

논문 2007-44TC-11-9

마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR(Split Ring Resonator)를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기

(Low Phase Noise VCO using Microstrip Square Open Loop Multiple Split Ring Resonator)

최재원*, 서철현**

(Jaewon Choi and Chulhun Seo)

요약

본 논문에서는 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 Split Ring 공진기 (OLMSRR)를 이용하여 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 줄이기 위한 새로운 구조를 제안하였다. 이러한 특성 실현을 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프의 형태를 갖는 사각 형태의 다중 Split Ring 공진기 (MSRR)에 대하여 연구하였다. 일반적인 마이크로스트립 선로 공진기뿐만 아니라 위상 잡음 특성을 개선하기 위하여 제안된 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 마이크로스트립 사각 개방 루프 Split Ring 공진기 (OLSRR)와 비교할 경우에도 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR는 더 큰 결합 계수를 갖으며, 이로 인하여 얻을 수 있는 더 높은 Q 값을 통하여 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄일 수 있다. 1.7 V의 공급 전력을 갖는 전압 제어 발진기는 주파수 조절 범위, 5.746 ~ 5.84 GHz에서 -124.5 ~ -122.0 dBc/Hz @ 100 kHz의 위상 잡음 특성을 갖는다. 이 전압 제어 발진기의 Figure Of Merit (FOM)은 동일한 주파수 조절 범위에서 -203.96 ~ -201.6 dBc/Hz @ 100 kHz를 갖는다. 기본적인 마이크로스트립 선로 공진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용한 전압 제어 발진기와 비교할 경우, 제안된 공진기를 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 각각 25.66 dB, 8.34 dB, 4.5 dB 개선되었다.

Abstract

In this paper, a novel voltage-controlled oscillator (VCO) using the microstrip square open loop multiple split ring resonator (OLMSRR) is presented for reducing the phase noise property. The square-shaped multiple split ring resonator (MSRR) having the form of the microstrip square open loop is investigated to realize this property. Compared with the microstrip square open loop resonator and the microstrip square open loop split ring resonator (OLSRR) as well as the conventional microstrip line resonator, the microstrip square OLMSRR has the larger coupling coefficient value, which makes a higher Q value, and has reduced the phase noise of VCO. The VCO with 1.7V power supply has the phase noise of -124.5 ~ -122.0 dBc/Hz @ 100 kHz in the tuning range, 5.746 ~ 5.84 GHz. The figure of merit (FOM) of this VCO is -203.96 ~ -201.6 dBc/Hz @ 100 kHz in the same tuning range. Compared with VCO using the conventional microstrip line resonator, VCO using the microstrip square open loop resonator and VCO using microstrip square OLSRR, the phase noise property of VCO using the proposed resonator has been improved in 25.66 dB, 8.34 dB, and 4.5 dB, respectively.

Keywords : VCO, Phase Noise, Multiple Split Ring Resonator, Microstrip Square Open Loop, Coupling Coefficient

I. 서론

최근 무선 통신 분야의 급속한 성장은 이동 통신 용

용 분야에 더 많은 이용 가능한 채널에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 요구는 전압 제어 발진기의 위상 잡음에 대한 더욱 더 엄격한 요구 조건을 부과한다. 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 공진기의 Q값에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 하지만 마이크로스트립 라인을 이용한 공진기는 낮은 Q값 때문에 위상 잡음을 줄이는데 제한적이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조를 이용한 공진

* 학생회원, ** 정회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부 (Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

※ 이 연구는 2007학년도 숭실대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음

접수일자: 2007년11월2일, 수정완료일: 2007년11월15일

기와 SRR형태 또는 CSRR형태의 metamaterial 특성을 갖는 구조들에 대한 연구가 이루어지고 있다. 주요 장점들은 협대역의 대역 통과 여파 특성, 용이한 제작, 낮은 방사 손실, 그리고 높은 주파수 선택도이다. 이러한 장점들은 무선 통신 시스템에 사용되어지는데 있어서 매우 좋은 특성을 갖는다^[1-3].

SRR는 음의 자기적 투자율 혹은 Left-handed metamaterial(주기적인 구조를 통해 자연상에 존재하지 않는 특성을 갖도록 만든 인공 구조물)의 특성을 갖는 효과적인 매체의 설계를 위한 핵심 구성 물질로써 전자기와 초고주파 공학자들 사이에서 최근 수 년 동안 많은 관심을 이끌었다. Pendry에 의해 최초로 제안된 SRR들은 자계가 원형의 축을 따라서 극성을 갖는 경우, 그것들의 공진 주파수 근처에서 협대역으로 신호 전달을 저지할 수 있는 하부 파장 공진기이다. 이것은 SRR들의 공진 상하에서의 실질적인 투자율의 양과 음의 값들의 결과로 해석되어져 왔다. 또한 Pendry에 의해서 제안된 기본적인 SRR로부터 고안된 수많은 다른 공진기 구조들은 소형의 협대역 대역 통과 여파기와 단항 이로 통신기(diplexer)의 설계에 적용되어질 수 있는 것으로 증명되어져 왔다. 이것으로부터 음의 유전율을 갖는 매체는 공진 물질로 동작할 수 있음을 보여준다. 사각 형태의 SRR들은 또한 음의 metamaterial의 개념을 기반으로 효과적인 저지대역 구조들을 만들기 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조와 자계적으로 결합될 수 있다. 이 구조는 높은 주파수 선택도를 갖고, 이러한 높은 주파수 선택도를 통하여 저위상 잡음 특성을 갖는 전압 제어 발진기 설계를 할 수 있다^[4-6].

이러한 기본적인 SRR의 공진 특성을 개선하기 위하여 다중 SRR 형태를 제안하였으며, 최종적으로 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조와 결합하여 다른 공진기 구조들보다 더 높은 결합 계수 때문에 더 큰 Q값을 얻을 수 있다는 사실을 발견하였다. 또한 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조와의 용이한 결합과 결합 계수를 더욱 더 높이기 위하여 다중 SRR를 사각 형태로 설계하였다. 본 논문에는 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용하여 설계된 전압 제어 발진기가 다른 기본의 전압 제어 발진기 보다 개선된 저위상 잡음 특성을 얻을 수 있다는 사실을 최초로 증명하였다.

II. 설계 원리

그림 1. (a)의 결합 구조에서, 두 개의 공진기들의 공

통 결합 부분에서의 전계와 자계 분산은 서로 결합 가능하고, 이 때문에 전계 결합과 자계 결합 중 어느 것도 무시 할 수 없다. 이와 같은 이유로 이러한 결합 형태를 혼합 결합이라고 한다. 그림 1. (a)는 혼합 결합의 일반적인 형태와 이와 관련된 등가 회로를 나타내고, 그림 1. (b)는 제안된 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중

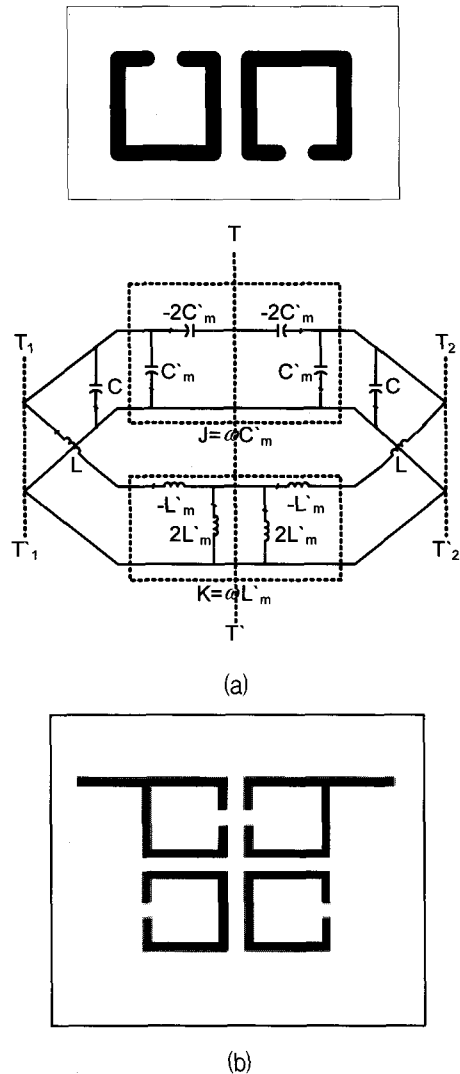


그림 1. (a) 자계 결합과 전계 결합을 나타내기 위한 임피던스 인버터 $K = \omega L'_m$ 과 어드미턴스 인버터 $J = \omega C'_m$ 을 갖는 혼합 결합 구조와 이와 관련된 등가 회로, (b) 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 설계하기 위하여 적용된 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기

Fig. 1. (a) Mixed coupling structure and an associated equivalent circuit with an impedance inverter $K = \omega L'_m$ and an admittance inverter $J = \omega C'_m$ to represent the magnetic coupling and the electric coupling, respectively, (b) Microstrip square open loop resonator adapted for designing the microstrip square open loop SRR.

SRR를 설계하기 위하여 적용된 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 나타낸다.

식 (1)과 (2)는 혼합 결합의 두 공진 주파수 (f_e, f_m)을 나타낸다.

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

여기서 C, L, C'_m, L'_m 은 각각 자기 캐패시턴스, 자기 인덕턴스, 상호 캐패시턴스, 상호 인덕턴스이다.

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

식 (1)과 (2)로부터 혼합 결합 계수 (k_B)를 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$k_B = \frac{CL'_m + LC'_m}{LC + L'_m C'_m} \quad (3)$$

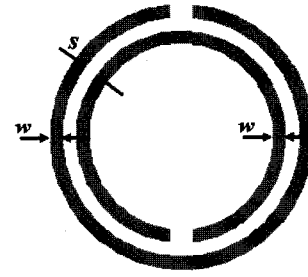
$L'_m C'_m \ll LC$ 라고 가정하면, 식 (3)은 아래와 같다.

$$k_B \approx \frac{L'_m}{L} + \frac{C'_m}{C} = k'_M + k'_E \quad (4)$$

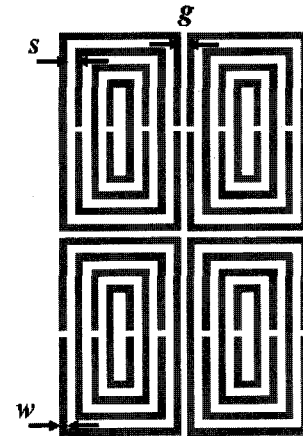
여기서 혼합 결합이 자체 결합과 전계 결합의 중첩으로부터 만들어졌다는 것을 명확히 나타내고 있다^[7].

그림 2는 Pendry에 의해서 최초로 제안된 기본적인 SRR 구조와 새롭게 제안된 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR 구조를 보여준다. 기본적인 SRR의 주파수 선택 동작은 공진이 발생될 때 원형의 마이크로스트립 부분에 유발된 전류 루프들에 의해서 설명되어질 수 있다. 이 전류 루프들은 동심의 마이크로스트립 원 사이에서 발생된 캐패시턴스를 통하여 근접해진다. SRR들은 자계에 의해 외부적으로 구동될 수 있는 LC 공진부로서 모델링될 수 있다. 만약 이것들의 방향이 적절하게 조절되어지면 특정한 협대역에서 신호 전달을 저지할 수 있다. 등가 캐패시턴스 C 가 동심의 마이크로스트립 원 사이의 끝단 캐패시턴스에 의해 주어지기 때문에, 공진 주파수는 두 원 사이의 간격 (s)이 작아질수록 매우 작아질 수 있다.

그림 2. (b)에서 보는 것처럼, 다중 SRR는 일반적으로 이용되는 기본적인 SRR 구조와 나선형 공진기 구조를 직접적으로 확장한 것이다. 다중 SRR는 N 개의 동심을 갖는 분리된 원형 선로가 서로 반대의 면을 연속적으로 번갈아 갖는 형태로 구성된다. 동일한 크기에서



(a)



(b)

그림 2. (a) Pendry에 의해 제안된 기본적인 SRR구조, (b) 새롭게 제안된 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR구조

Fig. 2. (a) Conventional SRR proposed by Pendry, (b) Proposed microstrip square OLMSRR.

더 낮은 공진 주파수를 얻기 위하여 동일한 크기에서 더 긴 선로를 갖을 수 있는 사각 형태를 원형 대신에 사용하였다. 다중 SRR의 경우에 인접한 사각 형태의 선로 사이에서 발생하는 $N-1$ 개의 분산 캐패시턴스가 고려되었다. 최외각과 최내각 사이의 선로들에 대하여 번호를 부여하여 분산 캐패시턴스를 C_{12}, C_{23}, C_{34} 로 나타낼 수 있다. 여기서 사각 형태의 선로의 수 N 을 증가시킬 때, 내부 선로와 관련된 분산 캐패시턴스의 영향은 점진적으로 작아진다. 즉, 공진기를 구성하는 사각 형태의 선로의 수를 계속 늘린다고 하더라도 공진 주파수가 계속 낮아지는 것은 아니다. 이와 같은 공진기 형태에서 발생하는 분산 인덕턴스 또한 유사한 특성을 갖는다. 그러므로 공진 주파수와 공진기의 크기 등을 고려하여 불필요한 사각 형태의 외각 선로가 없도록 공진기를 구성하는 선로의 수를 적절하게 선택하여야 한다. 또한, 이러한 캐패시턴스의 증가로 인하여 일반적인 SRR 보다 더 높은 결합 계수를 갖을 수 있으며, 결국

더 높은 Q값을 얻을 수 있다^[6].

위에서 언급한 기본적인 SRR의 주파수 선택 특성과 다중 SRR의 특성을 기반으로, 높은 결합 계수에 의해 발생하는 높은 Q값으로 인해 얻을 수 있는 공진 시 높은 제거 특성과 좋은 스킨트 특성을 갖는 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 설계할 수 있다^[4].

이 결합 구조를 이용하여 발생된 결합은 근접한 지점에서 가장자리 부분에서 발생하는 계를 통하여 이루어진다는 것이 명백하다. 가장자리 계의 특성과 강도는 결합 특성과 강도를 결정한다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR가 개방 갭을 갖는 부분에서 최대의 전계 강도를 갖고, 반대쪽에서 최대의 자기 강도를 갖는다는 사실을 알 수 있다. 또한, 각각의 개방 루프 구조들이 사각 형태의 다중 SRR의 형태를 갖는 구조로 설계되어지는 것을 통하여, 전계와 자계가 더 증가된다. 가장자리 계가 영역의 바깥쪽에서 급속히 감소하는 특성을 갖기 때문에, 가장자리 전계는 최대 전계 분산을 갖는 부분 근처에서 더욱 강하고, 반면에 가장자리 자계는 최대 자기 분산을 갖는 부분 근처에서 더욱 강하다.

이 구조는 각각의 개방 루프를 구성하는 내부 원과 외부 원사이의 높은 자계와 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조를 이용하여 높은 전계와 자계를 얻기 위하여 최적화되고, 그러므로 공진 주파수에서 높은 저지 특성을 갖도록 된다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 구성하는 원들은 결합 계수를 강화하기 위하여 사각 형태의 구조로 설계된다.

III. 제작 및 실험 결과

1. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR 설계

마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR의 개선된 특성을 증명하기 위하여, 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR와 비교하였다. 두 개의 공진기는 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic 기판으로 동일한 제작 과정을 통하여 제작되었다. 그림 3은 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR와 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR의 제작된 기판 사진과 측정된 공진 특성들을 보여준다. 실험 결과에서처럼, 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR와 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR의 저지 특성은 공진 주파수 5.8 GHz에서 각각 -43.56 dB와 -81.78 dB이다. 또한 제안된 공진기의 공진 주파수에서의 공진 특성이 높은 스킨트 특성을 통

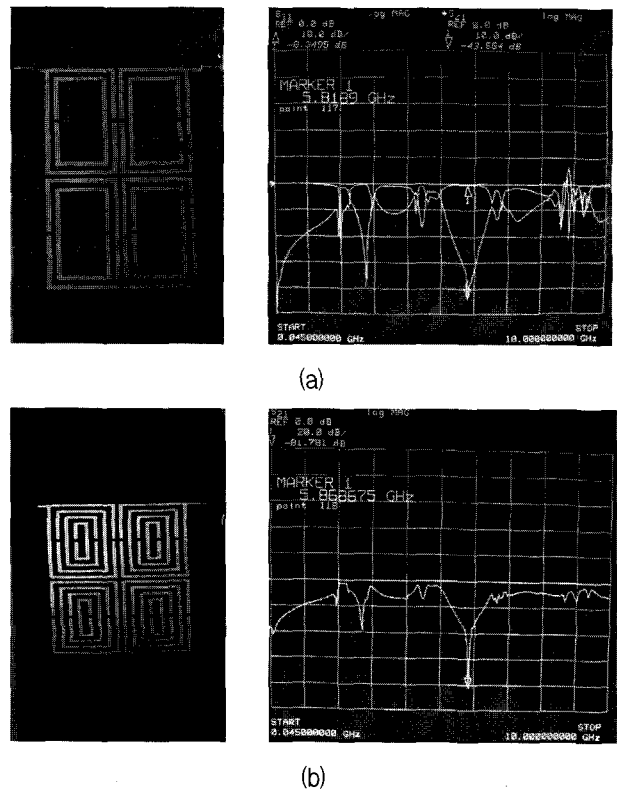


그림 3. 제작된 기판 사진과 측정된 공진 특성 (a) 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR, (b) 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR

Fig. 3. Fabrications and measured resonant properties (a) Microstrip square open loop SRR, (b) Microstrip square open loop multiple SRR.

하여 매우 우수하다는 것을 알 수 있다. 수치적인 결과와 측정 그림에서 알 수 있는 매우 우수한 공진 형태를 통하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR가 같은 공진 주파수 5.8 GHz에서 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR보다 더 높은 저지 특성과 더 좋은 스킨트 특성을 갖는다는 확인할 수 있다. 이는 사각 형태의 다중 SRR와 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기사이의 결합이 상호 보완적으로 이루어졌기 때문이고, 그러므로 제안된 공진기는 높은 결합 계수에 의하여 높은 Q값을 얻을 수 있다. 또한, 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR와 비교할 경우, 사각 형태의 다중 SRR의 중심원 사이의 끝단 캐패시턴스에 의해 주어진 등가 캐패시턴스 C 가 전체적인 등가 캐패시턴스에 더 많이 추가되기 때문에, 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR의 크기가 더욱 더 줄어들며 특성 또한 향상된다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR뿐만 아니라 마이크로스트립 선로 공진기와 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 비교할 경우, 공진 특성이 더 우수하다는 사실을 알 수 있다. 또한 전압 제어 발진기의 위상

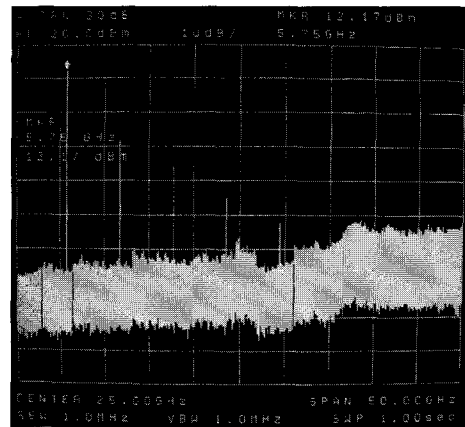


그림 4. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용하여 제안한 전압 제어 발진기 제작 모습
Fig. 4. Fabrications of the proposed VCO using the microstrip square OLMSRR.

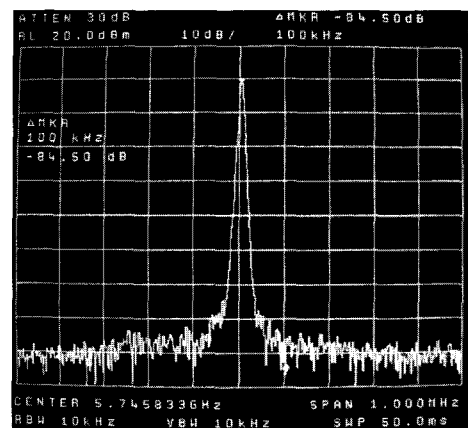
잡음 특성도 일반적인 마이크로스트립 선로 공진기뿐만 아니라 위상 잡음을 줄이기 위해 제안된 공진기를 이용한 전압 제어 발진기보다 더 우수하며 뛰어난 개선 특성을 갖는 다는 사실을 알 수 있다^[10].

2. 전압 제어 발진기 설계

마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용하여 제안한 전압 제어 발진기는 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic 기판으로 제작되었고, NEC사의 NE661M04 BJT 소자와 M/A-COM사의 MA46H202 버랙터 다이오드를 이용하여 설계되었다. 그림 4는 제안된 전압 제어 발진기의 제작된 기판 모습을 보여준다. 제안된 전압 제어 발진기는 주파수 조절을 위하여 사용된 버랙터 다이오드를 공진기가 아닌 부성 저항 부분에 연결하였다. 이는 공진부의 높은 Q특성에 의하여 주파수 조절 범위가 좁아지는 문제를 해결하기 위하여 버랙터 다이오드를 부성 저항 부분에 연결한 것이다. 이러한 형태를 부성 저항을 조절 가능한 부성 저항이라고 한다. 또한 전압 제어 발진기의 부성 저항은 저위상 잡음을 얻기 위하여 대칭으로 설계되었고, 동작 주파수를 조절하기 위하여 조절 전압이 버랙터 다이오드에 인가될 때, 트랜지스터에 DC 성분이 인가되는 것을 막기 위하여 작은 캐패시턴스를 갖는 캐패시터를 부성 저항에 연결하였다^[10]. 결합 계수는 마이크로스트립 사각 개방 루프들 사이의 결합 공간 (g)과 각각의 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조들을 구성하는 다중 SRR의 사각 형태의 내부 선로들 사이의 간격 (s)을 줄임으로써 증가된다. 증가된 결합 계수는 낮은 위상 잡음을 얻을 수 있게 하지만, 주파수 조절 범위를 작게 한다. 그러므로 마이크로스트립 사각 개방 루프들사이의 결합



(a)



(b)

그림 5. 5.746 GHz에서의 제안된 전압 제어 발진기의 측정 결과 (a) 출력 전력, (b) 위상 잡음

Fig. 5. Measured properties of the proposed VCO at 5.746 GHz (a) Output power, (b) Phase noise.

공간 (g)과 각각의 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조들을 구성하는 다중 SRR의 사각 형태의 내부 선로들 사이의 간격 (s)은 적절히 조절되어야 한다.

제안된 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 5.746 ~ 5.84 GHz @ 0 ~ 26 V이고, 위상 잡음 특성은 -124.5 ~ -122 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 전압 제어 발진기의 출력 전력과 고조파 특성은 각각 12.17 dBm과 -20.5 dBc이다. 컬렉터 전압과 전류는 각각 1.7 V와 22 mA이고, 그래서 소비 전력은 37.4 mW이다. 그림 5는 제안된 전압 제어 발진기의 5.746 GHz에서의 출력 전력과 위상 잡음의 측정치를 보여준다. 위상 잡음의 개선을 증명하기 위하여, 제안된 전압 제어 발진기의 특성을 마이크로스트립 선로 공진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용한 전압 제어 발진기와 각각 비교하였다. 이 중 마이크로스트립 선로 공진기를 제외한 공진

기들은 위상 잡음 특성을 개선하기 위해 제안된 구조이므로 이 비교를 통하여 본 논문에서 제안한 구조의 특성이 우수하다는 것을 증명할 수 있다. 마이크로스트립 선로 공진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용한 각각의 전압 제어 발진기 또한 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic 기판으로 제작되었다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용하여 제안한 전압 제어 발진기는 마이크로스트립 선로 공진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용한 각각의 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성과 비교하여 0 V의 버랙터 다이오드 조절 전압에서 각각 -124.5 dBc/Hz, -98.84 dBc/Hz, -116.16 dBc/Hz, -120 dBc/Hz이다. 이 때 오프셋 주파수는 100 kHz이다. 서로 다른 형태의 공진기를 이용한 세 가지의 전압 제어 발진기와 비교하여 제안된 전압 제어 발진기는 위상 잡음 특성이 각각 25.66 dB, 8.34 dB, 4.5 dB 개선되었다. 그림 6은 위에서 언급한 세 가지 형태의 전압 제어 발진기와 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 버랙터 다이오드 조절 전압 범위 0 ~ 26 V에서 보여준다^[10].

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

$$FOM = L\{\Delta f\} - 20\log\left(\frac{f_o}{\Delta f}\right) + 10\log\left(\frac{P}{1mW}\right) \quad (5)$$

여기서 $L\{\Delta f\}$ 는 f_o 의 캐리어 주파수로부터 Δf 의 오프셋 주파수에서의 위상 잡음이고 P 는 전압 제어 발진기 코어의 소비 전력이다^[9]. 제안된 전압 제어 발진기의 FOM은 발진 주파수 5.746 GHz에서 -203.96 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 제안된 전압 제어 발진기의 FOM은 본 논문에서 특성 비교를 위해서 언급한 세 가지 전압 제어 발진기와 비교할 경우 각각 22.89 dB, 5.63 dB, 3.63 dB 개선되었다. 표 1은 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용하여 제안된 전압 제어 발진기의 특성을 다른 전압 제어 발진기와 비교한 결과를 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 위상 잡음을 줄이기 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR를 이용한 새로운 전

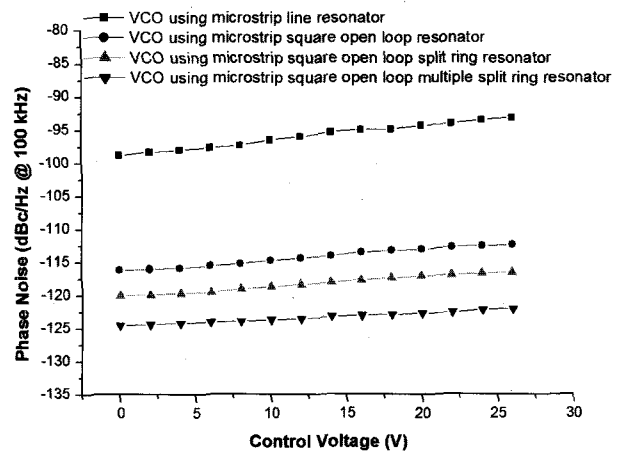


그림 6. 제안된 전압 제어 발진기와 다른 구조의 공진기를 갖는 전압 제어 발진기 사이의 위상 잡음 특성 비교

Fig. 6. Comparisons of the phase noise property between the proposed VCO and the other VCOs using the resonators having the other structures.

표 1. 전압 제어 발진기 특성 비교

Table 1. VCO Performance Comparisons.

	Line Resonator	Open Loop Resonator	OLSRR	This work
Oscillation Frequency (GHz)	5.749	5.735	5.746	5.746
Output Power (dBm)	1.5	4.83	12.33	12.17
Harmonics (dBc)	-22.5	-28.83	-29.16	20.5
Phase Noise (dBc/Hz @ 100 kHz)	-98.84	-116.16	-120.00	-124.5
FOM	-181.07	-198.33	-200.33	-203.96

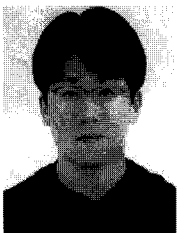
압 제어 발진기를 제안하였다. 사각 형태의 다중 SRR를 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조와 결합한 형태는 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 개선하기 위하여 제안된 다른 형태의 공진기 구조들보다 더 높은 결합 계수 때문에 더 큰 Q값을 얻을 수 있다는 사실을 발견하였다. 다른 형태의 공진기와 비교할 경우, 마이크로스트립 사각 개방 루프 다중 SRR는 더 큰 결합 계수

를 갖으며, 이를 통하여 더 높은 Q값을 만들어 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄였다. 1.7 V의 공급 전력을 갖는 전압 제어 발진기는 주파수 조절 범위, 5.746 ~ 5.84 GHz에서 -124.5 ~ -122 dBc/Hz @ 100 kHz의 위상 잡음 특성을 갖는다. 전압 제어 발진기의 FOM은 동일한 주파수 조절 범위에서 -203.96 ~ -201.6 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 기본적인 마이크로스트립 선로 공진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기, 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용한 전압 제어 발진기와 비교할 경우, 제안된 공진기를 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 각각 25.66 dB, 8.34 dB, 4.5 dB 개선되었다.

참고 문헌

- [1] A. Hajimiri and 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, February 1998.
- [2] S. Im, C. Seo, J. Kim, Y. Kim, N. Kim, "Improvement of microstrip open loop resonator filter using aperture," *IEEE MTT-S International* vol. 3, pp. 1801-1804, June 2002.
- [3] E. Park and C. Seo, "Low Phase Noise Oscillator Using Microstrip square Open Loop Resonator," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, June 2006.
- [4] I. Gil, J. Bonache, J. G. Garcia, and F. Martin, "Tunable Metamaterial Transmission Lines Based on Varactor-Loaded Split-Ring Resonators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 6, June 2006.
- [5] F. Falcone, T. Lopetegi, J. D. Baena, R. Margues, F. Martin, and M. Sorolla, "Effective Negative- ϵ Stopband Microstrip Lines Based on Complementary Split Ring Resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 6, June 2004.
- [6] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martin, R. M. Sillero, F. Falcone, T. Lopetegi, M. A. G. Laso, J. G. Garcia, I. Gil, M. F. Portillo, and M. Sorolla, "Equivalent-Circuit Models for Split-Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 4, April 2005.
- [7] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Couplings of Microstrip Square Open-Loop Resonators for Cross-Coupled Planar Microwave Filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 12, pp. 2099-2109, December 1996.
- [8] F. Bilotti, A. Toscano, and L. Vegni, "Design of Spiral and Multiple Split-Ring Resonators for the Realization of Miniaturized Metamaterial Samples," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 8, August 2007.
- [9] A. Wagemans, "A 3.5 mW 2.5 GHz diversity receiver and a 1.2 mW 3.6 GHz VCO in silicon-on-anything," in *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Tech. Dig.*, pp. 250-251, February 1998.
- [10] 최재원, 이종민, 서철현, "Microstrip Square Open Loop와 Tunable Negative Resistance를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기," *한국전자과학회논문지*, 제17권, 제12호, 1143-1149쪽, 2006년 12월

저자 소개



최재원(학생회원)
2006년 2월 숭실대학교 정보통신
전자공학부 (공학사)
2006년 3월~현재 숭실대학교
정보통신공학과 석사과정
<주관심분야 : 초고주파 회로 설
계, RF Power Amplifier, VCO,
RFIC, RFID, Digital RF 등>

서철현(정회원)
대한전자공학회 논문지
vol. 31, no. 6 참조