

논문 2007-44TC-12-4

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

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

최 재 원*, 서 철 현**

(Jaewon Choi and Chulhun Seo)

요 약

본 논문에서는 마이크로스트립 사각 개방 루프 Split Ring 공진기 (OLSRR)를 이용하여 개선된 전압 제어 발진기를 위상 잡음을 줄이기 위하여 제안하였다. 이 목적을 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프의 형태를 갖는 사각형의 Split Ring 공진기에 대하여 연구하였다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 비교할 경우, 마이크로스트립 사각 개방 루프 Split Ring 공진기는 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 ~ 5.854 GHz에서 -120 ~ -116.5 dBc/Hz @ 100 kHz의 위상 잡음 특성을 갖는다. 이 전압 제어 발진기의 FOM은 같은 주파수 조절 범위에서 -200.33 ~ -197 dBc/Hz @ 100 kHz를 갖는다.

Abstract

In this paper, a novel voltage-controlled oscillator (VCO) using the microstrip square open loop split ring resonator (OLSRR) is presented for reducing the phase noise. For this purpose, the square-shaped split ring resonator (SRR) having the form of the microstrip square open loop is investigated. Compared with the microstrip square open loop resonator, the microstrip square OLSRR 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 -120 ~ -116.5 dBc/Hz @ 100 kHz in the tuning range, 5.746 ~ 5.854 GHz. The figure of merit (FOM) of this VCO is -200.33 ~ -197 dBc/Hz @ 100 kHz in the same tuning range.

Keywords : VCO, Phase Noise, Split Ring Resonator, Microstrip Square Open Loop, 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 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. 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조를 이용한 여파기의 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].

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

※ 이 연구는 2007학년도 송실대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음

접수일자: 2007년11월28일, 수정완료일: 2007년12월12일

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 해결되어져 왔다. 또한 Pendry에 의해서 제안된 기본적인 SRR로부터 고안된 수많은 다른 공진기 구조들은 소형의 협대역 대역 통과 여파기와 단향 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 자체적으로 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].

사각 형태의 SRR를 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조와 결합하여 다른 공진기 구조들보다 더 높은 결합 계수 때문에 더 큰 Q값을 얻을 수 있다는 사실을 발견하였다. 본 논문에는 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용하여 설계된 전압 제어 발진기의 저위상 잡음 특성을 얻을 수 있다는 사실이 최초로 증명되어 졌다.

II. 설계 원리

그림 1. (a)의 결합 구조에서, 두 개의 공진기들의 공통 결합 부분에서의 전계와 자계 분산은 상대적이고, 이 때문에 전계 결합과 자계 결합 중 어느 것도 무시할 수 없다. 그리하여, 이와 같은 경우의 결합을 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 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.

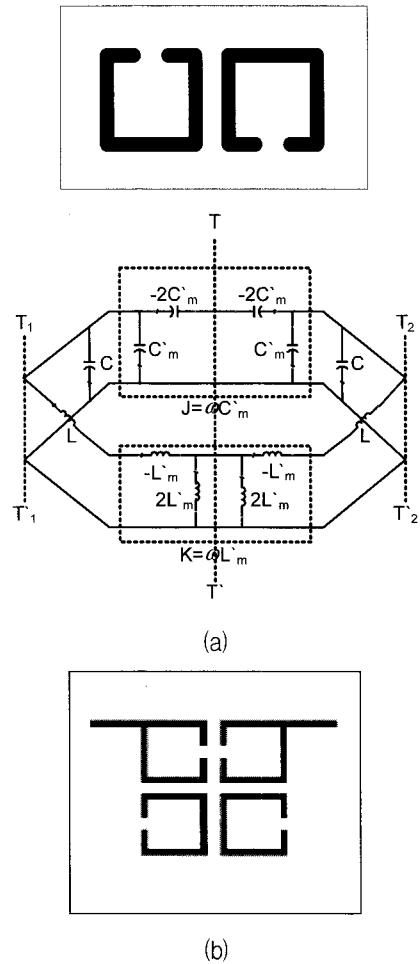


그림 1. (a) 자계 결합과 전계 결합을 나타내기 위한 임피던스 인버터 $K = \omega L'_m$ 과 어드미턴스 인버터 $J = \omega C'_m$ 을 갖는 혼합 결합 구조와 이와 관련된 등가 회로, (b) 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR을 설계하기 위하여 적용된 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기

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 OLSRR.

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

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

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

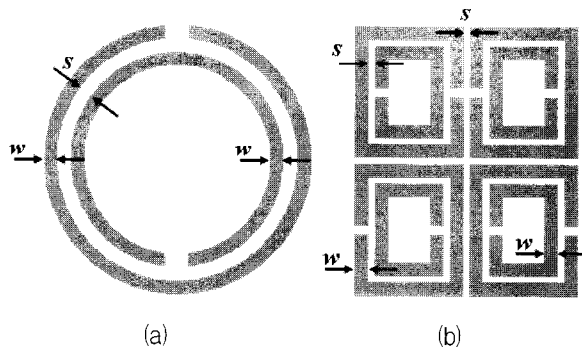


그림 2. (a) Pendry에 의해 제안된 기본적인 SRR구조, (b) 새롭게 제안된 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR구조

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

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 자계 결합과 전계 결합의 중첩으로부터 만들어졌다는 것을 명확히 나타내고 있다^[7].

그림 2는 Pendry에 의해서 최초로 제안된 기본적인 SRR구조와 새롭게 제안된 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR구조를 보여준다. 기본적인 SRR의 주파수 선택 동작은 공진이 발생할 때 원형의 마이크로스트립 부분에 유발된 전류 루프들에 의해서 설명되어질 수 있다. 이 전류 루프들은 동심의 마이크로스트립 원 사이에서 발생한 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, C가 동심의 마이크로스트립 원사이의 끝단 캐패시턴스에 의해 주어지기 때문에, 공진 주파수는 두 원 사이의 간격 (s)이 작아질수록 매우 작아질 수 있다. 기본적인 SRR들의 이러한 주파수 선택 특성들을 기반으로, 높은 결합 계수에 의해 발생하는 높은 Q값 때문에 얻을 수 있는 공진시 높은 제거 특성과 좋은 스킨트 특성을 갖는 마이크로스트립

사각 개방 루프 SRR를 설계할 수 있다^[4].

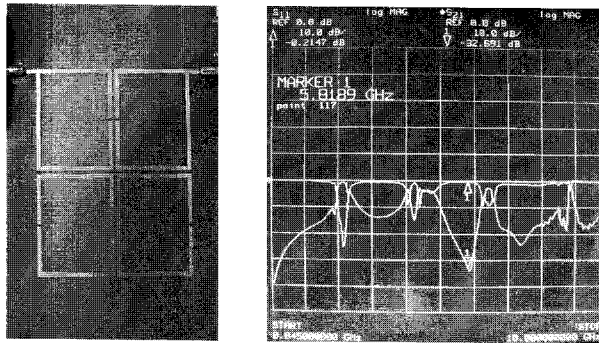
이 결합 구조를 이용하여 발생된 결합은 근접한 지점에서 가장자리 부분에서 발생하는 계를 통하여 이루어진다는 것이 명백하다. 가장자리 계의 특성과 강도는 결합 특성과 강도를 결정한다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR가 개방 갭을 갖는 부분에서 최대의 전계 강도를 갖고, 반대쪽에서 최대의 자계 강도를 갖는다는 사실을 알 수 있다. 또한, 각각의 개방 루프 구조들이 사각 형태의 SRR의 형태를 갖는 구조로 설계되어지는 것을 통하여, 전계와 자계가 더 증가된다. 가장자리 계가 영역의 바깥쪽에서 급속히 감소하는 특성을 갖기 때문에, 가장자리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

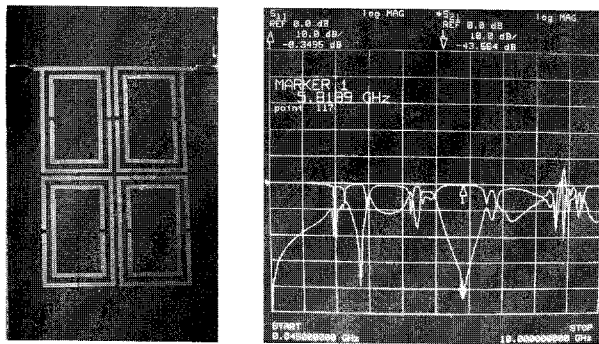
III. 제작 및 실험 결과

1. 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR 설계

마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR의 개선된 특성을 증명하기 위하여, 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 비교하였다. 두 개의 공진기는 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic 기판으로 동일한 제작 과정을 통하여 제작되었다. 그림 3은 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR의 제작된 기판 사진과 측정된 공진 특성들을 보여준다. 실험 결과에서처럼, 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR의 저지 특성은 공진 주파수, 5.8 GHz에서 각각 -32.7 dB와 -43.56 dB이다. 이 결과를 통하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR가 같은 공진 주파수, 5.8 GHz에서 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기보다 더 높은 저지 특성과 더 좋은 스킨트 특성을 갖는다는 확인할 수 있다. 이는 사각 형태의 SRR와 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기사이의 결합이 상호 보완적으로 이루어졌기 때문이고, 그러므로 제안된 공진기는 높은 결합 계수에 의하여 높은 Q값을 얻었다. 또한, 마이크로스트



(a)



(b)

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

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

립 사각 개방 루프 공진기와 비교할 겨우, 사각 형태의 SRR의 동심원사이의 끝단 캐패시턴스에 의해 주어진 등가 캐패시턴스, C가 전체적인 등가 캐패시턴스에 추가되기 때문에, 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR의 크기가 줄어든다.

2. 전압 제어 발진기 설계

마이크로스트립 사각 개방 루프 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. 전압 제어 발진기의 부성 저항은 저위상 잡음을 얻기 위하여 대칭으로 설계되었고, 대역 통과 정합 회로, 세개의 인덕터, 한 개의 캐패시터를 이용하였다. 동작 주파수를 조절하기 위하여 조절 전압이 버랙터 다이오드에 인가될 때, 트랜지스터에 DC 성분이 인가되는 것을

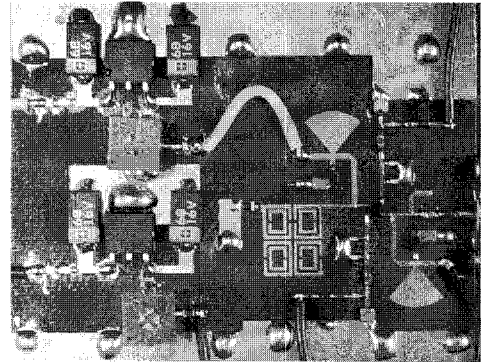
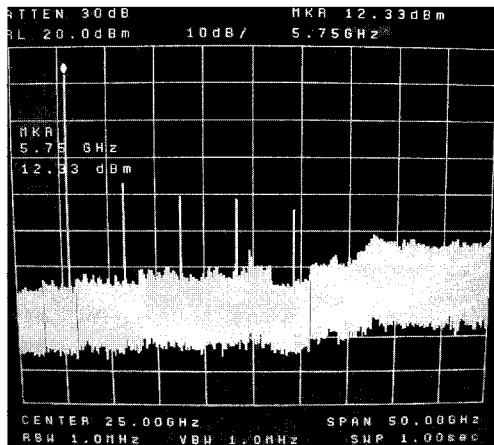


그림 4. 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용하여 제안한 전압 제어 발진기 제작 모습

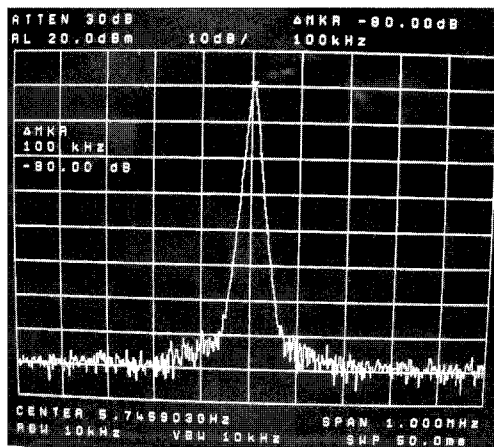
Fig. 4. Fabrications of the proposed VCO using the microstrip square OLSRR.

막기 위하여 작은 캐패시턴스를 갖는 캐패시터를 부성 저항에 연결하였다. 결합 계수는 마이크로스트립 사각 개방 루프들사이의 결합 공간 (s)과 각각의 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조들을 구성하는 내부 원과 외부 원사이의 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 공간 (s)과 각각의 마이크로스트립 사각 개방 루프 구조들을 구성하는 내부 원과 외부 원사이의 간격 (s)은 적절히 조절되어야 한다.

제안된 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 5.746 ~ 5.854 GHz @ 0 ~ 26 V이고, 위상 잡음 특성은 -120 ~ -116.5 dBc/Hz @ 100 kHz이다. 전압 제어 발진기의 출력 전력과 고조파 특성은 각각 12.33 dBm과 -29.16 dBc이다. 컬렉터 전압과 전류는 각각 1.7 V와 18 mA이고, 그래서 소비 전력은 30.6 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 사각 개방 루프 공진기를 이용한 전압 제어 발진기와 비교하였다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 전압 제어 발진기 또한 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic 기판으로 제작되었다. 오프셋 주파수 100 kHz에서 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용하여 제안한 전압 제어 발진기와 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 0 V의 버랙터 다이오드 조절 전압에서 각각 -120 dBc/Hz와 -116.16 dBc/Hz이다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 전압 제어 발진기와 비교하여 줄어든



(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.

위상 잡음은 3.84 dB이다. 그림 6은 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 전압 제어 발진기와 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 버랙터 다이오드 조절 전압 범위가 0 ~ 26 V에서 보여준다.

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^[8]. 제안된 전압 제어 발진기의 FOM은 발진 주파수 5.746 GHz에서 -200.33

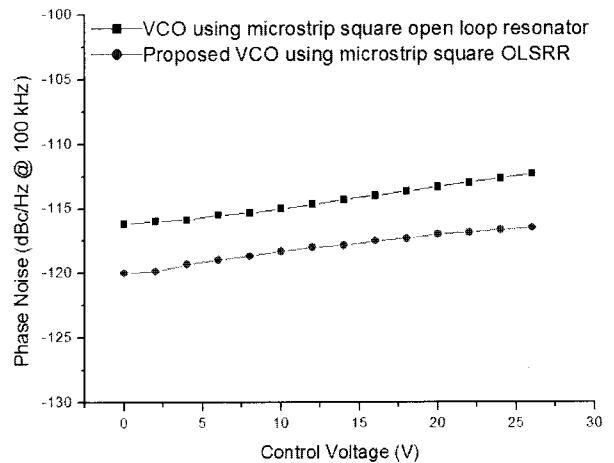


그림 6. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 전압 제어 발진기와 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성 비교

Fig. 6. Comparison of the phase noise property between VCO using the microstrip square open loop resonator and the Proposed VCO using the square-shaped OLSRR.

표 1. 전압 제어 발진기 특성 비교

Table 1. VCO Performance Comparisons.

	Units	[9]	This work
Oscillation Frequency	GHz	5.735	5.746
Output Power	dBm	4.83	12.33
Harmonics	dBc	-28.83	-29.16
Phase Noise	dBc/Hz @ 100 kHz	-116.16	-120.00
Tuning Range	GHz	5.735 ~ 5.845	5.746 ~ 5.854
Power Dissipation	mW	20.4 (1.7Vx12mA)	30.6 (1.7Vx18mA)
FOM	dBc/Hz @ 100 kHz	-198.33	-200.33

dBc/Hz @ 100 kHz이다. FOM은 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 전압 제어 발진기보다 2 dB 개선되었다. 표 1은 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기를 이용한 전압 제어 발진기와의 특성 비교를 나타낸다.

IV. 결론

본 논문에서는 위상 잡음을 줄이기 위하여 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용한 새로운 전압 제

어 발진기를 제안하였다. 사각 형태의 SRR를 마이크로 스트립 사각 개방 루프 구조와 결합하여 다른 공진기 구조들보다 더 높은 결합 계수 때문에 더 큰 Q값을 얻을 수 있다는 사실을 발견하였다. 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 비교할 경우, 마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR는 더 큰 결합 계수를 갖으며, 이를 통하여 더 높은 Q값을 만들어 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄인다. 1.7 V의 공급 전력을 갖는 전압 제어 발진기는 주파수 조절 범위, 5.746 ~ 5.854 GHz에서 -120 ~ -116.5 dBc/Hz @ 100 kHz의 위상 잡음 특성을 갖는다. 전압 제어 발진기의 FOM은 동일한 주파수 조절 범위에서 -200.33~-197 dBc/Hz @ 100 kHz이다.

참 고 문 헌

- [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] 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.
- [9] 최재원, 이종민, 서철현, "Microstrip Square Open Loop와 Tunable Negative Resistance를 이용한 저 위상 잡음 전압 제어 발진기," *한국전자과학회 논문지*, 제17권, 제12호, 1143-1149쪽, 2006년 12월

저 자 소 개

최 재 원(학생회원)
대한전자공학회 논문지
vol. 44, no. 11 참조

서 철 현(정회원)
대한전자공학회 논문지
vol. 31, no. 6 참조