 위상잡음 특성은 offset 주파수 100KHz에서 약 -97dBc/Hz의 특성을 얻을 수 있었다.

[참고문헌]

- [1] Leeson, D. B., "A simple model of feedback oscillator noise spectrum", Proc. IEEE., 1966, 54, pp 329-330.
- [2] Guillermo Gonzalez, "Microwave Transistor Amplifiers" Prentice Hall, pp, 384-427.
- [3] Kenneth V. Buer and El-Sharawy, "A Novel Technique for Tuning Dielectric Resonators", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.43, January 1995.
- [4] Robert E. Collin, "Foundations for Microwave Engineering", McGraw-Hill, Inc., pp,840-856.
- [5] Eric Holzman, "Solid-state microwave power oscillator design" Artech House, Boston, London, pp. 303-324.
- [6] Kai Chang, "Microwave Solide-State Circuits and Applications", WileyInterscience, pp382-397.