



P-코어 VCO를 사용한 10.525GHz 자체발진 혼합기의 설계

이주흔*, 채상훈**

Design of 10.525GHz Self-Oscillating Mixer Using P-Core Voltage Controlled Oscillator

Ju-Heun Lee*, Sang-Hoon Chai**

요 약

도플러 레이더에 응용할 목적으로 전압제어 발진기와 주파수 혼합기가 합쳐진 10.525GHz 자체발진 혼합기 반도체 IC 칩을 실리콘 CMOS 기술을 이용하여 설계하였다. 자체발진 혼합기에 포함된 p-코어 형태의 VCO는 송신신호에 포함된 잡음을 최소화한다. 이 잡음 최소화는 센싱 가능 거리를 늘여서 움직임 감지센서의 도달거리와 도달감도에 유리한 방향으로 작용한다. 위상잡음에 대한 시뮬레이션 결과 P-코어로 설계된 VCO는 1MHz 오프셋에서 -106.008dBc/Hz , 25MHz 오프셋에서 -140.735dBc/Hz 의 잡음특성을 가짐으로써 N-코어 및 NP-코어로 설계된 VCO에 비하여 우수한 잡음 특성을 보였다. 본 연구에 의한 p-코어로 설계된 VCO를 이용하여 자체 발진 혼합기를 구현한다면 도달거리와 도달감도가 우수한 움직임 감지센서를 제작할 수 있을 것이다.

Abstract

This paper describes design of a 10.525 GHz self oscillating mixer semiconductor IC chip combining voltage controlled oscillator and frequency mixer using silicon CMOS technology for Doppler radar applications. The p-core type VCO included in the self oscillating mixer minimizes the noise contained in the transmitted signal. This noise minimization increases the sensing distance and acts in a direction favorable to the reaching distance and the sensitivity of the motion detection sensor. Simulation results for phase noise show that a VCO designed as a P-core has a noise characteristic of -106.008 dBc / Hz at 1 MHz offset and -140.735 dBc / Hz at 25 MHz offset compared to a VCO designed with N-core and NP-core showed excellent noise characteristics. If a self-oscillating mixer is implemented using a p-core designed VCO in this study, a motion sensor with excellent range and reach sensitivity will be produced.

Keywords

self-oscillating mixer, 10.525 GHz, UWB, VCO, frequency synthesizer, PLL, circuit design

* 호서대학교 전자디스플레이공학부

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2868-6564>

** 호서대학교 전자디스플레이공학부 교수(교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1189-8237>

· Received: Aug. 22, 2018, Revised: Sep. 00, 2018, Accepted: Sep. 00, 2018

· Corresponding Author: Sang-Hoon Chai

Division of Electronic and Display Engineering, Hoseo University

20, Hoseo-ro 79 beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungnam-do, Korea,

Tel.: +82-41-560-5665, Email: shchai@hoseo.edu

I. 서 론

동작감지 센서의 종류는 크게 열 적외선 센서와 마이크로파 센서로 나눌 수 있다. 열 감지 센서는 움직이는 물체에서 방출되는 열 적외선 에너지를 검출한 뒤 주변 환경의 온도의 차이를 이용하여 물체를 감지한다. 그러나 열 감지 센서는 주변 환경의 온도와 물체의 온도가 비슷한 경우 수신감도가 떨어지는 단점이 있다. 이에 비해 마이크로파 센서는 주변 온도, 주변 잡음 등 주위환경에 관계없이 잘 동작하며 산란, 회절, 투과 등의 성질이 있어 많은 장점을 갖는다. 그러나 여러 부품을 PCB상에 모듈로 집적화하여 사용하기 때문에 큰 소비전력, 큰 사이즈, 높은 단가 등의 단점이 존재한다.

에너지 절약을 위한 저전력 동작 및 제품 소형화를 위한 고집적화 모두 만족할 수 있는 마이크로파 센서 기술에는 자체발진 혼합기(SOM, Self Oscillating Mixer)를 사용하는 방법이 있다. 자체발진 혼합기는 국부발진기와 주파수 혼합기 회로를 하나로 통합하여 반도체 칩으로 설계함으로써 전력 소모의 감소 및 제품의 고집적화를 가능하게 한다[1][2]. 마이크로파 센서의 수신감도 및 더 넓은 감지 범위를 갖기 위한 방법은 송신신호의 전력을 높이는 방법과 잡음지수를 낮추는 방법이 있다. 그 중에서 송신신호의 전력을 의미하는 방사전력은 전파규정에 의해 최대 14dBm(25mW) 이하로 규정되어 있기 때문에 더 이상 키울 수가 없는 제약이 있다.

본 연구에서는 회로 자체에서 발생하는 잡음을 최소화하여 마이크로파 센서의 수신감도 및 도달거리를 개선하고자 하였다.

II. 동작감시 센서의 구성

그림 1은 마이크로파 센서의 전체 구성도를 나타낸 것이다. 이 시스템은 송신단과 수신단으로 이루어진다. 송신단은 국부 발진기의 출력을 전력 증폭기(PA, Power Amplifier)를 거쳐 큰 전력 신호로 증폭한 뒤 송신 안테나를 통하여 전송하도록 구성되어 있다. 수신단은 송신된 신호가 물체에 반사되어 되돌아오는 수신 신호를 수신 안테나를 통하여 수신한 뒤 저 잡음 증폭기(LNA, Low Noise Amplifier)

를 거쳐 신호를 증폭하여 주파수 혼합기로 전달한다.

마이크로파 동작감시 센서는 도플러 효과(Doppler Effect)를 이용한다. 도플러 효과는 1842년 Christian Johann Doppler가 발견한 것으로 어떤 파동의 파동원이 관찰자에 대한 상대 속도에 따라 진동수와 파장이 바뀌는 현상을 가리킨다. 즉, 송신된 신호는 물체에 반사될 때 도플러 효과에 의하여 속도에 비례하여 주파수가 변하며 송신부를 기준으로 물체가 다가오면 더욱 높은 주파수로, 멀어지면 낮은 주파수로 변하여 수신된다. 이에 따른 도플러 이론의 수식은 (1)로 나타낼 수 있다[3].

$$f' = \frac{f_0}{1 - \cos\theta \frac{v}{c}} \approx f_0(1 + \cos\theta \frac{v}{c}) \quad (1)$$

$$= f_0 + f_0 \cos\theta \frac{v}{c} = f_0 + \cos\theta \frac{v}{\lambda}$$

여기서 f_0 는 입력신호의 주파수, v 는 움직이는 물체의 속도, c 는 광속도, f' 는 주파수 변화량, λ 는 입력 신호의 파장을 나타낸다[2]. 수식을 통하여 주파수 변화량에 해당하는 f' 을 계산해 보면, X-대역에 해당하는 10.525GHz의 송신 신호를 사용하여 3mm/s의 속도로 걸어오는 사람의 움직임을 감지했을 때 수신되는 주파수 변화량은 약 100Hz로 나타남을 예상할 수 있다.

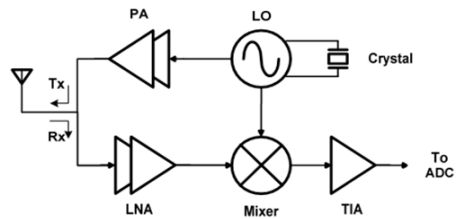


그림 1. 마이크로파 센서의 구성도
Fig. 1. Block diagram of microwave sensor

III. 자체발진 혼합기 회로의 설계

3.1 전압조정 발진기의 설계

국부발진기로 사용하기 위한 LC 탱크 발진기는 넓은 대역폭을 필요로 하는 회로에서는 부적합하나,

높은 Q 값을 갖기 때문에 10GHz 이상의 고주파를 출력하는데 용이하다[3]. 따라서 마이크로파 센서용으로 사용할 전압 조절 발진기는 협대역(Narrow Bandwidth)이면서 X-대역의 출력이 용이한 LC 탱크 발진기로 설계하는 것이 적합함을 알 수 있다.

MOSFET를 사용한 반도체 IC 칩 형태의 LC 탱크 발진기는 그림 2와 같이 N-코어 구조, P-코어 구조, NP-코어 구조의 세 종류로 구분된다. 전자(Electron)에 의해 동작하는 NMOSFET로 구성되는 N-코어 구조는 캐리어인 전자의 빠른 이동도로 인하여 작은 입력 전압에 큰 출력 전류를 얻을 수 있어 트랜지스터의 폭이 크게 설계하지 않아도 된다. 전자에 비해 상대적으로 느린 이동도를 갖는 홀(Hole)에 의해 동작하는 PMOSFET로 구성된 P-코어 구조는 NMOS에 비해 트랜지스터의 폭이 크게 설계하여야 한다. N-코어 구조는 소자의 크기가 작기 때문에 기생 정전용량이 작아서 세 가지 구조 중 가장 빠른 속도로 동작하는 장점이 있다.

그러나 출력신호의 대칭성 및 위상잡음 특성이 우수하지 못한 단점을 가지고 있다. 특히 NMOS는 게이트 산화막(SiO₂)과 실리콘 기판 접촉면에서 완벽한 결정 구조를 가지지 못하는 땀글링 본드(Dangling Bond)에 의하여 캐리어인 전자가 이동 시 트랩(Trap)되면서, 채널에 흐르는 드레인 전류에 나타나는 플리커 잡음(Flicker Noise, 1/f Noise)은 심각한 문제이다. 이에 비해 게이트 산화막 표면으로부터 약간 떨어진 매설채널(Buried Channel)에 의해서 동작하는 PMOS로 구성된 P-코어 전압 제어 발진기는 땀글링 본드의 영향을 상대적으로 덜 받기 때문에 출력단 신호에서 나타나는 플리커 잡음이 N-코어 전압 제어 발진기에 비하여 훨씬 적다[4][5]. 또한 P-코어 LC 발진 회로는 접지를 기준으로 동작하기 때문에 전원을 기준으로 동작하는 N-코어 LC 발진 회로에 비하여 우수한 위상 잡음 특성을 갖는 특징이 있다.

NP-코어 구조는 NMOS와 PMOS가 동시에 사용되므로 플리커 잡음 면에서 N-코어와 P-코어의 중간 특성을 보인다. 또한 전원 전압 쪽과 접지 쪽 모두에 일정 전압 이상이 요구되므로 저전압 동작에 불리하고, 제어 전압 범위에 제한이 따르는 단점이 있다[4][5].

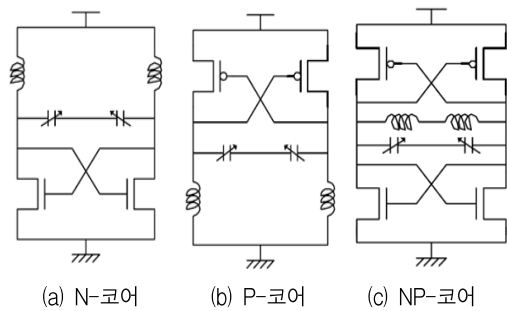


그림 2. 전압 조절 발진기
Fig. 2. Voltage controlled oscillator (a) N-core, (b) P-core, (c) NP-core

본 연구에서는 세 가지 구조의 전압 조절 발진기 전기적 특성을 서로 비교하기 위하여 세 종류의 전압 조절 발진기 회로를 0.18 μ m CMOS 기술을 사용하여 구성한 다음 시뮬레이션을 통하여 10.525GHz 발진 시 잡음특성을 비교하였다. 10.525GHz 발진 조건에서의 위상잡음 시뮬레이션 결과 N-코어로 설계된 VCO는 1MHz 오프셋에서 -99.212dBc/Hz, 25MHz 오프셋에서 -130.804dBc/Hz, P-코어로 설계된 VCO는 1MHz 오프셋에서 -106.008dBc/Hz, 25MHz 오프셋에서 -140.735dBc/Hz, NP-코어로 설계된 VCO는 1MHz 오프셋에서 -103.216dBc/Hz, 25MHz 오프셋에서 -138.987dBc/Hz,의 잡음특성을 가짐으로써 P-코어 구조로 설계된 VCO가 가장 우수한 잡음 특성을 보였으며, NP-코어, N-코어의 순으로 잡음 특성이 나빠지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 PMOS가 NMOS 보다 근본적으로 소자의 잡음 특성이 더 우수하기 때문에 나타나는 현상이다. 그림 3은 VCO 종류에 따른 잡음 특성을 비교한 그래프이며, 여러 오프셋(Offset)에서의 잡음 특성을 표 1에 정리하였다.

표 1. 전압 조절 발진기 종류에 따른 잡음특성
Table 1. Noise characteristics as VCO type

Type Offset	P-core [dBc/Hz]	N-core [dBc/Hz]	NP-core [dBc/Hz]
10 KHz	-51.866	-43.556	-46.187
100 KHz	-80.456	-72.202	-75.888
1 MHz	-107.362	-99.212	-103.216
25 MHz	-140.735	-130.804	-138.987

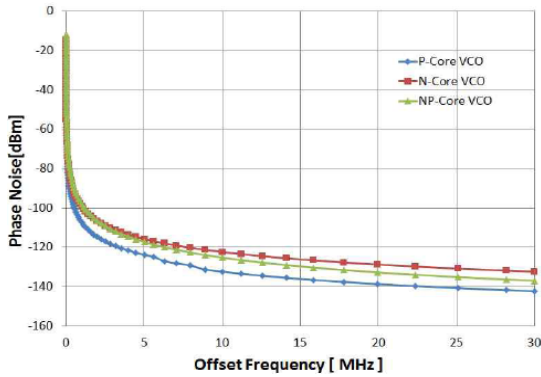


그림 3. VCO 종류에 따른 잡음 특성
Fig. 3. Noise characteristics as VCO types

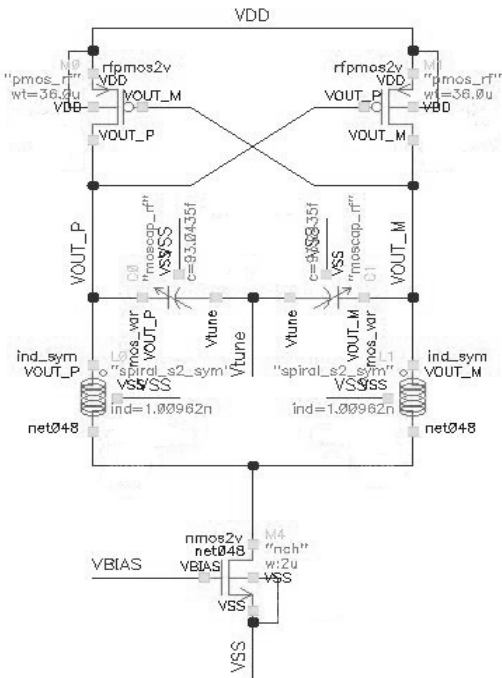


그림 4. P-코어 전압 조절 발진기
Fig. 4. P-core voltage controlled oscillator

RF PLL에서 우수한 속도 특성 및 잡음 특성을 얻기 위해서는 무엇보다도 먼저 VCO의 설계가 최적화되어야한다. 그림 4는 본 연구에서 사용한 VCO의 회로도로서 위상잡음 특성 및 소비 전력 특성이 우수한 P-MOS(M2, M3) 코어형 구조를 갖는 LC 탱크 회로를 채택하였다. 이를 위하여 정확한 값을 갖는 L과 함께 커패시턴스 변화가 가능한 바랙터(Varactor) Cv를 연결하였다.

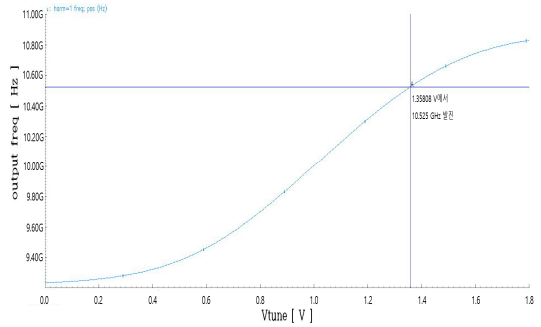


그림 5. V_c 전압에 따른 발진 주파수
Fig. 5. Oscillation frequency of the V_c .

시뮬레이션 결과, 0V의 V_c 전압에서 약 9.2498GHz의 발진을 하였으며, 1.8V의 V_c 전압에서 약 10.8009GHz의 발진을 하였다. 따라서 약 1.5510GHz의 대역폭을 가지며, V_c 전압에 1.365V가 인가되었을 때 10.525GHz의 발진을 한다는 것을 확인하였다. 그림 5는 1.365V의 V_c 전압을 인가하였을 때 전압 조절 발진기의 출력을 확인해 본 모의실험 결과로써 정확히 10.525GHz 발진을 함을 확인할 수 있었다.

3.2 주파수 혼합기의 선택

마이크로파 센서에서 주파수 혼합기는 송신신호 (LO Frequency)와 물체에 반사되어 되돌아오는 수신신호(RF Frequency)를 혼합하여 물체의 동작에 대한 정보를 생성하는 수신부의 역할을 수행한다. 주파수 혼합기는 unbalanced, single balanced, double balanced 등 여러 종류가 있으나 double balanced 방식이 RF 신호 및 LO 신호를 차동으로 입력받기 때문에 LO 입력단과 RF 입력단의 격리 특성이 우수하다. 따라서 외부 필터의 사용을 줄일 수 있으며, 각종 스푸리어스 성분 또한 많이 줄여줄 수 있다. 또한 선형성 및 변환 이득, 잡음 특성이 우수하여 다른 구조들의 단점이 많이 개선된 주파수 혼합기이다[6][7].

본 연구에서는 동작 감지 센서가 넓은 감지 범위를 얻기 위하여 변환 이득 높고, 잡음 특성이 우수한 그림 6과 같은 double balanced의 한 방식인 Gilbert 셀 주파수 혼합기를 선택하여 설계를 진행하였다.

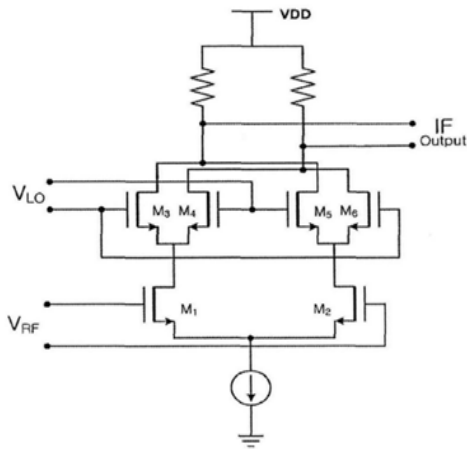


그림 6. Gilbert 셀 주파수 혼합기
Fig. 6. Gilbert cell mixer

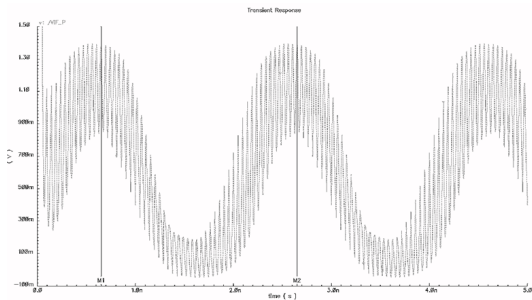


그림 7. 500MHz의 IF 신호
Fig. 7. IF signal of 500MHz

주파수 혼합기의 동작을 확인하기 위하여 10.525GHz의 LO 신호와 임의의 RF 신호를 입력하였을 때, 그 합과 차에 해당하는 IF 신호가 생성되는지 확인하였다. 그림 7은 1.8V의 V_{DD} 전압, 10.525GHz의 LO 신호, 11.025GHz의 RF 신호를 입력하였을 때, 출력되는 IF 신호이다. 시뮬레이션 결과 10.525GHz의 LO 신호와 11.025GHz의 RF 신호를 입력하면 두 신호의 차에 해당하는 500MHz의 IF 신호가 생성되었으며, 500MHz의 IF 신호 안에는 10.525GHz의 LO 신호가 포함되어 있음을 확인할 수 있었다.

3.3 자체발진 주파수 혼합기 회로

본 논문에서의 자체발진 혼합기는 잡음 특성이

우수한 p-코어 구조의 전압 조절 발진기와 변환 이득과 잡음 특성, 각 입력단 간의 격리 특성이 우수한 Gilbert 셀 주파수 혼합기를 하나의 회로로 통합하여 자체발진 혼합기를 설계하였다. 이렇게 통합되어 설계된 자체발진 혼합기는 두 가지 종류의 회로가 개별적으로 동작할 때보다 전력 소비 측면에서 유리하며, 각 회로간의 임피던스 정합에서도 이점이 존재한다. 또한 고 집적화가 가능하기 때문에 설계 기술에 따라 원하는 특성은 극대화 시키면서 제품의 소형화가 가능해진다.

자체발진 혼합기가 동작 감지 센서로 활용될 때의 동작 원리는 전압 조절 발진기에서 생성된 10.525GHz의 송신 신호는 전력 증폭기를 통해 규격 내의 송신 전력으로 증폭된 뒤, 송신 안테나를 통해 송신된다. 그 후 송신된 신호가 움직이는 물체에 반사되면서 변화되는 수신 신호가 수신 안테나를 통해 수신되며, 저 잡음 증폭기를 거쳐 주파수 혼합기로 수신된다. 이렇게 수신된 RF 신호는 전압 조절 발진기가 생성하는 LO 신호와 혼합되어 그 합과 차에 해당하는 새로운 신호를 생성하고, IF 신호로 출력하는 순서로 동작한다[11]. 자체발진 혼합기의 회로 설계는 0.18 μ m CMOS 공정을 사용하여 설계한 전압 조절 발진기와 주파수 혼합기를 통합하여 진행하였다. 그림 8은 설계된 자체발진 혼합기의 회로도이다. 자체발진 혼합기의 설계에서는 2개의 전압 조절 발진기를 사용하였는데 1개는 주파수 혼합기로 LO 입력을 인가해주는 역할을 하며, 다른 1개는 칩 제작 후 외부에서 전압 조절 발진기의 발진파형을 측정하거나, 안테나를 통해 송신하기 위한 목적으로 설계되었다[6]-[8].

IV. 레이아웃 설계

자체발진 혼합기의 레이아웃은 앞서 설계한 전압 조절 발진기의 레이아웃과 주파수 혼합기의 레이아웃을 하나의 회로로 구성하기 위하여 Cadence사의 Virtuoso 툴을 이용하여 설계 하였으며, 검증에 필요한 DRC, ERC, LVS 작업은 Mentor Graphics사의 Caliber 툴을 이용하였다.

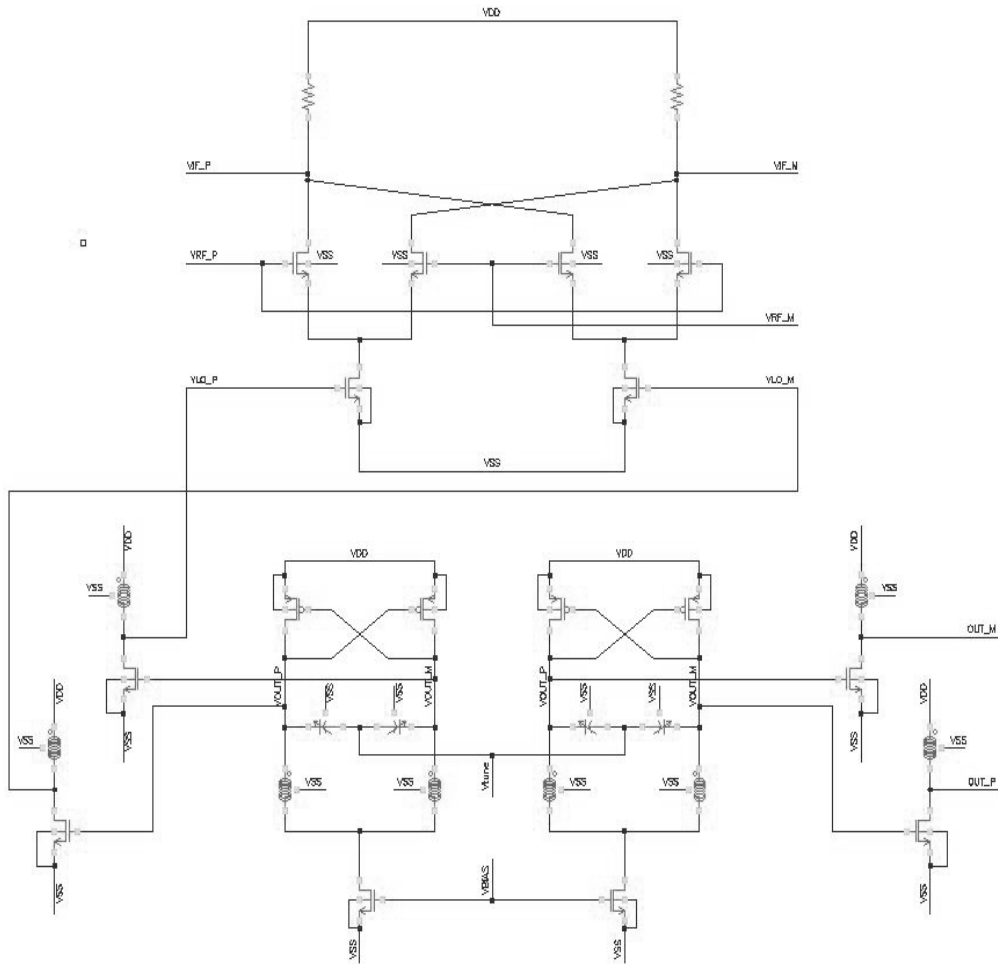


그림 8. 자체발진 혼합기의 회로도
Fig. 8. Schematic of a self oscillating mixer

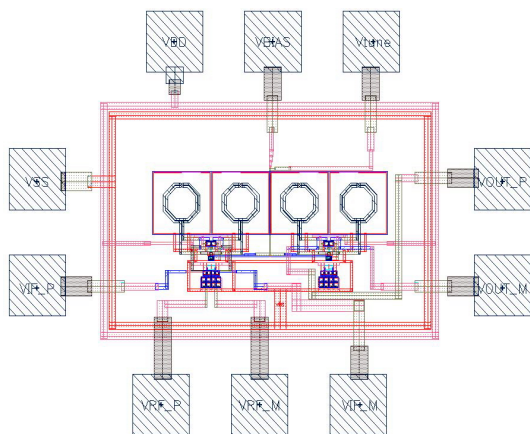


그림 9. 설계된 칩의 레이아웃 도면
Fig. 9. Layout of designed chip

설계된 자체발진 혼합기의 레이아웃은 그림 9에 나타내었다. 설계된 자체발진 혼합기의 칩 면적은 약 $2500\mu\text{m} \times 1900\mu\text{m}$ 이며, 총 10개의 패드를 갖는다. 입력으로 사용 되는 패드는 VDD, VSS, VBIAS, Vtune, VRF_P, VRF_M으로 6개이며, 출력으로 사용 되는 패드는 VIF_P, VIF_M, VOUT_P, VOUT_M으로 4개이다.

V. 모의실험 결과

설계한 자체발진 혼합기의 모의실험 또한 Cadence사의 Spectre를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

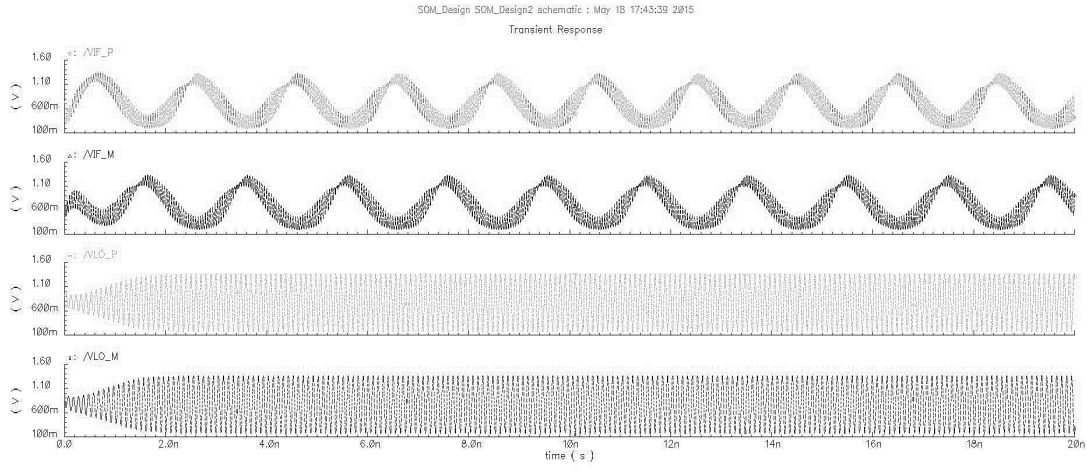


그림 10. 자체발진 혼합기의 입·출력 신호
Fig. 10. Input and output signals of the SOM

SPICE 파라메타는 현재 많이 사용되고 있는 $0.18\mu\text{m}$ RF CMOS 공정 파라메타를 사용하였으며, 전압 조절 발진기의 발진 주파수를 LO 신호를 입력받았을 때, 자체발진 혼합기의 동작을 확인하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 따라서 전압 조절 발진기가 출력하는 10.525GHz 의 LO 신호와 임의의 RF 신호를 입력하였을 때, 그 합과 차에 해당하는 IF 신호가 생성되는지 확인하고, 두 회로를 통합한 회로의 동작 여부를 확인하였다. 그림 10은 1.8V 의 VDD 전압 조건 하에 아래 두 신호는 전압 조절 발진기의 출력 신호인 10.525GHz 의 LO 신호와 안테나로부터 수신된 100MHz 차이의 신호인 10.625GHz 의 RF 신호이며, 위 두 신호는 자체발진 혼합기에서 출력되는 100MHz 의 파동 형태를 갖는 IF 차동 신호이다.

VI. 결 론

회로의 전력 소모 감소 및 고 집적화를 가능하게 하는 자체발진 혼합기를 $0.18\mu\text{m}$ 실리콘 CMOS 공정으로 설계하였다. 높은 수신감도와 넓은 동작 범위를 갖는 자체발진 혼합기를 설계하는 방법은 방사 전력의 출력이 무선설비규격이 허용하는 한계에 최대한 근접할 수 있도록 전력증폭기를 설계하는 방법과, 시스템이 갖는 잡음 지수를 최소화 하여 송신

신호가 물체에 반사된 뒤 수신 신호로 되돌아올 때 증폭되는 잡음을 최소화하는 방법이 있으나, 본 논문에서는 후자의 방법을 적용하기 위하여 송신신호를 생성하는 전압 조절 발진기의 구조를 잡음이 가장 적은 P-코어 구조로 설계하였다. 이를 통하여 송신신호의 잡음을 최소화 하였으며, 주파수 혼합기를 Gilbert 셀 구조로 설계하여 수신 감도에 도움을 줄 수 있도록 하였다. 그 결과로 본 연구에서 설계한 전압 조절 발진기의 잡음 특성은 1MHz 떨어진 곳에서는 -106.008dBc/Hz , 25MHz 떨어진 곳에서는 -140.735dBc/Hz 로 우수한 특성이 나타났다. 향후에는 칩을 제작하여 그 특성을 분석할 예정이다.

감사의 말씀

본 연구를 위하여 CAD tool을 제공해 주신 IDEC에 진심으로 감사드립니다.

References

- [1] Stanley S. K. Ho, Carlos E. Saavedra, and Brad R. Jackson, "A low-noise self-oscillating mixer using a balanced VCO load", IEEE Circuits and Systems, Vol. 58, No. 8, pp. 1705-1711, Aug. 2011.
- [2] Jae-Wook Lee, Choon-Sik Cho, and Min-Hoe Kim,

"A high lineality self-oscillating mixer using second harmonic injection", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 23, No. 6, pp. 682-690, Jun. 2012.

[3] Tae-Jin Kim, "Implementation of microwave sensor using Doppler effect", J. of KIEC, Vol. 4, No. 2, pp. 75-81, Jun. 2009.

[4] M. Haase and T. Zhang, "Comparison of CMOS VCO topologies", IEEE Microelectronics, Vol. 18, No. 21, pp. 1-4, Jul. 2010.

[5] Tae-Won An and Yong Moon, "Design of linear gain CMOS LC VCO for 5.8GHz/5.2GHz/2.4GHz wireless lan", Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 42, No. 6, pp. 59-66, Jun. 2005.

[6] Alishir Moradi K. and Sepideh E., "The analysis and design of a dual-band self-oscillating mixer", Majlesi Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 10-15, Jun. 2011.

[7] Carlos E. Saavedra, Brad R. Jackson, and Stanley S. K. Ho, "Self-oscillating mixers: a natural fit for active antennas", IEEE Microwave Magazine, Vol. 14, No. 6, pp. 40-49, Sep. 2013.

[8] Sung-Min Park and Sang-Hoon Chai, "Design of self oscillating mixer for motion detect sensor", Proceedings of IEIE autumn conference, Nov. 2014.

채 상 훈 (Sang-Hoon Chai)



1981년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학사)
1983년 2월 : 부산대학교
전자공학과(공학석사)
1992년 2월 : 부산대학교
전자공학과(공학박사)
1983년 3월 ~ 1997년 8월 : 한국전

자통신연구원 반도체 연구단 책임연구원
2004년 9월 ~ 2006년 8월 : University of Florida
연구교수
1997년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 전자공학과 교수
관심분야 : RF 아날로그 ASIC 설계, AI 칩 설계,
전력소자 설계 및 공정, 태양전지, LED 조명시스템 등

저자소개

이 주 훈 (Ju-Heun Lee)



2017년 2월 : 호서대 전자공학과
(공학사)
2017년 3월 ~ 현재 : 호서대학교
전자디스플레이공학부(석사과정)
관심분야 : 초고주파
능동/수동회로, 재구성 안테나
시스템, 초고주파 센서 네트워크

시스템 등