

# Complimentary Bifilar Archimedean Spiral Resonator(CBASR)를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기

## Low Phase Noise VCO Using Complimentary Bifilar Archimedean Spiral Resonator(CBASR)

이훈성\* · 윤원상\*\*\* · 이경주\* · 한상민\*\*\* · 표성민\* · 김영식\*

Hun-Sung Lee\* · Won-Sang Yoon\*\*\* · Kyoung-Ju Lee\* · Sang-Min Han\*\*\* ·  
Seongmin Pyo\* · Young-Sik Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 complimentary bifilar archimedean spiral resonator(CBASR)를 이용하여 저위상 잡음 특성을 갖는 새로운 구조의 전압 제어 발진기를 제안하였다. CBASR은 작은 면적, 저지대역에서 날카로운 스킨트 특성과 통과대역에서 낮은 삽입 손실, 큰 결합 계수 값을 나타내며, 이로 인해 높은 Q값을 구현할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 CBASR을 공진 회로로 사용하여 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 개선시켰다. 제안된 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 제어 전압 0~5 V에서 2.396~2.502 GHz이며, 출력은 7.5 dBm, 그리고 위상 잡음 특성은 100 kHz offset에서 -119.16~-120.2 dBc/Hz이다.

### Abstract

In this paper, a novel voltage-controlled oscillator(VCO) using the complimentary bifilar archimedean spiral resonator(CBASR) is presented for reducing the phase noise characteristic. A CBASR has compact dimension, a sharp skirt characteristic in stopband, a low insertion loss in passband, and a large coupling coefficient value, which makes a high Q value and improve the phase noise of VCO. The proposed VCO has the oscillation frequency of 2.396~2.502 GHz in the tuning voltage of 0~5 V, the output power of 7.5 dBm and phase noise of -119.16~-120.2 dBc/Hz at the offset frequency of 100 kHz in tuning range.

Key words : VCO, Phase Noise, Complementary Spirial Resonator, Negative Resistance, Q-Factor

### I. 서 론

최근 이동 통신 및 무선 네트워크에 대한 급격한 수요 증가로 무선 통신 시스템이 크게 발전하면서 고주파 부품의 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 RF 시스템에서 주파수원을 공급하는 전압 제어 발진기

는 RF의 핵심 부품 중의 하나로 전압 제어 발진기의 성능 개선의 중요성이 커지고 있다. 전압 제어 발진기의 특성은 출력 특성과 고조파 특성 그리고 위상 잡음 등이 고려된다. 특히 위상 잡음은 발진 성능을 나타내는 중요한 지표 중의 하나으로써, 이러한 위상 잡음은 공진기의 Q값에 영향을 받는 것으로 알려져

「이 연구에 참여한 연구자는 '2단계 BK21사업' 지원비를 받았음.」

\*고려대학교 컴퓨터전파통신공학과(Department of Computer and Radio Communications Engineering, Korea University)

\*\*삼성탈레스 통신연구소(Communication R&D Center, Samsung Thales)

\*\*\*순천향대학교 정보통신공학과(Department of Information & Communication Engineering, Soonchunhyang University)

· 논문 번호 : 20100323-028

· 교신저자 : 김영식(e-mail : yskim@korea.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 5월 6일

있다<sup>[1]</sup>. 하지만 마이크로스트립 라인과 lumped component를 이용한 공진기의 경우 낮은  $Q$ 값 때문에 위상 잡음을 줄이는데 제한이 있다. 따라서,  $Q$ 값을 높이기 위하여 SR(Spiral Resonator), SRR(Split Ring Resonator) 또는 CSRR(Complimentary Split Ring Resonator) 형태의 Metamaterial<sup>[2]</sup> 특성을 갖는 구조들에 대한 연구가 이루어지고 있다<sup>[3]</sup>. 이 형태들의 주요 장점들은 협대역의 대역 통과 특성, 용이한 제작, 낮은 방사 손실, 그리고 높은 주파수 선택도이다. 이러한 장점들은 무선 통신 시스템에 사용되어지는데 있어서 매우 좋은 특성을 갖는다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 위상 잡음 특성을 개선하기 위하여 Spiral 공진기 형태인 Complimentary Bifilar Archimedean Spiral Resonator(CBASR)<sup>[5]</sup> 구조를 이용하여 설계한 전압 제어 발진기를 제안하였다. 그리고 CBASR의 등가 모델을 모의실험과 측정 결과를 비교하였고, 이를 이용하여 전압 제어 발진기를 제작하여 위상 잡음 특성의 모의실험과 측정 결과를 마이크로스트립 라인 공진기를 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성과 비교한 결과를 제시하였다.

## II. CBASR의 구조 및 설계

본 논문에서 제안한 CBASR의 구조를 그림 1에 나타내었다. CBASR은 중간에 gap을 가지는 마이크로스트립 라인 아래의 접지면에 위치한다. 이 CBASR은 접지면에 수직인 방향으로 전계가 걸렸을 때 특정 공진 주파수에서 음의 유전율(negative permittivity)이 나타나며, 이것은 일반적으로 연속성(continuous)을 띤 마이크로스트립 라인의 경우, 대역 저지 특성을 형성한다. 그러나 마이크로스트립 라인이 gap으로 인해 불연속성(discontinuous)을 지닐 경우, 음의 투자율(negative permeability)을 형성하게 된다. 이로 인해 제안된 CBASR 구조는 음의 유전율과 음의 투자율로 인해 대역 저지 특성이 대역 통과 특성으로 바뀌게 된다<sup>[6]</sup>.

그림 2는 그림 1에서 나타낸 단위 셀의 등가 T-회로 모델을 보여준다. Spiral resonator에 적용할 수 있는 이 등가회로 모델은 CSRRs 등가 모델을 기초로 제안하였다<sup>[6]~[8]</sup>. 제안된 CBASR은  $C_r$ 과  $L_r$ 의 캐패시턴스와 인덕턴스의 병렬 결합으로 나타내었고,

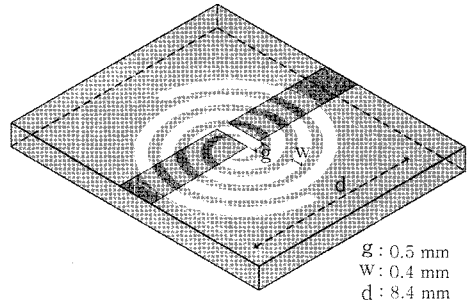


그림 1. CBASR의 레이아웃  
Fig. 1. Layout of a CBASR.

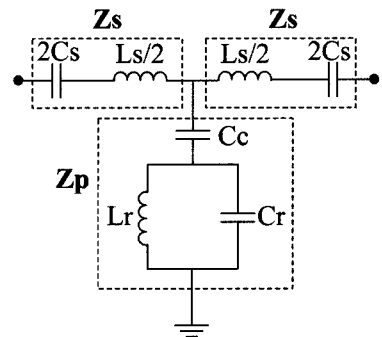


그림 2. CBASR의 등가모델  
Fig. 2. Equivalent-circuit model of the unit cell.

마이크로스트립 라인의 인덕턴스와 직렬 gap의 캐패시턴스는 각각  $L_s$ 와  $C_s$ 로 나타내었다. 그리고 공진기와 마이크로스트립 라인 사이의 전기적 커플링과 마이크로스트립 라인의 병렬 캐패시턴스의 결합은  $C_c$ 로 나타내었다.

이 등가 T-회로 모델의 파라미터는  $Z_s$ 와  $Z_p$ 로 직렬과 병렬 임피던스를 나타낼 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$Z_s = \frac{1}{jw2C_s} + \frac{jwL_s}{2} \quad (1)$$

$$Z_p = \frac{1}{jwC_c} + \frac{\frac{jwL_r}{jwC_r}}{jwL_r + \frac{1}{jwC_r}} \quad (2)$$

이 식에서  $w = 2\pi f$ 이다.

각각 식 (3), (4)는 spiral 공진기의 고유 공진 주파수  $f_0$ 와 zero-transmission 주파수  $f_t$ 를 나타낸다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r \cdot C_r}} \quad (3)$$

$$f_t = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r(C_r + C_s)}} \quad (4)$$

이 식들은 식 (2)에서  $Z_p = \infty$ 와  $Z_p = 0$ 일 때 두 주파수를 얻을 수 있다.

그리고 입력 포트에서 바라보는 임피던스는 출력 포트의 임피던스와  $C_s$ 와  $L_s$ 의 합성으로 이루어지는 리액턴스의 합으로 주어진다. 즉,  $f_t$ 와 zero-reflection 주파수  $f_r$ 의 두 주파수에 따른  $Z_s$ 의 리액턴스 값에 의해 식을 구할 수 있고, 이 식을 식 (1)에서 대입하여 나온 두 식에 의해  $C_s$ 와  $L_s$ 를 유추해 낼 수 있다. 또한 식 (6)은 식 (5)에 의해 주어지는 이 공진기 구조의 dispersion에 의해 나타낼 수 있다.

$$\cos \phi = 1 + \frac{Z_s(j\omega)}{Z_p(j\omega)} \quad (5)$$

이 식에서  $\phi = \beta l$ 은 기본적인 공진기 구조의 위상이다. 그리고  $\phi = \pi/2$ 인 주파수에 관해서  $f_{\pi/2} = \omega_{\pi/2}/2\pi$ 가 되고, 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$Z_s(j\omega_{\pi/2}) = -Z_p(j\omega_{\pi/2}) \quad (6)$$

앞에서 구한 식 (3), (4), (6)을 분석하여 병렬 리액턴스의 세 개 성분의 값을 추측할 수 있다. 그리고 주파수  $f_{\pi/2}$ 는  $f_o$ (upper limit)와  $f_t$ (lower limit) 주파수 영역이 아닌 대역 통과 영역에 존재한다.

그림 1에 나타난 구조의 단위 셀의 등가 T-회로 모델의 파라미터 값들을 위의 식들을 이용하여 구하였다. 그 결과  $L_r = 1.206$  nH,  $C_r = 2.728$  pF,  $L_s = 3.098$  nH,  $C_s = 0.325$  pF,  $C_c = 8.894$  pF의 파라미터 값들을 얻었다. 이 파라미터 값들은 모의실험과 측정을 통해 증명하였다.

그림 3은 제안된 CBASR의 제작된 기판의 윗면과 아랫면을 보여준다. 제안된 CBASR의 전체 크기는  $80 \times 60$  mm<sup>2</sup>이고, 제작을 위해 비유전율( $\epsilon_r$ )이 4.4와 두께가 0.8 mm인 FR-4 기판을 사용하였다. 제작된 CBASR 단위 셀의 길이  $d$ 는 8.4 mm, 마이크로스트립 라인 중앙에 직렬로 갖는 gap의 폭  $g$ 는 0.5 mm이고, bifilar spiral 트랙의 폭  $w$ 는 0.4 mm이다. 그림 4는 등가 T-회로 모델의 파라미터 값들을 이용하여 등가회로 모의실험 결과, EM simulation 결과, 그리고 제작하여 측정한 결과의 S-파라미터를 비교한 것을 나타내었다. 등가 T-회로를 이용한 모의 실험은 Agi-

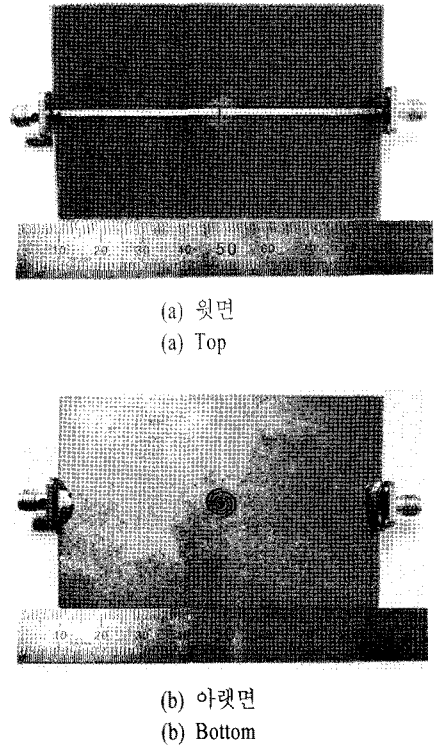


그림 3. 제작된 CBASR  
Fig. 3. The fabrication of the CBASR.

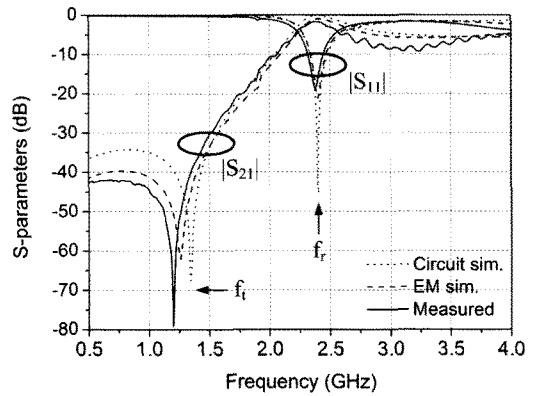


그림 4. CBASR의 등가회로, EM 모의실험, 측정 결과의 S-파라미터 비교  
Fig. 4. Comparison of equivalent circuit, EM simulation and measurement.

lent사의 회로 시뮬레이터인 ADS2008을 이용하여 진행하였다. 그 결과 zero-reflection 주파수  $f_r = 2.4$  GHz, zero-transmission 주파수  $f_t = 1.34$  GHz이고, 삽입 손실(insertion loss)은 0.025 dB, 반사 손실(return loss)은 45.4 dB를 나타냈다. 그리고 EM 모의실험은

표 1. CBASR의 등가회로, EM 모의실험, 측정 결과의 S-파라미터 비교

Table 1. Comparison of equivalent circuit, EM simulation and measurement.

	Circuit sim.	EM sim.	Measurement
$f_r$ (GHz)	2.4	2.41	2.38
$f_t$ (GHz)	1.34	1.26	1.2
삽입 손실 (dB)	0.025	0.9	1.5
반사 손실 (dB)	45.4	21.2	18.8

Ansoft사의 EM 시뮬레이터인 HFSS를 이용하여 진행하였다. 그 결과  $f_r=2.41$  GHz,  $f_t=1.26$  GHz이고, 삽입 손실은 0.9 dB, 반사 손실은 21.2 dB를 나타냈다. 또한 그림 3과 같이 제작한 CBASR을 측정된 결과  $f_r=2.38$  GHz,  $f_t=1.2$  GHz이고, 삽입 손실은 1.5 dB, 반사 손실은 18.8 dB를 나타냈다. 이 S-파라미터 결과를 비교하여 표 1에 나타냈다.

공진기의 Q값을 나타내는 식 (7)에서 W는 저장되는 에너지, P는 손실되는 에너지의 비로 주파수 개념을 적용한 식이다.

$$Q = w \frac{W}{P} \tag{7}$$

CBASR 구조에서 각 라인 사이의 간격이 서로 가까워지면 L,과 C,로 이루어진 상호 커패시턴스와 인덕턴스가 증가하면서 결합계수가 커진다. 또한 커패시턴스와 인덕턴스는 에너지를 저장할 수 있기 때문에 식 (7)에서 분자가 커지면서 Q값이 증가한다. 그 결과 Q값이 증가하면서 날카로운 스킵트 특성을 갖기 때문에 전압 제어 발진기의 위상 잠음 특성을 향상시킬 수 있다.

### III. 전압 제어 발진기 제작 및 실험 결과

그림 5에 트랜지스터를 사용한 일반적인 2단자망 부성 저항 발진기의 모델을 나타내었다. 발진기는 발진 주파수  $w_o$ 에서 불안 정도가 큰 트랜지스터를 이용하고, 소자의 불안 정도를 증가시키기 위해 정제환을 걸어준다. 그리고 발진기가 안정적으로 발진하기 위해서는 아래와 같은 발진 조건을 만족해야 한다<sup>[9]</sup>.

$$|\Gamma_{IN}| > 1 \tag{8}$$

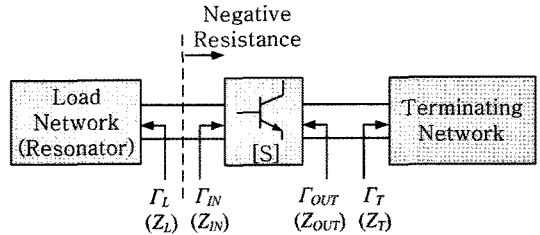


그림 5. 2-포트 발진기 모델  
Fig. 5. Two-port oscillator model.

$$K = \frac{1 + |\Delta| - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2 |S_{12}S_{21}|} < 1 \tag{9}$$

여기서,  $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$ 이다.

$$\Gamma_{IN}\Gamma_L = 1 \tag{10}$$

$$\Gamma_{OUT}\Gamma_T = 1 \tag{11}$$

발진기의 종단회로망을 식 (8)과 같이 설계를 해야 한다. 그리고 식 (9)에서 K는 안정화 계수으로써, 발진을 하기 위해서 발진 주파수에서 안정화 계수는 1보다 작아야 한다. ADS를 이용하여 모의실험 결과, 2.2~2.6 GHz에서 부성 저항이 발생하여 원하는 2.45 GHz 대역에서 사용이 가능함을 확인하였다. 또한 원하는 주파수 대역에서 공진부와 능동 회로 부분의 반사 계수의 곱이 1보다 크고, 위상이 0이 되어 발진이 가능함을 확인하였다.

그림 6은 제안된 전압 제어 발진기의 구조를 나타낸다. 식  $Q=f/3$  dB bandwidth에 의해 단락된  $\lambda/4$  마이크로스트립 라인 공진기와 CBASR을 이용한 공진기의 Q값은 각각 42.98과 85.68로 마이크로스트립 라인 공진기의 Q값이 상대적으로 낮다. 그래서 단락된  $\lambda/4$  마이크로스트립 라인 공진기 대신 CBASR을 사용하여 공진기를 구성하였다. 공진기의 Q값이 높아짐에 따라 좁아지는 주파수 조절 범위를 개선하기 위하여 공진부에 적당한 백래터 다이오드를 연결하여 제어 전압에 따라 커패시턴스를 변화시켜 주파수를 조절하였다. 그리고 발진 조건을 만족하기 위해 트랜지스터를 이용하여 불안정 조건을 만들고, 부성 저항 조건이 발생하도록 케환회로를 구성하였다. 또한 최대전력을 얻기 위해 출력정합회로는 마이크로스트립 라인 개방 스테리브를 이용하였다. 그림 7은 제안된 전압 제어 발진기의 제작된 기판을 나타낸다.

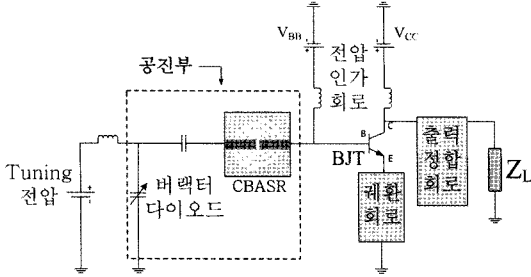
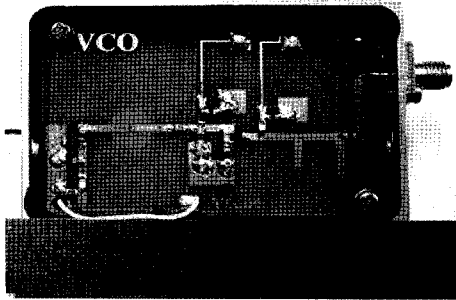
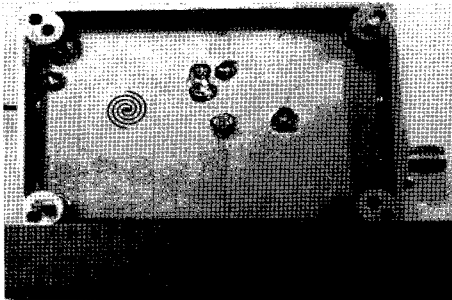


그림 6. 제안된 전압 제어 발진기의 구조  
Fig. 6. Topology of the proposed VCO.



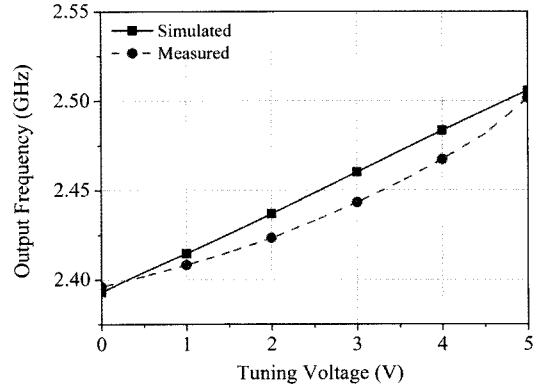
(a) 윗면  
(a) Top



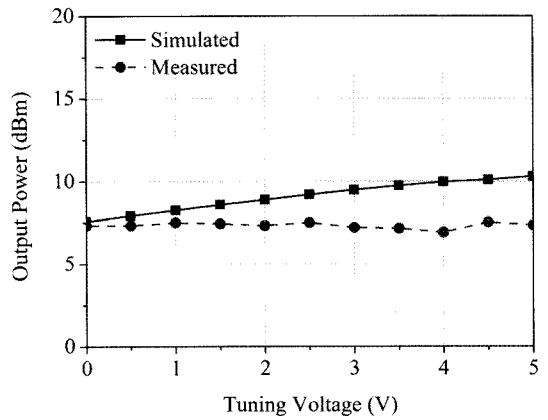
(b) 아랫면  
(b) Bottom

그림 7. 제안된 전압 제어 발진기의 제작 기관  
Fig. 7. The fabrication of the proposed VCO.

제안된 전압 제어 발진기는 전체 크기가  $62 \times 50 \text{ mm}^2$  이고, 비유전율( $\epsilon_r$ )이 4.4, 두께가 0.8 mm인 FR-4를 사용하였다. CBASR은 그림 1에 제시한 레이아웃을 기초로 하여 설계하였고, 저잡음 특성과  $1/f$  잡음이 낮은 Agilent사의 AT-41533 BJT 소자와 0~5 V의 가변 전압에 따라 전체 캐패시턴스가 6.5~1 pF로 변하고, 낮은 등가 잡음 저항을 갖는 Infineon사의 BB837 버랙터 다이오드를 사용하여 제작하였다. 그림 8은 제안된 전압 제어 발진기의 출력 주파수와



(a) 출력 주파수  
(a) Output frequency



(b) 출력 전력  
(b) Output power

그림 8. 제안된 전압 제어 발진기의 모의실험과 측정 결과

Fig. 8. Simulated and measured results of the proposed VCO.

출력 전력을 모의실험과 측정된 결과를 비교하여 나타냈다. 모의실험은 회로 시뮬레이터인 ADS를 사용하였고, CBASR은 EM 시뮬레이터인 HFSS로 S-파라미터를 추출하여 공진부에 연결하였다. 그 결과, 주파수 조절 범위는 2.393~2.506 GHz이고, 출력 전력은 7.57~10.3 dBm인 특성을 얻었다. 그리고 제작한 전압 제어 발진기를 측정된 결과, 주파수 조절 범위는 0~5 V의 제어 전압에 따라 2.396~2.502 GHz로 106 MHz의 넓은 주파수 조절 범위를 얻었다. 그리고 출력 전력은 7.5 dBm으로 일정하였다. 모의 실험과 비교하여 주파수 조절 범위와 출력 전력이 거의 일치하는 결과를 얻었다.

그림 9는 전압 제어 발진기의 고조파 억압 특성을

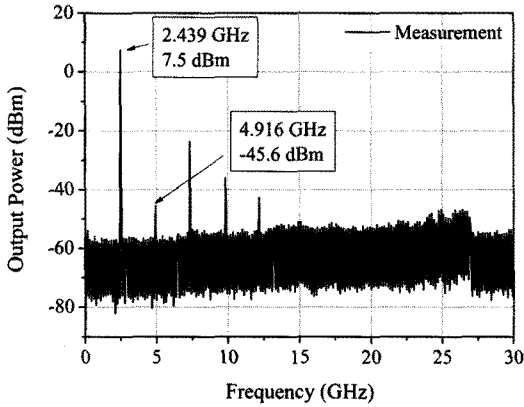


그림 9. 고조파 억압 특성  
Fig. 9. Characteristic of harmonic suppression.

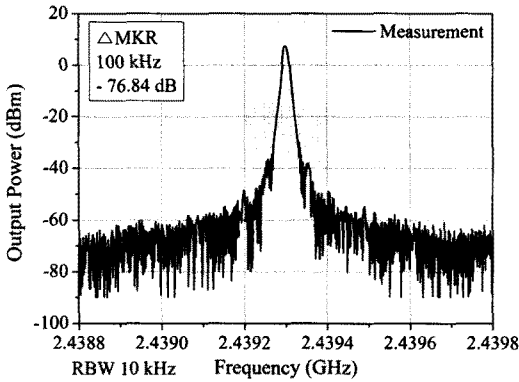


그림 10. 제어 전압이 2.5 V 상태에서 위상 잡음 특성  
Fig. 10. Phase noise at 2.5 V.

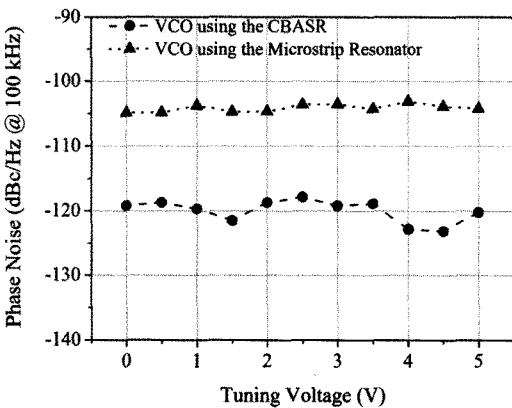


그림 11. 마이크로스트립 라인 공진기를 이용한 전압 제어 발진기와 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성 비교  
Fig. 11. Phase noise comparison of the VCO using the proposed resonator and conventional resonator.

보여준다. 2차 고조파 억압 특성은 53.1 dB이고, 3차 고조파 억압 특성은 23.5 dB를 나타내었다. 그림 10은 제어 전압이 2.5 V일 때 출력 주파수 2.439 GHz의 위상 잡음 특성을 보여준다. RBW가 10 kHz일 때, 100 kHz 오프셋에서 -116.84 dBc/Hz를 나타냈다. 위상 잡음 특성의 개선을 입증하기 위하여 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성과 전체 크기가 62×50 mm<sup>2</sup>인 단락된 λ/4 마이크로스트립 라인 공진기를 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 비교하여 그림 11에 나타내었다. 단락된 λ/4 마이크로스트립 라인 공진기를 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 제어 전압이 0~5 V일 때, 100 kHz 오프셋 주파수에서 -104.89~-104.21 dBc/Hz로 나타났다. 그에 반해 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 제어 전압이 0~5 V일 때, 100 kHz 오프셋 주파수에서 -119.16~-120.2 dBc/Hz를 나타내었다. 그 결과, 마이크로스트립 라인 공진기를 이용한 전압 제어 발진기보다 약 13%의 위상 잡음 특성이 개선되었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 개선시키기 위하여 높은 결합 계수에 의해 높은 Q값을 갖는 CBASR을 이용하여 새로운 구조의 전압 제어 발진기를 제안하였다. 제안된 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 0~5 V의 제어 전압에 따라 2.396~2.502 GHz이고, 출력 전력은 주파수 조절 범위에 따라 7.5 dBm으로 일정하게 나타났다. 그리고 주파수 조절 범위에서 위상 잡음 특성은 100 kHz 오프셋 주파수에서 -119.16~-120.2 dBc/Hz를 얻었다. 그 결과 마이크로스트립 라인 공진기를 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성에 비해 약 13% 개선되었다. 이를 통해 공진기의 Q값이 높아짐에 따라 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성을 개선할 수 있다는 것을 증명하였다.

#### 참 고 문 헌

[1] D. B. Lesson, "A simple model of feedback oscillator noise spectrum", *Proc. IEEE*, vol. 54, no. 2, pp. 426-434, Feb. 1966.

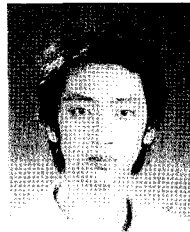
- [2] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterial: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, 1st Ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2006.
- [3] J. Choi, C. Seo, "Microstrip square open-loop multiple split-ring resonator for low phase noise VCO", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 56, no. 12, pp. 3245-3252, Dec. 2008.
- [4] Z. Jiang, P. S. Excell, and Z. M. Hejazi, "Calculation of distributed capacitance of spiral resonators", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 45, no. 1, pp. 139-142, Jan. 1997.
- [5] O. Isik, K. P. Esselle, "Backward wave microstrip lines with complementary spiral resonators", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 10, pp. 3173-3178, Oct. 2008.
- [6] I. Gil, J. Bonache, J. Selga, J. Garcia-Garcia, and F. Martin, "Left-handed and right-handed transmission properties of microstrip lines loaded with complementary split rings resonators", *Microwave and Opt. Tech. Lett.*, vol. 48, no. 12, pp. 2508-2511, Dec. 2006.
- [7] M. Gil, J. Bonache, J. Selga, J. Garcia-Garcia, and F. Martin, "Broadband resonant-type metamaterial transmission lines", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 17, pp. 97-99, Feb. 2007.
- [8] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martin, R. Marques, F. Falcone, T. Lopetegui, M. A. G. Laso, J. Garcia, I. Gil, and M. Sorollar, "Equivalent circuit models for split ring resonators and complementary split ring resonators coupled to planar transmission lines", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 4, pp. 1451-1461, Apr. 2005.
- [9] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd Ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.

이 훈 성



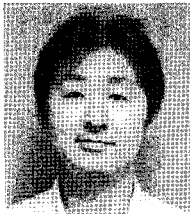
2009년 8월: 고려대학교 전자 및 정보공학부 (공학사)  
 2009년 9월~현재: 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 석사과정  
 [주 관심분야] RF Front-End System, Active & Passive Circuit

이 경 주



2006년 8월: 고려대학교 전파통신공학 (공학사)  
 2009년 2월: 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 (공학석사)  
 2009년 3월~현재: 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 박사과정  
 [주 관심분야] Metamaterial-based RF Circuit, Active/Passive Antennas, Array Antenna and System

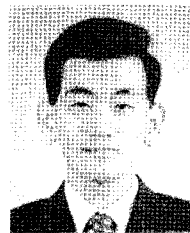
윤 원 상



1997년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)  
 1999년 2월: 고려대학교 통신시스템학과 (공학석사)  
 2007년 8월~현재: 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 박사과정  
 1999년 3월~현재: 삼성탈레스 통신연구소 전문연구원

[주 관심분야] Antennas, Active Components for Wireless System, Microwave & RF Front-End System

한 상 민



1996년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)  
 1998년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2003년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)  
 2003년 10월~2004년 11월: 미국 UC-LA Post-Doctoral Research Fellow

2005년 1월~2007년 8월: 삼성종합기술원 전문연구원  
 2007년 9월~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 조교수  
 [주 관심분야] RF Systems, Low-Power Transceivers, Active Antennas

표 성 민



2002년 2월: 고려대학교 전기전자전  
파공학부 (공학사)

2004년 2월: 고려대학교 전파공학  
과 (공학석사)

2004년 1월~2007년 3월: (주)팬택  
& 큐리텔 내수그룹 중앙연구소  
전임연구원

2007년 3월~2008년 8월: 고려대학교 정보통신기술연구소  
연구원

2008년 9월~현재: 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과  
박사과정

[주 관심분야] Metamaterial-Base RF Circuit, Device and  
System

김 영 식



1978년 3월~1982년 1월: 홍익공업  
대학 전자과 조교수

1988년 5월: University of Massa-  
chssrts at Amherst (공학박사)

1988년 5월~1989년 2월: Univer-  
sity of Massachssrts at Amherst  
(Post Doc.)

1989년 3월~1993년 2월: 한국전자통신연구원 이동통신연  
구단 무선기 술연구실 실장

1993년 3월~현재: 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과  
교수

[주 관심분야] RF Front-End System, Antennas