

메타 구조 Broadside Coupled 나선형 공진기를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기

Low Phase Noise VCO Using the Metamaterial Broadside Coupled Spiral Resonator

한 경 남 · 서 철 헌

Kyoungnam Han · Chulhun Seo

요 약

본 논문에서는 메타 구조 Broadside Coupled 나선형 공진기(BC-DSRs)를 이용하여 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 줄이기 위한 새로운 구조를 제안하였다. 이러한 특성 실현을 위하여 연속된 나선형 구조를 신호 면과 그라운드 면에 각각 적용하였다. 일반적인 전압 제어 발진기와 비교하였을 때, 본 논문에서 제안한 VCO는 더 큰 결합 계수를 가지며, 이로 인하여 얻을 수 있는 더 높은 Q값을 통하여 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄일 수 있다. 1.8 V의 공급 전력을 갖는 전압 제어 발진기는 주파수 조절 범위, 5.749~5.853 GHz에서 -121~-117.16 dBc/Hz @ 100 kHz의 위상 잡음 특성을 갖는다. 또한 전압 제어 발진기의 Figure Of Merit(FOM)은 동일한 주파수 조절 범위에서 -198.45~-194.77 dBc/Hz @ 100 kHz의 특성을 보였다.

Abstract

In this paper, a novel voltage-controlled oscillator(VCO) using the metamaterial broadside coupled spiral resonators (BC-DSRs) is presented for reducing the phase noise. For reducing of the phase noise, the series spiral structures have been applied for the signal plane and ground plane at each in order to have the large coupling. Compared with the conventional VCO, the proposed VCO has the larger coupling coefficient constant, which makes a higher Q-factor and has reduced the phase noise of the VCO. The proposed VCO has the phase noise of -121~-117.16 dBc/Hz at 100 kHz in the tuning range, 5.749~5.853 GHz. The figure of merit(FOM) of this VCO is -198.45~-194.77 dBc/Hz at 100 kHz in the same tuning range, respectively.

Key words : VCO, Phase Noise, Broad-Side Coupled Double Spiral Resonator, Coupling Coefficient

I. 서 론

최근 무선 통신 분야의 급속한 성장은 이동 통신 응용 분야에 더 많은 이용 가능한 채널에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 요구는 전압 제어 발진기의 위상 잡음에 대한 더욱더 엄격한 요구 조건을 부

과한다. 또한 위성 이동 통신, 개인 휴대 통신(PCS), 디지털 데이터 통신 이동 통신, WLL(Wireless Local Loop), 주파수 공용 통신(TRS) 서비스가 발전하면서 고주파 부품의 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 RF 시스템에서 주파수원을 공급하는 발진기는 RF의 핵심 부품 중의 하나로 중요성이 커지고 있다. 특히 발

「본 연구보고서는 정보통신부 출연금으로 MIC/ IITA/ ETRI, SoC산업진흥연구센터에서 수행한 IT SoC 핵심설계인력양성사업의 연구 결과입니다.」

숭실대학교 정보통신전자공학부(Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

· 논문 번호 : 20090730-075

· 수정완료일자 : 2009년 9월 15일

진기 설계 시 위상 잡음과 안정도가 가장 중요한 요소로, 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 공진기의 Q 값에 영향을 받는 것으로 알려져 있다^{[1],[2]}. 하지만 마이크로스트립 라인을 이용한 공진기는 낮은 Q 값 때문에 위상 잡음을 줄이는데 제한적이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조를 이용한 공진기와 SR, SRR 형태 또는 CSRR 형태의 metamaterial 특성을 갖는 구조들에 대한 연구가 이루어지고 있다^[3]. 주요 장점들은 협대역의 대역 통과 여과 특성, 용이한 제작, 낮은 방사 손실, 그리고 높은 주파수 선택도이다. 이러한 장점들은 무선 통신 시스템에 사용되어지는데 있어서 매우 좋은 특성을 갖는다^{[4],[6]}.

본 논문에서는 Q 값을 높이기 위하여 SR 구조를 적용하였다. SR는 음의 자기적 투자율 혹은 Left-Handed Metamaterial의 특성을 갖는 효과적인 매체의 설계를 위한 핵심 구성 물질로써 전자기와 초고주파 공학자들 사이에서 최근 수 년 동안 많은 관심을 이끌었다. SR 구조는 자계가 원형의 축을 따라서 극성을 갖는 경우, 그것들의 공진 주파수 근처에서 협대역으로 신호 전달을 저지할 수 있는 하부 파장 공진기이다. 이것은 SR들의 공진 상하에서의 실질적인 투자율의 양과 음의 값들의 결과로 해석되어져 왔다. 이것으로부터 음의 유전율을 갖는 매체는 공진 물질로 동작할 수 있음을 보여준다. 이 구조는 높은 주파수 선택도를 갖고, 이러한 높은 주파수 선택도를 통하여 저위상 잡음 특성을 갖는 전압 제어 발진기 설계를 할 수 있다. 또한 SR 구조는 그 축에 수직 한 방향으로 전계가 걸렸을 때, 특정 공진 주파수에서 자기 공진 현상이 일어나며, 이것이 대역 저지 특성으로 나타난다. SR 구조는 날카로운 스킨트 특성에 따른 높은 Q 값과 통과 대역에서는 리플이 없고 삽입 손실이 매우 낮은 특성을 볼 수 있다. 그리고 설계 방법이 간단하고 명확한 특징을 가지고 있다^{[7],[8]}.

이러한 기본적인 SR 구조를 바탕으로 더 나은 공진 특성을 얻기 위하여 이중 SR 형태를 제안하였으며, 최종적으로 신호 면과 그라운드 면에 각각 이 형태를 적용하여 다른 공진기 구조들보다 더 높은 결합 계수 때문에 더 큰 Q 값을 얻을 수 있다는 사실을 발견하였다. 논문에는 메타 구조 Broadside Coupled SRs를 이용하여 설계된 전압 제어 발진기가 다른 기

본의 전압 제어 발진기보다 개선된 저위상 잡음 특성을 얻을 수 있다는 사실을 최초로 증명하였다.

II. 설계 원리

2-1 나선형 공진기 분석

나선형 공진기를 LC 공진 등가 회로 모델을 통해 해석할 수 있다. 마이크로스트립 전송 선로에 의해 구현된 SR 형태를 그림 1에 나타내었다.

그림 1(a)는 SR의 모양으로 기판 위에 나선형 모양을 예칭한 형태를 가지고 있다. 이것은 나선형 선로에 외부에서 시간에 따라 변하는 자계가 가해지면, 나선형 선로에 전류가 유기된다. 유기된 전류가 흐르는 선로의 길이만큼 분산 인덕턴스가 발생하며 선로들 사이의 상호 인덕턴스가 발생한다. 선로에 유기된 전류에 의해 전압이 형성되는 모양이 그림 1(a)와 같고, 안쪽과 바깥쪽 선로 사이에 분산 커패시턴스와 양 끝단에서 가장자리 커패시턴스가 발생한다. 이 두 캐패시턴스는 직렬로 연결되었다고 할 수 있고, 등가 모델은 그림 1(b)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_T C_T}} \quad (1)$$

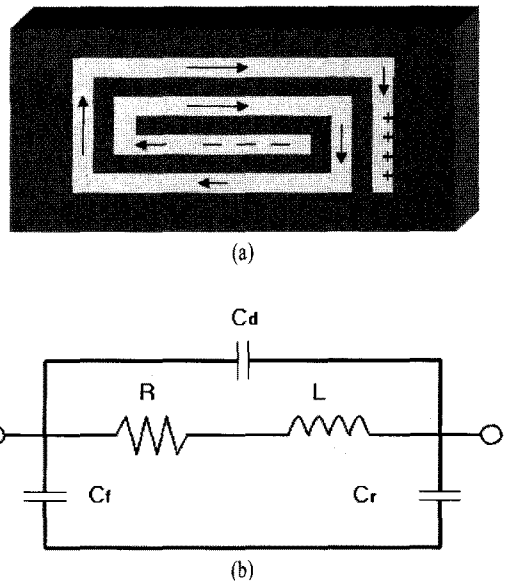


그림 1. (a) 직사각형 모양의 나선형 공진기, (b) 등가 회로

Fig. 1. (a) Spiral resonator with square shape, (b) Equivalent circuit.

식 (1)에서 C_T 는 분산 커패시턴스와 가장자리 커패시턴스의 합이며, L_T 는 상호 인덕턴스와 분산 인덕턴스의 합이다.

$$Q = w \frac{\text{average energy stored}}{\text{energy loss/second}} \quad (2)$$

식 (2)는 공진기의 Q 값을 나타내는 식으로써 저장되는 에너지와 손실되는 에너지의 배에 주파수 개념을 적용한 식이라 할 수 있다.

SR에서 각 라인이 서로 가까이 있으면서 상호 커패시턴스와 상호 인덕턴스가 증가하면서 결합계수가 커질 수 있다. 또한 커패시턴스와 인덕턴스는 에너지를 저장할 수 있기 때문에 식 (2)에서의 분자가 커지면서 Q 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. Q 값이 커질수록 파형이 예리해지기 때문에 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄일 수 있다.

2-2 나선형 공진기 설계

SR 설계를 바탕으로 전압 제어 발진기를 설계 및 제작하여 측정과 분석을 하였다. ϵ_r 이 3.2인 Taconic 기판을 사용하였으며, 전압 제어 발진기에 사용한 트랜지스터는 NEC사의 NE661M04, 버랙터 다이오드는 M/A-COM의 MA46H202를 사용하였다.

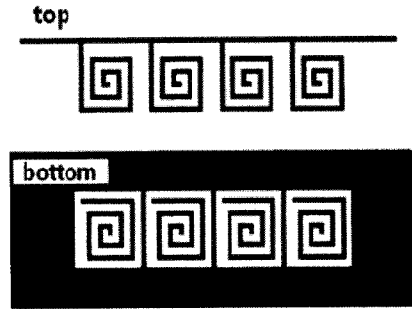
공진기 설계는 Ansoft사의 HFSS를 이용하여 모의 실험하고 실험한 결과를 바탕으로 HP사의 Advanced Design System(ADS)을 이용하여 5.8 GHz에서 발진하게 설계하였다.

그림 2는 SR 구조를 이용하여 만든 공진기의 그림으로 예칭하는 라인의 길이, 라인과 라인의 간격과 각 단위 셀의 간격을 조정하여 주파수를 조절하게 된다.

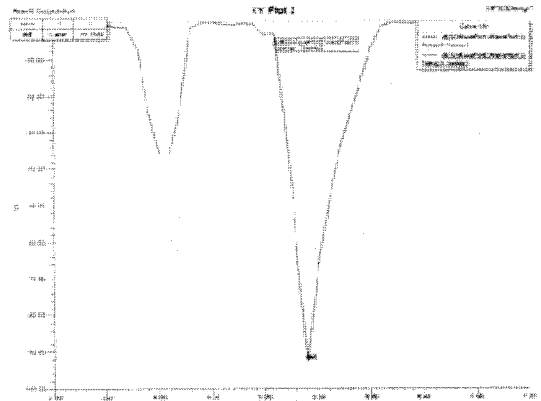
III. 제작 및 실험 결과

전압 제어 발진기는 설계한 공진기를 연결하고 인덕터, 마이크로스트립 라인과 주파수를 변화시킬 수 있는 인덕터를 연결하여 부성 저항을 설계하고 마이크로스트립 라인을 통해 출력 정합 회로를 설계하였다.

그림 3은 설계한 발진기를 기본으로 하여 실제 제작한 결과물이다. SR 구조를 가지고 전압 제어 발진기를 설계한 목적이 공진기의 Q 값이 상승함에 따라



(a)



(b)

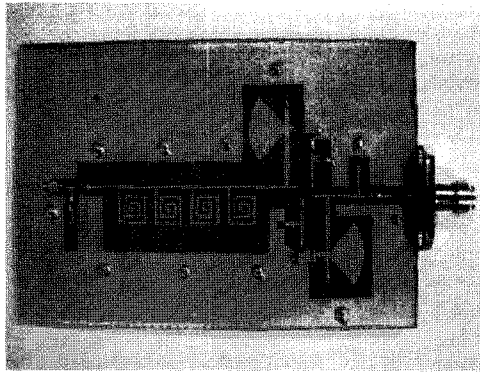
그림 2. (a) 제안한 나선형 공진기 구조, (b) 제안한 SR 구조의 공진 특성

Fig. 2. (a) Proposed spiral resonator structure, (b) Characteristics of proposed resonator.

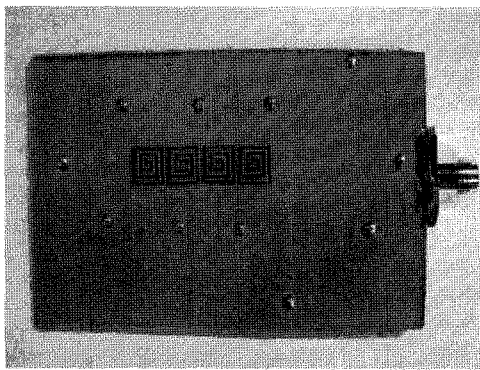
위상 잡음이 개선되는 것을 증명하기 위한 것이었으므로 일반적인 마이크로스트립 라인을 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음과 비교하였다. 그림 4는 일반적인 마이크로스트립 라인을 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성이다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 마이크로스트립 Broadside Coupled Double Spiral Resonator를 이용한 전압 제어 발진기의 출력 파워와 위상 잡음 특성이다.

제안된 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 5.749~5.854 GHz @ 0~26 V이고, 위상 잡음 특성은 -121~-117.16 dBc/Hz @ 100 KHz이다. 전압 제어 발진기의 출력 전력과 고조파 특성은 각각 10.16 dBm과 -23.84 dBc이다. 컬렉터 전압과 전류는 각각 1.8 V와 33 mA이고, 그래서 소비 전력은 59.4 mW이다. 그림 4와 그림 5의 비교를 통하여 제안된 공진기 구조를 통하여 본 논문에서 제안한 구조의 특성이



(a)



(b)

그림 3 (a) 메타 broadside coupled spiral resonator 구조를 이용한 전압 제어 발진기(앞면), (b) 메타 broadside coupled spiral resonator 구조를 이용한 전압 제어 발진기(뒷면)

Fig. 3. (a) Voltage controlled oscillator using the metamaterial BC-SRs(top), (b) Voltage controlled oscillator using the metamaterial BC-SRs(bottom).

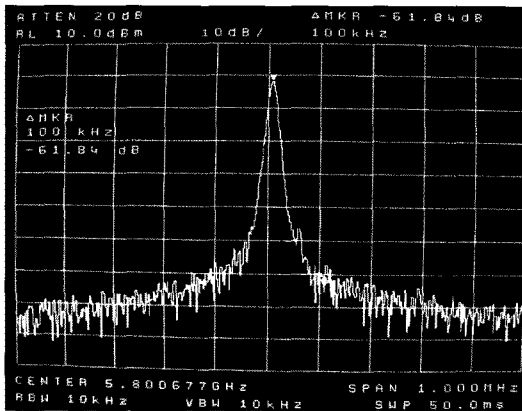
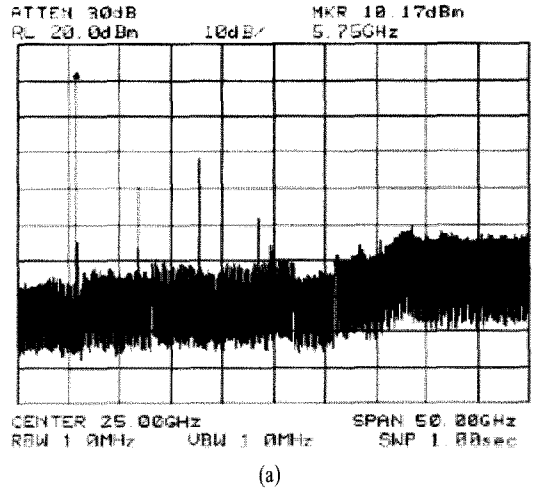
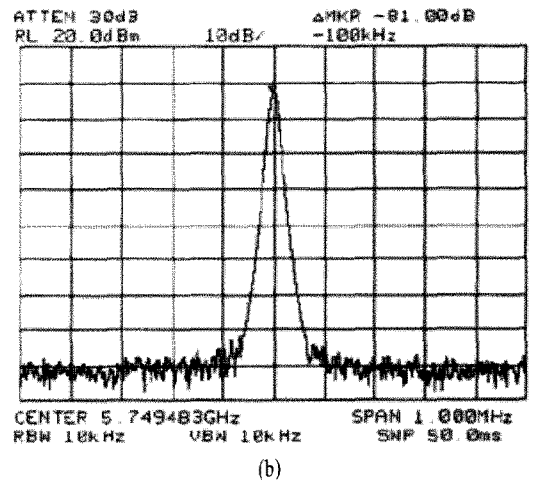


그림 4. 일반적인 발진기의 위상 잡음 특성
Fig. 4. Phase noise of conventional VCO.



(a)



(b)

그림 5. (a) VCO 출력, (b) 버랙터 다이오드에 0 V 인가했을 때의 위상 잡음

Fig. 5. (a) Output power of VCO, (b) Endorsed for 0 V phase noise when varactor diodes.

우수하다는 것을 증명할 수 있다. 마이크로스트립 선로 공진기를 이용한 전압 제어 발진기, BC-DSRs 구조를 이용한 저 잡음 위상 발진기는 유전율 3.2, 31 mils의 두께를 갖는 Taconic 기판으로 제작되었다.

다른 전압 제어 발진기들 사이의 비교를 위하여 널리 사용되어지는 Figure of Merit(FOM)은 다음과 같이 정의한다.

$$FOM = L(\Delta f) - 20 \log\left(\frac{f_o}{\Delta f}\right) + 10 \log\left(\frac{P}{1mW}\right) \quad (3)$$

여기서 $L(\Delta f)$ 는 f_o 의 캐리어 주파수로부터 Δf 의 오프셋 주파수에서의 위상 잡음이고, P 는 전압 제어

표 1. 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성 비교
Table 1. Voltage controlled oscillator phase noise characteristics comparison.

VCO Frequency 5.8 GHz	Phase noise (dBc/Hz @ 100 kHz)
Microstrip line 구조	-101.84 dBc
DSR 구조	-121 dBc

발진기 코어의 소비 전력이다. 제안된 전압 제어 발진기의 FOM은 발진 주파수 5.749 GHz에서 -198.45 dBc/Hz @ 100 kHz이다.

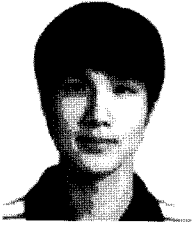
IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 개선하기 위하여 Q 값이 상대적으로 높은 나선형 공진기를 이용하여 설계하였다. 그리고 이 구조를 신호 면과그라운드 면에 각각 적용하여 Broadside Coupled 효과를 발생시켰다. BC-DSRs를 적용한 결과 일반적인 전압 제어 발진기보다 더 높은 결합계수로 인한 높은 Q 값을 얻을 수 있다는 사실을 발견하였다. 1.8 V의 공급 전력을 갖는 전압 제어 발진기는 주파수 조절 범위, 5.749~5.853 GHz에서 -121~-117.16 dBc/Hz @ 100 KHz의 위상 잡음 특성을 갖는다. 전압 제어 발진기의 FOM은 동일한 주파수 조절 범위에서 -198.45~-194.77 @ 100 KHz이다. 기본적인 마이크로스트립 선로를 이용한 공진기와 비교했을 경우, 약 19.16 dB 개선되었다. 앞으로 나선형 공진기 특성의 개선과 Q 값을 좀 더 개선할 수 있는 공진기를 설계하여 위상 잡음을 개선하는 연구와 주파수 조절 범위를 좀 더 넓힐 수 있는 선형화 방법을 연구할 것이다.

참고 문헌

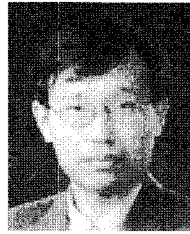
- [1] C. D. Broomfield, J. K. A. Everard, "Flicker noise reduction using GaAs microwave feedforward amplifiers", *2000 IEEE International Frequency Control Symposium, City*, Jun. 2000.
- [2] D. B. Lesson, "A simple model of feedback oscillator noise spectrum", in *Pro. IEEE*, vol. 54, no. 2, pp. 426-434, Feb. 1966.
- [3] J. Choi, C. Seo, "Microstrip square open-loop multiple split-ring resonator for low phase noise VCO", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.*, vol 56, no. 12, Dec. 2008.
- [4] A. Hajimiri, T. H. Lee, "A general theory of phase noise in electrical oscillators", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 2, pp. 179-194, Feb. 1998.
- [5] S. Im, C. Seo, J. Kim, Y. Kim, and N. Kim, "Improvement of microstrip open loop resonator filter using aperture", *IEEE MTT-S International*, vol. 3, pp. 1801-1804, Jun. 2002.
- [6] E. Park, C. Seo, "Low phase noise oscillator using microstrip square open loop resonator", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Jun. 2006.
- [7] Zunfu Jiang, P. S. Excell, and Z. M. Hejazi, "Calculation of distributed capacitance of spiral resonators", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.*, vol. 45, no. 1, Jan. 1997.
- [8] Z. M. Hejazi, P. S. Excell, and Z. Juang, "Accurate distributed inductance of spiral resonator", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 8, no. 4, Apr. 1998.

한 경 남



2007년 8월: 숭실대학교 정보통신
전자공학부 (공학사)
2007년 8월~현재: 숭실대학교 정보
통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계,
RF Power Amplifier, VCO, RFIC,
RFID, Digital RF 등

서 철 헌



1983년 3월: 서울대학교 전자공학
과 (공학사)
1985년 3월: 서울대학교 전자공학
과 (공학석사)
1993년 3월: 서울대학교 전자공학
과 (공학박사)
1993년~1995년: MIT 연구원
1993년~1997년: 숭실대학교 정보통신학과 조교수
1999년 8월~2001년 1월: MIT 방문교수
1997년~2004년: 숭실대학교 정보통신 전자공학부 부교수
2005년~현재: 숭실대학교 정보통신 전자공학부 교수
[주 관심분야] 이동 및 위성통신 Microwave 부품 및 시스
템, PBG를 이용한 RF 부품