

Microstrip Square Open Loop Resonator를 이용한 저위상 잡음 발진기에 관한 연구

Research on Low Phase Noise Oscillator Using Microstrip Square Open Loop Resonator

박 은 영 · 서 철 현

Eun-Young Park · Chulhun Seo

요 약

본 논문에서는 발진기의 위상 잡음 특성을 개선시키기 위하여 개방형 루프 구조를 공진기에 적용하였다. 개방형 루프 공진기는 크기 면에서 훨씬 소형화될 뿐만 아니라 협대역과 예리한 선택도를 갖기 때문에 이러한 특성을 이용하여 저 위상 잡음 발진기에 대한 연구를 수행하였다. 개방형 루프 구조를 이용한 공진기는 결합 계수를 증가시켜 Q 값을 높여 주어 결과적으로 발진기의 위상 잡음 특성을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서 제안된 발진기는 5.84 GHz에서 발진이 일어났으며, 출력은 -0.5 dBm, 하모닉 특성은 -15.83 dBc, 위상 잡음 특성은 100 kHz offset에서 -111.17 dBc/Hz이었다. 이를 통하여 개방형 루프공진기 구조를 이용한 발진기는 기존의 공진기를 이용한 발진기에 비해 100 kHz offset에서 15 dB 개선을 보였다.

Abstract

This paper has presented a low phase noise oscillator using a square open loop with microstrip structure. A square open loop resonator has a large coupling coefficient value, which makes a high Q value, and has reduced phase noise. This oscillator has presented the oscillation frequency of 5.84 GHz, harmonics of -15.83 dBc and the phase noise of -111.17 dBc/Hz at the offset frequency of 100 kHz. In conclusion, the proposal structure has improved phase noise of 15 dB at the offset frequency of 100 kHz compared with the conventional structure of oscillator.

Key words : Square Open Loop, Phase Noise, Oscillator, Resonator

I. 서 론

최근 무선 통신 시스템은 이동 통신 및 무선 네트워크에 대한 급격한 수요로 크게 발전하고 있으며 더 많은 정보를 제공하기 위하여 광대역, 초고주파의 추세로 나아가고 있다. 이에 따라 RF 시스템에서 주파수원을 제공하는 발진기는 없어서는 안 되는 핵심 부품 중의 하나이기 때문에 중요성은 더욱 커지고 있으며, 발진기의 성능 개선을 위하여 다양한 방

면의 연구가 진행되어지고 있다.

발진기의 대표적인 특성에는 출력 특성, 하모닉 특성, 위상 잡음 특성 등이 있다. 특히 발진기의 위상 잡음 특성은 전송 시스템에서 전체적인 성능을 좌우하기 때문에 위상 잡음 특성의 개선이 중요한 부분을 차지한다.

마이크로스트립을 이용한 필터는 제작과 내장이 용이하여 여러 가지 형태에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 반파장의 길이를 가지는 개방형 루

「본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.」

숭실대학교 정보통신공학부(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

· 논문 번호 : 20051019-117

· 수정완료일자 : 2006년 1월 12일

프 공진기를 이용한 필터는 다른 형태에 비하여 작은 면적을 차지하며, 이를 더 작게 구현하기 위한 여러 가지 연구가 진행되고 있다. 개방형 루프 공진기는 크기 면에서 훨씬 소형화될 뿐만 아니라 협대역과 예리한 선택도를 갖는 특성이 있다. 결합 계수를 증가시켜 Q 값을 높임으로써 선택도가 좋아지기 때문에 필터로 많이 이용되어 왔다^{[1]~[6]}.

본 논문에서는 마이크로스트립 개방형 루프 공진기 구조를 이용하여 발진기의 위상 잡음 특성을 개선하는 연구를 수행하였다. 개방형 루프 공진기는 예리한 선택도를 갖기 때문에 이러한 특성을 이용하여 저위상 잡음 발진기에 대한 연구를 수행하였다. 개방형 루프 구조를 이용한 공진기는 사각형에 근접한 모양으로 한 쪽 부분이 개방되어 있는 루프 형태이며, 그 사이에서 발생하는 결합 계수를 증가시켜 Q 값을 높여 주고, Q 값이 높아지면 발진기의 위상 잡음 특성을 개선할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 마이크로스트립 개방형 루프 공진기를 이용한 발진기의 구조를 설계 및 제작하여 측정과 분석을 통하여 위상 잡음의 개선을 보였다.

II. 본 론

2-1 개방형 루프 공진기

개방형 루프 공진기는 그림 1과 같이 전계 결합, 자계 결합, 혼합 결합이라는 세 가지 형태의 결합이 존재한다. 그림 1(a)와 같은 경우에는 개방단 부근에서 전계의 결합율이 크고, 그림 1(b)에서는 두 개의 결합 선로가 있으면 자계의 결합이 크게 된다. 그림 1(c)의 경우는 결합면에서 전계와 자계의 결합이

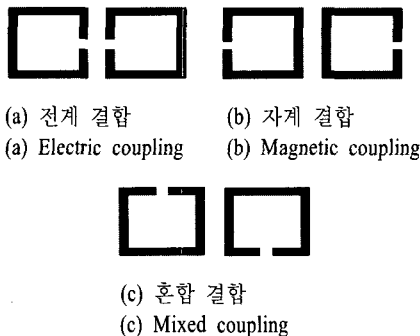


그림 1. 결합 구조
Fig. 1. Combination structure.

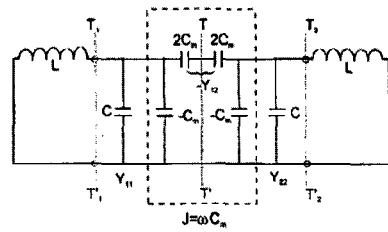


그림 2. 전계 결합에 대한 등가 회로
Fig. 2. Equivalent circuit of E-field combination.

발생되어 혼합 결합이라고 한다. 이러한 결합 형태에 대하여 각각 살펴본다^{[5],[6]}.

2-1-1 전계 결합

개방형 루프 공진기의 전계 결합 형태를 Lumped 소자로 등가 모델링하면 그림 2와 같다.

$$f_e = 1/2\pi\sqrt{L(C+C_m)} \quad (1)$$

$$f_m = 1/2\pi\sqrt{L(C-C_m)} \quad (2)$$

개방형 루프 공진기의 전계 결합에서 두 개의 공진 주파수(f_e, f_m)는 위와 같으며, f_e 와 f_m 은 각각 전계 결합과 자계 결합에 의한 공진 주파수를 의미한다. 그림 2의 대칭면(symmetric plane) T-T'를 전계벽(또는 단락 회로)으로 대체된다면 회로의 공진 주파수는 f_e 이며, 이와 유사하게 T-T'를 자계벽(또는 개방 회로)으로 대체하면 공진 주파수는 f_m 이다. 식 (1), (2)로부터 결합 계수(k_E)를 구하면 다음과 같다.

$$k_E = \frac{f_m^2 - f_e^2}{f_m^2 + f_e^2} = \frac{C_m}{C} \quad (3)$$

C 와 L , 그리고 C_m 은 각각 자기 커패시턴스, 자기 인덕턴스, 상호 커패시턴스를 나타낸다. 결합 계수는 상호 커패시턴스와 자기 커패시턴스에 의해 영향을 받으며, 상호 커패시턴스가 자기 커패시턴스보다 커질수록 결합 계수는 증가한다.

2-1-2 자계 결합

개방형 루프 공진기의 자계 결합 형태를 Lumped 소자로 등가 모델링하면 그림 3과 같다.

$$f_e = 1/2\pi\sqrt{(L-L_m)C} \quad (4)$$

$$f_m = 1/2\pi\sqrt{(L+L_m)C} \quad (5)$$

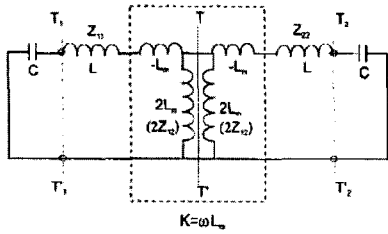


그림 3. 자계 결합에 대한 등가 회로
Fig. 3. Equivalent circuit of H-field combination.

개방형 루프 공진기의 자계 결합에서 두 개의 공진 주파수(f_e, f_m)는 위와 같으며, 식 (4), (5)로부터 결합 계수(k_M)를 구하면 다음과 같다.

$$k_M = \frac{f_e^2 - f_m^2}{f_e^2 + f_m^2} = \frac{L_m}{L} \quad (6)$$

C와 L, 그리고 L_m 은 각각 자기 커패시턴스, 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스를 나타낸다. 자계 결합에서의 결합 계수는 커패시턴스의 영향을 받는 전계결합과 다르게 상호 인덕턴스와 자기 인덕턴스에 의해 영향을 받으며, 상호 인덕턴스가 자기 인덕턴스보다 커질수록 결합 계수는 증가한다.

2-1-3 혼합 결합

개방형 루프 공진기의 혼합 결합 형태를 Lumped 소자로 등가 모델링하면 그림 4와 같다.

$$f_e = 1/2\pi\sqrt{(L-L'_m)(C-C'_m)} \quad (7)$$

$$f_m = 1/2\pi\sqrt{(L+L'_m)(C+C'_m)} \quad (8)$$

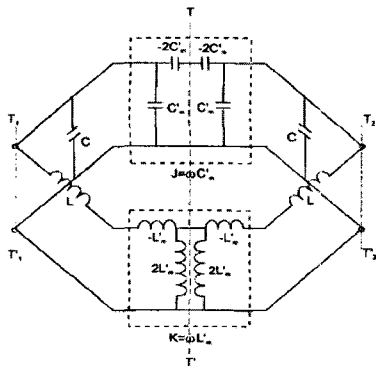


그림 4. 혼합 결합에 대한 등가 회로
Fig. 4. Equivalent circuit of mixed combination.

개방형 루프 공진기의 혼합 결합에서 두 개의 공진 주파수(f_e, f_m)는 위와 같으며, 식 (7), (8)로부터 결합 계수(k_B)를 구하면 다음의 수식과 같이 주어진다. 이 때, C, L, L'_m 그리고 C'_m 은 각각 자기 커패시턴스, 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스, 그리고 상호 커패시턴스를 나타낸다.

$$k_B = \frac{f_e^2 - f_m^2}{f_e^2 + f_m^2} = \frac{CL'_m + LC'_m}{LC + L'_m C'_m} \quad (9)$$

식 (9)에서 $L'_m C'_m \ll LC$ 이므로, 다음과 같은 수식이 된다.

$$k_B \approx \frac{L'_m}{L} + \frac{C'_m}{C} = k'_M + k'_E \quad (10)$$

식 (10)에서 구한 혼합 결합의 결합 계수는 전계와 자계의 합으로 표현되는 것을 알 수 있다.

$$Q = w \frac{\text{average energy stored}}{\text{energy loss/second}} \quad (11)$$

대역폭의 Q값은 공진기에서 위와 같은 수식으로 표현될 수 있다. 즉, 저장되는 에너지와 손실되는 에너지의 비에 주파수 개념을 적용한 수식이라고 볼 수 있다.

개방형 공진기에서 각 라인이 인접해 있으면서 발생하는 상호 커패시턴스와 상호 인덕턴스가 커지면 결합계수가 커질 수 있다. 또한, 커패시턴스와 인덕턴스는 에너지를 저장할 수 있기 때문에 식 (11)에서의 분모가 커지게 되면서 Q값도 역시 커진다고 볼 수 있다. Q값이 커질수록 파형이 예리해지기 때문에 발전기의 성능을 나타내는 지표인 위상 잡음의 특성을 개선할 수 있다.

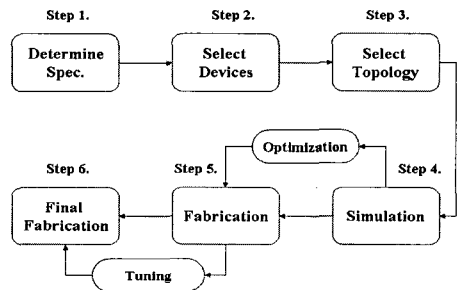


그림 5. 설계 과정
Fig. 5. Process of design.

2-2 개방형 루프 공진기를 이용한 발진기

본 장에서는 개방형 루프 구조를 이용한 발진기를 설계 및 제작하여 측정과 분석을 해보았다. 발진기에 사용한 트랜지스터는 NEC사의 NE661M04이고, 발진기의 설계는 HP사의 Advanced Design System(ADS) simulation tool을 사용하였으며 발진 주파수는 5.84 GHz 대역에서 발진하도록 설계하였다.

공진부는 5.84 GHz 대역에서 공진이 일어날 수 있도록 설계하였다. 개방형 루프 공진기는 개방되는 단에서 전압이 최대가 되기 때문에 개방되는 단의 부근에서 전계 결합(electric coupling)이 일어나고, 전류는 공진기의 중심에서 최대가 되기 때문에 중심 부분에서 자계 결합(Magnetic coupling)이 주로 발생한다. 이러한 특성을 이용하여 결합계수를 증가시킬 수 있도록 그림 6처럼 전계 결합과 자계 결합을 복합적으로 이용한 형태를 적용하였다. 5.84 GHz에서 발진이 일어날 수 있도록 개방형 공진기의 개방단 사이의 간격과 라인 길이를 조절하여 시뮬레이션을 이

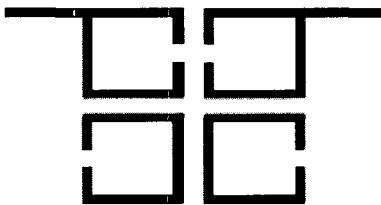


그림 6. 공진부 구조
Fig. 6. Structure of resonator.

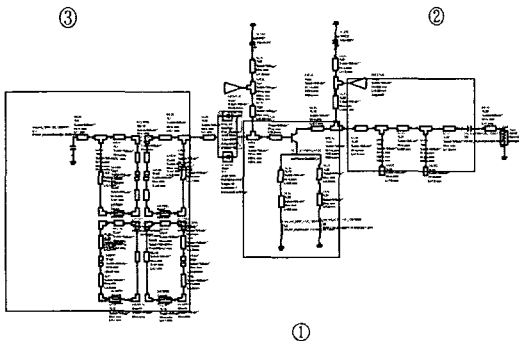


그림 7. 발진기의 회로도
Fig. 7. Schematic of oscillator.

용해 최적화시켰다.

발진기는 BJT에 인덕터와 마이크로스트립라인을 이용하여 부정 저항을 발생시켰고(그림 7 ①), 발진 조건에 맞게 출력 정합 회로를 설계하였으며(그림 7 ②) 최종적으로 개방형 루프 구조로 설계한 공진부(그림 7 ③)와 연결하여 발진을 일으켰다.

설계한 발진기는 5.84 GHz에서 발진이 일어났으며, 출력 특성은 -0.132 dBm이고, 하모닉 특성은 약 -15.496 dBc를 나타냈고, 위상 잡음 특성은 100 kHz offset에서 -117.4 dBc/Hz를 나타내었다.

발진기의 위상 잡음 특성을 비교 분석하기 위해 그림 10과 같이 마이크로스트립 라인을 이용하여 공진부를 구성한 일반적인 5.84 GHz 발진기를 설계하였다. 이때, 발진기의 위상 잡음 특성이 100 kHz offset에서 -101.7 dBc/Hz이었다. 따라서 시뮬레이션을

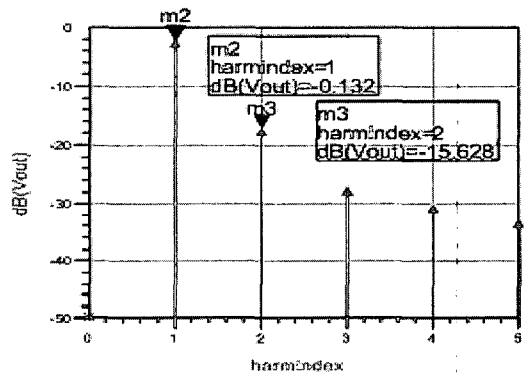


그림 8. 발진기의 하모닉 특성
Fig. 8. Oscillator of harmonic characteristic.

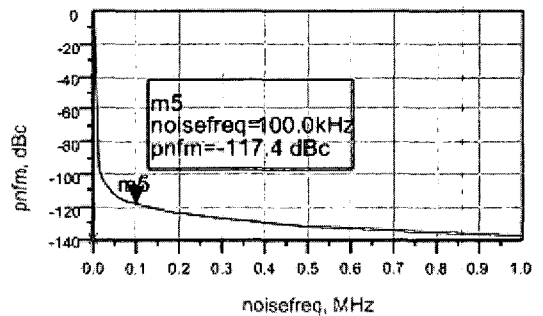


그림 9. 개방형 루프 공진기를 이용한 발진기의 위상 잡음 특성
Fig. 9. Oscillator of phase noise characteristic by open loop resonator.

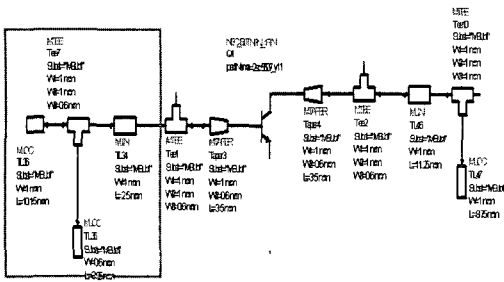


그림 10. 일반적인 발진기
Fig. 10. Conventional oscillator.

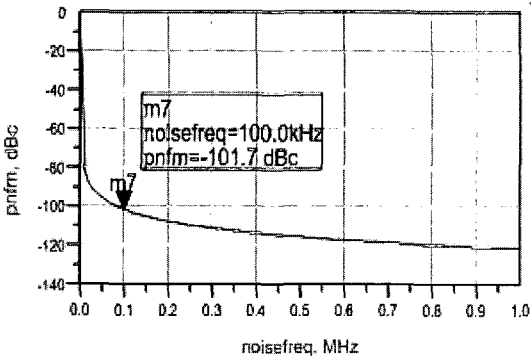


그림 11. 일반적인 발진기의 위상 잡음 특성
Fig. 11. Phase noise characteristic of conventional oscillator.

이용하여 개방형 루프 공진기를 가진 발진기를 설계하여 위상 잡음 특성을 비교해 보면 기존의 발진기보다 위상 잡음 특성이 100 kHz offset에서 -15.7 dBc/Hz 개선되었음을 알 수 있었다.

그림 12는 설계한 발진기를 기본으로 하여 실제 제작한 결과물을 나타낸다. 제작한 발진기는 5.84



그림 12. 제작한 결과물
Fig. 12. Fabrication.

GHz에서 발진이 일어났으며, 출력 특성은 -0.5 dBm이었고, 하모닉 특성은 약 -15.83 dBc를 나타냈으며 위상 잡음 특성은 100 kHz offset에서 -111.17 dBc/Hz를 나타내었다.

그림 15와 그림 16(b)는 각각 마이크로스트립 라인을 이용한 기존의 발진기와 hairpin과 aperture를 적용한 발진기의 위상 잡음 특성을 보여준다. 개방형 루프 구조를 이용한 발진기와 측정 결과를 비교해보면 일반적인 발진기는 위상 잡음 특성이 100 kHz offset에서 -96.17 dBc/Hz이며, hairpin과 aperture를 적용한 발진기는 100 kHz offset에서 -104.83 dBc/Hz이다. 반면에 개방형 루프 공진기를 이용한 발진기의 경우 100 kHz offset에서 -111.17 dBc/Hz이었다.

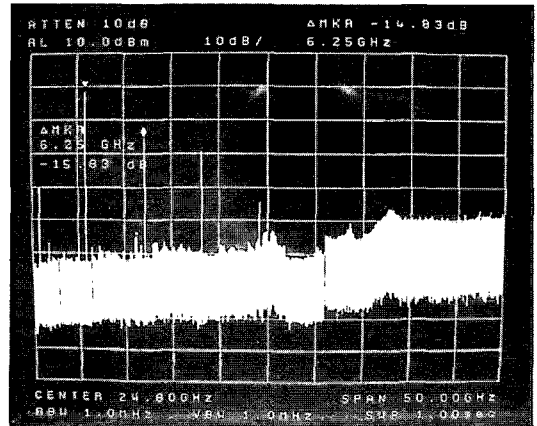


그림 13. 하모닉 특성
Fig. 13. Harmonic characteristic.

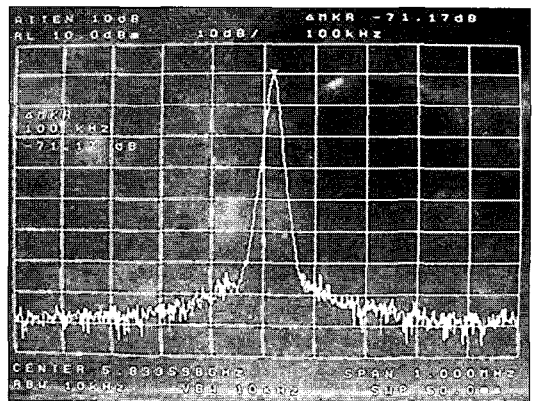


그림 14. 개방형 루프 공진기의 위상 잡음 특성
Fig. 14. Phase noise characteristic of open loop resonator.

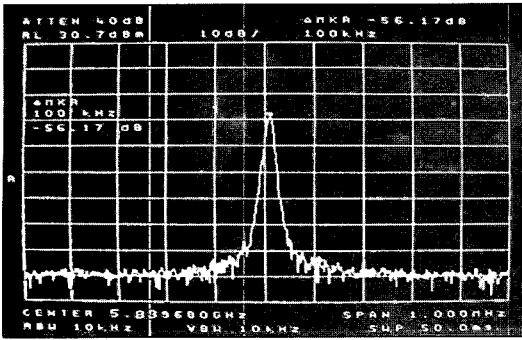
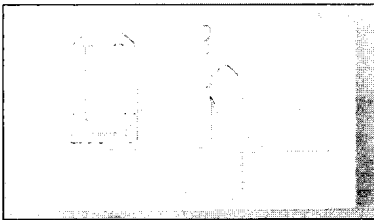
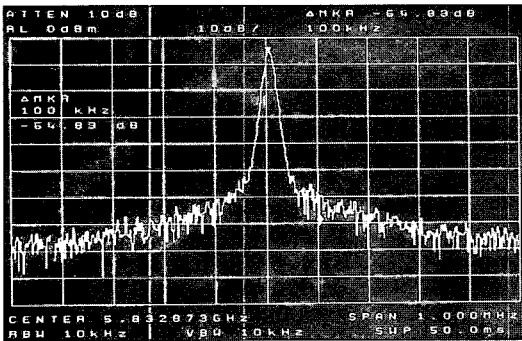


그림 15. 일반적인 발진기의 위상 잡음 특성
Fig. 15. Phase noise characteristic of conventional oscillator.



(a)



(b)

그림 16. (a) Hairpin과 Aperture를 적용한 발진기, (b) 위상 잡음 특성

Fig. 16. (a) Oscillator by hairpin and aperture, (b) phase noise characteristic.

그림 16(a)는 hairpin과 aperture를 적용한 5.84 GHz 대역의 발진기를 나타낸다. 공진부에 hairpin과 aperture를 적용하여 마이크로스트립 라인을 이용한 일반적인 발진기보다 8.66 dB의 위상 잡음 향상을 보여준다. 그러나 제안한 발진기의 위상 잡음 특성은 일반적인 발진기보다 15 dB 향상이 되었고, hairpin과 aperture를 적용한 발진기보다 6.34 dB의 향상된

표 1. 발진기의 위상 잡음 특성 비교

Table 1. Comparison of OSC's phase noise characteristic.

Oscillation Frequency 5.84 GHz	Phase noise (dBc/Hz @ 100 kHz)
기존 구조 (Using microstrip line)	-96.17
Hairpin과 aperture를 적용한 구조	-104.83
제안된 구조	-111.17

결과를 보여준다. 따라서 제안된 구조를 사용하면 기존의 발진기뿐만 아니라 hairpin과 aperture를 적용한 발진기보다 향상된 위상 잡음 특성을 가질 수 있었다.

제안한 발진기의 측정치와 시뮬레이션 툴을 이용해 설계한 것을 비교해 보면, 제작한 것의 위상 잡음 특성이 약간 좋지 않은 것을 알 수 있었다. 이것은 시뮬레이션 툴은 이상적인 상태를 가정으로 설계된 결과이지만, 실제 제작하는 과정에서 사용한 소자들의 오차 등 여러 가지 요인이 작용하여 손실이 발생할 수 있기 때문이다. 그러나 이러한 요소를 고려하여도 제안된 구조를 사용하면 기존의 발진기 및 위상 잡음을 개선시키기 위해 hairpin과 aperture를 적용한 발진기보다 향상된 위상 잡음 특성을 가질 수 있었다. 개방형 루프 구조를 이용하면 발진기의 위상 잡음 특성을 크게 개선시킬 수 있지만 크기 면에서 면적 차이가 많아질 수 있다. 이를 소형화하기 위한 연구가 필요할 것이다.

III. 결 론

본 논문은 발진기의 성능을 좌우하는 위상 잡음 특성을 개선하기 위해 기존의 공진기 형태와는 다르게 공진부에 개방형 루프 형태를 적용하였다. 제안된 발진기는 5.84 GHz에서 발진을 일으켰으며, 하모닉 특성은 -15.83 dB를 나타냈고, 위상 잡음 특성은 100 kHz offset에서 -111.17 dBc/Hz를 나타내었다. 이를 통해 제안된 발진기가 기존의 발진기 위상 잡음 특성보다 100 kHz offset에서 15 dB의 성능 개선이 되고, hairpin과 aperture를 적용한 발진기보다 6.34 dB의 향상된 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

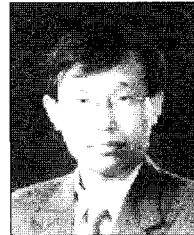
- [1] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Theory and experiment of novel microstrip slowwave open-loop resonator filters", *IEEE Trans. MTT*, vol. 45, no. 12, pp. 2358-2365, Dec. 1997.
- [2] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Microstrip slow-wave open-loop resonator filters", *IEEE Trans. MTT-S Digest*, 1997.
- [3] C. C. YU, K. Chang, "Novel compact elliptic-function narrow-band bandpass filters using microstrip square open-loop resonators with coupled and crossing lines", *IEEE Trans. MTT*, vol. 46, no. 7, pp. 952-958, Jul. 1998.
- [4] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Compact microwave elliptic function filter using novel microstrip meander open-loop resonators", *Electronics Letters*, vol. 32, pp. 563-564, Mar. 1996.
- [5] Serksoon Im, Chulhun Seo, Jachoon Kim, Youngwan Kim, and Naesoo Kim, "Improvement of microstrip open loop resonator filter using aperture", *IEEE MTT-S International*, vol. 3, pp. 1801-1804, Jun. 2002.
- [6] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Coupling of microstrip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters", *IEEE Trans. MTT*, vol. 44, no. 12, pp. 2099-2109, Nov. 1996.

박 은 영



2004년 2월: 숭실대학교 정보전자공학과 (공학사)
 2004년 3월~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로설계, Microwave 비선형회로, RF power Amplifier 등

서 철 현



1983년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 3월: 서울대학원 전자공학과 (공학석사)
 1993년 3월: 서울대학원 전자공학과 (공학박사)
 1993년 3월~1995년 2월: MIT 연구원
 1993년 9월~1997년 8월: 숭실대학교 정보통신공학과 조교수
 1999년 8월~2001년 1월: MIT 방문교수
 1997년 9월~2004 8월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수
 2004년 9월~현재: 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수
 [주 관심분야] 이동 및 위성통신 Microwave 부품 및 시스템, PBG를 이용한 RF 부품, CMOS RFIC, RFID