

# 저주파 잡음이 억압된 5.5 GHz 전압제어발진기

이자열, 배현철, 이상홍, 강진영, 김보우, 오승엽\*

한국전자통신연구원, SiGe 팀  
충남대학교\*  
전화 : 042-860-6363

## A 5.5 GHz VCO with Low-Frequency Noise Suppression

J.Y Lee, B.C.Bae, S.H.Lee, J.Y Kang, B.W.Kim, S.H Oh\*

SiGe Team  
Electronics and Telecommunications Research Institute  
Chungnam National University\*  
E-mail : ljylna@etri.re.kr

### Abstract

In this paper, we describe the design and implementation of the new current-current negative feedback (CCNF) voltage-controlled oscillator (VCO), which suppresses 1/f induced low-frequency noise. By means of the CCNF, the high-frequency noise as well as the low-frequency noise is prevented from being converted into phase noise. The proposed CCNF VCO shows 11-dB reduction in phase noise at 10 kHz offset, compared with the conventional differential VCO. The phase noise of the proposed VCO is -87 dBc/Hz at 10 kHz offset frequency from 5.5-GHz carrier. The proposed VCO consumes 14.0 mA at 2.0 V supply voltage, and shows single-ended output power of -12.0 dBm.

### I. 서론

CDMA, GSM 과 같은 통신방식을 사용하는 이동통신용 무선전화기에서는 고질의 국부발진기가 요구된다. 그래서 국부 발진기의 핵심부품인 전압제어발진기의 위상잡음을 개선하기 위한 회로가 많이 개발되었다. 실리콘 공정을 사용하는 LC-tank 차동형 전압제어발진기에서 주요 잡음원은 전류원과 스위칭

소자로부터 발생된다. 이러한 능동소자로부터 발생한 잡음은 스위칭 소자의 비선형성에 의해서 발진기의 위상잡음으로 변환된다. 능동소자로부터 발생한 잡음은 고주파 잡음과 저주파 잡음으로 나뉘어 진다. 고주파 잡음은 발진주파수의 하모닉 성분의 열잡음을 말하며, 짝수차 하모닉 주파수 주위의 열잡음이 위상잡음에 많은 영향을 미친다. 특히, 소자의 1/f잡음과 같은 저주파 잡음이 주로 위상잡음으로 변환된다. 그래서 저주파 피드백 회로를 사용해서 저주파 잡음을 억압하는 전압제어발진기 회로가 많이 연구되고 있다 [1][2][3][4].

발진기의 전류원으로부터 모든 짝수차 고조파주위의 열잡음이 위상잡음으로 하향 변환되는 것을 방지하기 위해 LC 저주파 필터가 컬렉터로부터 접지면으로 연결된다[2].

FET 증폭기를 사용한 발진기 회로에서, 저주파 부궤환 방법을 사용해서 FET 의 저주파 잡음원으로부터 FET 입력단으로 유기되는 잡음 전압을 근본적으로 차단하면서, 저주파 잡음원 과 FET 증폭기 사이의 상호작용을 억제시킨다. 따라서, FET 의 비선형성에 의해서 잡음이 위상잡음으로 변환되는 크기가 줄어들게 되어서 위상잡음이 개선된다[1][3][4].

본 논문에서는 current-current negative feedback network(CCNF)를 사용해서 발진기의 저주파 및 고주파

잡음을 줄였다. 본 논문의 발진기 회로에서 CCNF 회로는 저주파 잡음을 샘플링해서 부궤환 시킴으로써 저주파 잡음원을 줄이는 역할을 한다. 제작된 전압제어발진기의 위상잡음은 10 kHz 오프셋 주파수에서 -87 dBc/Hz로 11-dB 개선되었다.

## II. CCNF VCO 설계

그림 1에 본 논문에서 제안한 CCNF 발진기 회로가 나타나있다.  $Q_1$ 의 베이스-에미터 커패시턴스와  $C_r$ 에 의해 정궤환이 발생하므로, CCNF 발진기는 콜피츠형 발진기이다. 그림 1의 왼편의 콜피츠 발진기는  $Q_1$ , 저주파 잡음 샘플링 저항  $R_r$ , 고주파 궤환 커패시터  $C_r$ , 궤환 증폭기  $Q_3$ 로 구성된다. 차동형 발진기 구조를 형성하기 위해 같은 구조의 콜피츠 발진기가 LC-tank 공진기를 통해서 오른쪽에 대칭으로 연결되어있다. 그림 1의 CCNF 발진기회로에서,  $Q_1$ 의 에미터 전류가  $R_r$ 에 의해 샘플링되어서  $Q_3$ 의 베이스단으로 주입된다. 즉, 출력전류가 샘플링되어  $Q_3$ 를 통해서  $Q_1$ 의 입력으로 다시 궤환되는 전류-전류 부궤환(CCNF) 구조가 된다[5].

이와 같이 전류-전류 부궤환에 의해서,  $Q_1$ 의 베이스단의 저주파 잡음원에 의해  $Q_1$ 의 베이스입력으로 유기되는 베이스 잡음전압이 루프이득만큼 줄어든다. 또한, CCNF 구조에 의해서 출력 임피던스가 루프이득만큼 상승하기 때문에  $Q_1$ 의 전류원으로부터 나오는 저주파 잡음이  $Q_1$ 을 통해서 공진기로 주입되는 않는다.

고주파 피드백 커패시터  $C_r$ 는 기본과 주파수에서 정궤환을 일으키면서 짝수차 하모닉주위의 고주파 잡음과 고차 하모닉 성분을 접지면으로 단락시키는 역할을 한다.  $Q_3$ 는 저주파 잡음 전압을 증폭시킴으로써  $Q_1$ 의 베이스입력으로 주입되는 잡음전압을 더욱 억압시킨다.

그림 2는 CCNF 발진기의 저주파 등가회로모델을 나타낸다.  $Q_3$ 의 소신호 등가회로가 그림 2의 점선으로 표시된다.

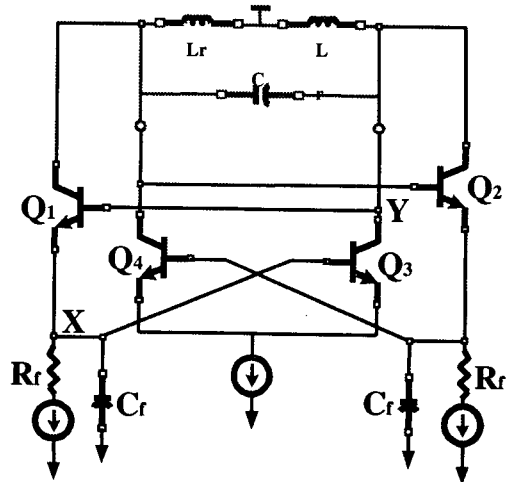


그림 1. CCNF 차동형 발진기 회로도

그림 2에서,  $r_b$ 는  $Q_3$ 의 베이스 분포저항과 접촉저항을 나타내며,  $r_i$ 는 베이스-에미터 다이오드의 순바이어스 저항을 나타낸다.  $Q_1$ 의 베이스단에 연결된 저주파 잡음원  $v_{nf}$ 에 의해서  $Q_1$ 의 베이스 입력잡음전압  $v_{nb}$ 가 발생된다. 베이스 입력 잡음전압  $v_{nb}$ 이  $Q_1$ 의 비선형성에 의해서 발진주파수주위의 위상잡음으로 변환된다. 따라서 본 논문에서는  $Q_1$ 의 베이스 입력 잡음전압  $v_{nb}$ 를 전류-전류 부궤환을 이용해서 식 (1)과 같이 줄였다. 식(1)을 보면  $Q_1$ 과  $Q_3$ 의 이득이 무한대로 접근하게 되면  $v_{nb}$ 는 아주 작아져서 능동소자의 비선형성에 의해 변환되는 위상잡음의 양이 줄어들게 된다 [3].

$$v_{nb} = \frac{v_{nf}}{1 + A_{v1} + \frac{A_{v1}A_{v3}r_i}{r_b + r_i}} \quad (1)$$

위 수식에서,  $A_{v1}$ 은  $Q_1$ 의 전압이득,  $A_{v3}$ 는  $Q_3$ 의 전압이득을 나타낸다. 또한, 전류-전류 부궤환에 의해  $Q_1$ 의 에미터를 바라본 출력 임피던스가 루프이득 만큼 증가해서 전류원으로부터 발생된 저주파 잡음이  $Q_1$ 으로 침투하는 것이 방지된다.

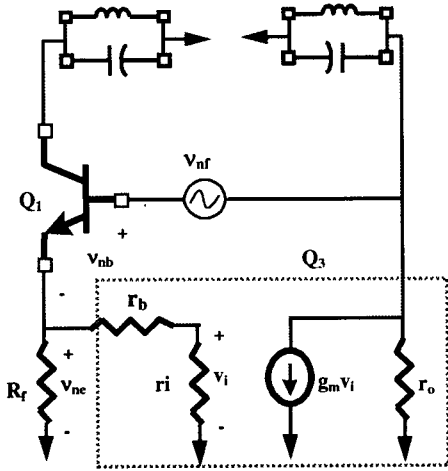


그림 2. 저주파 등가회로 모델

그림 3 은 근사적인 고주파 소신호 등가회로를 나타낸다. 그림 3 의 소신호 등가회로는 부성 저항을 발생시키는 능동회로 부분만을 나타낸다. 그림 3 의 입력 임피던스를 구해보면 식 (2)와 같다.

$$Z_{in} = \frac{V_y}{I_y} = \frac{g_{m1} + j\omega C_1}{g_{m1}g_{m2} - \omega^2 C_1 C_1} \approx -\frac{g_{m1}}{\omega^2 C_1 C_1} - j\frac{1}{\omega C_1} \quad (2)$$

위 식에서  $C_1$  는  $C_f$  와  $C_3$  의 병렬연결을 나타내고, 고주파에서  $g_{m1}g_{m2} \ll \omega^2 C_1 C_1$  라고 가정할 경우, 식 (2)와 같다. 식(2) 부성 저항부에  $C_f$  가 포함되어 있으므로, 부성저항의 크기가  $C_f$  를 조정함으로써 조절된다. 모의 실험한 입력 임피던스가 그림 4 에 제시된다. 주파수가 상승함에 따라 부성저항의 크기가 커지면서 어느 주파수 지점에 이르면 최대값을 가지다가 다시 주파수가 상승함에 따라 부성저항의 크기가 줄어든다. 이와 같이 수식 (2)가 모의 실험결과와 일치하지 못한 것은 근사화에 기인한다. 또한, 수식 (2)와 모의실험에 의하면 부성 저항은  $C_f$  가 증가함에 따라서 커진다는 것을 알 수 있다.

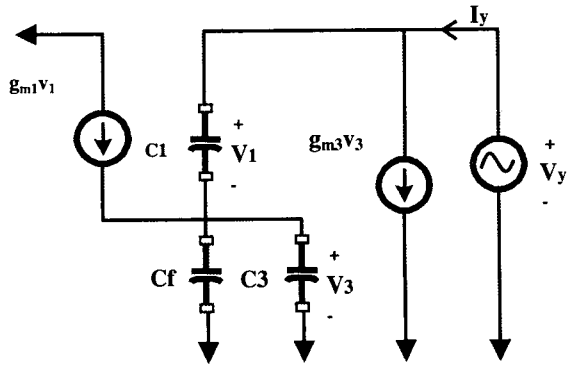


그림 3. 고주파 등가회로 모델

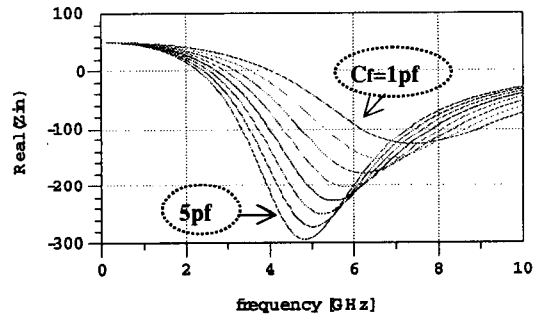


그림 4. 모의 실험한 부성 저항 그래프

### III. 측정결과

본 논문에서는 CCNF 발진기의 위상잡음이 기존의 차동형 LC-tank 발진기의 위상잡음보다 개선된 것을 검증하기 위해 일반적으로 많이 쓰이는 차동형 발진기를 제작하였다. 본 논문에서 제작된 두 개의 전압제어발진기는 5.5 GHz 대역에서 동작하도록 설계하였다. 그림 5 는 기존의 차동형 VCO 와 CCNF VCO 의 칩 사진을 나타낸다. 칩 크기는 각각 1.0 mm × 0.8 mm, 0.7 mm × 0.7 mm 이다. 그림 6 은 측정된 두 발진기의 위상잡음을 비교한 그래프이다. CCNF VCO 의 위상잡음이 5.5-GHz 발진주파수로부터 300 kHz 오프셋 주파수에서 최대 11 dB 개선되었다. 표 1 은 그림 5 의 VCO 의 측정된 DC 및 RF 특성을 비교한 데이터이다.

CCNF VCO의 FOM이 12dB 더 크게 개선되었다.

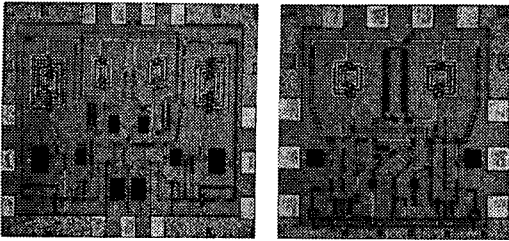


그림 5. 제작된 VCO의 사진

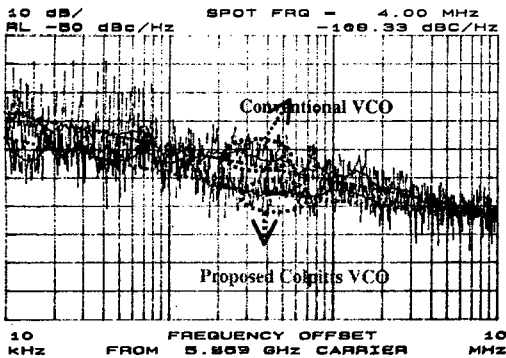


그림 6. 측정된 VCO의 위상잡음

표 1. 일반형 VCO와 CCNF VCO의 성능지수

VCO type Parameters	Conventional VCO	Proposed Colpitts VCO
$V_{cc}$ [V]	2.5	2.0
$I_{total}$ [mA]	13.5	14
$P_{out}$ [dBm]	-10.6	-12
Tuning Range [MHz]	5380 ~ 5520	5410 ~ 5540
Harmonics [dBc]	< -23	< -27
Phase Noise [dBc/Hz]	-77 @ 10 kHz	-87 @ 10 kHz
Phase Noise [dBc/Hz]	-89 @ 100 kHz	-98 @ 100 kHz
Phase Noise [dBc/Hz]	-94 @ 300 kHz	-105 @ 300 kHz
Phase Noise [dBc/Hz]	-102 @ 1 MHz	-108 @ 1 MHz
Phase Noise [dBc/Hz]	-109 @ 4 MHz	-110 @ 4 MHz
Figure of Merit (FOM) [dB]	174	186

#### IV. 결론

본 논문에서는 기존의 차동형 전압제어발진기의 위상잡음을 개선하기 위해 CCNF VCO가 제안되었다. 제안된 CCNF

VCO의 위상잡음은 저주파 부궤환 회로를 사용해서 감소되었다. CCNF VCO의 위상잡음은 기존의 차동형 VCO의 위상잡음보다 11 dB 개선되었으며, 고조파 성분은  $C_f$ 에 의해 4 dB 더 억압되었다. 본 논문에서 제시한 전압제어발진기는 0.8  $\mu\text{m}$  SiGe 공정을 사용해서 제작되었다.

#### References

- [1] M. Borremans, et. al., "Phase noise up-conversion reduction for integrated CMOS VCO", Electronics Letters, Vol. 36, no. 10, p 857-858, 11<sup>th</sup> May, 2000.
- [2] Emad Hegazi, et al., "A Filtering Technique to Lower LC Oscillator Phase Noise", IEEE JSSC, Vol.36, no.12, pp.1921-1930, December, 2001
- [3] M. Prigent, et al., "Phase Noise Reduction in FET Oscillators by Low-Frequency Loading and Feedback Circuitry Optimization", IEEE Trans. MTT, Vol. 35, no. 3, pp.349-352, March, 1987
- [4] Ulrich L. Rohde, "Requirements for High Performance RF/UHF ICs and Possible Solutions", IEEE RFIC, Vol. 35, no. 3, pp.13-17, 2002
- [5] Ja-Yol Lee, et al., "An 1.8 GHz Voltage-Controlled Oscillator using current-current negative feedback network", 6<sup>th</sup>, EcWT, pp.113-116, September, 2003