

Ku-band 전압제어 유전체 공진 발진기 설계 및 제작

나인주, 김영철, 이정해
홍익대학교 전자통신공학과

Design and fabrication of voltage controlled dielectric resonator oscillato

I. J. Nah, Y. C. Kim, J. H. Lee

Dept. of Radio Science and Communication Engineering, Graduate School of Hong Ik Univ

Abstract - 본 논문은 Ku-band(12.4-18 GHz) 위성통신 시스템 및 이동통신 중계기용 송수신부에 사용되는 고안정도 전압제어 유전체 공진기(Voltage Controlled Dielectric Resonator Oscillator)의 설계 및 제작에 대해 논하였다. 유전체 공진기(Dielectric Resonator)의 등가회로 모델을 이용하여 유전체 공진 발진기(Dielectric Resonator Oscillator)를 설계 알고리즘화 하였다. 유전체 공진 발진기와 바랙터 다이오드를 이용하여 13.4 GHz의 전압 제어 유전체 공진 발진기를 제작하였다. 이때의 출력 전력은 +12dBm이고 위상잡음은 offset 주파수 100kHz에서 -105 dBc/Hz로 측정되었다.

1. 서 론

마이크로파 대역에서 발진기는 소형, 경량, 저 전력화 및 우수한 주파수 안정도가 요구되기 때문에 waveguide cavity보다 소형이면서 저 가격, 저 손실, 높은 온도 안정도와 유전율, 그리고 높은 Q값을 갖는 유전체 공진기(Dielectric Resonator)의 사용이 일반화되고 있다.

본 논문에서는 위성통신시스템의 송신부에 사용되는 높은 주파수 안정도와 우수한 잡음특성을 갖는 Local Oscillator를 구현하기 위하여 먼저 HP사의 Advanced Design System (ADS)을 이용하여 중심 주파수 13.4GHz의 유전체 공진 발진기를 선형 설계 법에 의한 알고리즘을 체계화하였다.

2. 본 론

2.1 유전체 공진기의 모델링

유전체 공진기의 공진 모드는 공진기의 크기에 따라 결정된다. 에너지는 공진기 내부에 저장되고 외부 자계는 외부의 회로와 결합된다. 만일 공진기가 isolation된다면 자계가 방출되고, 방사 손실로 인하여 Q값이 급속히 감소한다. 이러한 방출 손실을 최소화(Q값 증가)하기 위하여 급속 cavity안에서 사용되어야 한다. 차폐된 유전체 공진기의 구조는 그림 1과 같다.

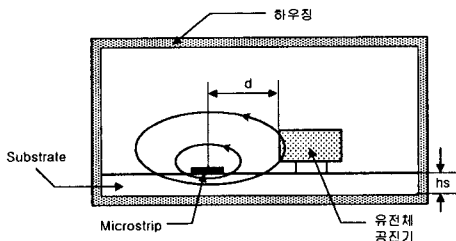


그림 1. 마이크로스트립 라인과 유전체 공진기 사이의 결합

유전체 공진기와 마이크로스트립 라인간의 결합은 그림 1에서처럼 자기에 의해 결합하며 마이크로스트립 라인에 수직하게 자기 모멘트의 원점으로부터 이루어진다. 유전체 공진기는 공진 주파수에서 RF 에너지가 방사 되

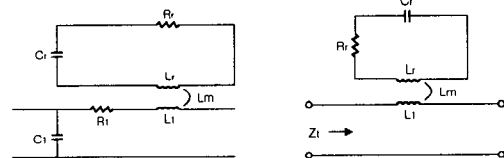
고 마이크로스트립 라인과 결합도를 조절하기 위해 거리 d를 조정하면서 위치시킨다. 공진기의 등가회로는 그림 2(a)와 같고 공진기는 자계 결합을 통하여 마이크로스트립 라인과 결합한다. 이 그림에서 L_r , C_r , R_r 등은 유전체 공진기의 등가 파라미터이고, L_l , C_l , R_l 은 마이크로스트립 라인의 등가 파라미터들이다. 자기 결합은 상호 인덕턴스 L_m 에 의해 나타내어진다. 결합 면에서 마이크로스트립 라인이 손실이 없다고 가정했을 때 그림 2(b)와 같이 간략화 시킬 수 있으며 또한 그림 2(c)와 같은 형태로 나타낼 수 있다. 그림 2(b)에서 마이크로스트립 라인을 포함한 변환된 임피던스를 구하면,

$$Z_l = j\omega L_l + \frac{\omega^2 L_m^2}{R_r + j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r}} \quad (1)$$

공진 주파수 근처에서 ωL_l 은 무시되므로 식 (1)은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

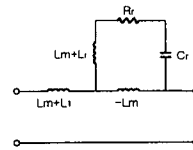
$$Z_l \approx \omega Q_0 \frac{L_m^2}{L_r} \frac{1}{1 + jX} \quad (2)$$

여기서 $X = 2Q_0(\delta\omega/\omega)$, $\delta = (\omega - \omega_0)/\omega_0$ 이고, unloaded Q와 공진 주파수는 다음과 같다.



(a)

(b)



(c)

(d)

그림 2 유전체 공진기의 등가회로와 스트립라인의 결합

$$Q_0 = \frac{L_r \omega_0}{R_r}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (3)$$

공진 주파수에서 $X=0$ 이므로 변환된 임피던스는 다음과 같은 실수가 된다.

$$Z_l = R = Q_0 \omega_0 \frac{L_m^2}{L_r} \quad (4)$$

식 (4)는 그림 2(a)에서 보여진 등가회로를 그림 2(d)와 같은 병렬 동조 회로로 간단히 나타낼 수 있는 식이다. 여기서 L , R , C 는 다음과 같다.

$$L = \frac{L_m^2}{L_r}, \quad C = \frac{L_r}{\omega_0^2 L_m^2}, \quad R = Q_0 \omega_0 \frac{L_m^2}{L_r} \quad (5)$$

공진 주파수 ω_0 에서 결합 계수 β 는

$$\beta = \frac{R}{R_{ext}} = \frac{R}{2Z_0} = \frac{\omega_0 Q_0}{2Z_0} \frac{L_m^2}{L_r} \quad (6)$$

이 고, S_{110} 과 S_{210} 을 마이크로스트립 라인과 결합했을 때의 공진 주파수에서 각각 반사 계수와 전달 계수라고 한다면 결합 계수 β 는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [1][2].

$$\beta = \frac{S_{110}}{1 - S_{110}} = \frac{1 - S_{210}}{S_{210}} = \frac{S_{110}}{S_{210}} \quad (7)$$

식 (6)에서 L_r/L_m^2 은 공진기와 마이크로스트립 라인 사이의 거리 d 에 대한 함수이다.

$\beta=1$ (critical coupling)은 유전체 공진기에서 소모된 에너지와 외부 회로(external circuit)에서 소모되는 에너지가 같을 때 발생한다. 즉, 반사된 에너지와 전달된 에너지의 양이 같다($S_{110}=S_{210}=0.5$). 차폐된 유전체 공진기에서 소모되는 에너지는

$$P_d = 1 - |S_{110}|^2 - |S_{210}|^2 \quad (8)$$

이 고, 결합 계수 β 또한 Q값에 대한 관계는 다음과 같다.

$$Q_0 = Q_L(1 + \beta) = \beta Q_{ex} \quad (9)$$

Q_0 , Q_L , Q_{ex} 는 각각 unloaded, loaded, external Q값을 나타낸다.

2.2 유전체 공진기 등가회로 값의 추출

이 절에서는 ADS Simulation에 필요한 유전체 공진기의 등가회로 값의 추출을 위한 Q값의 측정에 대하여 논하고자 한다. 유전체 공진기와 마이크로스트립 라인의 관계를 그림 3과 같이 재 구현해보았다.

그림 3(b)에서 임피던스 Z 는

$$Z = \frac{1}{C} \frac{s}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC}} = \frac{1}{C} \frac{s}{s^2 + 2as + \omega_0^2} \quad (10)$$

$2a = 1/RC$, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 이며 $s = j\omega$ 로 놓으면 식 (10)은

$$Z = \frac{R}{1 + j2Q_0\delta} \quad (11)$$

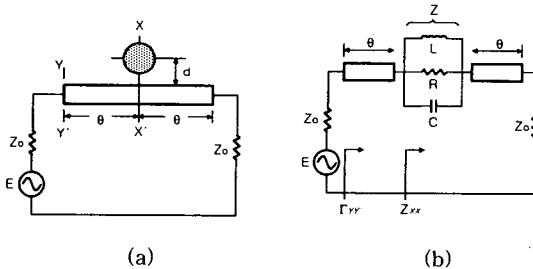


그림 3. (a)유전체 공진기와 마이크로스트립 라인 결합 (b)XX'축에서의 등가회로

여기서, $\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$

그림 3(b)의 XX'축 기준에서 normalized 입력 임피던스는 식 (11), (6)에 의해

$$z_{in} = \frac{2\beta}{1 + j2Q_0\delta} + 1 \quad (12)$$

이다. 따라서 마이크로스트립 라인에 결합된 유전체 공진기의 S-parameter는 식 (13)으로 주어진다.

$$S_R = \begin{pmatrix} \frac{\beta}{\beta + 1 + j2Q_0\delta} & \frac{1 + j2Q_0\delta}{\beta + 1 + j2Q_0\delta} \\ \frac{1 + j2Q_0\delta}{\beta + 1 + j2Q_0\delta} & \frac{\beta}{\beta + 1 + j2Q_0\delta} \end{pmatrix} \quad (13)$$

그림 3(b)에서 입력 단의 반사 계수는 다음과 같다.

$$\Gamma_{YY'} = \frac{\beta}{\sqrt{(\beta + 1)^2 + (2Q_0\delta)^2}} e^{-j(2\theta + \tan^{-1} \frac{2Q_0\delta}{\beta + 1})} \quad (14)$$

등가모델에서 병렬 R, L, C의 값을 구하기 위하여 그림 3(b)를 그림 4(a)로 등가화 할 수 있고, 그림 4(a)는 공진 주파수에서 C와 L은 서로 상쇄되므로 그림 4(b)처럼 그럴 수 있다.

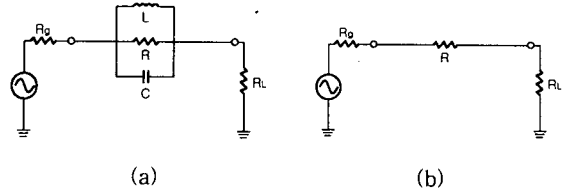


그림 4 공진 주파수에서의 유전체 공진기의 등가 회로

이 때 삽입손실을 구하면

$$IL(aB) = L_0(aB) = 20 \log \left(\frac{R_g + R_L}{R_g + R + R_L} \right) \quad (15)$$

위 식에서 $R_g = R_L = 50\Omega$ 이므로

$$R = 100 (10^{IL/20} - 1) \quad (16)$$

따라서 삽입손실을 알면 R값을 알 수 있다. 그림 5는 식 (13)을 이용하여 그린 것으로 L_0 , X는 식 (17)과 같이 주어진다[3][4]. 그림 5(b)에서 보듯이 L_0 가 20dB보다 크면 거의 X가 3dB로 된다.

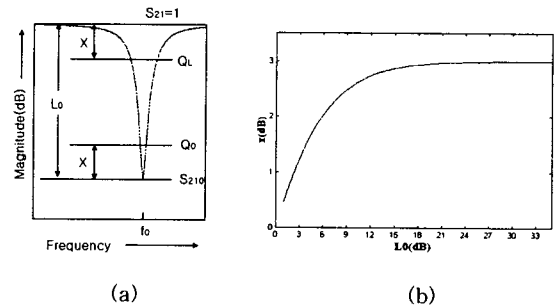


그림 5. $S_{21}(dB)$ 의 측정으로부터 Q_0 결정(Q_L :loaded Q, Q_0 :unloaded Q)

$$L_0(aB) = 20 \log S_{210}, \quad x(aB) = 3 - 10 \log (1 + 10^{-0.1L_0}) \quad (17)$$

$$Q_0 = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (18)$$

(f_1 : 공진 주파수에서 $x(aB)$ 낮은 주파수)

(f_2 : 공진 주파수에서 $x(aB)$ 높은 주파수)

그림 6에 그림 1의 $d=0mm$ 에서 측정한 데이터와 ADS simulation을 비교하였다. 그림 7의 측정 데이터에서 13.315GHz 근방에서 작은 dip이 관측되었는데 이는 측정에서 이용된 하우징의 고차 모드 공진 현상 때문이라고 생각되어진다. 그림 7의 데이터와 식 (5), (6), (16), (17), (18)로부터 구한 유전체 공진기의 등가회로 값은 표 1과 같다.

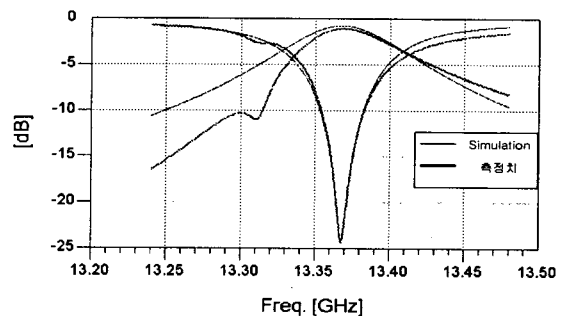


그림 6. 측정치와 Simulation비교

표 1. 유전체 등가회로 값(d=0mm).

Parameter	값	관계 식
$x(\text{dB})$	2.984	(2.17b)
f_0	13.3678 GHz	그림 2.9
f_1	13.36529 GHz	그림 2.9
f_2	13.37062 GHz	그림 2.9
R	1527.48 Ω	(2.16)
β	15.27	(2.6)
Q_0	2508.03	(2.18)
L	7.251096 pH	(2.5a)
C	19.548647 pF	(2.5b)

실험에 이용된 유전체 공진기의 Data book에서 제공된 Q_0 값은 3134.33이고 본 연구에서 측정된 Q_0 값은 2500인데 이 차이는 측정에 사용된 하우징의 크기에 따른 차이(공급사:31.2×31.2×17(mm), 본연구:52.3×42.14×16.88(mm))로 생각되어진다.

2.3 DRO 설계 이론

그림 7은 DRO의 입출력단의 정합회로를 나타낸 것이다. 아래의 설계 과정을 통하여 정합회로를 설계한다[5].

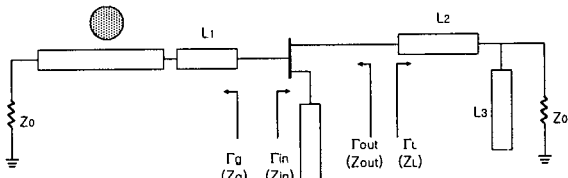


그림 7. 발진조건에 대한 입력단과 정합회로

식 (19)은 발진 조건의 관계식을 나타낸 것이다.

$$R_L + jX_L = -\frac{R_{out}}{3} - jX_{out} \quad (19)$$

그림 7에서 L_1 의 초기값을 $\lambda/4$ 로 놓고 Z_{out} 을 구해 식 (19)로부터 Z_L 의 정합회로를 구현한다. 그리고 나서 Γ_g 와 Γ_{in} 의 조건 식 (20)에 만족하도록 L_1 의 값을 변화시키고, 다시 Z_{out} 을 구해 식 (19)에 만족하도록 정합회로를 구현한다. 이와 같은 방법으로 식 (19)와 식(20)에 만족할 때까지 되풀이한다. 위의 과정을 통하여 발진조건에 만족하는 $L_1=12.97(\text{mm})$, $L_2=3.71(\text{mm})$, $L_3=3.48(\text{mm})$ 를 구한다.

$$|\Gamma_g| > \frac{1}{|\Gamma_{in}|}, \quad \angle(\Gamma_g) = \angle\left(\frac{1}{\Gamma_{in}}\right) \quad (20)$$

Γ_g , Γ_{in} , Z_{out} , Z_L 이 발진 조건에 만족하도록 설계한 값은 표 2에 나타나 있다.

표 2. DRO 입력단과 정합회로 설계 값

$ \Gamma_g $	$1/ \Gamma_{in} $	$\angle \Gamma_g$	$\angle (1/\Gamma_{in})$	Z_{out}	Z_L
0.926	0.894	31.799°	29.529°	-7.311+j134.935	2.440-j134.539

지금까지 DRO설계 과정을 하나의 Flow chart로 도시하자면 그림 8과 같다.

ADS로 Simulation한 결과는 그림 9에 보인 바와 같이 발진 Loop Gain을 구하고자 ADS Tool에서 공진기와 FET사이에서 OSC TEST를 이용하여 발진 조건을 확인한 결과 발진기의 발진 주파수 13.4GHz에서 Phase는 2.27°이고, Loop Gain은 1.036이다. 이로부터 설계된 DRO 회로는 13.4GHz에서 발진할 수 있다는 것을 확인하였다.

설계된 DRO를 제작하여 측정한 결과 중심 주파수 13.4GHz에서 출력전력이 4.42dBm 정도로 나타났다.

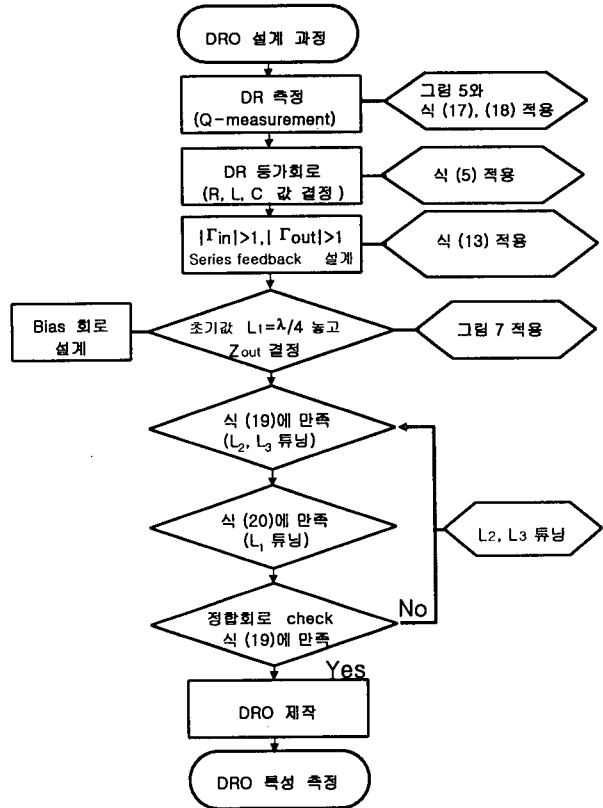


그림 8 DRO 설계 Flow Chart

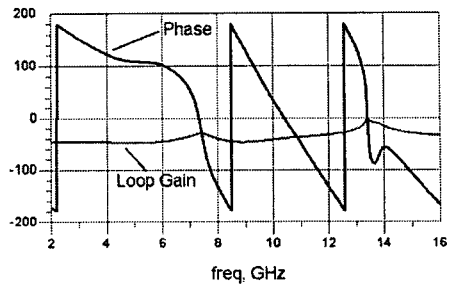


그림 9 최종적으로 설계된 DRO의 모의 실험 결과

2.4 완충 증폭기 설계

앞 절에서 설계한 발진기의 출력 전력은 4.42dBm으로 나타났다. 하지만 증폭기를 거친 최종 출력은 13dBm 정도를 얻는 것이 설계목표이다. 발진기와 증폭기를 연결할 때의 손실을 감안하여 최대의 이득을 갖도록 설계하고자 한다[3]. 산란계수 값들은 표 3에 나타내었다. 표 3에 보인 FET는 HP사의 ATF-26884이다.

표 3. 산란계수의 Magnitude와 Angle

S11		S12		S21		S22	
Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.
0.546	80.4	0.162	12.8	1.776	-45.4	0.532	-137.6

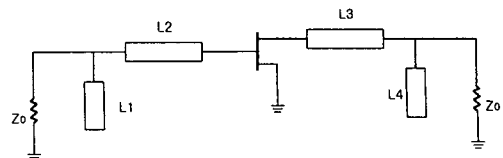


그림 10. 완충 증폭기의 입력 및 출력 정합회로

입력 및 출력 정합회로는 그림 10과 같이 구성을 하였고 최종 설계 값들은 $L_1=4.69\text{mm}$, $L_2=3.57\text{mm}$, $L_3=1.62\text{mm}$, $L_4=2.13\text{mm}$ 이다. 완충 증폭기의 모의 실험 결과에서 전압 이득은 11.2dB이다. 완충 증폭기를 제작하여 측정결과는 그림 12에 나타내었다. 그림12에서 보는 바와 같이 13.4GHz에서 전압 이득을 11dB 얻을 수 있었다.

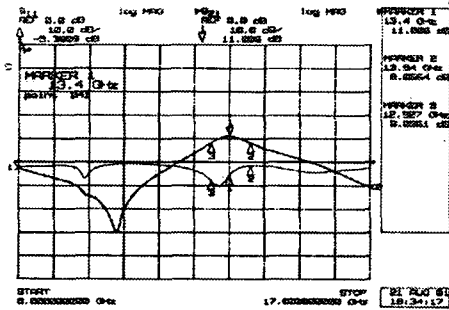


그림 12. 완충 증폭기의 측정 결과

DRO와 완충 증폭기를 연결하여 측정 결과는 그림 13에 보였다. 보는 바와 같이 연결했을 때의 출력 전력은 주파수 13.4GHz에서 13.61dBm을 얻을 수 있었다.

완충 증폭기를 거쳐 나온 출력에 대한 위상 잡음을 측정하고자 발진 주파수에서 offset 주파수 100kHz에서의 출력 전력은 -51.39dBm을 보이고 있다. 따라서 offset 주파수 100kHz에서의 위상 잡음은 $[dBm]-10\log(RBW)$ 로 계산하면 -105 dBc/Hz를 구할 수 있다.

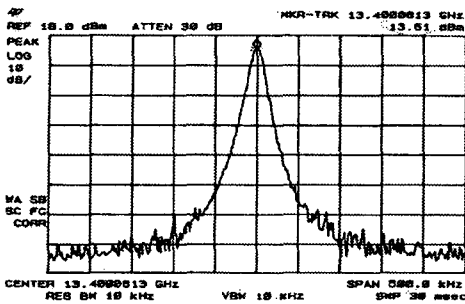


그림 13. DRO와 완충 증폭기를 연결했을 때의 특성

2.5 전압 제어 유전체 공진 발진기 설계

바랙터 다이오드와 발진기의 연결 구성은 그림 14에 나타내었고, 앞 절에서 설계한 DRO에 바랙터 다이오드를 연결한 전압제어 유전체 공진 발진기의 tuning range를 측정하여 그림 15에 보였다.

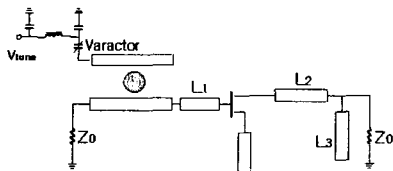
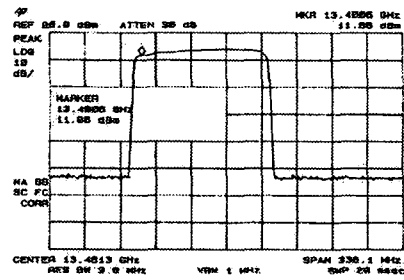


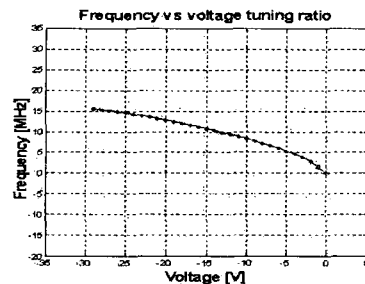
그림 14. 바랙터 다이오드와 발진기의 연결 구성

그림 15(a)는 다이오드의 전압을 고정시키고 tuning-screw에 의한 기계적 tuning range의 측정결과를 보인 것이고, 그림 15(b)는 tuning screw를 고정시키고 바랙터 다이오드의 전압을 변화시키면서 측정한 전기적 tuning range를 보인 것이다(완충 증폭기를 연결한 상태). 그림 15에서 보는 바와 같이 기계적 tuning range는 13.395GHz~13.52GHz의 범위로 125MHz 정도이고, 전기적 tuning range는 바랙터 다이오드에 인가하는 전

압을 0~-29V 까지 변하는 동안 주파수의 범위는 15MHz 정도로 나타났다.



(a) 기계적 tuning range



(b) 전기적 tuning range

그림 15. 전압제어 유전체 공진 발진기의 tuning range 측정

3. 결론

PLDRO를 설계하기 위해 DR을 모델링하여 VCDRO의 설계를 모의 실험 결과와 비교하면서 설계 알고리즘을 체계화하였으며, 측정 결과에서 살펴봤던 것처럼 주파수 13.4 GHz에서 출력 전력 12dBm과 Offset 주파수 100kHz에서 위상잡음 -105dBc/Hz를 얻을 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] APS Khanna, Y.Garault, "Determination of Loaded, Unloaded, and External Quality Factors of a Dielectric Resonator Coupled to a Microstrip Line," IEEE Trans. MTT, Vol. 31, No.3, pp. 261-264, 1983.
- [2] A.P.S. Khanna, "Q measurements of microstrip-coupled dielectric resonators," Microwaves and R.F., Vol. 23, pp. 81-86, Jan. 1984.
- [3] Guillermo Gonzalez, "Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design," Prentice Hall, 1997.
- [4] Darko Kajfez, Pierre Guillon, "Dielectric Resonator," Artech House, 1986.
- [5] Philip G Wilson, Richard D Carver, "An Easy-To-Use FET DRO Design Procedure Suited To Most CAD Programs," IEEE MTT-s Digest, pp.1033-1036, 1989.