

X-대역에서 중간동기결합 발진기의 설계 및 제작에 관한 연구

김희곤*, 서경환*

A study on design and implementation of oscillator with intermediate synchronized coupling in the X-Band

Hee-gon Kim *, Kyung-Hwan Seo *

요 약

본 논문에서는 X-band용 두 개의 발진기를 사용하여 중간결합을 통한 위상잡음 특성을 개선할 목적으로 중간동기결합 구조의 발진기를 제안하였다. 제안된 구조는 각각의 발진기는 Hair-Pin을 이용한 발진기로 설계를 하였으며, 두 발진기가 중간결합을 위해 갖는 위상차는 발진기들의 바이어스를 이용하여 조절을 한다. 제안된 구조의 수치계산을 통한 설계, 하드웨어 구현 및 실험을 통해 측정된 결과를 제시하였으며, 측정 결과로 위상잡음 특성이 약 10dBc/Hz 개선됨을 보였다.

▶ Keyword : 발진기, 중간동기결합, 위상잡음, 브랜치-라인-커플러, Hair-Pin

1. 서 론

전현재 통신시스템에서는 높은 신뢰성을 가지는 정보 전송과 안정된 마이크로웨이브와 밀리미터 웨이브 신호 소스는 상업용이나 군사용의 분야에서 각각 요구되고 있다. 또한 각종 통신시스템 단말기 종류에 소형화가 진전됨에 따라 이들 단말기의 기준 주파수 발진용으로 사용되는 핵심 부품인 주요 RF 발진기의 수요가 크게 늘고 있다. 높은 신뢰성이 있는 정보전송을 위해 비트 오류율(bit error rate: BER)과 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)에 엄격한 규제를 주고 있으므로 안정된 발진기를 요구한다.

안정된 발진기는 전형적으로 매우 높은 Q 값의 공진기를 발진기에 사용하거나, 신호를 안정화 하기위해 높은 Q 값의 캐비티(cavity)를 통과한 발진기 출력신호를 보내고 잡음 성분을 제거한다. 발진기의 더욱 효과적인 Q 값은 발진기의 출력위상과 주파수의 흔들림이 없음을 의미하고, 그 때 발진기는 더욱 안정적이다. 발진기의 위상잡음(phase noise)을 Q 값과 밀접한 관계를 가지고 있으므로 통신시스템에 매우 중요한 변수이다. 그래서 위상잡음을 줄이고 발진기의 위상과 주파수를 안정화시키려는 많은 방법이 제시되어 왔다.

• 제1저자 : 김희곤

* 강남대학교 전자시스템공학부 전자공학전공

본 논문에서는 X-band용 두 개의 발진기를 사용하여 중간결합(intermediate coupling)을 통한 위상잡음 특성을 개선할 목적으로 새로운 구조를 제안하였다. 제안된 구조는 각각의 발진기는 Hair-Pin을 이용한 발진기로 설계를 하였으며, 두 발진기가 중간결합을 위해 갖는 위상차는 발진기들의 바이어스를 이용하여 조절을 한다. 제안된 구조의 수치계산을 통한 설계와 구현 및 실험을 통해 측정된 결과를 제시하고 고찰한다.

2. 결합 발진기 이론

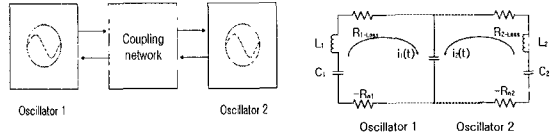
중간 결합 발진기의 일반적인 분석방법은 전형적으로 스프링으로 연결된 두 진자로 보여 질 수 있다. 처음에는 하나의 진자가 작은 진폭을 갖고 스윙하면서 또 다른 진자는 처음 진자로부터 스프링에 의해 에너지를 전달 받음에 따라 서서히 진폭이 증가하게 된다. 그리고 에너지는 처음 진자로 다시 전달되고 이러한 에너지 순환은 계속된다. 진자의 움직임에는 같은 방향 또는 반대 방향으로 진자들이 이동하는 두 가지 모드가 있다. 만약 진자들이 같은 방향으로 스윙한다면 고유 주파수로 동일하게 스윙할 것이고, 그들이 반대 방향으로 스윙한다면 진자들은 중간 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 2는 각각 발진기 구성도와 직렬 결합된 발진기 회로의 구성도이다. L1, C1 그리고 L2, C2는 직렬 발진기 1과 2의 L, C 공진회로 이다. R1-loss와 R2-loss는 공진기의 손실저항이다. 그리고 Rn1, Rn2는 능동소자의 부성저항 들이다. 가장 간단한 연결 네트워크는 두 개의 발진회로를 결합하는 Cc(중간에 위치, 그림 3)에 의해 구현될 수 있다. L과 C의 등가 값은 아래와 같이 주어진다.

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

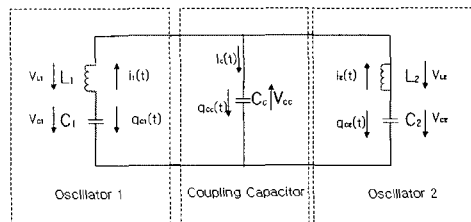
$$C=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2} \dots\dots\dots (2)$$

Cc의 무한대 값은 두 발진회로가 연결되지 않은 것을 의미한다. 발진기 1과 발진기 2는 그들의 자유 동작 주파수에서 발진하고, 능동소자의 부성저항은 발진기의 저항으로 인한 손실을 보상한다. 그림 2는 직렬 손실저항 없이 연결된 발진회로를 보여주는 그림 3으로 유도될 수 있다. 실제

구현에 있어서 중간 결합 강도(intermediate coupling strength)는 중간 결합된 발진기 시스템 분석에 매우 중요한 변수이다.



〈그림 1〉 발진기 구성도 〈그림 2〉 직렬 결합된 발진기 구성도



〈그림 3〉 직렬 손실저항 없이 연결된 발진회로 구성도

그림 3의 회로 방정식은 키르히호프의 전압법칙으로 표현 될 수 있다. 이상적인 발진기의 경우 (L=L1=L2 그리고 L=C1=C2)라고 가정하면, 식 (3) 및 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 ω_{av} 는 두 각주파수의 평균 각 주파수이며, ω_{diff} 는 두 각주파수의 차이를 의미하며, K1 및 K2는 상수이다.

$$q_{a1}(t) = \exp[j\omega_{av}t](K_1 \exp[j\omega_{diff}t] + K_2 \exp[-j\omega_{diff}t]) \dots\dots\dots (3)$$

$$q_{a2}(t) = \exp[j\omega_{av}t](K_1 \exp[j\omega_{diff}t] - K_2 \exp[-j\omega_{diff}t]) \dots\dots\dots (4)$$

3. 설계 및 제작

1) Hair-pin 공진기를 이용한 발진기 설계

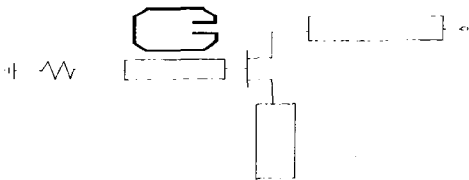
발진기 설계를 위해 Agent사의 ADS ver.2004를 이용하였다. 선 계산을 통해 마이크로 스트립 선로의 특성 임피던스에 해당하는 폭과 파장을 구하였으며, 공진부는 Hair-pin 구조로 주파수 9.3 GHz에 맞추도록 설계 하였다. 능동소자로는 저잡음 기술을 갖고 위상잡음을 최소화할 수 있으며, 부성저항을 쉽게 얻을 수 있는 소자인 GaAs

MESFET인 Agent사의 ATF-13786을 이용하였다. 기판은 $\epsilon_r = 2.6$, $H = 0.504\text{mm}$, $T = 0.018\text{mm}$ 인 테프론 기판을 사용하였다. 초고주파 영역의 발진기를 설계시 가장 우선 고려되는 것은 사용하고자하는 주파수 대역에 알맞은 능동소자의 선택이 필요하다.

주로 2~4GHz 이하에서는 Si BJT가 사용되지만 30GHz 이하에서는 소자의 동작특성과 잡음특성이 좋은 MESFET이나 HEMT 또는 HBT를 선택하여 사용한다. 발진기 형태는 회로구성이 간단하고 부하변동에 따른 주파수 변화와 출력 변화가 작은 그림 4와 같은 소스 직렬 케환형으로 구성하였다. 이 때 마이크로스트립 선에 결합한 Hair-pin 공진기는 대역 저지 필터 특성을 갖게 되고, 초기 발진 조건은 다음의 식이다.

$$R_d[Z_{ad}] < 0 \dots\dots\dots(5)$$

$$I_m[Z_{ad}] = -I_m[Z_L] \dots\dots\dots(6)$$



〈그림 4〉 소스 직렬 케환형 구성도

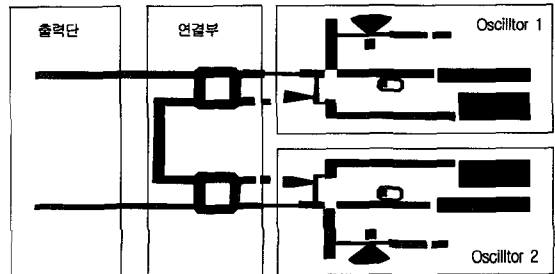
식 (5)에서 실수부는 부성저항 값을 나타내며 허수부는 0을 나타낸다. 위상조건과 부성저항 발생조건은 각 소자 주변의 선(line)의 길이를 조절하여 발생조건을 만족시킬 수 있다. 그림 4의 Hair-pin 공진기에서 결합이 잘 일어나도록 게이트의 선 길이를 조절하였으며, FET의 게이트 단을 바라본 반사계수가 최대가 되도록 소스의 선 길이를 최적화하고 공진부의 결합 선로 게이트의 선 길이를 조절함으로써 발진주파수를 쉽게 조절할 수 있도록 설계하였다.

2) Branch Line Coupler 와 대역통과 필터 설계

두 발진기의 주입(injection)을 위해서 전력 합성기는 널리 사용되고 있는 Branch Line Coupler를 사용하였고, 2차 고조파를 억압하고 기본 주파수 성분을 통과시킨 일종의 대역통과 필터의 역할을 하기위해 DC Block을 9.35 GHz의 맞추어 설계하였다.

3) 중간결합 구조 발진기의 설계 및 제작

중간결합 구조의 발진기는 두 개의 발진기를 결합하였고, 결합 구조는 Branch Line Coupler를 이용하여 양방향 결합 구조를 갖는 결합 구조 발진기를 설계하였다. 여기서 Branch Line Coupler는 마이크로스트립 선 공진부로 사용되며, 두 발진기의 출력을 1/2 파장으로 위상차를 일으켜야 한다. 두 개의 발진기는 서로 같은 설계를 지니며 Branch Line Coupler로 결합하는 순간, 이들의 발진 조건이 변화하기 때문에 위상차를 조정하는 방법으로 가장 간단하게 사용할 수 있는 발진기의 바이어스를 조정하였다. 그림 5는 발진기의 중간결합구조를 보여준다.



〈그림 5〉 발진기의 중간 결합구조

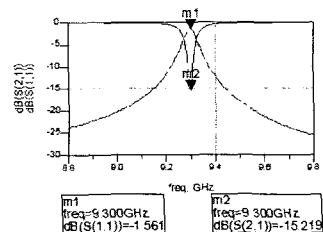
그림 5와 같이 설계된 최적화시킨 제한된 중간결합 발진기를 사진 부식 방법에 의하여 비유전율 2.6, 유전체 두께 0.504 mm인 테프론 기판 위에 제작하였다.

4. Simulation & Test Result

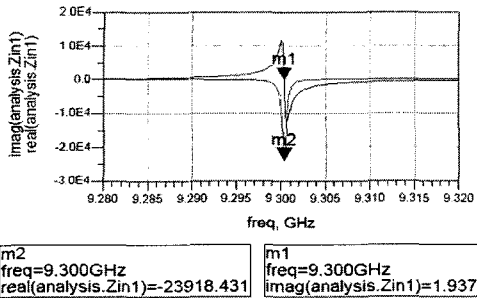
1) 수치계산 결과

가. Hair-pin Resonator

설계된 Hair-Pin 공진기 공진기의 발진 조건의 전기적 특성은 그림 6 및 7에 나타내었다.



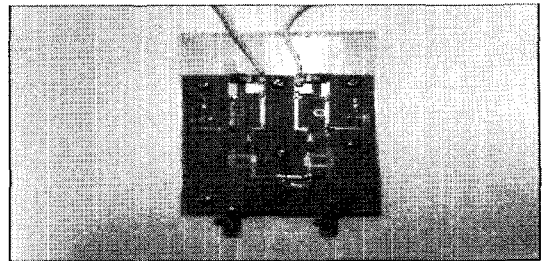
〈그림 6〉 Hair-Pin Resonator



〈그림 7〉 Hair-Pin Resonator 발진 조건

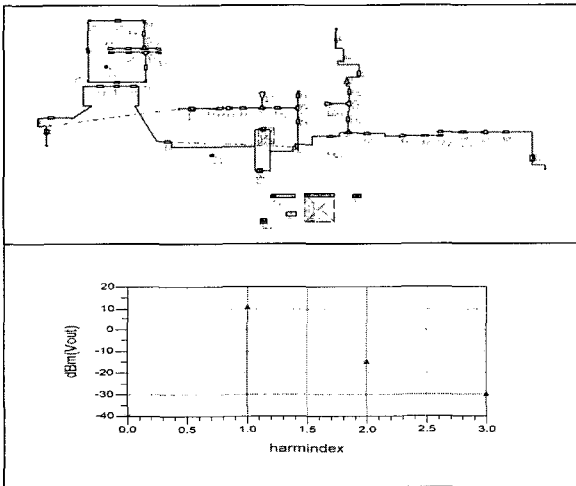
2) 실험 결과 및 고찰

구현된 발진기의 실물 사진을 그림 10에 나타내었으며, 그림 11은 회로의 도식적인 구성도이다.

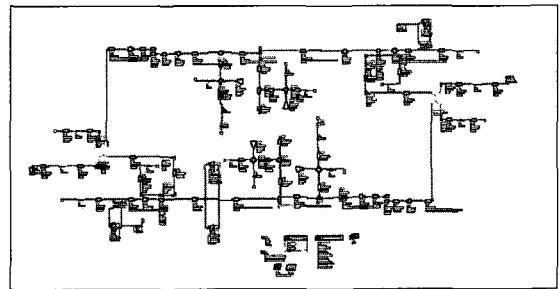


〈그림 10〉 제작된 실물사진

나. single oscillator 회로 설계 및 설계 결과



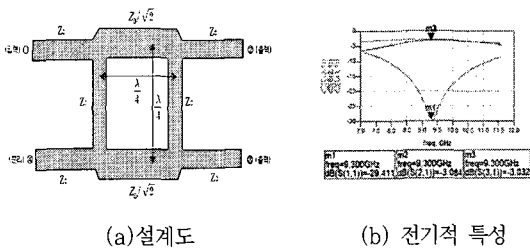
〈그림 8〉 단일 발진기의 회로 설계 및 특성



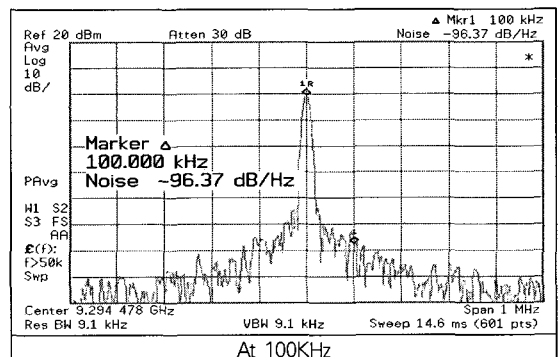
〈그림 11〉 구현된 발진기의 회로도 (schematic diagram)

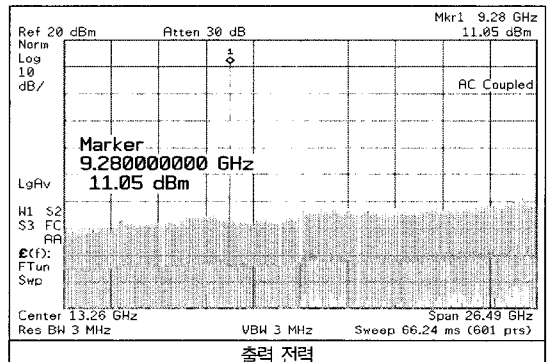
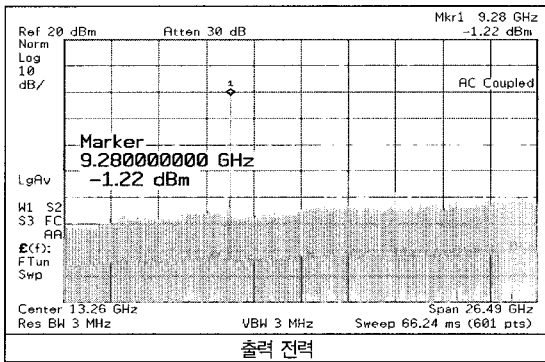
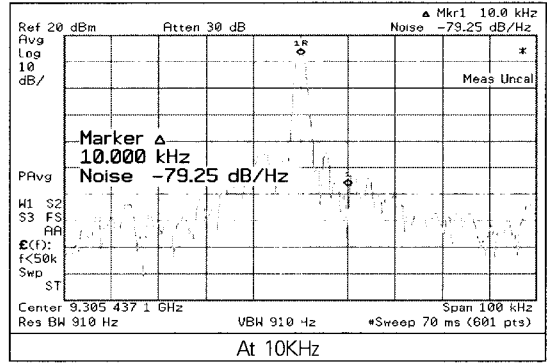
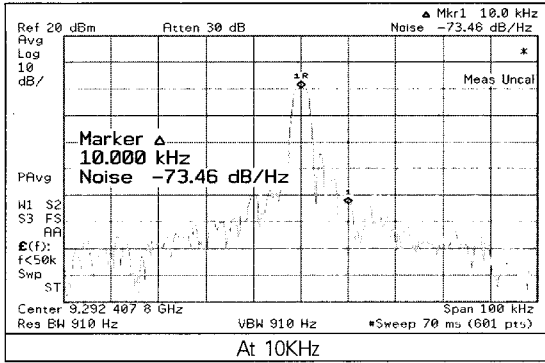
그림 12는 4.3V 37mA의 바이어스 상태에서 발진기 1을 동작시키고 출력단 2에서 측정된 결과, 발진 주파수 9.3GHz에서 각각 -96.37dBc/Hz (@100kHz), -73.46 dBc/Hz (@10kHz)의 특성을 얻을 수 있었으며, 이때 출력 전력은 -1.22dBm을 보인다.

다. Branch Line Coupler 설계 및 설계 결과



〈그림 9〉 Branch Line Coupler 설계 및 특성



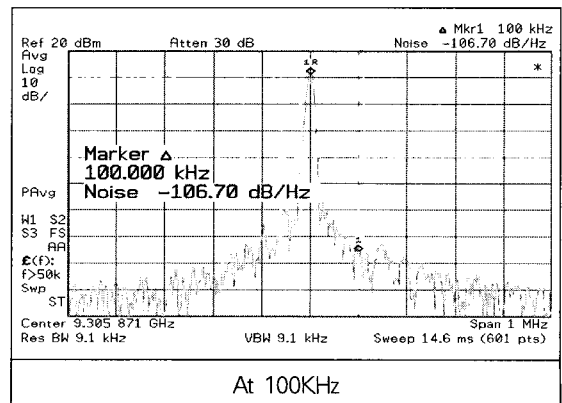
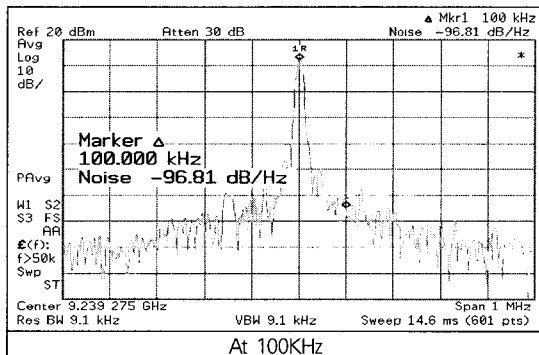


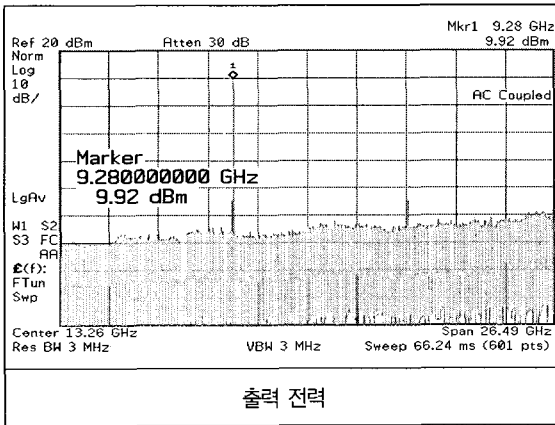
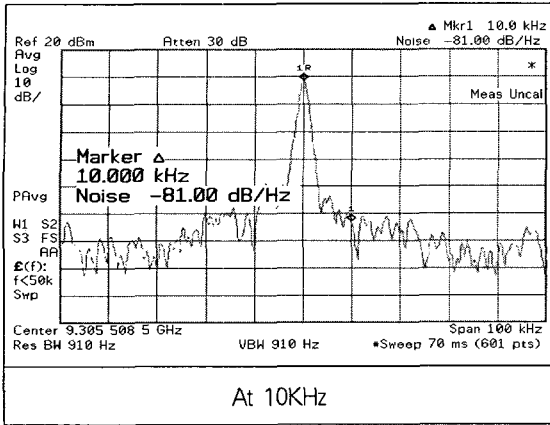
〈그림 12〉 주파수 편이에 따른 위상잡음 및 출력

〈그림 13〉 주파수 편이에 따른 위상잡음 및 출력

그림 13은 8.1V 69mA의 바이어스 상태에서 발진기 2을 동작시키고 출력단 2에서 측정된 결과, 발진 주파수 9.3GHz 에서 각각 -96.81dBc/Hz (@100kHz), -79.25 dBc/Hz (@10kHz)의 특성을 얻을 수 있었으며, 이때 출력 전력은 11.05dBm을 보인다.

그림 14에서는 4.3V 37mA, 8.1V 69mA의 바이어스 상태에서 발진기 1과 2를 동시에 동작시키고, 출력단 2에서 측정된 결과, 발진 주파수 9.3GHz에서 각각 -106.7dBc/Hz (@100kHz), -81 dBc/Hz (@10kHz)의 특성을 얻을 수 있었 으며, 이때의 출력 전력은 9.92dBm을 나타내었다.





〈그림 14〉 주파수 편이에 따른 위상잡음 및 출력

5. 결 론

본 논문에서는 낮은 Q값으로 인해 발생하는 위상잡음 특성의 저하를 보상하기 위하여 새로운 구조의 X-band 중간결합 발진기를 제안하였으며, 수치 계산을 통한 설계 및 전기적 특성과 구현 및 실험을 통해 결과를 제시하고 고찰하였다.

구현된 발진기의 측정 결과로는 발진주파수 9.3GHz에서 각각 $-106.7 \text{ dBc/Hz} (@100\text{kHz offset frequency})$, $-81 \text{ dBc/Hz} (@10\text{kHz})$ 라는 매우 우수한 위상잡음 특성을 얻을 수 있었다. 회로 제작 측면에서는 대칭구조를 취하고 있어 제작이 용이하며, 또한 특별한 조정 없이 동작 점의 변화를 통해 발진 주파수를 미세 조정할 수 있다는 이점도 갖고 있다.

본 논문에서 제안된 구조는 기존의 논문들이 제안한 방법에 적용하여 회로의 소형화, 고직접화, 고성능화를 이루는데 기여할 수 있을 것이라 예상된다. 제안된 방법은 유전체 공진기에 비해 낮은 Q 값을 갖지만 평면구조를 취하고 있어 유전체 공진기의 단점을 극복할 수 있다. 즉, 유전체 공진기는 Q 값이 우수하나 3차원 구조를 가지고 있어 회로의 소형화뿐만 아니라 다른 회로들과의 집적에 어려움이 있다.

향후 연구로는 논문에서 제안한 두 개의 발진기를 이용한 양방향성 중간결합 발진기를 N개의 포트를 가진 네트워크로 결합된 N개의 다 방향성 중간결합 발진기로 확장하는 것이 남은 과제이다.

참고문헌

- [1] H.-C. Chang, X. Cao, U. K. Mishra, and R. A. York(1997), "Phase noise in coupled oscillators: Theory and experiment," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, pp. 604-615, May.
- [2] H.-C. Chang, X. Cao, M. J. Vaughan, U. K. Mishra, and R. A. York(1997), "Phase noise in externally injection-locked oscillator arrays," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, pp.2035-2042, Nov.
- [3] H.-C. Chang(1998), "Noise and stability analysis in coupled oscillators," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng., Univ. California at Santa Barbara, Santa Barbara, CA.
- [4] Ulrich L. Rohde, Ajay K. Poddar, and Georg Bock, "The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications," WILEY-INTERSCIENCE.
- [5] Rajesh Mongia, Inder Bahl, and Prakash Bhartia, "RF AND MICROWAVE COUPLED-LINE CIRCUITS," Artech House.
- [6] David M. Pozar "MICROWAVE ENGINEERING SECOND EDITION" WILEY-INTERSCIENCE.
- [7] Eric Holzman "Solid-State Microwave Power Oscillator Design," Artech House.