

논문 2007-44TC-11-8

# Varactor-Loaded Split-Ring Resonator(VLSRR) 기반의 가변 Metamaterial 전송 선로를 이용한 광대역 전압 제어 발진기

## (Broadband VCO Using Electronically Controlled Metamaterial Transmission Line Based on Varactor-Loaded Split-Ring Resonator)

최재원\*, 서철현\*\*

(Jaewon Choi and Chulhun Seo)

### 요약

본 논문에서는 varactor-loaded split-ring resonator (VLSRR)를 기반으로 한 가변 metamaterial 전송 선로를 이용한 광대역 전압 제어 발진기를 제안하였다. 우선, 마이크로스트립 라인에 결합된 VLSRR이 주파수 조절 특성을 갖는 metamaterial 전송 선로를 만들 수 있음을 증명하였다. 음의 유효 투자율은 VLSRR에 의해 공진 주파수 상에서 협대역으로 얻어지는데, 비렉터 다이오드들의 연결을 통해 주파수가 조절될 수 있다. 1.8 V의 공급 전압을 갖는 전압 제어 발진기는 주파수 조절 범위 5.407 ~ 5.84 GHz에서 -108.84 ~ -105.5 dBc/Hz @ 100 kHz의 위상 잡음 특성을 얻는다. Power-frequency-tuning-normalized (PFTN)라고 불리는 figure of merit (FOM)은 20.144 dB이다.

### Abstract

In this paper, broadband voltage-controlled oscillator (VCO) using electronically controlled metamaterial transmission line based on varactor-loaded split-ring resonator (VLSRR) is presented. First, it is demonstrated that VLSRR coupled to microstrip line can lead to metamaterial transmission line with tuning capability. The negative effective permeability is provided by the VLSRR in a narrow band above the resonant frequency, which can be bias controlled by virtue of the presence of varactor diodes. The VCO with 1.8 V power supply has phase noise of -108.84 ~ -106.84 dBc/Hz @ 100 kHz in the tuning range, 5.407 ~ 5.84 GHz. The figure of merit (FOM) called power-frequency-tuning-normalized (PFTN) is 20.144 dB.

**Keywords:** broadband VCO, metamaterial, varactor-loaded split-ring resonator, tuning range, phase noise

### I. 서론

최근 몇 년 동안 통신 분야에서 새로운 표준이 만들어지면서 더 많은 주파수 대역에 대한 요구가 증가하고 있다. 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위가 다중대역 주파수 합성기의 가장 중요한 요소 중 하나이기 때문에 다중 대역 전압 제어 발진기의 구현이 큰 관심을

받고 있다<sup>[1]</sup>.

Metamaterial은 주기적인 구조를 통해 자연상에 존재하지 않는 전자기적 특성을 갖도록 만든 인공 구조물이다. Veselago가 자신이 left-handed (LH)라고 명칭한 음의 투자율과 유전율을 동시에 갖는 인공 물질의 전기역학을 1968년에 최초로 연구하였다. Veselago의 left-handed metamaterials (LHMs)에 대한 이론적 분석이 후로, Pendry가 음의 유전율을 갖는 금속 구조물을 소개하였고, 음의 투자율을 갖는 SRR이라는 주기적인 비자기 구조를 개발하였다<sup>[2-4]</sup>.

SRR들은 자계가 원형의 축을 따라서 극성을 갖는 경우, 그것들의 공진 주파수 근처에서 협대역으로 신호 전달을 저지할 수 있는 하부 파장 공진기이다. 이것은

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

※ 이 연구는 2007년도 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 연구되었음

접수일자: 2007년10월10일, 수정완료일: 2007년11월15일

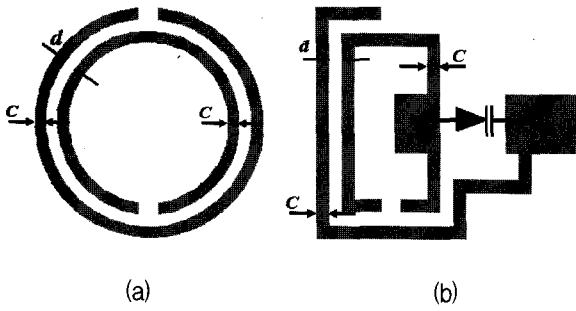


그림 1. (a) 비가변 원형 SRR, (b) 가변 VLSRR

Fig. 1. (a) Untunable circular SRR, (b) Tunable varactor-loaded SRR (VLSRR).

SRR들의 공진 상하에서의 실질적인 투자율의 양과 음의 값들의 결과로 해석되어져 왔다. 이러한 주파수 선택 동작 특성은 공진 시 원형의 링에 인가된 전류 루프들에 의해서 설명될 수 있다. 이 전류 루프들은 중심 원 사이의 분산 캐패시턴스를 통하여 근접해진다. 이것으로부터, SRR들은 자계에 의해 외부적으로 구동될 수 있는 LC 공진부로서 동작될 수 있고, 그러므로 그것들이 적절히 조절된다면 특정한 협대역에서 신호 전달을 저지할 수 있다<sup>[5-7]</sup>.

이전 논문들에서, 버랙터 다이오드가 연결된 SRR들은 SRR기반의 노치 여파기에서 전자적인 조절을 얻을 수 있음을 보여주었다. 이는 가변 캐패시턴스 때문인데, 공진기의 주파수의 특정한 조절을 가능하게 한다. 본 논문에서는, 이러한 VLSRR의 공진 주파수 조절 특성을 이용한 광대역 전압 제어 발진기를 보여준다.

## II. VLSRR 설계

그림 1은 SRR의 두 가지 구조를 보여주는데, (a)는 Pendry에 의해 최초로 제안된 비가변 원형 SRR이고, (b)는 몇몇 저자들에 의해서 제안된 가변 VLSRR이다. 비록 원형 링 사이의 간격 (d)이 내/외부 도체 사이에 버랙터 다이오드를 연결하기 위하여 더 이상 일정하지 않지만, Pendry에 의해 최초로 제안된 구조와 유사하다. 즉, 버랙터 다이오드가 놓여있는 영역의 거리가 증가되었다. 또한, 금속 패드가 용이한 다이오드 바이어싱을 위하여 구조물의 중앙에 추가되었고, 사각형의 링이 마이크로스트립 라인과의 결합을 강화하기 위하여 고려되었다. 이러한 구조의 VLSRR들의 전자기적 동작은 버랙터 다이오드에 의해서 공진 주파수의 특정한 전자적인 조절이 가능하다는 사실외에는 SRR들의 동작 특성과 크게 다르지 않다. 버랙터 다이오드는 내/외부 도

체 사이에 연결되고, 구조물의 오른쪽과 관련된 끝 단 캐패시턴스에 영향을 준다. SRR들과 VLSRR들의 또 다른 차이점은 공진 시 전류 루프들의 발생과 관련 있다. 이 전류들은 내부 링으로 흐르는 자계에 의해 주로 발생되지만, VLSRR들에서의 링들의 전류 발생은 버랙터 다이오드가 놓여있는 내부 링의 영역에 들어가는 자계에 의해서 주로 얻어진다.

등가 캐패시턴스가 중심의 링 사이의 끝 단 캐패시턴스에 의해 주어지기 때문에, 공진 주파수는 링 사이의 간격 (d)을 줄임으로써 작아질 수 있다. 선로와 VLSRR의 결합과 관련하여, VLSRR들은 선로에 의해 발생하는 축의 자계 (inductive coupling) 혹은 선로와 외부 링 사이에서 발생하는 전계 (capacitive coupling)에 의해서 동작된다고 가정한다. 두 가지 결합 모두 선로와 외부 링 사이의 상호 인덕턴스와 끝 단 캐패시턴스로서 적절히 모델링될 수 있다. 그림 1 (b)에서 보는 것처럼 외부 링의 오른쪽은 그 부분을 통해서 흐르는 감지할 수 있는 크기의 전류가 없기 때문에 짧아져 있다. 즉, 전기적 전류는 대부분 버랙터 다이오드에 의해 흡수되어지고, 다이오드 접합부와 구멍을 구성하는 외부링의 일부분을 통하여 전류가 순환하는 것을 막는다.

## III. VLSRR기반의 가변 Metamaterial 전송 선로 설계

SRR들의 주파수 선택 특성들을 통하여, 마이크로스트립 형태의 소형 대역 저지 여파기를 설계하였다. metamaterial 전송 선로의 가변성은 일반적인 SRR들을 VLSRR들로 대체하는 것으로 얻어진다. 이 구조들은 선로와 링 사이의 높은 자계 결합을 얻기 위하여 최적화되고, 이로 인하여 저지 대역에서 높은 저지 특성을 얻는다. 공면 도파관 (CPW) 대역 저지 여파기들에서, SRR들은 접지 면의 선로 아래에 식각되는 반면, 마이크로스트립 구조에서, 도체 선로 근처에 가깝게 위치한 링들은 선로와 링 사이의 결합을 강화하기 위하여 사각 형태로 설계된다.

본 논문에서는 이단 형태로 제작되었다. 그림 2는 가변 metamaterial 전송 선로 배치도를 보여준다. 그림 2 (a)와 (b)는 각각 배치도의 위에서 본 그림과 아래에서 본 그림을 보여준다. 이번 설계에는 그림 1 (b)의 구조가 사용되었고, 전압원의 직렬 저항을 통하여 RF 신호가 접지로 흘러가는 것을 더욱 더 보호하기 위하여 링들과 전압원 사이에 인덕티브 초크들을 배치하였다. 그

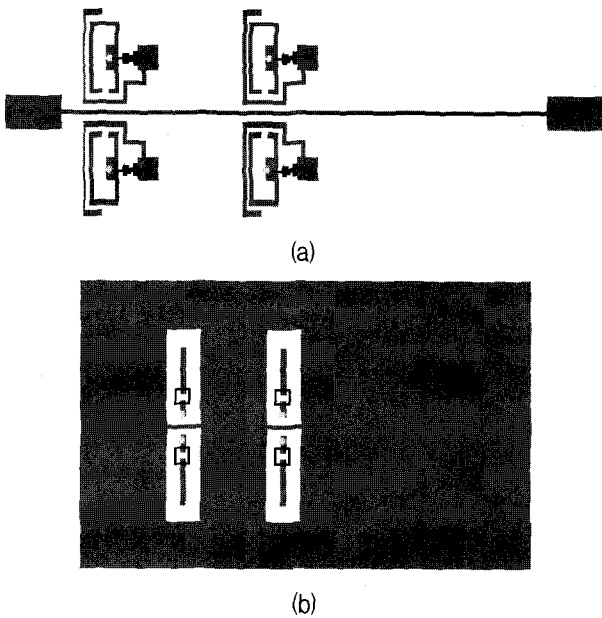


그림 2. 이단 가변 metamaterial 전송 선로 배치도 (a) 위에서 본 그림, (b) 아래에서 본 그림  
 Fig. 2. Layout of the two-stage electronically controlled metamaterial transmission line (a) Top view, (b) Bottom view.

그림 2 (b)에서 보는 것처럼, 네모 상자는 인덕티브 초크들을 나타내고, 흰색 원은 전압원 바이어싱으로써 신호면과 접지면 사이의 연결을 나타낸다. 전압원은 전압을 공급하기 위해서 접지면에 있는 선로의 끝 부분에 인가된다. VLSRR와 관련된 손실의 영향은 이 방법으로 감소된다. 인덕티브 초크로 칩 인덕터를 사용하였다. 설계된 구조는 선로의 양쪽에 배치된 두 쌍의 VLSRR과 함께 50 Ω 마이크로스트립 선로로 구성된다. 가변 metamaterial 전송 선로는 유전율이 3.2이고 두께가 31 mils인 Taconic 기판으로 제작되었다. 여파기의 저지 위치를 전자적으로 조절하기 위하여, M/A-COM사의 MA46H202 버랙터 다이오드들이 비선형 캐패시턴스로서 사용되었다. 이 소자들은 0.6 ~ 7.0 pF @ 0 ~ 26 V의 높은 캐패시턴스 비율을 갖는다. 이 캐패시턴스 범위는 링들의 끝 단 캐패시턴스에 영향을 주고, 그러므로 이번 설계에 적합하다. VLSRR 치수와 관련하여, VLSRR은 5.4 GHz 근처에서 공진이 발생하도록 설계하였다. 링의 폭은 0.2 mm이고, 링 사이의 간격은 VLSRR의 오른쪽을 제외하고 0.2 mm이며, 이 부분의 간격은 버랙터 다이오드가 배치될 수 있도록 충분한 공간으로 늘렸다. 선로와 링들 사이의 결합을 강화하기 위하여, 그 사이의 간격은 가능한 최소화시켰다.

그림 3은 가변 metamaterial 전송 선로의 제작된 기판 모습을 보여주고, 측정된 주파수 특성은 그림 4에

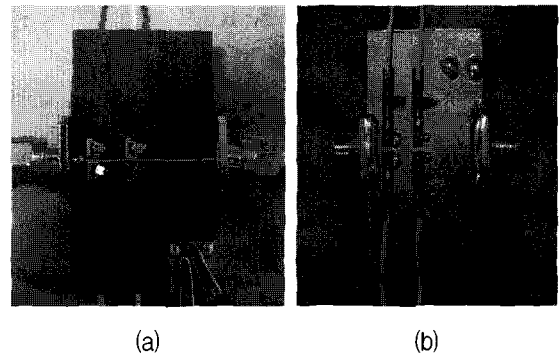


그림 3. 이단 가변 metamaterial 전송 선로 기판 제작 모습 (a) 위에서 본 그림, (b) 아래에서 본 그림  
 Fig. 3. Fabrication of the two-stage electronically controlled metamaterial transmission line (a) Top view, (b) Bottom view.

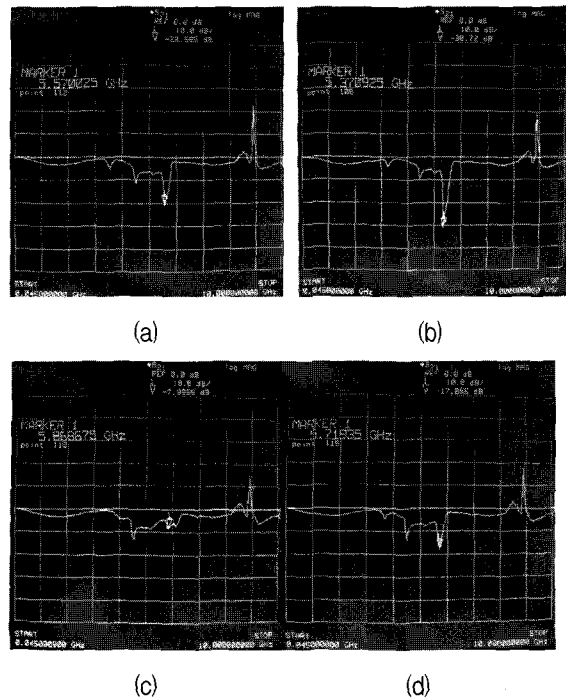


그림 4. 측정된 주파수 응답 (a) 5.37 GHz, (b) 5.57 GHz, (c) 5.72 GHz, (d) 5.87 GHz  
 Fig. 4. Measured frequency response (a) 5.37 GHz, (b) 5.57 GHz, (c) 5.72 GHz, (d) 5.87 GHz.

나와 있다. 예상대로, 가변되는 저지 대역 특성을 얻었다. -31 ~ -8 dB의 저지 특성을 갖는 5.37 ~ 5.87 GHz (약 500 MHz)의 광대역 주파수 조절 범위를 얻었다. 만약 버랙터 다이오드가 없다면, 전류 루프들은 내부 링과 바이어스 패드로 흐르지 못하고, 이 공진은 패드를 갖는 하나의 링과 관련된 것이 된다. 그러나 만약 버랙터 다이오드들이 연결된다면, 전체 전류는 버랙터 다이오드들로 흐르고, VLSRR의 주파수 응답 특성은 줄어들고, 바이어스 조절될 수 있다. 낮은 버랙터 다이

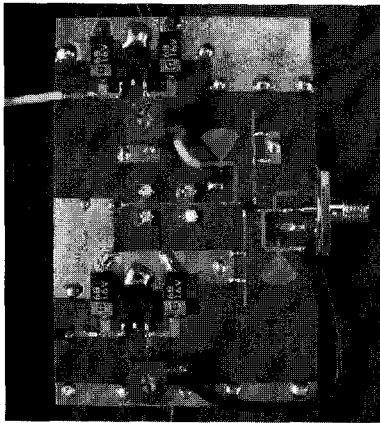


그림 5. 이단의 VLSRR들을 갖는 가변 metamaterial 전송 선로를 이용하여 제안한 광대역 전압 제어 발진기 기판 제작 모습

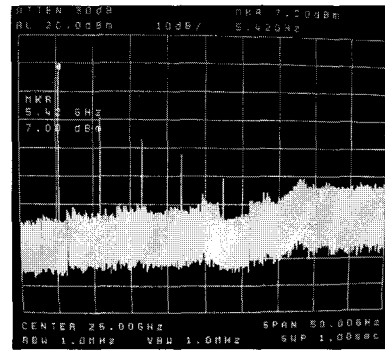
Fig. 5. Fabrication of the proposed broadband VCO using electronically controlled metamaterial transmission line with two-stage VLSSRs.

오드 조절 전압에서, 전체 캐패시턴스에 대한 벡터 다이오드들의 영향은 더 크고, 그 결과 손실의 영향의 늘어난다. 이 사실은 조절 전압이 증가될 때의 저지 특성 감소를 설명한다. 본 실험의 결과는 단지 독립적인 바이어스 조절로 더 많은 VLSRR를 연결하는 것을 통하여 저지 위치를 조절 할 수 있는 가능성 뿐만 아니라, 저지 대역에서의 저지 폭을 전자적으로 강화할 수 있는 가능성 또한 열었다. 만약 네 쌍의 VLSRR을 갖는 가변 metamaterial 전송 선로를 설계한다면, 네 개의 추가된 VLSRR 때문에 저지 대역에서의 저지 특성은 개선되고, 저지 대역에서의 저지 폭과 주파수 조절 범위는 조금 변한다. 이 특성들은 단수에 크게 영향을 받지 않기 때문이다.

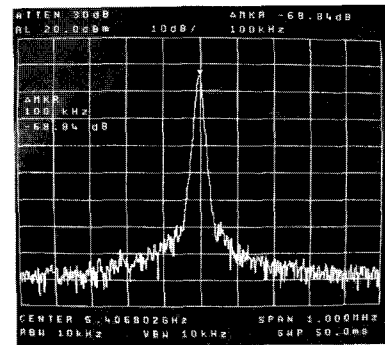
#### IV. 광대역 전압 제어 발진기 설계

가변 metamaterial 전송 선로를 이용하여 제안한 광대역 전압 제어 발진기는 유전율이 3.2이고 기판 두께가 31 mils인 Taconic 기판으로 제작되었고, NEC사의 NE661M04 BJT 소자와 M/A-COM사의 MA46H202 벡터 다이오드를 이용하여 설계하였다. 그림 5는 제안된 전압 제어 발진기의 제작된 기판 모습을 보여준다. 전압 제어 발진기의 부성 저항은 낮은 위상 잡음을 위하여 대칭으로 설계되었고, 대역 통과 정합 회로와 두 개의 인덕터를 이용하였다.

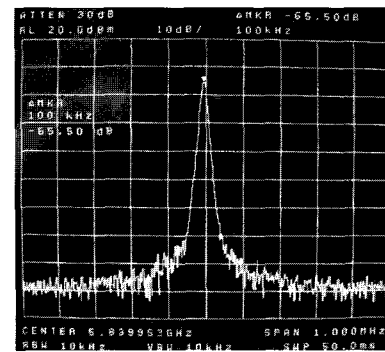
제안된 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 5.407 ~ 5.84 GHz @ 0 ~ 26 V이고 위상 잡음 특성은



(a)



(b)



(c)

그림 6. 측정 결과 (a) 출력 전력 (전체 스펙트럼), (b) 하측 대역 (5.407 GHz)에서의 위상 잡음, (c) 상측 대역 (5.84 GHz)에서의 위상 잡음

Fig. 6. Measured results (a) Output power (full spectrum), (b) Phase noise at lower band (5.407 GHz), (c) Phase noise at upper band (5.84 GHz).

-108.84 ~ -106.84 @ 100 kHz이다. 출력 전력과 고주파 특성은 각각 7.0 dBm과 -16.0 dBc이다. 컬렉터 전압과 전류는 1.8 V와 24 mA이고, 그러므로 소비 전력은 43.2 mW이다. 그림 6은 제안된 전압 제어 발진기의 출력 전력과 하측 대역과 상측 대역에서의 위상 잡음 특성을 보여준다. 주파수 조절 범위의 개선을 증명하기 위하여, 제안된 전압 제어 발진기의 특성들은 일반적인 SRR를 이용한 전압 제어 발진기의 특성들과 비교되었

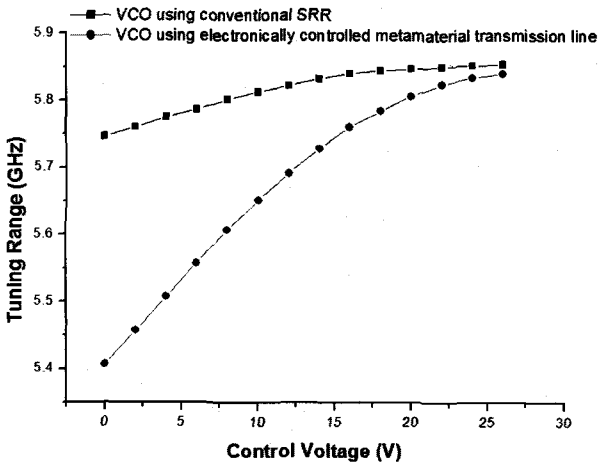


그림 7. 동일한 조절 전압, 0 ~ 26 V에서 제안된 전압 제어 발진기와 일반적인 SRR를 이용한 전압 제어 발진기의 주파수 조절 특성 비교

Fig. 7. Comparison of the tuning range property between the proposed VCO and VCO using conventional SRR in the same control voltage, 0 ~ 26 V.

다. 일반적인 SRR를 이용한 전압 제어 발진기도 또한 유전율이 3.2이고 기판 두께가 31 mils인 Taconic 기판으로 제작되었다. 제안된 전압 제어 발진기와 일반적인 SRR를 이용한 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 동일한 버랙터 다이오드 조절 전압 범위, 0 ~ 26 V에서 각각 -430 MHz (5.407 ~ 5.84 GHz)와 108 MHz (5.746 ~ 5.854 GHz)를 갖는다. 넓어진 주파수 조절 범위는 322 MHz이고 일반적인 SRR를 이용한 전압 제어 발진기보다 4배 넓다. 이러한 두 가지 형태의 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위 특성은 0 ~ 26 V의 동일한 조절 전압에서 그림 7에 나타내었다.

다른 전압 제어 발진기들과의 비교에서 주파수 조절 범위를 고려하기 위하여, power-frequency-tuning-normalized (*PFTN*)라는 figure of merit (*FOM*)을 사용하였다.

$$PFTN = 10 \log \left[ \frac{kT}{P_{sup}} \cdot \left( \frac{f_{tune}}{f_{off}} \right)^2 \right] - L\{f_{off}\} \quad (1)$$

여기서  $L\{f_{off}\}$ 는 캐리어 주파수  $f_o$ 로부터 오프셋  $f_{off}$ 에서의 위상 잡음이고  $P_{sup}$ 은 전압 제어 발진기에서 소모된 전체 dc 전력을 나타낸다.  $f_{tune}$ 은  $f_{max} - f_{min}$ 이다. *PFTN*은 dB로 표현되는 별도의 단위가 없는 *FOM*이다. *PFTN*이 클 수록 더 좋은 전압 제어 발진기이다. 제안된 전압 제어 발진기의 *PFTN*은

20.114 dB이다. 일반적인 SRR를 이용한 전압 제어 발진기와 비교했을 때, *PFTN*은 25.607 dB 개선되었다 [8].

본 논문에서 광대역 전압 제어 발진기를 구현하기 위하여 이단의 VLSRR들을 갖는 가변 metamaterial 전송 선로를 이용하였다. 만약 네 쌍의 VLSRR들을 사용하였다면, 이 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 이단의 VLSRR들을 사용한 것보다 더 낮을 것이라고 예상된다.

### V. 결론

본 논문에서 이단의 VLSRR들을 기반으로 한 가변 metamaterial 전송 선로를 이용한 광대역 전압 제어 발진기를 제안하였다. 마이크로스트립 라인에 결합된 VLSRR은 주파수 조절 특성을 갖는 metamaterial 전송 선로를 만들 수 있다. 음의 유효 투자율은 공진 주파수 상의 협대역에서 VLSRR에 의해 얻을 수 있는데, 버랙터 다이오드들의 연결을 통하여 바이어스 조절될 수 있다. 1.8 V의 공급 전압을 갖는 전압 제어 발진기는 5.407 ~ 5.84 GHz (약 430 MHz)의 주파수 조절 범위에서 -108.84 ~ -106.84 dBc/Hz @ 100 kHz의 위상 잡음 특성을 갖는다. *PFTN*이라는 *FOM*은 20.144 dB이다. 일반적인 SRR를 이용한 전압 제어 발진기와 비교했을 때, 넓어진 주파수 조절 범위는 322 MHz로 네 배이며, *PFTN*은 25.607 dB 개선되었다.

### 참고 문헌

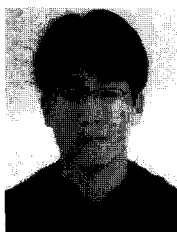
- [1] H. Kim, S. Ryu, Y. Chung, J. Choi, and B. Kim, "A Low Phase-Noise CMOS VCO with Harmonic Tuned LC Tank," IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, vol. 54, no. 7, pp. 2917-2924, July 2006.
- [2] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," Sov. Phys.-Usp., vol. 10, pp. 509-514, January-February 1968.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic microstructures," Phys. Rev. Lett., vol. 76, no. 25, pp. 4773-4776, June 1996.
- [4] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, vol. 47,

- pp. 2075-2084, November 1999.
- [5] 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.
- [6] F. Falcone, T. Lopetegi, J. D. Baena, R. Margues, F. Martin, and M. Sorolla, "Effective Negative- $\epsilon$  Stopband Microstrip Lines Based on Complementary Split Ring Resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 6, June 2004.
- [7] 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.
- [8] D. Ham, A. Hajimiri, "Concepts and Methods in Optimization of Integrated LC VCOs," *IEEE Journal of solid-state circuits*, vol. 36, no. 6, pp. 896-909, June 2001.

---

 저 자 소 개
 

---



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)  
 대한전자공학회논문지  
 vol. 31, no. 6 참조