

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2024.24.2.139>
IIIBC 2024-2-21

작은 K_{vco} 게인을 위한 직렬 바랙터와 병렬 캐패시터 뱅크를 이용한 CMOS 5GHz VCO 설계

A Design of CMOS 5GHz VCO using Series Varactor and Parallel Capacitor Banks for Small K_{vco} Gain

이미영*

Mi-Young Lee*

요 약 본 논문에서는 VCO 이득(K_{vco}) 변화가 작은 현대 무선 통신 시스템의 핵심 구성 요소 중 하나인 전압 제어 발진기(VCO)의 설계를 제시하였다. 기존의 큰 K_{vco} 변화를 보상하기 위해 병렬 커패시터 뱅크 어레이가 있는 기존 LC-탱크에 직렬 배랙터 뱅크가 추가되었다. 또한 넓은 튜닝 범위를 유지하면서 우수한 위상 잡음 성능을 달성하기 위해 혼합 거친/미세 튜닝 방식(직렬 배랙터 어레이 및 병렬 커패시터 어레이)이 선택되었다. 스위치드 배랙터 어레이 뱅크는 추가 디지털 회로 없이 스위치드 커패시터 어레이에 대해 동일한 디지털 코드에 의해 제어됩니다. 1.2V의 낮은 전압에서 사용하기 위해 본 논문에서 제안된 전류 참조 회로는 공통 게이트를 보다 안전하게 제거한 안전성을 위해 전류 참조 회로를 사용하였다. TSMC 0.13 μm CMOS RF 기술로 구현된 제안된 VCO는 9.6% 미만의 K_{vco} (VCO 이득) 변화로 4.4GHz에서 5.3GHz로 조정할 수 있다. 1.2V 공급에서 3.1mA를 소비하는 동안 VCO는 5.3GHz의 반송파에서 오프셋 1MHz에서 -120dBc/Hz 위상 잡음을 갖을 수 있었다.

Abstract This paper presents the design of a voltage controlled oscillator (VCO) which is one of the key building blocks in modern wireless communication systems with small VCO gain (K_{vco}) variation. To compensate conventional large K_{vco} variation, a series varactor bank has been added to the conventional LC-tank with parallel capacitor bank array. And also, in order to achieve excellent phase noise performance while maintaining wide tuning range, a mixed coarse/fine tuning scheme(series varactor array and parallel capacitor array) is chosen. The switched varactor array bank is controlled by the same digital code for switched capacitor array without additional digital circuits. For use at a low voltage of 1.2V, the proposed current reference circuit in this paper used a current reference circuit for safety with the common gate removed more safely. Implemented in a TSMC 0.13 μm CMOS RF technology, the proposed VCO can be tuned from 4.4GH to 5.3GHz with the K_{vco} (VCO gain) variation of less than 9.6%. While consuming 3.1mA from a 1.2V supply, the VCO has -120dBc/Hz phase noise at 1MHz offset from the carrier of the 5.3 GHz.

Key Words : CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), VCO(Voltage controlled oscillator), AMOS(Accumulation MOS) varactor, Series varactor array bank, safety

*정회원, 한남대학교 전기전자공학과
접수일자 2024년 1월 15일, 수정완료 2024년 3월 15일
게재확정일자 2024년 4월 5일

Received: 15 January, 2024 / Revised: 15 March, 2024 /
Accepted: 5 April, 2024

*Corresponding Author: aphro95@hanmail.net

Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Hannam
University, Korea

I. 서 론

기존 구조의 VCO 이득(Kvco)은 전체 튜닝 범위에 걸쳐 가변적이어서 위상 잡음을 증가시키지만 VCO의 튜닝 범위를 넓히는 데 유용하며, 본질적으로 비선형적인 특성은 VCO 및 위상 고정 루프의 위상 잡음 성능을 저하시킨다[1,2]. 이러한 광대역 주파수 범위를 커버하기 위해 스위칭 커패시터 어레이는 일반적으로 LC 전압 제어 발진기(VCO)에서 낮은 VCO 튜닝 이득(Kvco)으로 튜닝 범위를 확장하는 데 사용되므로 위상 잡음 성능이 저하되는 것을 피할 수 있다. 낮은 위상 잡음의 경우 가능한 작은 Kvco를 갖는 것이 바람직하지만, 작은 Kvco는 좁은 주파수 잠금 범위를 의미한다. 작은 Kvco로 주파수 잠금 범위를 확장하기 위해 LC-탱크 VCO는 스위칭 가능한 커패시터 뱅크[3-8]를 채택할 수 있다. LC-탱크 VCO의 진동 주파수는 다음과 같이 주어진다.

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_v + C_{Cap.bank})}} \quad (1)$$

여기서 Cv와 CCap.bank는 각각 바랙터와 스위처블 커패시터 뱅크의 커패시턴스를 의미한다. 발진 주파수 fosc는 CCap.bank에 의해 대충 제어되고 Cv에 의해 미세 조정되며 값은 Vtune에 의해 결정되도록 하였다. VCO 이득 Kvco는 식 (2)에 의해 주어진 것처럼 유도될 수 있다.

$$K_{VCO} = \frac{\partial f_{osc}}{\partial V_{tune}} = -\frac{1}{4\pi\sqrt{L(C_v + C_{Cap.bank})^{1.5}}} \cdot \frac{\partial C_v}{\partial V_{tune}} \quad (2)$$

위의 식에서 Kvco가 스위치드 커패시터 뱅크의 정전 용량 CCap.bank의 강함수임을 쉽게 알 수 있으므로 LC-탱크 VCO를 채용한 PLL의 루프 특성은 PLL의 동작 주파수의 함수인 CCap.bank의 값에 따라 변화하게 된다. 그러면, Kvco의 변화로 인해 PLL의 루프 특성을 전체 동작 주파수 범위에 최적화할 수 없게 된다[9-11]. 이러한 문제는 주파수 튜닝 범위가 넓을 필요가 있을 때 더욱 심각해진다. 주파수 튜닝 범위가 넓을 경우 CCap.bank의 최소값과 최대값의 차이가 크므로 주파수 튜닝 범위와 VCO 이득 변화 사이에 상충 관계가 있어야 한다. 본 논문에서는 VCO 이득 변화를 최소화하는 직렬-변액기 병렬 커패시터 뱅크 구조(Series-Varactor-parallel capacitor bank structure)를 제안하였다. 2절에서는 AMOS varactor와 제안된 VCO 회로, 3절에서는 안전

진류 기준 회로에 대해 설명한다. 0.13μm CMOS 기술로 구현된 VCO에 대한 측정은 4절에 제시되어 있고 5절 결론으로 마무리를 하였다.

II. 본문(Background of AMOS and VCO)

1. AMOS(Accumulation MOS) Varactor

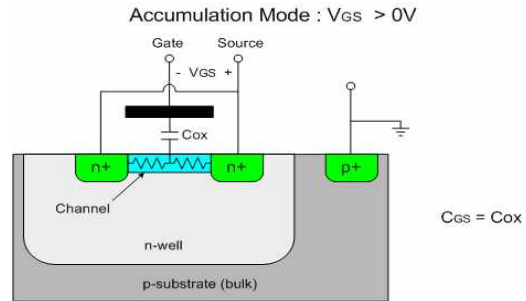


그림 1. AMOS 바랙터 구조와 동작
Fig. 1. AMOS varactor structure and operation

누적 MOS(AMOS) 바랙터는 VCO 바랙터에 대한 대중적인 선택이었고, 많은 VCO 회로에서 사용되어 왔다 [9-15]. AMOS 바랙터는 누적, 공핍, 반전의 세 가지 동작 모드를 가지고 있으며 이 장치의 용량은 동작 모드에 따라 다르다. 제안된 VCO 설계에는 드레인, 소스 및 벌크(S = D = B) 구성을 가진 nMOS 기반 바랙터가 사용된다. dc 튜닝 전압(Vtune)은 nMOS 바랙터의 게이트에서 인가되고 가변 용량이 달성된다 nMOS 바랙터의 정전용량은 식 (3)을 사용하여 달성할 수 있다.

$$C_v = C_{ox} \times W \cdot L \cdot nf \quad (3)$$

여기서 Cox는 산화 캐패시턴스, W는 폭, L은 활성 장치의 길이, nf(number of finger)는 손가락 수[14]를 나타낸다.

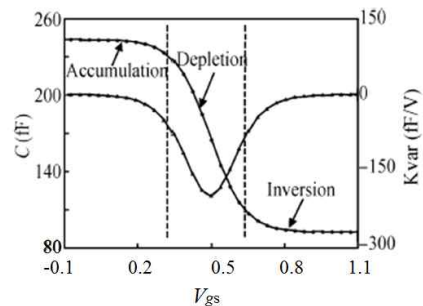
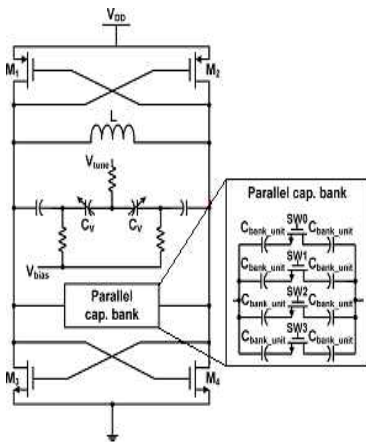


그림 2. AMOS 바랙터의 캐패시터 전압특성
Fig. 2. Capacitor-Varactor characteristic of AMOS varactor

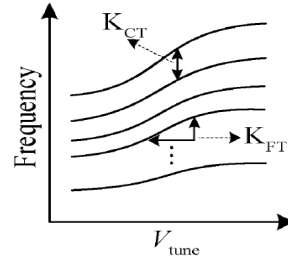
AMOS 커패시터의 구조와 동작은 Fig. 1과 같으며, C-V 특성은 Fig. 2와 같다. 게이트 전극이 양 끝에서 바이어스 될 때 AMOS는 축적 모드로 동작하며, 바랙터 CV,max는 Cmax를 나타내며, 게이트 전극이 음이 됨에 따라 공핍 영역이 형성되며, 바랙터 CV,min는 Cmin을 나타낸다. AMOS 바랙터는 튜닝 범위가 넓어지고 기생 저항이 낮으며, AMOS 바랙터를 채택한 VCO는 낮은 전력 소산과 낮은 위상 잡음을 나타냄을 알 수 있다. AMOS 바랙터의 C-V 특성은 좋은 조절비(Cmax=Cmin)를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 C-V 곡선은 비선형성이 높은 특성을 가지므로 튜닝 범위 전체에서 Kvar가 일정하지 않으며, 선형성에서 멀어질수록 저주파 잡음을 위상 잡음으로 변환한다[10]. □

2. Voltage-Controlled Oscillator with small VCO gain variation

Fig. 3에 도시된 종래의 LC-탱크 VCO는 바랙터에 병렬로 연결된 스위처블 커패시터 뱅크를 사용하고 있다. 식 (2)에 따르면, CCap.bank가 커질수록 Kvcod는 커지므로 더 높은 발진 주파수를 위해 Kvcod는 커진다. 낮은 KVCO로 광대역 주파수 범위를 커버하기 위해, 스위칭 커패시터 어레이가 일반적으로 채택되며, 이는 Fig. 3에 도시된 바와 같다. 바랙터 CV는 제어 전압에 의해 튜닝되어 출력 주파수를 연속적으로 변경하는 반면, 이진 가중치 커패시터 어레이(binary weighted capacitor array)는 디지털로 제어되어 출력 주파수 대역을 이산적으로 변경한다.



(a) 기존의 LC-탱크 VCO
 (a) Conventional LC-tank VCO



(b) 튜닝 전압에 따른 KCT, KVT
 (b) KCT, KVT according to tuning voltage

그림 3. 병렬 커패시터 뱅크가 있는 기존 LC-탱크 VCO
 Fig. 3. Conventional LC-tank VCO with parallel capacitor bank

기존의 완전 집적형 크로스-커플드 CMOS LC-VCO의 전형적인 도식 및 튜닝 특성은 Fig. 3에 도시되어 있다. 거친 튜닝(Course tuning)과 미세 튜닝(fine tuning)은 스위처블 커패시터 뱅크에 적절한 디지털 코드를 설정하고 바랙터에 각각 아날로그 전압을 인가함으로써 실현된다, 그리고 디지털과 아날로그 튜닝 민감도는 각각 KCT와 KFT로 정의되며, 선형 튜닝 특성을 달성하기 위해서는 미세하고 거친 튜닝 민감도의 변화를 줄여야 한다.

스위칭 커패시터 토폴로지는 더 낮은 KVCO를 유지하면서 출력 주파수 범위를 확장하는 데 유용하지만 두 가지 단점이 있습니다. 첫째, 동일한 커패시터는 더 낮은 또는 더 높은 대역이 필요할 때마다 뱅크 안팎으로 스위칭된다. 커패시터스에 대한 주파수의 비선형성으로 인해 탱크 커패시터를 4분의 1로 줄임으로써 출력 주파수가 두 배가 될 때 KVCO는 8배까지 변화한다.

Fig. 4와 같이 커패시터 뱅크가 바랙터에 직렬로 연결된 경우, 발진 주파수는 다음과 같이 주어진다

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C_v + C_{ser.Var}}{L(C_v C_{ser.Var})}} \quad (4)$$

그리고 VCO gain(Kvco)은 다음과 같이 주어진다.

$$K_{VCO} = \frac{1}{4\pi C_v^2} \cdot \sqrt{\frac{C_v C_{ser.Var}}{L(C_v + C_{ser.Var})}} \cdot \frac{\partial C_v}{\partial V_{tune}} \\ = -\frac{1}{8\pi^2 C_v^2 L} \cdot \frac{1}{f_{osc}} \cdot \frac{\partial C_v}{\partial V_{tune}} \quad (5)$$

따라서 더 높은 발진 주파수를 위해 K_{vco} 는 직렬 연결된 바랙터 뱅크로 감소하는 반면 병렬 연결된 커패시터 뱅크로 증가한다. 따라서 Fig. 5와 같이 직렬 연결된 바랙터 뱅크와 병렬 연결된 커패시터 뱅크를 결합하면 VCO 이득 변동을 최소화할 수 있다. 광대역 응용을 위한 아날로그 튜닝 이득 KVCO와 대역 스텝의 변동을 최소화하기 위해 제안된 아키텍처가 Fig. 5에 나타나 있다. 이 아이디어는 커패시터와 바랙터의 크기를 모두 변경 가능하게 함으로써 전압의 가변 범위를 넓혀 주파수 가변범위를 넓히는 것에 초점 맞춘 것이다. 하나의 고정 아날로그 바랙터와 이진 가중치 커패시터 어레이(Binary weighting capacitor array)를 사용하는 대신 서로 다른 값을 가진 다수의 커패시터와 바랙터를 채택한다. 더 낮은 주파수 대역에서 KVCO는 낮기 때문에 대부분의 바랙터 유닛은 아날로그 제어 전압에 연결되고 다른 바랙터 유닛은 전원 공급기 또는 접지에 연결되어 최소 고정 용량을 얻을 수 있다. 반대로 더 높은 주파수 대역에서는 소수의 바랙터 유닛만 스위칭된다. 반면 동일한 주파수 대역 스텝을 얻기 위해 고정 커패시터도 변경 가능하게 된다.

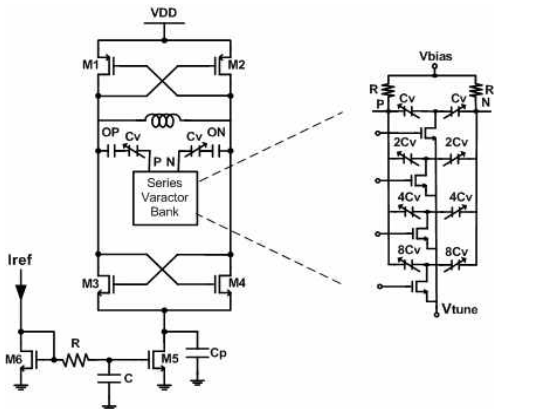


그림 4. 기존의 직렬 바랙터를 갖는 LC-tank VCO
Fig. 4. Conventional LC-tank VCO with series varactor bank

그림 4에 제시된 제안된주파수는 다음 수식 (6)과 같다.

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_v \| C_{ser.Var} + C_{par.Cap})}} \quad (6)$$

그리고 VCO 이득 K_{vco} 는 아래의 식 (7)이고, 여기서 $\alpha = C_{ser.Var}/C_{par.Cap}$. K_{vco} 의 변동을 최소화하는 $C_{ser.Var}$ (Series varactor bank)와 같은 설계 매개 변

수를 찾을 수 있다. 바로 위의 매개 변수들 α 를 얻기 위해, $C_{par.Cap}$ ((병렬 커패시터 뱅크)), V_{tune} 는 실제로 이 시뮬레이션에서 고정되어 있다.

$$K_{vco} = -\frac{(C_{ser.Var}/C_{par.Cap})^2 \cdot C_{ser.Var}}{4\pi\sqrt{L(C_v + (C_{ser.Var}/C_{par.Cap}) \cdot C_{ser.Var})} \{C_v(1 + C_{ser.Var}/C_{par.Cap}) + C_{ser.Var}\}^{1.5}} \frac{\partial C_v}{\partial V_{tune}} \quad (7)$$

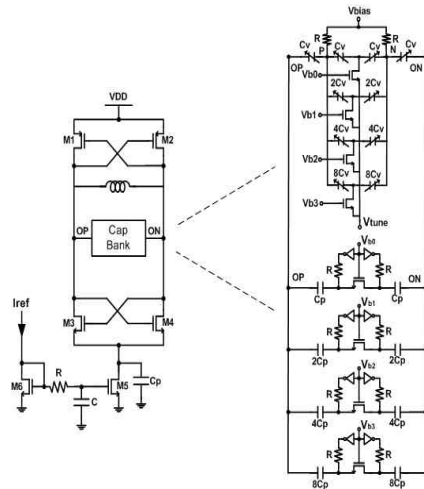


그림 5. 제안된 직렬 바랙터뱅크를 갖는 LC-tank VCO
Fig. 5. Proposed LC-tank VCO with Series Varactor bank and parallel cap bank

III. Measurement Results

보다 작은 K_{vco} 변화량을 가진 광대역 VCO는 TSMC 0.13 μm 1-poly, 6-metal CMOS RF 기술로 구현되었다. Fig. 6은 제작된 칩의 마이크로 사진을 보여 주고 있다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이, 제안된 VCO의 마이크로 사진은 0.24mm² 미만을 차지함을 알 수 있다. 제안된 VCO의 출력 주파수는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 4.6 GHz 5.25 GHz에서 조정될 수 있도록 하였다. 출력의 위상 잡음은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 5.25 GHz의 반송파 주파수로부터 1 MHz 오프셋에서 -120 dBc/Hz로 측정되었다. 제안된 VCO의 VCO 이득, K_{vco} 및 위상 잡음은 아날로그 바랙터 제어 전압 V_{tune} 을 0.6 V로 고정하고 그 결과를 Fig. 9에 나타난 바와 같이, VCO 이득의 변화는 9.6% 미만이지만 이전에 보고된 LC-탱크 VCO는 표 I[15-18]에 요약된 바와 같이 VCO 이득의 25.3% 이상의 변화를 보여준다. VCO는 1.2 V 공급 전

표 1. 다른 이전의 논문들과의 성능비교

Table 1. Comparison of the performance with prior works

Ref.	fosc [GHz]	Δ KVCO [%]	Tuning Range [%]	Phase Noise [dBc/Hz]	Power [mW]	FoM [dBc]	Tech [μ m]
[16]	6.0	57.5	5.1	-115.2@1M	12.5	179.8	0.13
[17]	1.7	69.5	63.1	-128.0@1M	14.0	179.2	0.18
[18]	1.8	27.2	66.7	-130.0@1M	41.4	175.7	0.18
[19]	2	25.3	52	-124.0@1M	18	176	0.18
This Work	5.25	9.6	18.5	-120@1M	3.72	180	0.13

압으로부터 3.1 mA의 파워를 소비한다. 제안된 VCO의 성능을 일부 이전 작업의 성능과 비교하기 위해, 식 (8)로 정의된 VCO의 성능을 잘 평가할 수 있는 잘 알려진 장점 수치(Figure of Merit)를 사용하였다.

$$FoM = 10 \log \left(\left(\frac{\omega_0}{\Delta\omega} \right)^2 \frac{1}{L\{\Delta\omega\}P} \right) \quad (8)$$

Table 1에서 보여지듯이 이전의 발표된 CMOS VCO 논문 들 중 타 논문들과 비교해 이 논문에서 제시한 VCO가 FOM이 180으로 가장 높음을 나타내고 있다. 전력면에서도 월등히 작은 3.72[mW]를 얻을 수 있었고 VCO 이득인 Δ KVCO도 9.6%미만의 낮은 계인을 얻을 수 있었다.

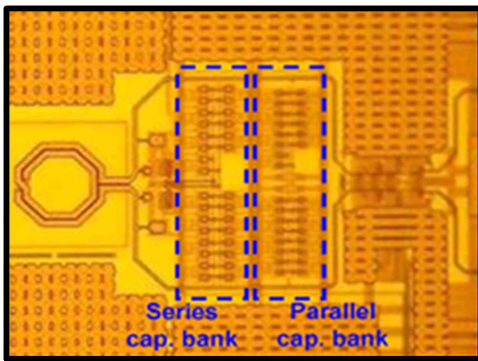


그림 6. 제안된 VCO의 마이크로 공정상의 칩 사진
 Fig. 6. Chip Microphotograph of Proposed VCO

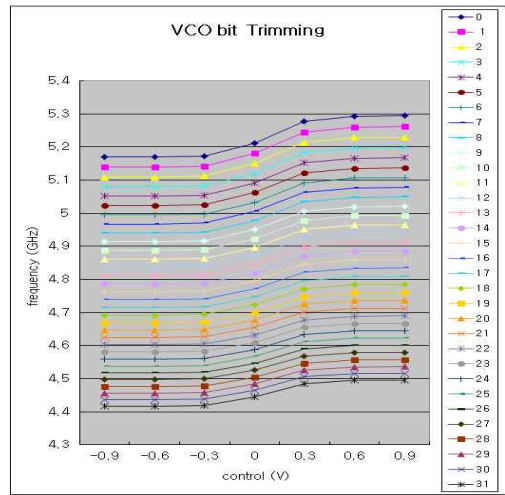


그림 7. 제안된 LC탱크 VCO의 주파수 튜닝범위
 Fig. 7. Frequency tuning range of the Proposed LC-tank VCO

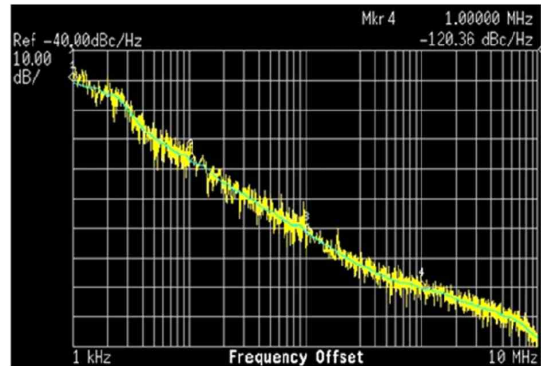


그림 8. 제안된 5.5GHz VCO의 측정된 위상잡음
 Fig. 8. Measured phase noise of the proposed 5.5 GHz VCO

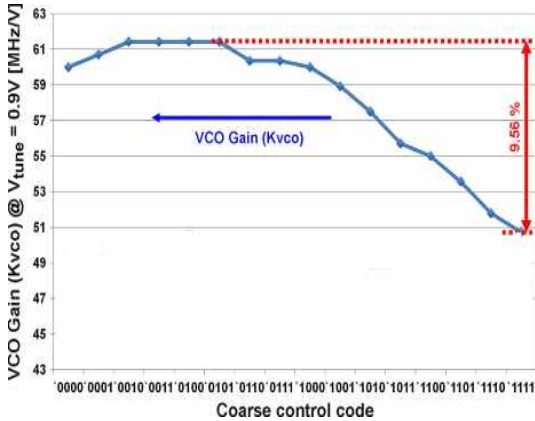


그림 9. 바랙터와 캐패시터 뱅크의 기능에 따른 VCO 이득
 Fig. 9. VCO gain a as a function of Varactor and Cap bank

IV. Conclusions

본 논문에서는 VCO 이득의 작은 변화를 위해, 직렬 바랙터 뱅크와 병렬 커패시터 뱅크를 광대역 LC-탱크 전압 제어 발진기(VCO)에서 함께 사용되도록 하였다. TSMC 0.13 μm CMOS RF 기술로 구현된 제안된 VCO는 주파수 조정 범위가 4.4 GHz에서 5.3 GHz의 광대역에서 동작하도록 하였고, 동작 밴드안에서 VCO 이득이 9.6% 미만의 보다 작은 변화를 하도록 조절할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 VCO는 1.2V 공급에서 3.1mA를 소비하고 위상 잡음은 반송파로부터 1MHz 오프셋에서 120.36 dBc/Hz를 얻을 수 있었다. 타 논문들과 비교해 이 논문에서 제시한 VCO가 FoM (Figure of Merit)이 180으로 가장 높음을 확인할 수 있었다.

References

- [1] Kim J, Shin J, Kim S, et al. "A wide-band CMOS LC VCO with linerized coarse tuning characteristics," in IEEE Trans Circuits Syst, pp.399-403 , 2008.
- [2] M. A. L. Mostafa, S. Tuncer, and G. Luff, "Low power low phase noise 3.9 GHz SiGe VCO whit data modulation correction loop," in IEEE RFIC Symp. pp. 273-276, Jun. 2004.
- [3] Hauspie D, Eun-Chul P, Craninckx J. Wideband VCO with simultaneous switching of frequency band, active core, and varactor size. IEEE J Solid-State Circuits, pp.1472-1479, 2007
- [4] Changmin Song, Young-Chan Jang, "10 GHz LC Voltage-controlled Oscillator with Amplitude Control Circuit," The Journal of KIIT, Vol. 24, No. 4, pp. 55-61, 2020. DOI:https://doi.org/10.7471/ikeee.2020.24.4.975
- [5] Tae-Kyung Kim, Dae-Su Park, Sung-Chul Oh, "Maximum Power Point Tracking Method Without Input side Voltage and current Sensor of DC-DC Converter for Thermoelectric Generation," (JKAIS) Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 21, No. 3, pp. 569-575, 2020 DOI:https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.3.569
- [6] N. H. W. Fong, J. O. Plouchart, N. Zamdmer, and D. Liu, "A 1-V 3.8-5.7 GHz wide-band VCO with differentially tuned accumulation MOS varactors for common-mode noise rejection in CMOS SOI technology," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 51, no. 8, pp. 1952-1959, Aug. 2003.
- [7] P. Vaananen, N. Mikkola, and P. Helio, "VCO design with on-chip calibration system," IEEE Trans. Circuit Syst. I, vol. 53, no. 10, pp. 2157-2166, Oct. 2006.
- [8] Liu P, Upadhyaya P, Jung J, et al. Dynamically switched lowphase-noise LCVCO with harmonic filtering. Electron Lett, pp. 792-816, 2011.
- [9] Berny A D, Niknejad A M, Meyer R G. "A 1.8-GHz LC VCO with 1.3-GHz tuning range and digital amplitude calibration" IEEE J Solid-State Circuits, pp. 909-912, 2005.
- [10] Manetakis K, Jessie D, Narathong C. "ACMOS VCO with 48% tuning range for modern broadband systems" IEEE Custom Integrated Circuits Conference, pp 265-269, 2004.
- [11] Fong N H W, Jean-Olivier P, Noah Z. "Design of wide-band CMOS VCO for multi-band wireless LAN applications" IEEE J Solid-State Circuits, vol. 38, pp.1333-1341, 2003.
- [12] Kim J, Shin J, Kim S, et al. "A wide-band CMOS LC VCO with linearized coarse tuning characteristics" IEEE Trans Circuits Syst, pp. 399-404, 2008.
- [13] Yuan Lu, Tang Zhangwen, Min Hao. A wideband LC-VCO with small tuning gain fluctuation. Journal of Semiconductors, vol. 29, pp.1003-1008, 2008.
- [14] Kwon H, Kang B. "Linear frequency modulation of voltagecontrolled oscillator using delay-line feedback" IEEE Microwave Wireless Compon Lett, vol 15 pp.431-437, 2005.
- [15] Nakamura T, Masuda T, Shiramizu N, et al. A wide-tuning-range VCO with small VCO-gain fluctuation for multi-band W-CDMA RFIC. Proceedings of the 32nd European Solid-State Circuits Conference, ESSCIRC, pp 448-462, 2006.
- [16] L. Jia, Y. B. Choi, and W. G. Yeoh, "A 5.8-GHz VCO with precision gain control," in IEEE RFIC Symp. Dig., pp. 701-704, 2007

- [17] E. Y. Sung, K. S. Lee, D. H. Baek, Y. J. Kim, and B. H. Park, "A wideband 0.18- μ m CMOS fractional-N frequency synthesizer with a single VCO for DVB-T," in IEEE Asian Solid-State Circuits Conf. Dig., pp. 193-196 Nov. 2015.
- [18] J. W. Shin, J. S. Kim, S. S. Kim, and J. K. Choi, "A wideband fractional-N frequency synthesizer with linearized coarse-tuned VCO for UHF/VHF Mobile Broadcasting Tuners," in IEEE Asian Solid-State Circuits Conf. Dig., pp. 440-443, Nov. 2017.
- [19] Lei Lu, Lu Yuan, Hao Min and Zhangwen Tang, "A fully integrated 1.175-to-2GHz frequency synthesizer with constant bandwidth for DVB-T applications," in IEEE RFIC Symp., Jun. pp. 303-306, April, 2018

저 자 소 개

이 미 영(정회원)



- 2001.B.S. degree in Department of Information and Communication Engineering, Chonbuk National University
- 2010.Ph.D. degrees in Department of Electronic and Computer Engineering, Hanyang University
- Present. Associate professor in Department of Electrical and Electronics Engineering, Hannam University

※ 이 논문은 2023학년도 한남 대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음