

위상잡음 특성 개선을 위한 X-band 상호 결합 구조의 발진기

X-band Mutually Coupled Structure Oscillators for Improved Phase-Noise Characteristics

최정완
(광운대, 석사과정)

김현진
(광운대, 박사과정)

홍의석
(광운대, 교수)

Key Words : mutually coupled structure oscillator, phase noise

목 차

- I. 서론
- II. 이론
- III. 설계 및 측정 제작

- IV. 결론
- 참고문헌

I. 서론

최근 통신 시스템에서는 안정된 마이크로파와 밀리미터파 신호원이 상업용이나 군사적인 목적을 위한 응용을 요구하고 있으며 각종 통신 시스템과 단말기들의 소형화가 진전됨에 따라 이들 단말기의 기준 주파수 발진용으로 사용되는 핵심 부품인 RF 발진기의 수요가 크게 늘고 있다. 상업적인 디지털 통신 시스템 또한 높은 신뢰성이 있는 정보 전송을 위해 안정된 신호원을 요구하고 있으며, 이로 인해 우수한 위상잡음 특성을 갖는 발진기의 필수적으로 요구되고 있는 실정이다. 우수한 위상잡음 특성을 위해서는 공진기의 Q 값을 개선시켜야 한다. 유전체 공진기는 Q값이 우수하나 3차원 구조를 갖고 있어 회로의 소형화와 다른 회로들과 집적하기에 어렵기 때문에 평면 구조인 마이크로스트립 공진기의 성능 개선을 통한 우수한 Q값의 확보를 필요로 한다. 그러한 이유로 마이크로스트립 공진기를 통한 위상잡음 개선과 발진기의 발진주파수를 안정화시키려는 많은 방법들이 제시되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 서로 다른 바이어스를 통해 위상을 조정하고, hair-pin 공진기를 이용한 두 개의 발진기 출력신호를 서로의 출력단에 인가되도록 결합하는 상호 결합 발진기를 제안하였다. 그 결과, 서로의 출력단에 영향을 주지 않았을 때보다 약 10 dBc가량 개선된 위상잡음 특성을 얻을 수 있었다.

II. 이론

1. 상호 결합 발진기

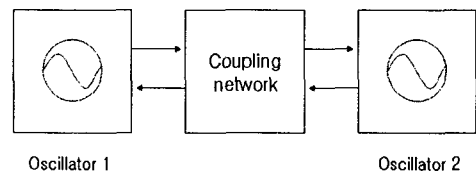
상호 결합 발진기의 일반적인 분석방법은 스프링으로 연결된 두 진자를 운동을 통해 설명할 수 있다. 처음에 하나의 진자가 작은 진폭을 갖고 스윙하면 다른 진자는 처음 진자로부터 스프링에 의해 에너지를 전달받음에 따라 서서히 진폭이 증가된다. 그리고 에너지는 처음 진자로 다시 전달되고 이러한 에너지의 순환은 계속된다. 진자의 움직임에는 같은 방향 또는 반대 방향으로 진자들이 이동하는 두 가지 모드가 있다. 만약

진자들이 같은 방향으로 스윙한다면 고유 주파수로 동일하게 스윙할 것이고 그들이 반대 방향으로 스윙한다면 진자들은 상호 결합되지 않았을 때보다 더 높은 주파수에서 스윙할 것이다. 진자가 이상적이지 않을 때에도 여전히 두 개의 모드가 존재하지만 움직임은 더 복잡해지고 어떠한 모드도 고유의 주파수는 아니다. 비슷한 분석은 결합된 발진기에서도 주어진다. 그림 1 과 그림 2 는 결합된 발진기의 간단한 개념도와 직렬 결합된 발진기 회로를 도시하였다. L_1 , C_1 그리고 L_2 , C_2 는 직렬 발진기 1과 2의 LC 공진 회로이다. R_{1-Loss} 와 R_{2-Loss} 는 공진기의 손실 저항이다. 그리고 R_{n1} 그리고 R_{n2} 는 능동소자의 부성저항들이다. 가장 간단한 연결 네트워크는 두 개의 발진 회로를 결합하는 커패시터 C_c 에 의해 구현될 수 있다. L과 C의 등가 값은 아래와 같이 주어진다.

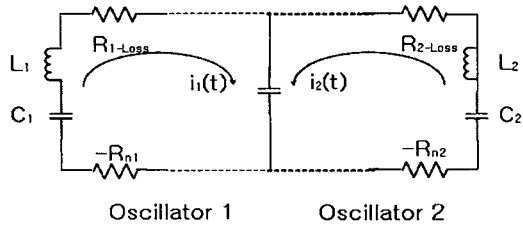
$$L=L_1+L_2 \quad (1)$$

$$C=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2} \quad (2)$$

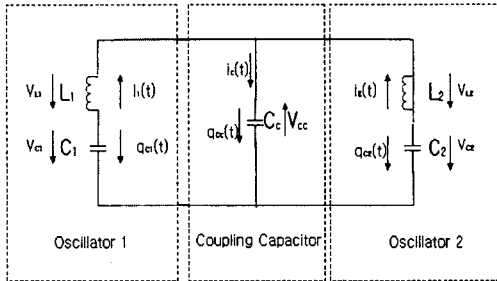
C_c 의 무한대 값은 두 발진 회로가 연결되지 않는 것을 의미한다. 발진기 1과 2는 그들의 자유 동작 주파수에서 발진하고 능동소자의 부성저항은 발진기의 저항으로 인한 손실을 보상한다. 그림 3은 직렬 손실저항 없이 연결된 발진회로를 보이며, 그림 4로 다시 표현할 수 있다. 실제 구현에 있어서 상호 결합 강도 (intermediate coupling strength) 는 상호 결합된 발진기 시스템 분석에 매우 중요한 파라미터이다.



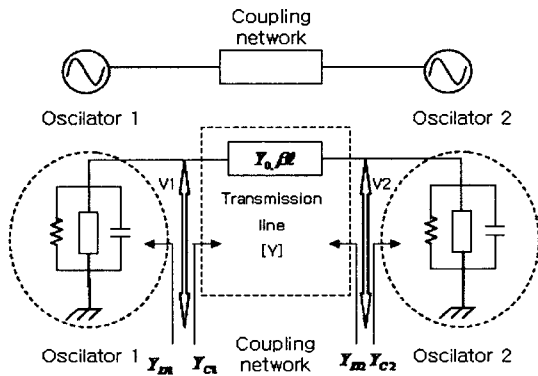
<그림 1> 결합된 발진기의 개념도
<Fig 1> Concept of the coupled oscillator



<그림 2> 결합된 발진기의 회로
<Fig 2> Circuit of the coupled oscillator



<그림 3> 직렬 손실저항 없는 결합된 발진기 회로
<Fig 3> Coupled oscillator circuit without series loss
resistance상호 동기화 결합 발진기



<그림 4> 상호 결합 발진기의 등가회로
<Fig 4> Equivalent circuit of the mutually coupled oscillators

그림 4는 전송라인에 의해 결합된 상호 동기화 결합 발진기의 등가회로를 보이고 있다. 발진기의 등가모델은 직렬 또는 병렬로 나타낼 수 있으며, 발진기의 상호 동기화를 분석할 경우에도 마찬가지이다. 전송선은 결합구조와 함께 공진기로서 동작하기 때문에 분석이 용이하도록 전송라인이 가진 손실을 부하 어드미턴스 G_L 로 나타내었다. 그림 4에서 Y_D 과 Y_C 는 두 개의 능동소자와 그들의 부하 등가 어드미턴스를 나타낸다. 반면에 Y_A 과 Y_C 는 상호 결합된 발진기 회로에 의한 어드미턴스를 나타낸다. 전송선의 길이는 발진 기법에 기본을 두고 두 소자가 공통 공진 주파수에서 공진하도록 선택되었다. 이것은 각각의 소자 서셉턴스가 같은 크기의 진폭을 가지면서 위상이 정반대로 다른 소자의 서셉턴스로 전송되도록 하기 위함이다. 따라서 가상 접지 회로가 전송선의 중간에 나타나게 되는데, 이것은 소자가 위상을 통해 동기화된 주입을 좀 더 확실하게 만들어 준다. 이론적인 분석을 위해 전송선을 $V_1 = |V_1|e^{j\theta_1}$ 과

$V_2 = |V_2|e^{j\theta_2}$ 을 가진 2포트로 나타내었다. 그림 5의 등가회로는 전송선 이론에서 다음과 같은 행렬의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -Y_{D1} & V_1 \\ -Y_{D1} & V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[Y]_{\text{전송선}} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -jY_0 \cot(\beta \ell) & jY_0 \operatorname{cosec}(\beta \ell) \\ jY_0 \operatorname{cosec}(\beta \ell) & -jY_0 \cot(\beta \ell) \end{bmatrix} \quad (4)$$

이상적으로 결합된 발진기를 위해서는

$$V_1 = V_2 = V, Y_{D1} = Y_{D2} = Y_D, \text{ and } Y_{C1} = Y_{C2} = Y_C \quad (5)$$

식 3로부터, 위상의 차이를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e^{+j(\theta_2 - \theta_1)} = e^{+j(\Delta\theta)} = \frac{[Y_D + Y_{11}]}{-[Y_{12}]} \quad (6)$$

Y_C 가 전송선 방정식으로 이루어지듯이 어드미턴스 Y_D 는 소자 어드미턴스와 부하 컨덕턴스로 이루어져있다.

$$Y_D = G_L - G_D + jB_D; G_D > 0 \quad (7)$$

$$Y_C = Y_0 \left[\frac{Y_D + jY_0 \tan(\beta \ell)}{Y_0 + jY_D \tan(\beta \ell)} \right] \quad (8)$$

발진 기법을 적용하면서 전송선의 길이는 어드미턴스 Y_C 의 실수와 허수부가 다음과 같이 되어야 한다.

$$\operatorname{Re}[Y_C] = G_L - G_D \quad (9)$$

$$\operatorname{Im}[Y_C] = -jB_D \quad (10)$$

식 7과 8로부터

$$\tan(\beta \ell) = \frac{2B_D Y_0}{B_D^2 - Y_0^2 + (G_L - G_D)^2} \quad (11)$$

발진이 시작될 때 어드미턴스 Y_C 와 Y_D 는 음수가 되고, 소자의 이득은 신호 레벨이 증가함에 따라 손실이 보상될 때까지 감소한다. 안정된 발진은 $G_L - G_D = 0$ 일 때 시작되고 전송선의 전기적 길이 θ 는 식 9로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\theta = (\beta \ell) = \tan^{-1} \left[\frac{2B_D Y_0}{B_D^2 - Y_0^2} \right] \quad (12)$$

전송선의 파라미터 $[Y]$ 는 식 4로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 [Y]_{\text{전송선}} &= \begin{bmatrix} -jY_0 \cot(\beta \ell) & jY_0 \operatorname{cosec}(\beta \ell) \\ jY_0 \operatorname{cosec}(\beta \ell) & -jY_0 \cot(\beta \ell) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -j \frac{B_D^2 - Y_0^2}{2B_D} & j \frac{B_D^2 + Y_0^2}{2B_D} \\ j \frac{B_D^2 + Y_0^2}{2B_D} & -j \frac{B_D^2 - Y_0^2}{2B_D} \end{bmatrix} \quad (13)
 \end{aligned}$$

위상차는 식 6과 식 13을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 e^{+j(\rho_2 - \rho_1)} &= \frac{[Y_D + Y_{11}]}{-[Y_{12}]} \\
 &= \left[\frac{Y_D - j(B_D^2 - Y_0^2)/2B_D}{j(B_D^2 + Y_D^2)/2B_D} \right] \\
 &= \left[\frac{jB_D - j(B_D^2 - Y_0^2)/2B_D}{j(B_D^2 + Y_D^2)/2B_D} \right] \\
 &= -1 \Rightarrow \Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 = \pm 180^\circ \quad (14)
 \end{aligned}$$

식 14는 결합된 발진 회로가 상호 결합을 이루기 위한 위상 조건을 나타낸다. □

3. 상호 결합 발진기의 잡음 분석

상호 결합 발진기의 위상잡음은 다음과 같이 나타낼 수 있다. □

$$|\Delta \theta_{\text{total}}(\omega)|^2 = \frac{1}{N} |\Delta \theta_i(\omega)|^2 \quad (15)$$

여기서

$\Theta_{\text{total}}(\omega)$: 상호 결합된 발진기 위상 잡음 특성

$\Theta_i(\omega)$: 한 개의 발진기 위상 잡음 특성

N : 상호 결합된 발진기의 수

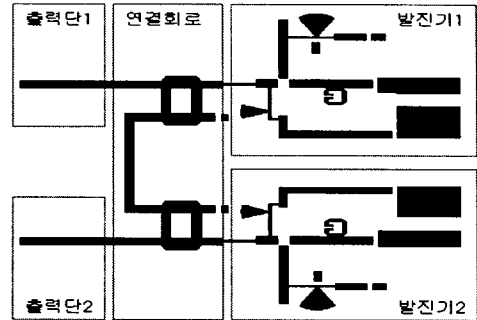
식 15를 통해 상호 결합된 발진기의 수가 많을수록 우수한 위상잡음 특성을 갖게 될 것이라는 것을 예측할 수 있다.

III. 설계 및 측정 제작

1) 설계

유전율(ϵ_r) 2.5의 테프론 기판 위에 Surface Mount Gallium Arsenide FET 2개를 이용하여 각각의 발진기가 상호 결합된 새로운 구조의 X-band 발진기를 설계하였다. 공진부는 최대 결합 특성을 나타내기 위하여 0.13mm의 간격을 갖는

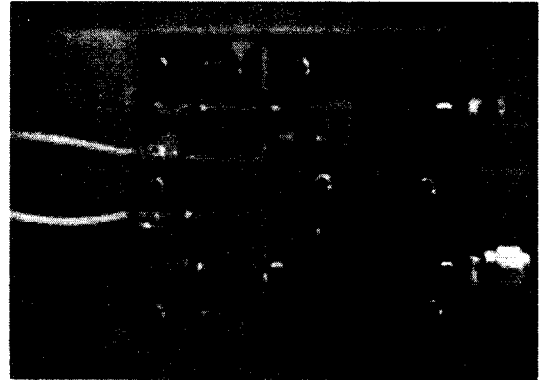
hair-pin 공진기를 이용하였다. □ 두 개의 발진기가 각각의 출력에 영향을 주도록 Branch-Line Coupler를 이용하여 결합하였다. □ 그림 5는 위상잡음 특성의 개선을 위해 상호 결합된 제안된 발진기의 구조를 보이고 있다.



<그림 5> 제안된 구조의 상호 결합 발진기

<Fig 5> Proposed structure of the mutually coupled oscillators

2) 제작



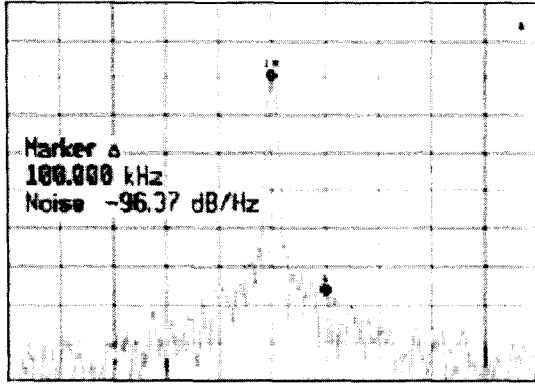
<그림 15> X-band 상호 결합 구조 발진기의 실물사진

<Fig 15> Photograph of the X-band mutually coupled structure oscillators

본 논문에서 제안된 구조의 발진기는 바이어스 부분의 전원 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 Tantalum capacitor를 첨가하였으며, 최종 출력단에서의 특성을 보장하기 위하여 하나의 출력단을 50 Ω으로 종단시켰다.

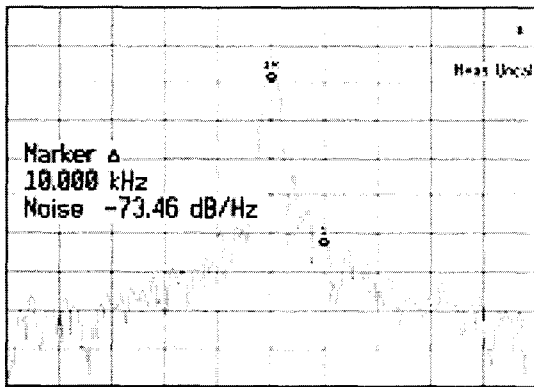
3) 측정

4.3 V, 37 mA의 바이어스 상태에서 발진기 1을 동작시키고 출력단 2에서 측정한 결과, 발진주파수 9.3 GHz에서 각각 -96.37 dBc(@100 kHz offset frequency), -73.46 dBc(@10 kHz offset frequency)의 특성을 얻을 수 있었으며, 그림 6과 7에서 볼 수 있다. 이때의 출력전력은 그림 8에서와 같이 -1.22 dBm을 나타내었다.



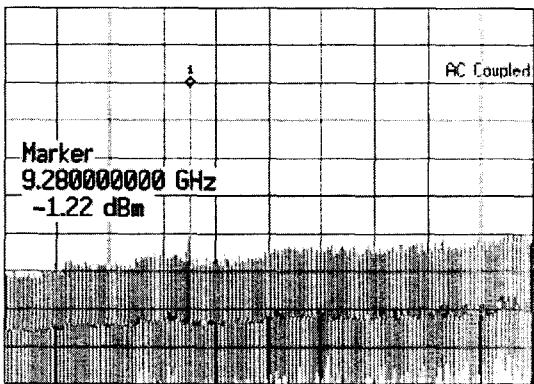
<그림 6> 출력단 2에서 측정된 발진기 1의 100 kHz 떨어진 주파수의 위상잡음

<Fig 6> Measured phase-noise of the oscillator-1 at the output port-2(@100 kHz offset frequency)



<그림 7> 출력단 2에서 측정된 발진기 1의 10 kHz 떨어진 주파수의 위상잡음

<Fig 7> Measured phase-noise of the oscillator-1 at the output port-2(@10 kHz offset frequency)

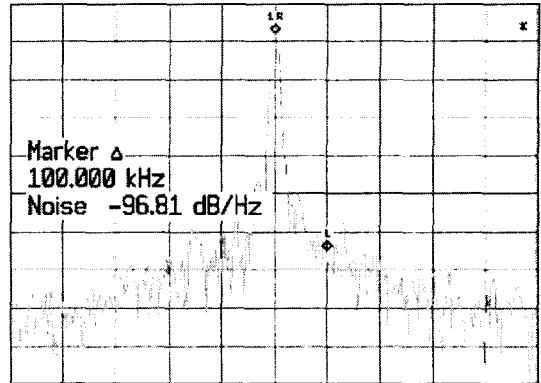


<그림 8> 발진기 1이 4.3V, 37mA로 동작될 때의 출력단 2에서의 파워레벨

<Fig 8> Power level of the output port-2 at 4.3 V, 37 mA biased of the oscillator-1

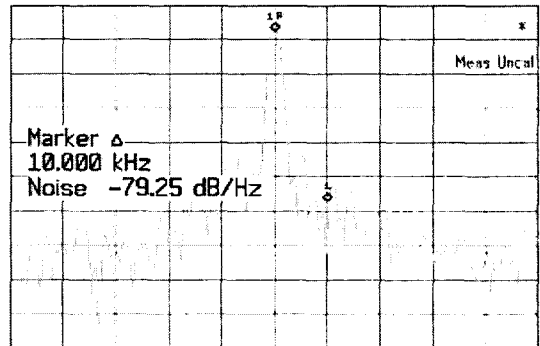
8.1 V, 69 mA의 바이어스 상태에서 발진기 2를 동작시키고 출력단 2에서 측정한 결과, 발진주파수 9.3GHz에서 각각 -96.81 dBc(@100 kHz offset frequency), -79.25 dBc(@10 kHz

offset frequency)의 특성을 얻을 수 있었으며, 그림 9와 10에서 볼 수 있다. 이때의 출력전력은 그림 11에서와 같이 11.05 dBm을 나타내었다.



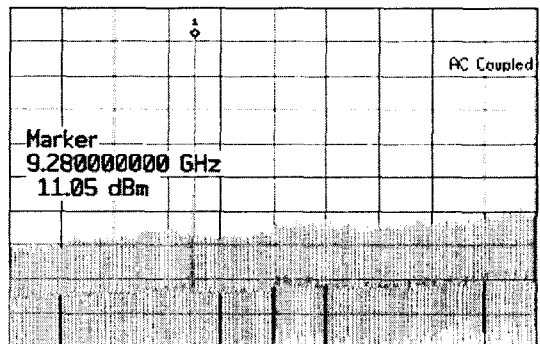
<그림 9> 출력단 2에서 측정된 발진기 2의 100 kHz 떨어진 주파수의 위상잡음

<Fig 9> Measured phase-noise of the oscillator-2 at the output port-2(@100 kHz offset frequency)



<그림 10> 출력단 2에서 측정된 발진기 2의 10 kHz 떨어진 주파수의 위상잡음

<Fig 10> Measured phase-noise of the oscillator-2 at the output port-2(@10 kHz offset frequency)



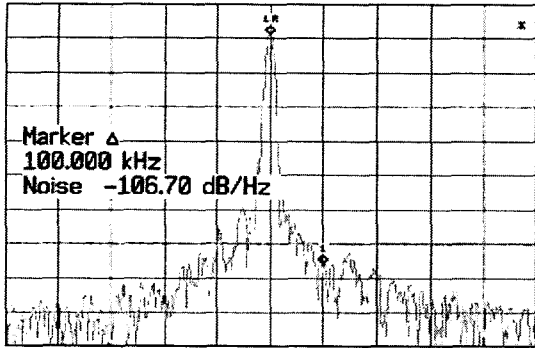
<그림 11> 발진기2가 8.1V, 69mA로 동작될 때의 출력단 2에서의 파워레벨

<Fig 11> Power level of the output port-2 at 8.1 V, 69 mA biased of the oscillator-2

이렇게 출력 신호의 특성을 서로 다르게 변화시켜 동작점을

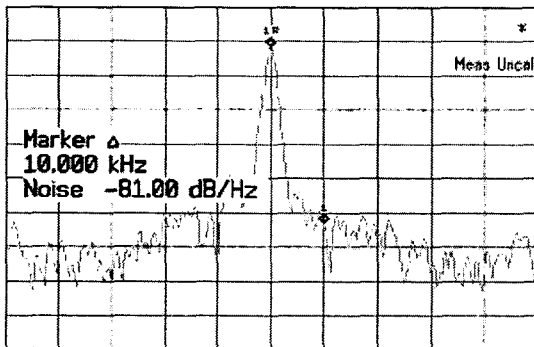
조정된 이유는, 두 출력 신호간의 반 파장의 위상을 미세조정하기 위함이며, 동시에 두 개의 발진기를 동작시키면 발진기 1과 발진기 2는 서로의 출력 신호에 영향을 주게 된다.

그 결과, 발진주파수 9.3 GHz에서 각각 $-106.07 \text{ dBc}(@100 \text{ kHz offset frequency})$, $-81 \text{ dBc}(@10 \text{ kHz offset frequency})$ 의 개선된 특성을 얻을 수 있었으며, 그림 12와 13에서 볼 수 있다. 이때의 출력전력은 그림 11에서와 같이 9.92 dBm 을 나타내었다.



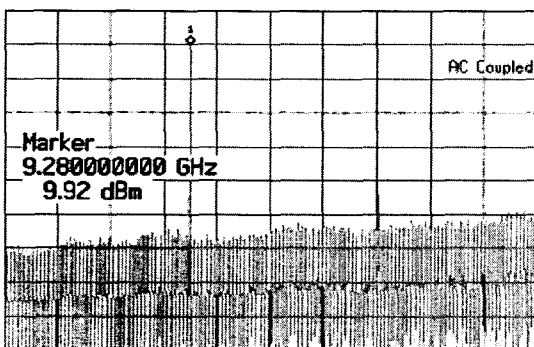
<그림 12> 발진기 1과 2가 함께 동작될 때의 100 kHz 떨어진 주파수의 위상잡음

<Fig 12> Measured phase-noise during both oscillator 1 and 2 operated (@100 kHz offset frequency)



<그림 13> 발진기 1과 2가 함께 동작될 때의 10 kHz 떨어진 주파수의 위상잡음

<Fig 13> Measured phase-noise during both oscillator 1 and 2 operated (@10 kHz offset frequency)



<그림 14> 발진기 1과 2가 함께 동작될 때의 출력단 2에서의 파워레벨

<Fig 14> Power level of the output port-2 during both oscillator 1 and 2 operated.

상호 결합된 발진기는 각각의 발진기에서 갖는 특성과 비교할 때, 우수한 위상잡음 특성을 갖게 되는 것을 알 수 있었다. 회로제작의 측면에서 볼 때, 대칭구조를 취하고 있기 때문에 제작이 용이하다는 장점을 갖고 있으며, 또한 별다른 튜닝없이도 동작점의 변화를 통해 발진주파수를 미세 조정할 수 있다는 이점도 갖고 있다.

IV. 결론

유전체 공진기는 Q값이 우수하나 3차원 구조를 갖고 있어 회로의 소형화뿐만 아니라 다른 회로들과의 집적에 어려움이 따른다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 유전체 공진기에 비해 낮은 Q값을 갖지만 평면 구조를 취하고 있는 hair-pin 공진기를 채택하였다. 또한 본 논문에서는 낮은 Q값으로 인해 발생하는 위상잡음 특성의 저하를 보상하기 위하여 새로운 구조의 X-band 상호결합 발진기를 제안하였다. 그 결과, 발진주파수 9.3 GHz에서 각각 $-106.7 \text{ dBc}(@100 \text{ kHz offset frequency})$, $-81 \text{ dBc}(@10 \text{ kHz offset frequency})$ 라는 매우 우수한 위상잡음 특성을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제안된 구조는 기존의 논문들이 제안한 방법에 적용하여 회로의 소형화, 고집적화, 고성능화를 이루는데 기여할 수 있을 것이라 예상된다.

참고문헌

1. H.-C. Chang, X. Cao, U. K. Mishra, and R. A. York, "Phase noise in coupled oscillators: Theory and experiment," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, pp. 604-615, May 1997.
2. Ulrich L. Robde, Ajay K. Poddar, and Georg Bock "The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications" WILEY-INTERSCIENCE pp. 247-257
3. Ulrich L. Robde, Ajay K. Poddar, and Georg Bock "The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications" WILEY-INTERSCIENCE pp. 276-288
4. 민준기, 하성재, 이근태, 안창돈, 홍의석 "A Study on the new structure Voltage Controlled Hair-pin Resonator Oscillator using parallel feedback of second-harmonic" 한국통신학회 논문지 제27권 5C호, 2002. 5 pp. 530-534 (5 pages)
5. Rajesh Mongia, Inder Bahl, and Prakash Bhartia " RF and Microwave Coupled - Line Circuits" Artech House pp. 244-247