

위상 잡음 특성 개선을 위한 상호 결합 구조의 발진기 설계 및 제작

Design and Implementation of the Mutually Coupled Structure Oscillators for Improved Phase-Noise Characteristics

최정완 · 도지훈 · 이형규 · 강동진 · 윤호석 · 이경학* · 홍의석

Jeong-Wan Choi · Ji-Hoon Do · Hyung-Kyu Lee · Dong-Jin Kang · Ho-Seok Yoon · Kyung-Hak Lee* · Ui-Seok Hong

요 약

본 논문에서는 상호 결합 구조의 발진기를 이용하여 우수한 위상 잡음 특성을 얻었다. 상호 결합 구조의 발진기는 두 개의 발진기 출력 신호의 위상을 변화시켜 결합시키는 구조를 가졌으며, 유전율 2.5인 테프론 기판과 Surface Mount Gallium Arsenide FET 소자를 이용하여 제작하였다. 그리고 두 발진기가 9.3 GHz에서 상호 결합 위상 조건을 만족시키기 위해 바이어스만으로 조절할 수 있는 구조를 제안하였다. 4.4 V의 전압을 인가했을 때 37 mA의 전류가 흐르는 발진기는 -96.37 dBc(@100 kHz offset frequency), -73.46 dBc(@10 kHz offset frequency)의 위상잡음 특성을 나타내었고, 8.1 V를 인가했을 때 69 mA를 갖는 발진기의 출력과 상호 결합하여 -106.7 dBc(@100 kHz offset frequency), -81 dBc(@10 kHz offset frequency)의 우수한 위상 잡음 특성을 나타내었다.

Abstract

In this paper, mutually coupled oscillator is employed to improve phase noise. Mutually coupled structure oscillator couples two oscillator's phase shifted output signals, that is fabricated using teflon board which has dielectric constant of 2.5 and Surface Mount Gallium Arsenide FET devices. And this paper proposed the structure to bias adjustment for the phase condition of mutually couples. When one oscillator has bias point of 4.4 V and 37 mA, it's output signal has phase noise characteristic of -96.37 dBc(@9305 MHz, offset frequency 100 kHz), -73.46 dBc(10 kHz). and After it's output signal mutually coupled the other's output signal that has bias point of 8.1 V and 69 mA, it has superior phase noise characteristic of -106.7 dBc(@9305 MHz, offset frequency 100 kHz), -81 dBc(10 kHz).

Key words : Mutually Coupled Structure Oscillator, Phase Noise

I. 서 론

최근 통신 시스템에서는 안정된 마이크로파와 밀리미터파 신호원이 상업용이나 군사적인 목적을 위한 응용을 요구하고 있으며 각종 통신 시스템과 단

말기들의 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 우

「본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITA-2006-(C1090-0603-0008)).」

광운대학교 전파공학부(Department of Transmission Engineering, Kwangwoon University)

*광운대학교 전자통신공학과(Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University)

· 논문 번호 : 20060926-119

· 수정완료일자 : 2006년 10월 31일

수한 위상 잡음 특성을 갖는 발진기의 필수적으로 요구되고 있는 실정이다^[1]. 우수한 위상 잡음 특성을 위해서는 공진기의 Q 값을 개선시켜야 한다. 유전체 공진기는 Q 값이 우수하나 3차원 구조를 갖고 있어 회로의 소형화와 다른 회로들과 집적하기에 어렵기 때문에 평면 구조인 마이크로스트립 공진기의 성능 개선을 통한 우수한 Q 값의 확보를 필요로 한다. 그러한 이유로 마이크로스트립 공진기를 통한 위상 잡음 개선과 발진기의 발진 주파수를 안정화시키려는 많은 방법들이 제시되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 서로 다른 바이어스를 통해 위상을 조정하고, hair-pin 공진기를 이용한 두 개의 발진기 출력 신호를 서로의 출력단에 인가되도록 결합하는 상호 결합 발진기를 제안하였다. 그 결과, 서로의 출력단에 영향을 주지 않았을 때보다 약 10 dBc 가량 개선된 위상 잡음 특성을 얻을 수 있었다.

II. 이 론

2-1 상호 결합 발진기

상호 결합 발진기의 일반적인 분석 방법은 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 1과 그림 2는 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 능동 소자의 부성 저항들이다. 가장 간단한 연결 네트워크는 두 개의 발진 회로를 결합하는 캐패시터 C_c 에 의해 구현될 수 있다. L 과 C 의 등가 값은 아래와 같이 주어진다.

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

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

C_c 의 무한대 값은 두 발진 회로가 연결되지 않는 것을 의미한다. 발진기 1과 2는 그들의 자유 동작 주파수에서 발진하고 능동 소자의 부성 저항은 발진기의 저항으로 인한 손실을 보상한다. 그림 3은 직렬 손실 저항 없이 연결된 발진 회로를 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.

2-2 상호 동기화 결합 발진기

그림 4는 전송 라인에 의해 결합된 상호 동기화 결합 발진기의 등가 회로를 보이고 있다. 발진기의 등가 모델은 직렬 또는 병렬로 나타낼 수 있으며, 발진

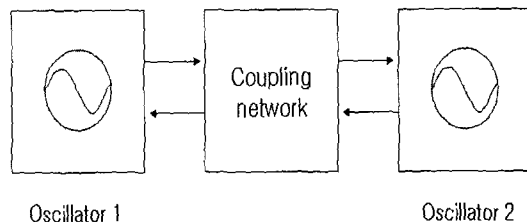


그림 1. 결합된 발진기의 개념도
Fig. 1. Concept of the coupled oscillator.

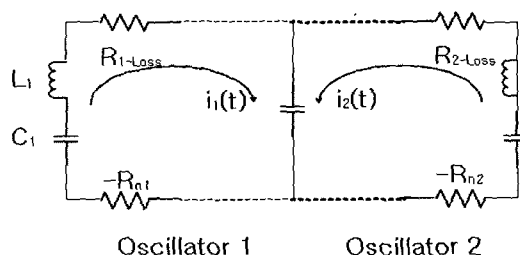


그림 2. 결합된 발진기의 회로
Fig. 2. Circuit of the coupled oscillator.

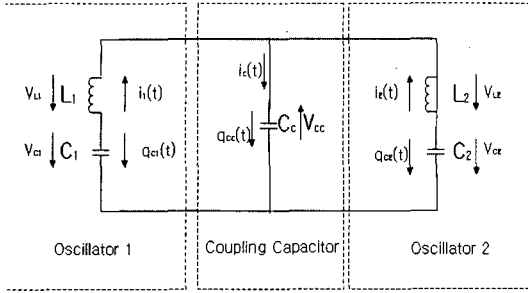


그림 3. 직렬 손실 저항 없는 결합된 발진기 회로
Fig. 3. Coupled oscillator circuit without series loss resistance.

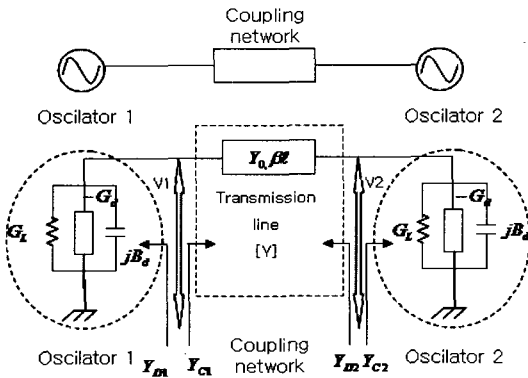


그림 4. 상호 결합 발진기의 등가 회로
Fig. 4. Equivalent circuit of the mutually coupled oscillators.

기의 상호 동기화를 분석할 경우에도 마찬가지이다. 전송선은 결합 구조와 함께 공진기로서 동작하기 때문에 분석이 용이하도록 전송 라인이 가진 손실을 부하 어드미턴스 G_L 로 나타내었다. 그림 4에서 Y_{D1} 과 Y_{D2} 는 두 개의 능동 소자와 그들의 부하 등가 어드미턴스를 나타낸다. 반면에 Y_{C1} 과 Y_{C2} 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 등가 회로는 전송선 이론에서 다음과 같은 행렬의 형태로 나타낼 수 있다.

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

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

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 (3)으로부터, 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 이루어져 있다.

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

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

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 (7)과 (8)으로부터

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

발진이 시작될 때 어드미턴스 Y_C 와 Y_D 는 음수가 되고, 소자의 이득은 신호 레벨이 증가함에 따라 손실이 보상될 때까지 감소한다. 안정된 발진은 $G_L \cdot G_D = 0$ 일 때 시작되고 전송선의 전기적 길이 θ 는

식 (9)로부터 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 (4)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

위상차는 식 (6)과 식 (13)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e^{+j(\rho_2 - \rho_1)} = \frac{[Y_D + Y_{11}]}{-[Y_{12}]} \\ = \left[\frac{Y_D - j(B_D^2 - Y_0^2)/2B_D}{j(B_D^2 + Y_0^2)/2B_D} \right] \\ = \left[\frac{jB_D - j(B_D^2 - Y_0^2)/2B_D}{j(B_D^2 + Y_0^2)/2B_D} \right] = -1 \quad (14)$$

식 (14)는 결합된 발진 회로가 상호 결합을 이루기 위한 위상 조건을 나타낸다^[2].

2-3 상호 결합 발진기의 잡음 분석

상호 결합 발진기의 위상 잡음은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[3].

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

여기서

Δ : fluctuation

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

$\theta_i(\omega)$: 한 개의 발진기 위상 잡음 특성

N : 상호 결합된 발진기의 수

식 (15)를 통해 상호 결합된 발진기의 수가 많을수록 우수한 위상 잡음 특성을 갖게 될 것이라는 것을 예측할 수 있다.

III. 설계 및 측정 제작

3-1 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 0.13 mm의 간격을 갖는 hair-pin 공진기를 이용하였다^[4]. 두 개의 발진기가 각각의 출력에 영향을 주도록 Branch-Line Coupler를 이용하여 결합하였다^[5]. 그림 5는 위상 잡음 특성의 개선을 위해 상호 결합된 제안된 발진기의 구조를 보이고 있다.

3-2 측정

4.3 V, 37 mA의 바이어스 상태에서 발진기 1을 동작시키고 출력단 2에서 측정된 결과, 발진 주파수 9.3

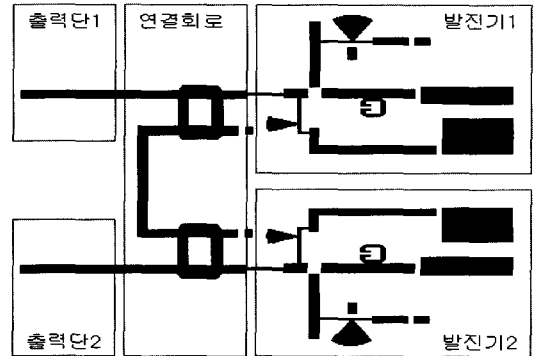


그림 5. 제안된 구조의 상호 결합 발진기
Fig. 5. Proposed structure of the mutually coupled oscillators.

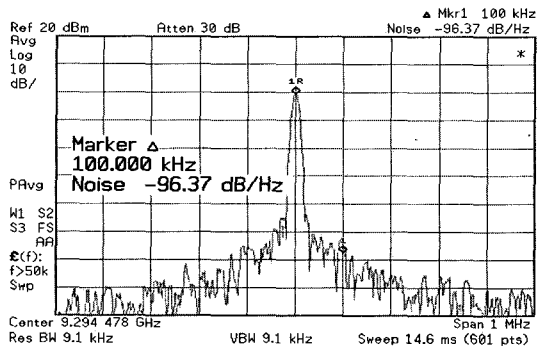


그림 6. 출력단 2에서 측정된 발진기 1의 100 kHz 떨어진 주파수의 위상 잡음
Fig. 6. Measured phase-noise of the oscillator-1 at the output port-2(@100 kHz offset frequency).

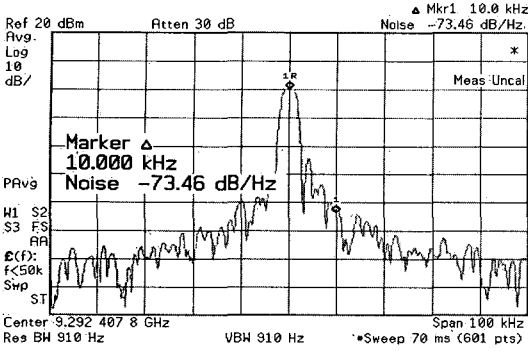


그림 7. 출력단 2에서 측정된 발진기 1의 10 kHz 떨어진 주파수의 위상 잡음
 Fig. 7. Measured phase-noise of the oscillator-1 at the output port-2(@10 kHz offset frequency).

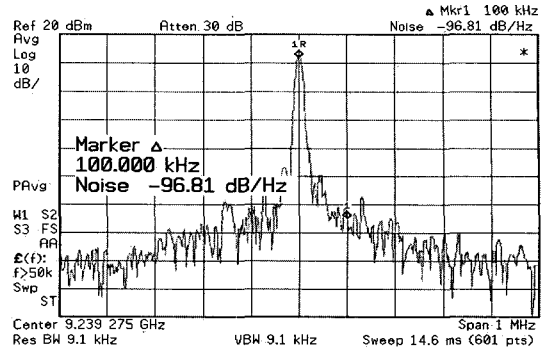


그림 9. 출력단 2에서 측정된 발진기 2의 100 kHz 떨어진 주파수의 위상 잡음
 Fig. 9. Measured phase-noise of the oscillator-2 at the output port-2(@100 kHz offset frequency).

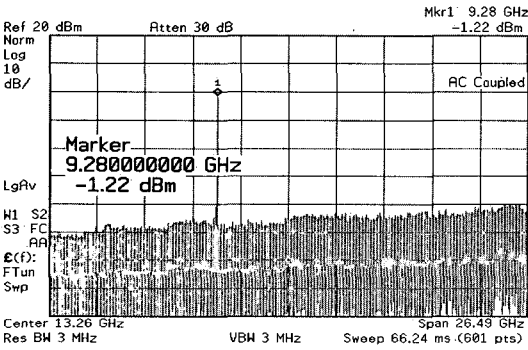


그림 8. 발진기 1이 4.3V, 37 mA로 동작될 때의 출력단 2에서의 파워 레벨
 Fig. 8. Power level of the output port-2 at 4.3 V, 37 mA biased of the oscillator-1.

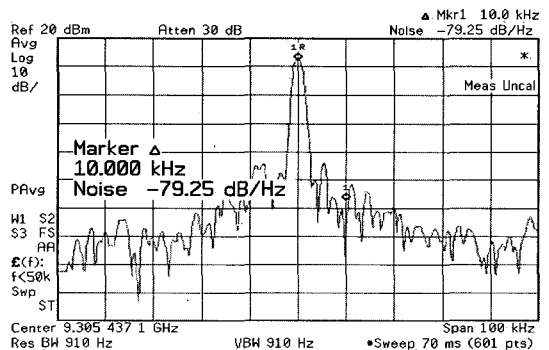


그림 10. 출력단 2에서 측정된 발진기 2의 10 kHz 떨어진 주파수의 위상 잡음
 Fig. 10. Measured phase-noise of the oscillator-2 at the output port-2(@10 kHz offset frequency).

GHz에서 각각 $-96.37 \text{ dBc}(@100 \text{ kHz offset frequency})$, $-73.46 \text{ dBc}(@10 \text{ kHz offset frequency})$ 의 특성을 얻을 수 있었으며, 그림 6과 7에서 볼 수 있다. 이때의 출력 전력은 그림 8에서와 같이 -1.22 dBm 을 나타내었다.

8.1 V, 69 mA의 바이어스 상태에서 발진기 2를 동작시키고 출력단 2에서 측정한 결과, 발진 주파수 9.3 GHz에서 각각 $-96.81 \text{ dBc}(@100 \text{ kHz offset frequency})$, $-79.25 \text{ dBc}(@10 \text{ kHz offset frequency})$ 의 특성을 얻을 수 있었으며, 그림 9와 10에서 볼 수 있다. 이때의 출력 전력은 그림 11에서와 같이 11.05 dBm 을 나타내었다.

이렇게 출력 신호의 특성을 서로 다르게 변화시

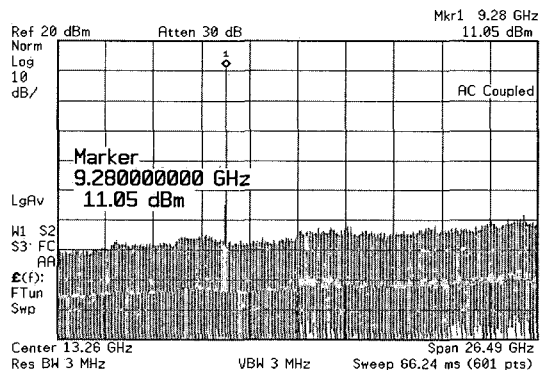


그림 11. 발진기 2가 8.1 V, 69 mA로 동작될 때의 출력단 2에서의 파워 레벨
 Fig. 11. Power level of the output port-2 at 8.1 V, 69 mA biased of the oscillator-2.

켜 동작점을 조정한 이유는, 두 출력 신호간의 반 파장의 위상을 미세 조정하기 위함이며, 동시에 두 개의 발진기를 동작시키면 발진기 1과 발진기 2는 서로의 출력 신호에 영향을 주게 된다.

그 결과, 발진 주파수 9.3 GHz에서 각각 -106.07 dBc(@100 kHz offset frequency), -81 dBc(@10 kHz offset frequency)의 개선된 특성을 얻을 수 있었으며, 그림 12와 13에서 볼 수 있다. 이때의 출력 전력은 그림 11에서와 같이 9.92 dBm을 나타내었다.

상호 결합된 발진기는 각각의 발진기에서 갖는 특성과 비교할 때, 우수한 위상 잡음 특성을 갖게 되는 것을 알 수 있었다. 회로 제작의 측면에서 볼 때, 대칭 구조를 취하고 있기 때문에 제작이 용이하다는

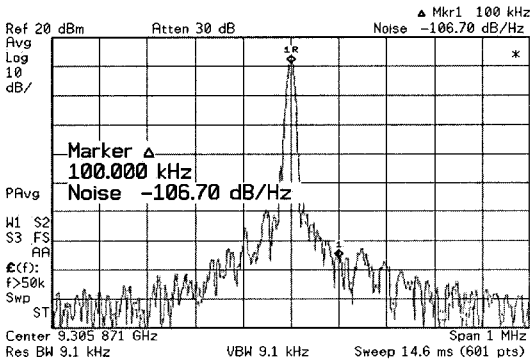


그림 12. 발진기 1과 2가 함께 동작될 때의 100 kHz 떨어진 주파수의 위상 잡음
 Fig. 12. Measured phase-noise during both oscillator 1 and 2 operated (@100 kHz offset frequency).

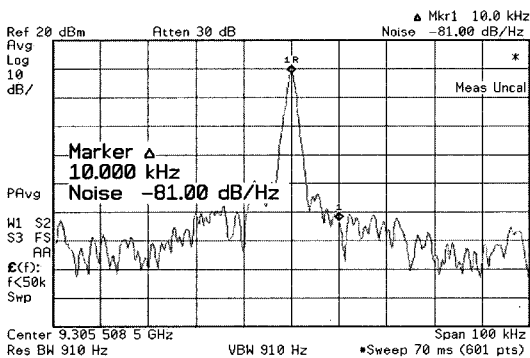


그림 13. 발진기 1과 2가 함께 동작될 때의 10 kHz 떨어진 주파수의 위상 잡음
 Fig. 13. Measured phase-noise during both oscillator 1 and 2 operated (@10 kHz offset frequency).

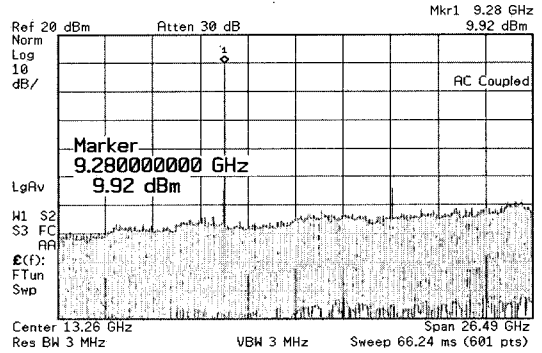


그림 14. 발진기 1과 2가 함께 동작될 때의 출력단 2에서의 파워 레벨
 Fig. 14. Power level of the output port-2 during both oscillator 1 and 2 operated.

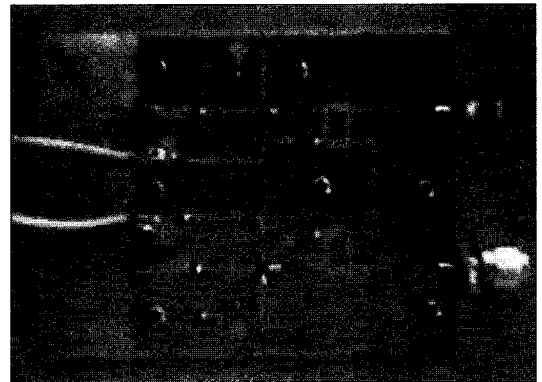


그림 15. X-band 상호 결합 구조 발진기의 실물 사진
 Fig. 15. Photograph of the X-band mutually coupled structure oscillators.

장점을 갖고 있으며, 또한 별다른 튜닝없이도 동작점의 변화를 통해 발진 주파수를 미세 조정할 수 있다는 이점도 갖고 있다.

3-3 제작

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.

IV. 결론

유전체 공진기는 Q 값이 우수하나 3차원 구조를

갖고 있어 회로의 소형화뿐만 아니라 다른 회로들과의 집적에 어려움이 따른다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 유전체 공진기에 비해 낮은 Q 값을 갖지만 평면 구조를 취하고 있는 hair-pin 공진기를 채택하였다. 또한 본 논문에서는 낮은 Q 값으로 인해 발생하는 위상 잡음 특성의 저하를 보상하기 위하여 새로운 구조의 X-band 상호 결합 발진기를 제안하였다. 그 결과, 발진 주파수 9.3 GHz에서 각각 -106.7 dBc(@100 kHz offset frequency), -81 dBc(@10 kHz offset frequency)라는 매우 우수한 위상 잡음 특성을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제안된 구조는 기존의 논문들이 제안한 방법에 적용하여 회로의 소형화, 고집적화, 고성능화를 이루는데 기여할 수 있을 것이라 예상된다.

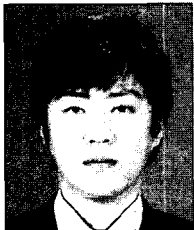
참 고 문 헌

[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.

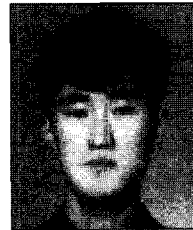
[2] Ulrich L. Robde, Ajay K. Poddar, and Georg Bock, *The Desing of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications*, WILEY-INTERSCIENCE, pp. 247-257.
 [3] Ulrich L. Robde, Ajay K. Poddar, and Georg Bock, *The Desing of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications*, WILEY-INTERSCIENCE, 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", 한국통신학회논문지, 27(5C), pp. 530-534, 2002년 5월.
 [5] Rajesh Mongia, Inder Bahl, and Prakash Bhartia, *RF and Microwave Coupled-line Circuits*, Artech House, pp. 244-247.

최 정 완



2005년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2005년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF, 마이크로파 회로 설계 및 응용

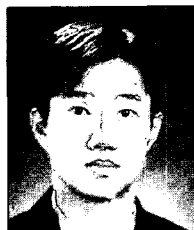
이 형 규



2000년 2월: 호원대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2002년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2002년 9월~현재: 광운대학교 전파공학과 박사과정
 [주 관심분야] RF, 마이크로파 회로

설계 및 응용

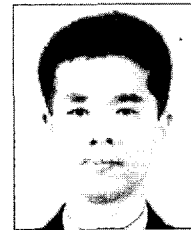
도 지 훈



2004년 2월: 한밭대학교 전자공학과 (공학사)
 2006년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2006년 2월~현재: 광운대학교 전파공학과 박사과정
 [주 관심분야] 초고주파 능동회로

(MMIC, Hybrid) 회로설계, SSPA, LPA

강 동 진

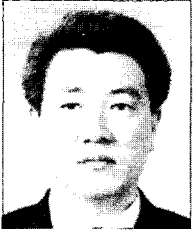


1993년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)
 2003년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2004년 2월~현재: 광운대학교 전파공학과 박사과정
 1993년 4월~1995년 6월: 정보통신

부 전파연구소

1996년 5월~2000년 7월: 강원이동통신
 2000년 8월~현재: 한국정보통신기술대학 교수
 [주 관심분야] 초고주파 능동회로(MMIC, Hybrid) 회로설계, RFID, 안테나

윤 호 석



1983년 2월: 광운대학교 전자통신 공학과 (공학사)
2004년 2월: 광운대학교 무선통신 공학과 (공학석사)
2004년 2월~현재: 광운대학교 전자공학과 박사과정
1983년 1월~1998년 10월: 삼성전자

1998년 10월~현재: 삼성SDS 상무
[주 관심분야] 초고주파 능동회로(MMIC, Hybrid) 회로설계, RFID, 안테나

홍 의 석



1968년 2월: 광운대학교 전자통신 공학과 (공학사)
1973년 9월 :연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1982년 11월 : 독일 Aachen 전자공학과 (공학박사)
1986년~1987년: 미국 Univ. of Texas

객원교수

2001년 1월~2001년 12월: 한국통신학회 회장
2002년 5월~2003년 12월: 한국 ITS학회 초대회장
1992년 2월~현재: 광운대학교 전파공학과 교수
[주 관심분야] 초고주파 능동회로(MMIC, Hybrid) 설계, 안테나

이 경 학



1992년 2월: 광운대학교 전자통신 공학과 (공학사)
1994년 2월: 광운대학교 전자통신 공학과 (공학석사)
2000년 3월~현재: 광운대학교 전자통신공학과 박사과정
1994년 4월~현재: 한국산업기술평

가원 선임연구원

[주 관심분야] RF Signal detecting, 통신신호처리