

밀리미터파 CMOS 메타-전압 제어 발진기의 설계

이종석, 문용

승실대학교 전자공학과

e-mail : ljs1385@ssu.ac.kr, moony@ssu.ac.kr

A Design of Millimeter-wave CMOS META-VCO

Jongsuk Lee and Yong Moon
Department of Electronic Engineering
Soongsil University

요약

65nm CMOS 공정을 이용하여 밀리미터파 대역에서 동작하는 메타 구조 기반의 전압 제어 발진기를 설계했다. 제안한 META-VCO는 SRR구조를 주기적으로 배열한 메타 구조 공진기를 NMOS 교차쌍 구조에 적용하였다. 동작범위는 26.4~30.2GHz이고 위상잡음은 1MHz 오프셋 주파수에서 -89dBc/Hz 이고, 10MHz 오프셋 주파수에서 -117.9dBc/Hz 이다. 소모전력은 1.2V 전원전압에서 16mW 이고, FOM_T 는 -177.6dB 이다.

I. 서론

최근 다양하고 많은 양의 정보 전송이 필요하기 때문에 고 비트율 전송 시스템을 구현하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 밀리미터파 대역 통신은 전송 속도를 높여주기 때문에 넓은 대역폭을 제공하여 이러한 트래픽 증가로 인한 문제점들을 해결해 줄 수 있다. 30GHz에서 동작하는 전압 제어 발진기 (VCO: Voltage Controlled Oscillator) 는 밀리미터파 대역 통신에 사용되는 클럭 생성에 주로 사용되며, VCO의 더 좋은 성능을 얻기 위한 인덕터와 캐패시터의 연구가 꾸준히 진행되고 있다^[1]. VCO 성능에 대한 비교는 FOM_T (Figure-Of-Merit with Tuning range) 값을 사용하여 할 수 있다^[2].

본 논문에서는 메타물질 (Meta-material) 기반의 공진 시스템을 이용한 메타-전압 제어 발진기 (META-VCO)를 65nm CMOS 공정으로 설계하였으며, 동일한 공정으로 설계된 기존의 VCO와 비교하여 더 좋은 FOM_T 값을 확인했다^[1,3-4]. 메타물질이란 자연계에 존재하지 않는 성질을 가지는 인공 구조로 음의 유전율 또는 음의 투자율을 이용하여 기존에 불가능했던 전파 특성의 구현이 가능하다^[3-4]. 메타물질은 물질을 구성하는 원자 구조를 모방해 만든 가상의 원자 역할을 하며 단위 구조의 배열로 이루어진다.

II. 회로 설계

2.1 제안하는 메타 구조

SRR (Split Ring Resonator) 구조를 주기적으로 배열하면 유효 투자율을 음의 값으로 가져갈 수 있기 때문에 메타물질의 성질을 갖는다^[3-4]. 또한 SRR 패턴의 길이만큼 인덕턴스가 발생하고, 패턴과 그라운드 사이 또는 패턴과 패턴 사이에 캐패시턴스가 존재한다. 따라서 패턴의 크기와 유전체 두께, 그리고 패턴과 패턴 사이의 거리를 조절하면 원하는 주파수에서의 LC 공진 특성을 얻어낼 수 있다. 제안한 메타 구조 기반의 공진기 배열은 그림 1과 같다. 65nm CMOS 공정을 사용하였기 때문에 공정에서 주어진 레이어별 유전율 값과 두께를 사용한 EM-시뮬레이션을 통해 최종적으로 67GHz에서 공진 주파수를 얻었다.

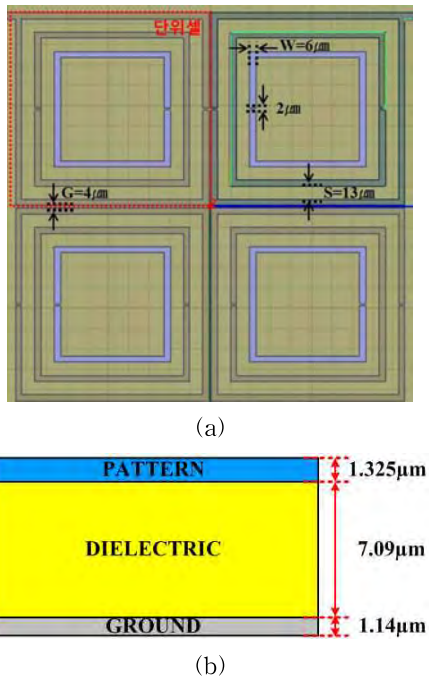


그림 1. (a)제안한 메타 구조 기반의 LC공진기 구조(윗면) (b)단위셀의 단면도

2.2 META-VCO

설계한 메타 구조를 적용한 META-VCO의 회로도 와 각 소자의 사이즈는 그림2와 같다. 메타구조의 LC 공진기와 부성저항을 갖는 NMOS 교차쌍 차동 구조로 되어있으며, 2개의 베렉터 (C_{VAR1} 과 C_{VAR2})를 추가하여 V_{CTRL} 전압에 의한 공진주파수 조절이 가능하다. 하지만 메타구조의 LC 이외에도 베렉터의 캐패시턴스가 추가되기 때문에 출력 주파수는 1/2정도로 낮아진다. MN3와 MN4는 출력버퍼이며 출력버퍼의 전원 노이즈가 크아 회로로 타고 들어가는 것을 방지하기 위해 VDDA와 VDDB로 전원을 분리했다. R_{ISOL} 은 10Ω 이하의 매우 작은 저항으로 VDDA와 OSCP 또는 OSCM 노드의 쇼트를 막기 위해 추가했다.

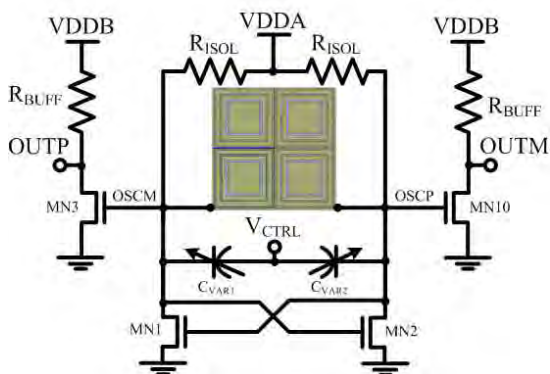


그림 2. META-VCO 회로도

III. 모의실험 결과

회로 검증에는 HFSS와 CADENCE Spectre RF를 사용했다. 그림 3은 HFSS를 이용하여 메타구조의 공진주파수를 확인한 결과이다.

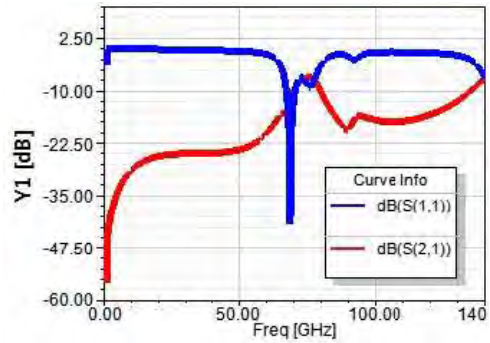


그림 3. 제안한 메타 구조의 HFSS 시뮬레이션 결과

제안한 메타 구조는 67GHz에서 S_{11} 이 -43dB이고 S_{21} 이 -6dB 이므로 직렬공진 특성을 보이는 것을 확인했다. 그림 4는 META-VCO의 레이아웃이고 전체 크기는 $0.51 \times 0.49 \text{mm}^2$ 이다. CADENCE LPE 에서 인덕턴스 성분은 추출이 되지 않으므로 시뮬레이션은 HFSS에서 추출한 s-parameter 데이터를 CADENCE 스키매틱에 삽입하여 진행하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같으며 제안한 META-VCO는 V_{CTRL} 전압에 의해 26.4~30.2GHz의 동작범위를 갖는다. 위상잡음은 1MHz 오프셋 주파수에서 -89dBc/Hz, 10MHz 오프셋 주파수에서 -117.9dBc/Hz 이다. 소모전력은 1.2V 전원전압에서 16mW 이다. 제안한 META-VCO와 같은 공정을 사용하여 설계한 최신 연구와의 특성 비교를 위해 FOM_T 개념을 사용하였으며, 그 정의는 식 (1)과 같다^[2].

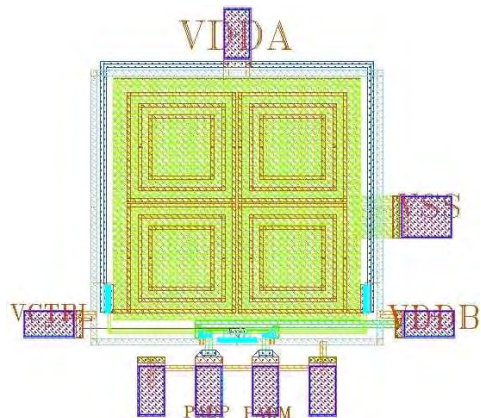


그림 4. 제안한 META-VCO 레이아웃

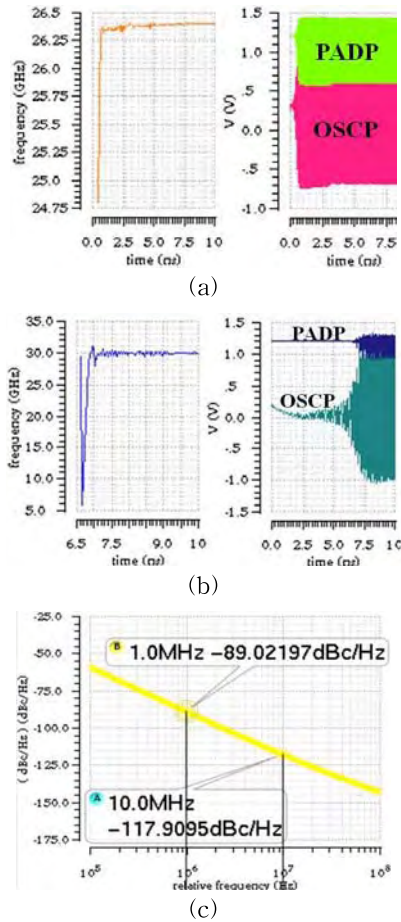


그림 5. META-VCO의 CADENCE 시뮬레이션 결과
(a) $V_{CTRL}=0$ (b) $V_{CTRL}=1.2$ (c) 위상잡음 결과

$$FOM_T = L\{\Delta f\} - 20 \log \left(\frac{f_0}{\Delta f} \cdot \frac{FTR}{10} \right) + 10 \log \left(\frac{P_{DC}}{1mW} \right) \quad (1)$$

여기에서 f_0 는 중심주파수, Δf 는 오프셋 주파수, FTR은 VCO의 동작범위(%), 그리고 P_{DC} 는 소모전력 (mW)이다. FOM_T 값은 낮은 값일수록 좋은 특성을 의미한다. 제안한 META-VCO의 FOM_T 는 -177.6dB이며, 같은 공정을 사용하여 설계한 기존의 VCO에 비해 더 좋은 FOM_T 값을 가짐을 확인했다^[1]. 표 1은 기존 연구와의 성능비교 표이다.

표 1. 기존 연구와의 성능비교

	Process	Center Freq. [GHz]	FTR [%]	Phase noise [dBc/Hz]	P_{DC} [mW]	VDD [V]	FOM_T [dB]
APMC 2014[1]	65nm CMOS	40	4.2	-97@1M	28.8	1.2	-166.9
This work	65nm CMOS	28.3	13.5	-89@1M -117.9@10M	16	1.2	-168.6 -177.6

IV. 결론

메타 구조 기반의 LC 공진기를 사용한 META-VCO를 65nm CMOS 공정으로 제안하였다. 메타 구조는 HFSS 툴을 사용하여 설계 및 검증하였고, LC 공진부를 제외한 나머지 회로는 CADENCE 툴을 사용하여 설계했다. 메타 구조의 s-parameter를 추출하여 CADENCE 회로에 삽입 후 Spectre RF로 시뮬레이션 하였다. 동작범위는 26.4GHz~30.2GHz로 밀리미터파 대역에서 동작한다. K_{VCO} 는 3.17GHz/V이고, 위상잡음은 1MHz 오프셋 주파수에서 -89dBc/Hz, 10MHz 오프셋 주파수에서 -117.9dBc/Hz이다. 계산된 FOM_T 값은 -177.6dB이다.

본 연구를 통하여 CMOS 공정을 기반으로 메타 구조를 사용한 VCO를 설계 및 분석하였으며, 밀리미터 대역의 고속 데이터 전송이 가능하다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인했다. 제안하는 META-VCO는 PLL, 클럭 생성기 등 다양한 분야에 적용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구(No.2014044894)입니다

참고문헌

- [1] Hiroki Tsuji, et. al., "Millimeter-Wave VCO using Striped Inductor," IEEE, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp.959-961, Nov. 2014.
- [2] Mohammad Nariman, et al., "A Switched-Capacitor mm-Wave VCO in 65nm Digital CMOS," Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), IEEE, pp.157-160, May. 2010.
- [3] 김형준, 서철현, "메타구조 기반의 고효율 공진형 무선전력전송 시스템," 전자공학회논문지, Vol.51, No.1, pp.47-51, Jan. 2014.
- [4] Choi Jaewon and Seo Chulhun, "Low Phase Noise Push-Push VCO using Microstrip Square Open Loop Multiple Split Ring Resonator and Rat Race Coupler," IEEE, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp.394-397, Dec. 2010.