

논문 2011-48SD-2-6

I/Q 오차 보정 회로를 갖는 2.5GHz Quadrature LC VCO 설계

(Design of a 2.5GHz Quadrature LC VCO
with an I/Q Mismatch Compensator)

변 상 진*, 심 재 훈**

(Sangjin Byun and Jae Hoon Shim)

요 약

본 논문에서는 Quadrature LC VCO(Voltage controlled oscillator)의 I/Q 오차를 분석하고, 그 분석된 결과를 이용하여 I/Q 오차 보정 회로를 제안한다. 제안된 I/Q 오차 보정 회로는 높은 주파수 대역폭을 요구하는 위상 오차 검출기를 사용하는 대신에 낮은 주파수 대역폭으로도 동작이 가능한 진폭 오차 검출기를 사용한다. 제안된 I/Q 오차 보정 회로의 검증을 위하여 2.5GHz Quadrature LC VCO가 0.18 μ m CMOS 공정으로 제작 및 측정되었다. 측정결과 제안된 진폭 오차 검출기를 사용해도 기존의 위상 오차 검출기는 사용하는 경우들과 유사한 I/Q 오차 보정 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 본 I/Q 오차 보정 회로는 1.8V 전원 전압에서 0.4mA 전류를 소모하며, 차지하는 칩 면적은 0.04mm²이다.

Abstract

In this paper, an analysis on I/Q mismatch characteristics of a quadrature LC VCO(Voltage controlled oscillator) is presented. Based on this analysis, a new I/Q mismatch compensator is proposed. The proposed I/Q mismatch compensator utilizes an amplitude mismatch detector rather than the conventional phase mismatch detector requiring much more wide frequency bandwidth. To verify the proposed circuit, a 2.5GHz quadrature LC VCO was designed in a 0.18 μ m CMOS process and tested. Test results show that an amplitude mismatch detector achieves similar I/Q mismatch compensation performance as that of the conventional phase mismatch detector. The I/Q mismatch compensator consumes 0.4mA from 1.8V supply voltage and occupies 0.04mm².

Keywords : LC VCO, CMOS, I/Q mismatch

I. 서 론

일반적으로 Quadrature LC VCO(Voltage controlled oscillator)는 다양한 유무선 통신 및 데이터 송수신 회로들에서 폭넓게 사용되고 있다^[1~2]. 이러한 Quadrature

LC VCO는 서로 90° 차이 나는 I/Q 직교 신호를 발생 할 수 있다는 장점을 갖고 있을 뿐만 아니라, 두 개의 LC VCO를 사용함으로써 밴드 패스 필터링 효과에 의하여 보다 나은 위상 잡음 특성을 갖는 장점이 있는 유용한 회로이다^[3]. Quadrature LC VCO가 제공하는 위상 잡음 특성과 I/Q 직교 신호의 정확성은 Quadrature LC VCO가 사용되는 전체 송수신 시스템의 성능에 직접적인 영향을 미치므로 Quadrature LC VCO를 설계 할 때에는 위상 잡음 특성과 I/Q 직교 신호의 오차 특성을 함께 고려하여야 한다.

본 논문에서는 특히 I/Q 직교 신호의 오차 특성을 분석하고, 그에 따른 I/Q 오차 보정 회로를 제안 및 설계

* 정회원-교신저자, 동국대학교 전자전기공학부
(Dongguk University-Seoul)

** 정회원, 경북대학교 전자공학부
(Kyungpook National University-Daegu)

※ 이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로
한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(KRF-2006-611-D00020)

접수일자: 2010년9월9일, 수정완료일: 2010년12월29일

한다. 이미 Quadrature LC VCO의 I/Q 직교 신호의 오차 특성을 분석한 몇 편의 훌륭한 논문들이 발표된 바 있다^[4-6]. 기존의 논문들은 상세한 수학적 분석을 통하여 I/Q 오차에 영향을 끼치는 가능한 많은 요소들을 포함하고 있다. 그 중 한 논문^[6]은 I/Q 위상 오차뿐 아니라 I/Q 진폭 오차에 대하여도 분석하였다. 하지만, 위상 오차와 진폭 오차간의 상관 관계를 주목하고 분석하지는 않은 한계가 있다. 본 논문은 기존의 논문들과 다르게 Quadrature LC VCO의 위상 오차와 진폭 오차간의 상관 관계를 주목하고, 그 관계를 분석하는 차이점이 있다. 덧붙여, 본 논문은 LC VCO가 전압 제한 영역 및 전류 제한 영역으로 두 가지 동작 영역을 가지고 있으며, 각 동작 영역에 따라서 서로 매우 다른 동작 특성을 보인다는 사실을 고려하였다^[7]. 본 논문의 I/Q 오차 분석은 LC 오실레이터 내부의 전류 신호와 전압 신호가 보다 적은 왜곡을 갖고, 따라서 Quadrature LC VCO의 위상 오차와 진폭 오차가 보다 명확한 상관 관계를 갖고 있는 전류 제한 영역으로 한정하였다.

앞으로 II장에서는 일반적인 Quadrature LC VCO의 I/Q 오차를 분석하고, 특히 위상 오차와 진폭 오차와의 상관 관계를 분석하려고 한다. III장에서는 분석된 결과를 이용하여 새로운 I/Q 오차 보정 회로를 제안하고, 이를 포함하는 2.5GHz Quadrature LC VCO의 상세 회로 설계를 보여줄 것이다. IV장에서는 제작된 회로의 측정 결과를 보여주고, V장에서는 결론을 맺는다.

II. Quadrature LC VCO의 I/Q 오차 분석

그림 1은 일반적인 Quadrature LC VCO의 회로도 및 선형화 된 모델이다. Quadrature LC VCO는 두 개의 동일한 LC 오실레이터로 구성되며, 각 LC 오실레이터는 다시 동일한 인덕터, 커패시터, 네가티브 트랜스 컨덕터와 커플링 트랜스 컨덕터로 구성된다. 이들 구성 소자와 각 소자에 흐르는 전류는 그림 1(b)와 같이 선형화하여 나타낼 수 있다.

그림 2는 상기 그림 1(b)의 선형화 된 모델을 참조하여 두 개의 LC 오실레이터의 각 소자에 흐르는 전류 신호들 및 각 소자 양단간의 전압 신호들의 페이저들을 도시한 페이저 다이어그램이다. I/Q 위상 오차는 θ 로 표현되었다. 이 페이저 다이어그램은 각 소자에 흐르는 전류 신호들 및 각 소자 양단간의 전압 신호들에 고조파 왜곡 성분이 적을 경우에만 한정되어 사용 가능하다. 본 논문에서 설계한 Quadrature LC VCO는 그림 3

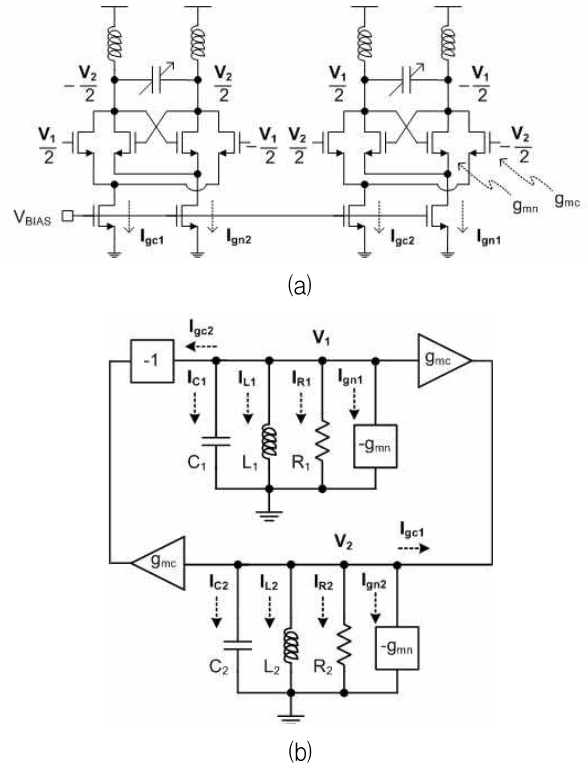


그림 1. 일반적인 Quadrature LC VCO의 회로도 및 선형화 모델

Fig. 1. Conventional quadrature LC VCO: circuit diagram and linearized model.

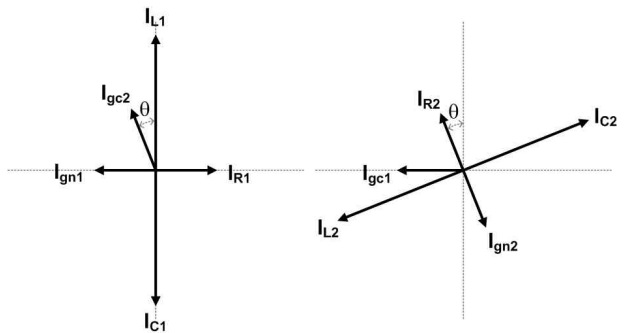


그림 2. Quadrature LC VCO의 페이저 다이어그램

Fig. 2. Phasor diagram of quadrature LC VCO.

과 같이 매우 적은 (대략 -45dBc 보다 적은) 고조파 왜곡을 보이므로 그림 2와 같은 페이저 다이어그램을 사용할 수 있다.

그림 2의 왼쪽 페이저 다이어그램은 Quadrature LC VCO의 첫 번째 LC 오실레이터에 흐르는 전류 신호들을 나타내며, 오른쪽 페이저 다이어그램은 두 번째 LC 오실레이터에 흐르는 전류 신호들을 나타낸다.

키르히호프(Kirchhoff)의 전류 법칙을 사용하면 우리는 그림 2의 페이저 다이어그램으로부터 다음과 같이 두 개의 페이저 신호들간의 벡터 방정식을 얻을 수 있다.

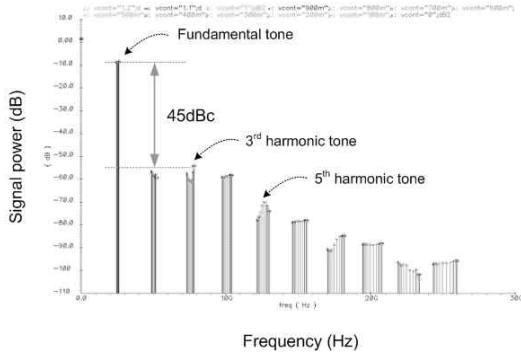


그림 3. Quadrature LC VCO의 파워 스펙트럼 시뮬레이션

Fig. 3. Simulated power spectrum of quadrature LC VCO.

$$I_{C1} + I_{L1} + I_{R1} + I_{gn1} + I_{gc2} = 0 \quad (1)$$

$$I_{C2} + I_{L2} + I_{R2} + I_{gn2} + I_{gc1} = 0 \quad (2)$$

상기 벡터 방정식 (1)과 (2)는 다음과 같이 4개의 스칼라 방정식으로 분리할 수 있다.

$$I_{gn1} + I_{gc2} \sin\theta = I_{R1} \quad (3)$$

$$I_{L1} + I_{gc2} \cos\theta = I_{C1} \quad (4)$$

$$I_{gn2} - I_{gc1} \sin\theta = I_{R2} \quad (5)$$

$$I_{L2} + I_{gc1} \cos\theta = I_{C2} \quad (6)$$

상기 스칼라 방정식들 중 식 (3)과 (5)는 Quadrature LC VCO의 I/Q 오차가 갖는 매우 중요한 특성을 나타낸다. 즉, Quadrature LC VCO의 두 LC 오실레이터들에 공급되는 전류(I_{gn1} , I_{gn2} , I_{gc1} 및 I_{gc2})가 모두 같더라도 I/Q 위상 오차(θ)가 존재하면 I_{R1} 과 I_{R2} 는 서로 다르다는 점이다. I_{R1} 과 I_{R2} 가 서로 다르다는 것은 V_1 과 V_2 이 서로 다르다는 점을 가리키며 이것은 I/Q 진폭 오차가 존재한다는 것을 의미한다. 따라서 우리는 Quadrature LC VCO의 I/Q 위상 오차와 I/Q 진폭 오차가 서로 밀접한 관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

상기 스칼라 방정식들을 풀기 위하여 우리는 다음과 같은 치환을 사용함으로써 세 개의 전류 신호들을 하나의 전압 신호와 각 소자의 값들로 표현한다. 이러한 치환은 그림 1(b)에 도시한 바와 같이 LC 오실레이터에서 병렬로 연결된 인덕터, 캐패시터 및 기생 저항의 양단

간의 전압신호들이 V_i 로 동일하기 때문에 가능하다.

$$I_{Ri} = \frac{V_i}{R_i} \quad (7)$$

$$I_{Li} = \frac{V_i}{\omega L_i} \quad (8)$$

$$I_{Ci} = V_i \omega C_i \quad (9)$$

치환 후, 상기 스칼라 방정식들은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$V_1 = (I_{gn1} + I_{gc2} \sin\theta) \times R_1 \quad (10)$$

$$\omega_1^2 L_1 C_1 - \frac{I_{gc2} \cos\theta}{V_1} \omega_1 L_1 - 1 = 0 \quad (11)$$

$$V_2 = (I_{gn2} - I_{gc1} \sin\theta) \times R_2 \quad (12)$$

$$\omega_2^2 L_2 C_2 - \frac{I_{gc1} \cos\theta}{V_2} \omega_2 L_2 - 1 = 0 \quad (13)$$

상기 식 (11)과 식 (13)을 살펴보자. 식 (11)은 ω_1 를 포함하며 식 (13)은 ω_2 를 포함한다. ω_1 는 Quadrature LC VCO의 첫 번째 LC 오실레이터의 공진 주파수이며 ω_2 는 두 번째 LC 오실레이터의 공진 주파수이다. 만약 Quadrature LC VCO를 구성하는 두 개의 LC 오실레이터가 서로 커플링 되어 있지 않다고 가정하면, 즉 I_{gc1} 와 I_{gc2} 가 모두 0이라면, ω_1 과 ω_2 는 각각 $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ 와

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

가 되어 각각의 공진 주파수가 됨을 알 수 있다. 하지만, Quadrature LC VCO 내에서 두 개의 LC 오실레이터는 상호 커플링 되므로 식 (11)의 ω_1 과 식 (13)의 ω_2 는 다음과 같이 풀 수 있다.

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} + \frac{1}{2C_1} \times \frac{I_{gc2} \cos\theta}{V_1} \quad (14)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} + \frac{1}{2C_2} \times \frac{I_{gc1} \cos\theta}{V_2} \quad (15)$$

특히, 두 개의 LC 오실레이터가 Quadrature LC VCO 내에서 상호 완벽히 커플링 되어 동일한 공진 주

파수를 출력할 때에는 ω_1 과 ω_2 는 서로 동일한 값을 갖으므로 식 (14)와 (15)는 다음과 같이 합쳐질 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} - \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \\ &= \frac{1}{2C_2} \times \frac{I_{qc1} \cos\theta}{V_2} - \frac{1}{2C_1} \times \frac{I_{qc2} \cos\theta}{V_1} \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)에서 좌변은 두 개의 LC 오실레이터가 커플링 되지 않고 독립적으로 존재할 때의 두 공진 주파수의 미세 오차($\Delta\omega$)와 같으므로, 우리는 식 (16)을 다음과 같이 보다 간단히 표현할 수 있다.

$$\Delta\omega = \frac{1}{2C_2} \times \frac{I_{qc1} \cos\theta}{V_2} - \frac{1}{2C_1} \times \frac{I_{qc2} \cos\theta}{V_1} \quad (17)$$

직관적으로 식 (17)은 Quadrature LC VCO의 I/Q 위상 오차(θ)와 두 개의 LC 오실레이터가 커플링 되지 않았을 때의 각각의 공진 주파수의 미세한 차이($\Delta\omega$)와의 관계적임을 파악할 수 있다.

마지막으로, 식 (17)은 상기 식 (10)과 식 (12)를 이용하여 I/Q 위상 오차(θ)와 두 개의 LC 오실레이터가 커플링 되지 않았을 때의 각각의 공진 주파수의 미세한 차이($\Delta\omega$)와의 보다 간단한 관계로 풀릴 수 있다. 다만, 계산의 복잡성을 피하고자 다음과 같은 두 가지 근사를 수행할 필요가 있다. 다음과 같은 근사는 그림 4에 보이는 각 소자의 1% 오차로 인한 I/Q 오차 시뮬레이션 결과와 아래의 설명에 의하여 합리화 할 수 있다.

첫째, R_1 과 R_2 의 오차는 무시한다. 실제적으로 L과 C 오차는 R 오차보다 Q 팩터(quality factor) 만큼 I/Q 오차에 더 영향을 미친다^[6]. Q 팩터는 일반적으로 10이상이므로 R 오차는 무시될 수 있다. 그림 4는 각각 1%의 L, C, R 및 전류 오차를 인가하였을 때의 Quadrature LC VCO의 I/Q 신호를 보여주는 시뮬레이션 결과 파형이다. 4개의 각 파형의 왼쪽 부분은 아무런 오차가 존재하지 않을 경우이며 중간에 1%의 오차를 인가할 경우에 I/Q 오차가 발생함을 알 수 있다.

둘째, 전류 오차는 무시한다. 설계시 전류 소스의 트랜지스터 크기를 조정하여 매칭을 좋게 할 수 있기 때문이다. 또한 그림 4에서 볼 수 있듯이 전류의 오차는 I/Q 오차에 큰 영향을 끼치지 않기 때문이다.

위와 같은 근사를 통하여 식 (17)은 상기 식 (10)과 식 (12)를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta\omega &\approx \frac{I_{qc} \cos\theta}{2} \times \frac{I_{qc} \sin\theta R(C_1 + C_2)}{I_{gn}^2 R^2 C_1 C_2} \\ &\approx \left(\frac{I_{qc}}{I_{gn}}\right)^2 \times \frac{\theta}{RC} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)을 정리하면, I/Q 위상 오차(θ)는 다음과 같

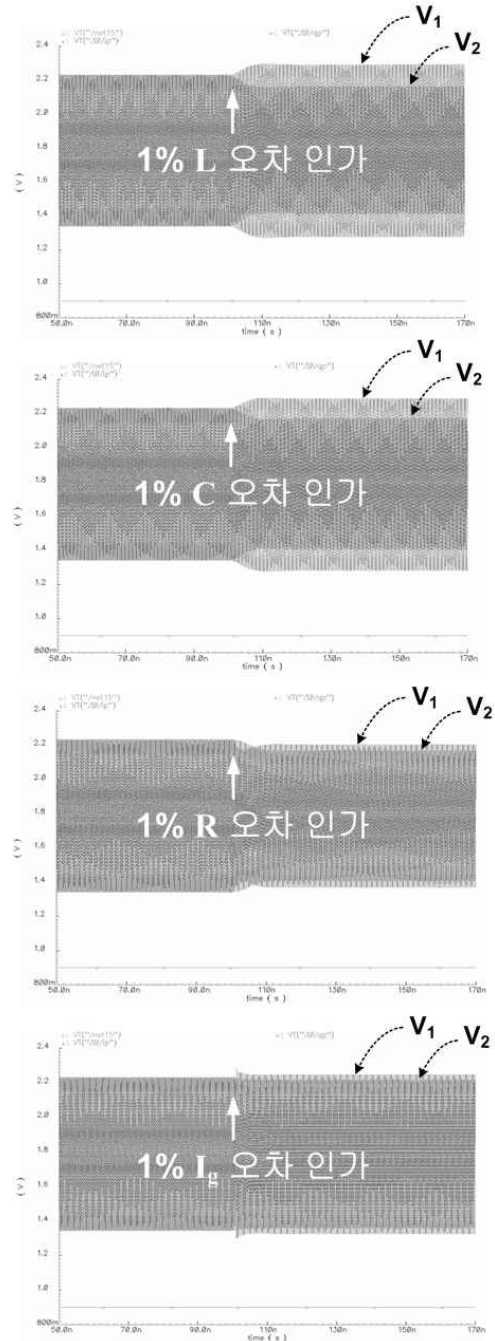


그림 4. I/Q 오차에 대한 1%의 L, C, R 및 전류 오차의 영향 시뮬레이션

Fig. 4. Simulated I/Q mismatch against 1% of L, C, R and I_g mismatch.

다. 즉 I/Q 위상 오차는 두 개의 LC 오실레이터의 커플링 세기(I_{gc})의 제곱에 반 비례하고, 두 개의 LC 오실레이터의 공진 주파수 오차($\Delta\omega$)에 비례한다.

$$\theta = \left(\frac{I_{gn}}{I_{gc}}\right)^2 RC\Delta\omega \quad (19)$$

I/Q 진폭 오차는 I/Q 위상 오차를 나타내는 식 (19)와 식 (10) 및 식 (12)로부터 얻을 수 있다. 우선 I/Q 진폭 오차를 다음과 같이 정의하여 보자.

$$\epsilon = \frac{\Delta V}{V_{average}} = \frac{V_1 - V_2}{\frac{V_1 + V_2}{2}} \quad (20)$$

다음, 식 (20)의 V_1 과 V_2 를 식 (10)과 식 (12)로 치환한다. 치환된 식에서 $\sin\theta$ 를 θ 로 근사하면 아래 식 (21)를 얻을 수 있다. 일반적으로 Quadrature LC VCO의 I/Q 위상 오차는 5° 이하로 매우 작게 설계되는 점을 고려하면 이와 같은 근사는 정당하고 볼 수 있다.

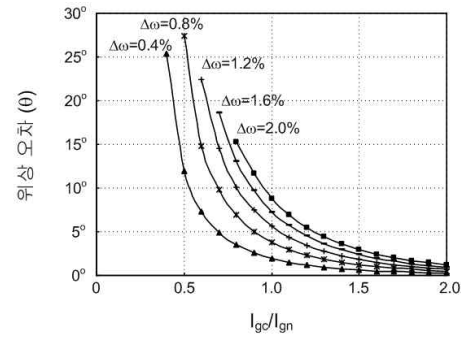
$$\begin{aligned} \epsilon &= 2 \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \\ &= 2 \frac{(I_{gn} + I_{gc}\sin\theta)R - (I_{gn} - I_{gc}\sin\theta)R}{(I_{gn} + I_{gc}\sin\theta)R + (I_{gn} - I_{gc}\sin\theta)R} \quad (21) \\ &= 2 \left(\frac{I_{gc}}{I_{gn}}\right) \sin\theta \approx 2 \left(\frac{I_{gc}}{I_{gn}}\right) \theta \end{aligned}$$

위와 같은 방법으로 구한 식 (21)은 Quadrature LC VCO의 I/Q 진폭 오차(ϵ)와 I/Q 위상 오차(θ)간의 관계식이다. 이 식에서 우리는 진폭 오차와 위상 오차가 서로 비례 관계를 갖음을 알 수 있다.

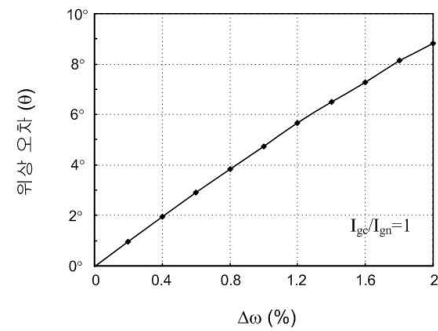
마지막으로 식 (21)에 식 (19)의 I/Q 위상 오차를 치환하면 다음과 같이 I/Q 진폭 오차를 구할 수 있다.

$$\epsilon = 2 \left(\frac{I_{gn}}{I_{gc}}\right) RC\Delta\omega \quad (22)$$

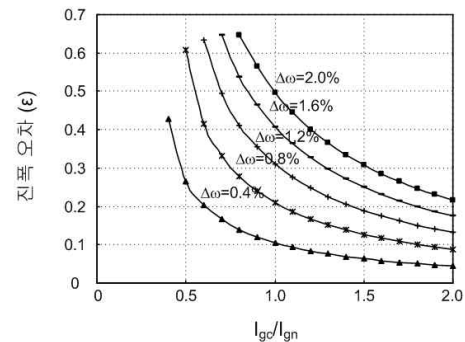
그림 5는 두 개의 LC 오실레이터의 공진 주파수의 미세한 차이($\Delta\omega$) 및 상호 커플링 강도(I_{gc}/I_{gn})에 따른 Quadrature LC VCO의 I/Q 위상 오차(θ)와 I/Q 진폭 오차(ϵ)를 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 5(a)의 시뮬레이션 결과는 위상 오차가 대략 두 개의 LC 오실레이터의 커플링 세기(I_{gc}/I_{gn})의 2.7승에 반 비례함을 보여준다. 유도된 식 (19)은 위상 오차가 커플링 세기(I_{gc}/I_{gn})의 제곱에 반 비례함을 나타내므로 그림 5(a)의 회로 시뮬레이션 결과와는 약간의 차이가 있는 것이 사실이



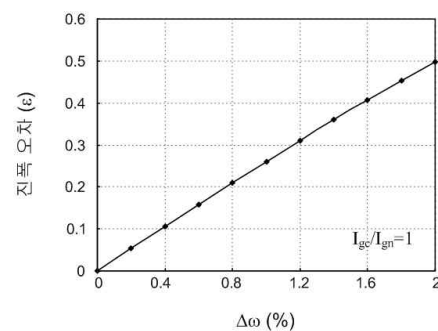
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5. I/Q 위상 오차 및 진폭 오차 시뮬레이션
Fig. 5. Simulated I/Q mismatch against $\Delta\omega$ and I_{gc} .

다. 하지만 식 (19)를 유도하는 과정에서 행한 몇 가지 근사들을 고려하면 시뮬레이션 결과와 유도된 식이 서로 유사한 결과를 보이는 것으로 판단 할 수 있다. 다음

그림 5(c)는 진폭 오차가 LC 오실레이터의 커플링 세기(I_{gc}/I_{gn})에 반 비례함을 보여주며 유도된 식 (22)과 정확히 일치한다. 그림 5(b)와 그림 5(d)는 각각 위상 오차와 진폭 오차가 LC 오실레이터의 공진 주파수의 미세한 차이($\Delta\omega$)와 비례함을 보여주며 유도된 식 (19) 및 식 (22)와 정확히 일치한다.

본 장에서는 Quadrature LC VCO의 I/Q 오차를 분석하고, 위상 오차와 진폭 오차와의 관계를 유도하였다. 식 (19)와 식 (22)는 I/Q 오차에 미치는 두 개의 LC 오실레이터의 공진 주파수의 미세한 차이($\Delta\omega$) 및 상호 커플링 강도(I_{gc}/I_{gn})의 영향을 보이며, 식 (21)은 위상 오차와 진폭 오차의 상관 관계를 보여주었다.

III. 2.5GHz quadrature LC VCO 설계

상기 식 (21)에서 Quadrature LC VCO의 I/Q 위상 오차는 I/Q 진폭오차와 서로 비례 관계를 갖음을 확인하였다. 우리는 이러한 두 오차 간의 상관 관계를 이용하여 그림 6에 도시한 바와 같이 기존의 위상 오차 검출기를 사용하는 대신에 새로이 제안하는 진폭 오차 검출기를 사용하는 I/Q 위상 오차 보정회로를 갖는 2.5GHz quadrature LC VCO를 설계하였다.

그림 6에서 진폭 오차 검출기는 두 개의 정류기 (rectifier), V/I 변환기(transconductor) 및 루프 필터 (C_L)로 구성된다. 정류기는 진폭을 검출하고 V/I 변환기는 검출된 I/Q 신호의 진폭을 비교하여 그 차이를 전류 신호로 출력한다. 루프 필터는 전류 신호를 전압 신호(V_{cont})로 바꾸어 두 개의 LC 오실레이터 중 두 번째 LC 오실레이터에 인가함으로써 진폭 오차를 보정한다. 진폭 오차가 보정되면 진폭 오차와 비례 관계를 갖는 위상 오차도 보정된다.

그림 7은 Quadrature LC VCO를 구성하는 두 개의 LC 오실레이터의 회로도이다. 그림 1(a)의 일반적인 LC 오실레이터와 같은 구조이지만 미세한 인덕터 및 캐패시터의 오차를 보상하기 위하여 작은 배랙터 캐패시터(C_{small})를 추가하였다. 추가된 배랙터 캐패시터는 캐패시터의 오차 뿐만 아니라 인덕터의 오차도 보상할 수 있는데 그 이유는 다음과 같다. I/Q 오차에 직접적인 영향을 미치는 LC 오실레이터의 공진 주파수의 미세한 차이($\Delta\omega$)는 $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 를 이용하여 다음 식 (23)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (23)에서 추가된 배랙터 캐패시터(C_{small})의 값을 조정하여 $\Delta C = -\frac{C\Delta L}{L}$ 로 하면

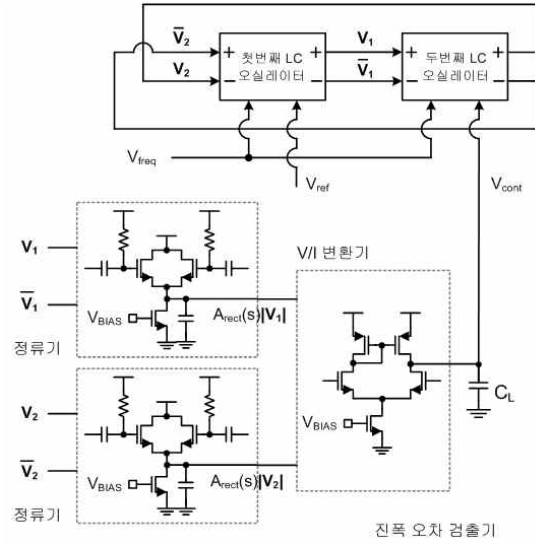


그림 6. 제안하는 I/Q 오차 보정 회로를 갖는 2.5GHz quadrature LC VCO
 Fig. 6. Proposed 2.5GHz quadrature LC VCO with I/Q mismatch compensator.

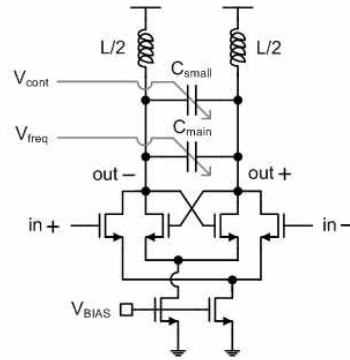


그림 7. LC 오실레이터 회로
 Fig. 7. Schematic of LC oscillator.

$\Delta\omega$ 를 0으로 보정할 수 있게되기 때문이다.

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \frac{\partial\omega}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial\omega}{\partial C} \Delta C \\ &= -\frac{\omega}{2} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \end{aligned} \tag{23}$$

제안하는 진폭 오차 검출기를 이용한 I/Q 오차 보정 회로를 검증하기 위하여 2.5GHz quadrature LC VCO가 0.18 μ m CMOS 공정으로 설계되었다. 그림 8은 설계된 Quadrature LC VCO에 고의적으로 각각 1%의 인덕터 오차와 1%의 캐패시터 오차를 인가하였을 때의 I/Q 오차 보정 회로의 동작을 검증하는 시뮬레이션 파형이다. 그림 8(a)와 8(c)는 각각 1%의 인덕터 및 캐패시터 오차를 인가하고 I/Q 오차 보정 회로를 사용하지 않았을 때의 Quadrature LC VCO의 I/Q 출력 신호를 보여

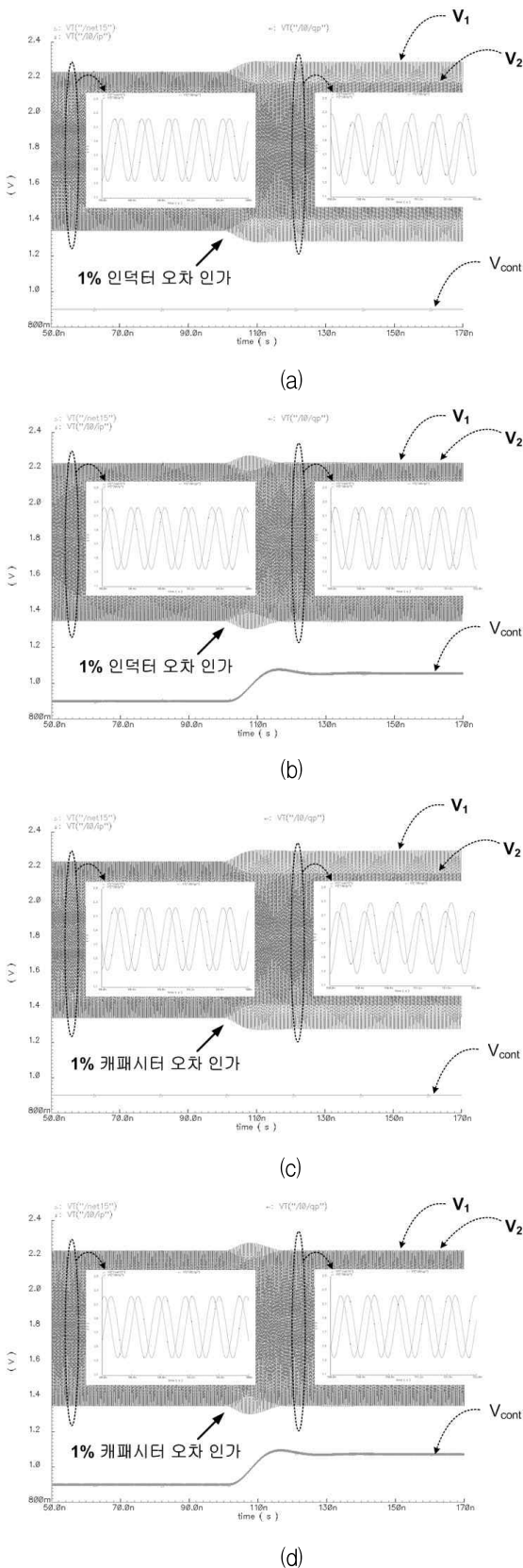


그림 8. 1%의 인덕터 및 캐패시터 오차를 인가하였을 때의 I/Q 오차 보정 시뮬레이션 파형
 Fig. 8. Simulated I/Q mismatch compensation result when 1% of L and C mismatch is added.

준다. I/Q 신호는 그림에서 V_1 과 V_2 로 인덕터 또는 캐패시터 오차가 인가되면서 서로 상당한 차이를 보이게 된다. 그림 8(b)와 8(d)는 마찬가지로 각각 1%의 인덕터 및 캐패시터 오차를 인가하고 I/Q 오차 보정 회로를 사용할 때의 Quadrature LC VCO의 I/Q 출력 신호를 보여준다. 설계된 I/Q 오차 보정 회로를 사용할 경우 I/Q 신호의 오차가 정밀하게 보정됨을 알 수 있다.

본 시뮬레이션에서는 I/Q 오차 검출 회로의 문턱 전압 오차의 영향은 고려되지 않았다. 만약, 설계된 진폭 오차 검출 회로의 문턱 전압 오차를 20mV 라고 가정할 경우, I/Q 진폭 오차는 20mV이하로 보정되지 않는다.

IV. 실험

제안하는 I/Q 오차 보정 회로를 갖는 2.5GHz quadrature LC VCO가 0.18 μ m 1P6M CMOS 공정을 사용되어 제작되었다. 총 소모 전류는 1.8V 전원 전압으로부터 8mA이고 칩 면적은 1.28mm²이다. 그 중, I/Q 오차 보정 회로만의 소모 전류는 0.4mA이고, 칩 면적은 0.04mm²이다. 그림 9는 제작된 2.5GHz quadrature LC VCO의 칩 사진이다.

그림 10은 측정된 Quadrature LC VCO의 I/Q 클럭 신호이다. 그림 10(a)는 I/Q 오차 보정 회로를 사용하지 않을 때이고 그림 10(b)는 I/Q 오차 보정 회로를 사용할 때이다. 측정된 I/Q 클럭 신호의 위상 오차는 1^o에서 1^o로 감쇄하는 것을 볼 수 있다. 물론 문턱 전압 오차로 인하여 측정 칩마다 보정할 수 있는 최소 위상 오차의 크기는 1^o에서 2^o사이로 서로 다른 것을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 위상 오차 보정 성능은 기존의 위상 오차 검출기를 사용한 I/Q 오차 보정 회로^[8-9]와 유사한 수준이며, 진폭 오차 검출기가 갖는 구현상의 용이성 및 요구되는 낮은 주파수 대역폭을 고려하면 제안하는 I/Q 오차 보정 회로는 추후 수 GHz 또는 수십

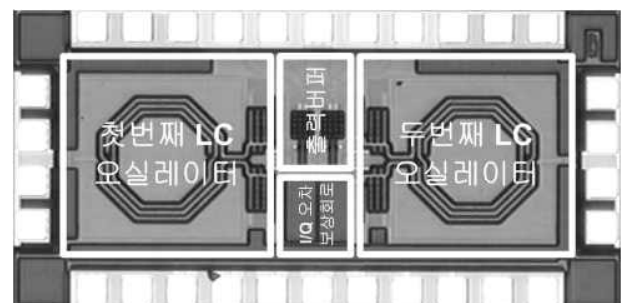
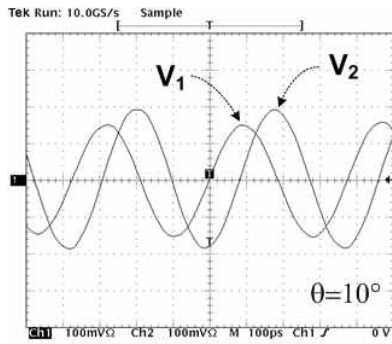
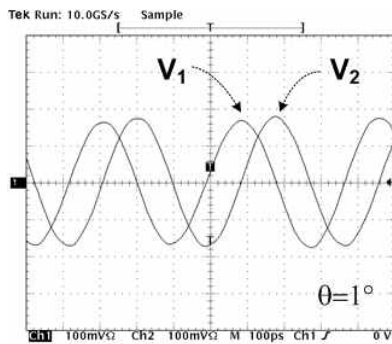


그림 9. 칩 사진
 Fig. 9. Die photo.



(a)



(b)

그림 10. 측정된 Quadrature LC VCO의 I/Q 오차

Fig. 10. Measured I/Q mismatch of the quadrature LC VCO.

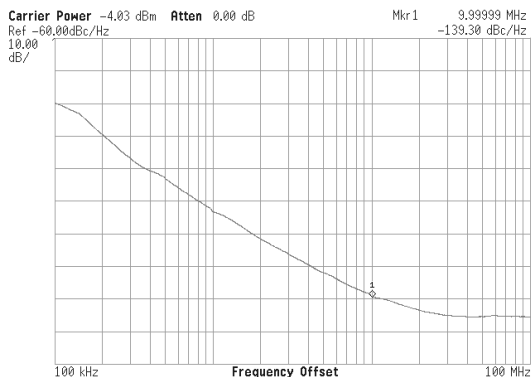


그림 11. 측정된 Quadrature LC VCO의 위상 잡음

Fig. 11. Measured phase noise of the quadrature LC VCO.

GHz의 고속 Quadrature LC VCO에 적용할 수 있는 매력적인 설계 방법이라고 볼 수 있다.

실제적으로 기존의 위상 오차 검출기를 사용한 I/Q 오차 보정 회로^[9]의 경우, 소모 전류는 5mA이고, 칩 면적은 0.4mm²이므로, 본 논문에서 제안하는 진폭 오차 검출기를 이용한 I/Q 오차 보정회로의 소모 전류 및 칩 면적과 비교해 상당히 큰 것을 알 수 있다.

그림 11은 Quadrature LC VCO의 위상 잡음 성능이

다. 측정결과 10MHz 주파수 오프셋에서 -140dBc/Hz의 위상 잡음 성능을 보였다.

V. 결론

본 논문에서는 다양한 유무선 통신 및 데이터 송수신 시스템에서 유용하게 사용되는 Quadrature LC VCO의 I/Q 오차를 분석하고, 분석된 결과를 바탕으로 진폭 오차 검출기를 이용한 I/Q 오차 보정 회로를 제안하였다. 제안된 회로는 2.5GHz quadrature LC VCO에 내장되어 0.18μm 1P6M CMOS 공정으로 설계 및 제작되어 측정되었다. 측정결과 I/Q 오차 보정 회로가 보정할 수 있는 최소 위상 오차의 크기는 1°에서 2°사이이다. 제작된 I/Q 오차 보정 회로의 소모 전류는 0.4mA이고, 칩 면적은 0.04mm²이다.

참고 문헌

- [1] A. Rofougaran, G. Chang, J. J. Rael, J. Y.-C. Chang, M. Rofougaran, P. J. Chang, M. Djafari, M.-K. Ku, E. W. Roth, A. A. Abidi and H. Samuelli, "A single-chip 900-MHz spread-spectrum wireless transceiver in 1-μm CMOS-Part I: architecture and transmitter design," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 4, pp. 515-534, Apr. 1998.
- [2] J. E. Rogers and J. R. Long, "A 10-Gb/s CDR/DEMUX with LC delay line VCO in 0.18-μm CMOS," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol. 37, no. 12, pp. 1781-1789, Dec. 2002.
- [3] J. J. Kim and B. Kim, "A low-phase noise CMOS LC oscillator with a ring structure," in *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers*, pp. 430-431, San Francisco, CA, USA, Feb. 2000.
- [4] A. Mirzaei, M. E. Heidari, R. Bagheri, S. Chehrazi and A. A. Abidi, "The quadrature LC oscillator: a complete portrait based on injection locking," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol. 42, no. 9, pp. 1916-1932, Sep. 2007.
- [5] L. Romano, S. Levantino, C. Samori and A. L. Lacaita, "Multiphase LC oscillators," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 53, no. 7, pp. 1579-1588, Jul. 2006.
- [6] A. Mazzanti, F. Svelto and P. Andreani, "On the amplitude and phase errors of quadrature LC-tank CMOS oscillators," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 6, pp.

- 1305-1313, Jun. 2006.
- [7] A. Hajimiri and T. H. Lee, "Design issues in CMOS differential LC oscillators," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol. 34, no. 5, pp. 717-724, May. 1999.
- [8] H. K. Ahn, I.-C. Park and B. Kim, "A 5-GHz self-calibrated I/Q clock generator using a quadrature LC-VCO," in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems(ISCAS)*, vol. 1, pp.797-800, May 2003.
- [9] A. Y. Valero-Lopez, S. T. Moon and E. Sanchez-Sinencio, "Self-calibrated quadrature generator for WLAN multistandard frequency synthesizer," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 5, pp. 1031-1041, May 2006.

 저 자 소 개



변 상 진(정회원)
 1997년 KAIST 전기 및
 전자공학과 학사 졸업.
 1999년 KAIST 전기 및
 전자공학과 석사 졸업.
 2004년 KAIST 전기 및
 전자공학과 박사 졸업.

2001년~2004년 Berkana Wireless Korea
 선임 연구원

2004년~2008년 ETRI 선임 연구원

2008년~현재 동국대학교 전자전기공학부 조교수
 <주관심분야 : 음성신호 집적회로 설계 및 레이
 아웃 기술>



심 재 훈(정회원)
 1998년 KAIST 전기 및
 전자공학과 학사 졸업.
 2000년 KAIST 전기 및
 전자공학과 석사 졸업.
 2005년 KAIST 전기 및
 전자공학과 박사 졸업.

2005년~2009년 ETRI 선임 연구원

2009년~현재 경북대학교 전자공학부 전임강사
 <주관심분야 : 음성신호처리, SoC 설계>