

논문 2016-53-11-9

## 심장박동 측정 레이더를 위한 24GHz I/Q LO 발생기

## ( A 24 GHz I/Q LO Generator for Heartbeat Measurement Radar System )

양희성\*, 이옥구\*\*, 남일구\*\*

( Hee-Sung Yang, Ockgoo Lee, and Ilku Nam<sup>©</sup> )

## 요약

본 논문에서는 심장박동 측정 레이더 송수신기용 24 GHz I/Q 발생기를 제안한다. 공정 변화에 따른 I/Q LO 신호간의 부정합 특성을 개선하기 위하여 인덕터와 캐패시터로 구성된 high-pass 위상천이기와 low-pass 위상천이기 기반 24 GHz I/Q LO 발생기를 제안하였다. 제안한 24 GHz I/Q 발생기는 LO 버퍼와 high-pass 위상천이기와 low-pass 위상천이기 구성된 24 GHz I/Q LO 발생기는 65 nm CMOS 공정에서 설계되었고, 전원 전압 1 V에서 8 mA의 전류를 소모하면서 24.05 GHz에서 24.25 GHz의 주파수 대역에서 7.5 dB의 전압 이득, 2.3 dB의 잡음 지수, 공정 및 온도 변화에 대해 0.1 dB의 I/Q 이득 부정합, 4.3도의 I/Q 위상 부정합의 성능을 보인다.

## Abstract

This paper presents an 24 GHz I/Q LO generator for a heartbeat measurement radar system. In order to improve the mismatch performance between I and Q LO signals against process variation, a 24 GHz I/Q LO generator employing a low-pass phase shifter and a high-pass phase shifter composed of inductors and capacitors is proposed. The proposed 24 GHz I/Q LO generator consists of an LO buffer, a low-pass phase shifter and a high-pass phase shifter. It was designed using a 65 nm CMOS technology and draws 8 mA from a 1 V supply voltage. The proposed 24 GHz I/Q LO generator shows a gain of 7.5 dB, a noise figure of 2.3 dB, 0.1 dB gain mismatch and 4.3° phase mismatch between I and Q-path against process and temperature variations for the operating frequencies from 24.05 GHz to 24.25 GHz.

**Keywords :** 24 GHz, Heartbeat, I/Q generator, LO, Radar

## I. 서론

최근 졸음운전 사망사고율이 증가하고 있고, 고령화 사회에 접어들면서 고령자 운전으로 인한 부주의, 졸음, 신체적 돌발사고가 급증하고 있다.

이러한 사회적 문제의 해결책으로 IT 기술을 접목한 스마트 카 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다<sup>[1-3]</sup>.

\* 학생회원, 부산대학교 전기컴퓨터공학부 (Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University)

\*\* 평생회원, 부산대학교 전기컴퓨터공학부 (Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University)

© Corresponding Author (E-mail : nik@pusan.ac.kr)

※ 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

Received ; September 28, 2016 Revised ; October 13, 2016

Accepted ; October 19, 2016

국내에서는 24 GHz 물체감지센서용 무선기기의 기술 기준 조건으로 주파수 대역을 24.05 GHz에서부터 24.25 GHz의 주파수 대역을 사용하게 되어 있다.

이러한 시스템은 밀리미터파 대역의 주파수를 활용하기 때문에 LO 발생기의 설계가 중요하다. 보통 10 GHz 이하의 RF 주파수 대역에서는 동작하는 RF 주파수의 2배 주파수에서 동작하는 전압 제어 발진기를 사용하여 나누기 2 회로를 사용하여 I/Q LO 신호를 발생하는 방법을 많이 사용한다. 그러나, 밀리미터파 대역에서는 좋은 성능을 갖는 전압 제어 발진기와 나누기 2 회로의 설계가 어렵다. 다른 방법은 RC 폴리페이즈 필터를 이용하여 I/Q LO 신호를 발생하는 방법이 있다. 이 방법은 신호의 손실이 크다는 단점이 있다.

본 논문에서는 심장 박동 측정 레이더 시스템을 위한

24 GHz I/Q LO 발생기를 인덕터와 캐패시터를 사용한 LPF와 HPF의 기반의 24 GHz I/Q LO 발생기를 제안하고 65 nm CMOS 공정을 사용하여 설계하였다.

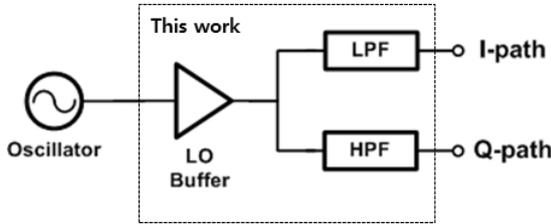


그림 1. 심장박동 측정 레이더를 위한 24 GHz I/Q LO 발생기 블록도

Fig. 1. Block diagram of 24 GHz I/Q LO generator for heartbeat measurement radar.

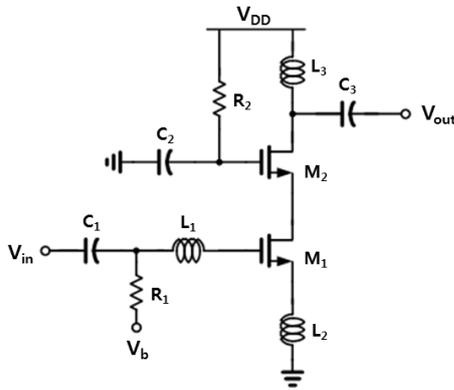


그림 2. 24 GHz LO 버퍼 회로도  
Fig. 2. Simplified schematic of 24 GHz LO buffer.

## II. HPF와 LPF 기반 I/Q LO 발생기

그림 1은 심장 박동 측정 레이더 시스템을 위한 24 GHz I/Q LO 발생기의 블록도를 보여주고 있다. 24 GHz I/Q LO 발생기는 LO 버퍼와 high-pass 위상천이기와 low-pass 위상천이기로 구성되어 있다. 심장 박동 측정 레이더 시스템은 사용 주파수 대역이 24.05 GHz에서 24.25 GHz로 200 MHz 대역의 주파수를 다루는 협대역 시스템이다.

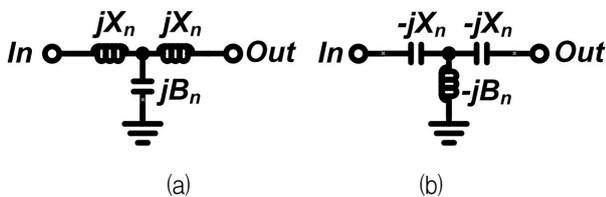


그림 3. (a) Low-pass T-네트워크, (b) High-pass T-네트워크  
Fig. 3. (a) Low-pass T-network, (b) High-pass T-network.

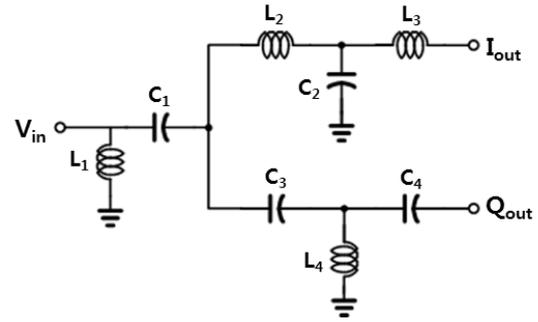


그림 4. 제안하는 high-pass 및 low-pass 위상천이기 기반 I/Q LO 발생회로  
Fig. 4. Proposed I/Q LO generator with high-pass and low-pass phase shifters.

주파수 합성기로부터 오는 LO 신호를 증폭하고 I/Q 발생하기 위한 위상 천이기와 격리를 위해 LO 버퍼 회로가 필요하다. 그림 2는 싱글엔드 캐스코드 구조의 LO 버퍼 회로를 보여주고 있다. 그림 2에서 24 GHz 협대역 입력매칭을 위해 인덕턴스  $L_1$ 과  $L_2$ 를 사용하였는데, 이 때 입력 임피던스  $Z(j\omega)$ 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega C_{gs1}} + \frac{g_{m1}L_2}{C_{gs1}} + j\omega(L_1 + L_2). \quad (1)$$

수식 (1)에서  $C_{gs1}$ 은 트랜지스터  $M_1$ 의 게이트-소스 간의 캐패시턴스이고,  $g_{m1}$ 은 트랜지스터  $M_1$ 의 트랜스컨덕턴스이다. 협대역 입력매칭을 위해 수식 (1)의 허수부는 0이 되도록 하고 실수부는 50Ω이 되도록 인덕턴스  $L_1$ 과  $L_2$ 의 값을 설정하였다<sup>[4]</sup>.

그림 3은 T-네트워크 형태로 구성된 low-pass 위상천이기와 high-pass 위상천이기를 각각 보여주고 있다<sup>[5]</sup>. Low-pass 위상천이기와 high-pass 위상천이기는 각각 직렬 인덕턴스와 병렬 캐패시턴스, 직렬 캐패시턴스와 병렬 인덕턴스로 구성된다. 그림 3에서 인덕턴스와 캐패시턴스의 임피던스를 reactance와 susceptance로 표시하여 ABCD 행렬을 통해 low-pass와 high-pass 위상천이기 간의 위상 변이값을 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = 2\tan^{-1} \left\{ \frac{B_n X_n^2 - 2X_n - B_n}{2(1 - B_n X_n)} \right\}. \quad (2)$$

수식 (2)에서 reactance  $X_n$ 과 susceptance  $B_n$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$X_N = \tan\left(\frac{\Delta\phi}{4}\right) \quad (3)$$

$$B_N = \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (4)$$

그림 4는 본 논문에서 제안하는 I/Q 발생회로를 보여 주고 있다. High-pass와 low-pass T-networks 회로를 병렬로 연결하고 입력 매칭을 위한 인덕터와 커패시터를 추가하였다. 그림 4에서 인덕턴스  $L_1$ 과 커패시턴스  $C_2$ 는 그림 2의 LO 버퍼 출력단과의 매칭을 위해 사용되었다.

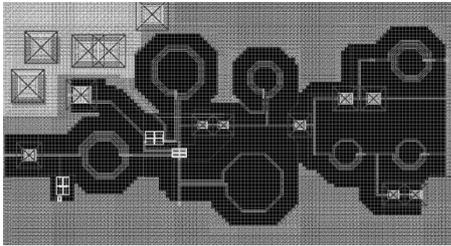


그림 5. 제안하는 24 GHz I/Q LO 발생기의 레이아웃도  
Fig. 5. Layout of 24 GHz I/Q LO generator.

수식 (2), (3) 및 (4)를 이용하여 위상 차이가 90°가 되는 인덕턴스 값과 커패시턴스 값을 다음 수식을 통해 계산할 수 있다.

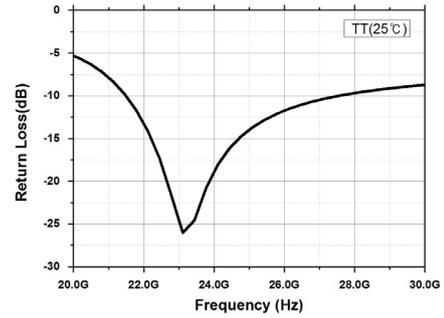
$$L_2 = L_3 = \frac{X_N}{2\pi f}, \quad C_2 = \frac{B_N}{2\pi f}, \quad (5)$$

$$L_4 = \frac{1}{2\pi f B_N}, \quad C_3 = C_4 = \frac{1}{2\pi f X_N} \quad (6)$$

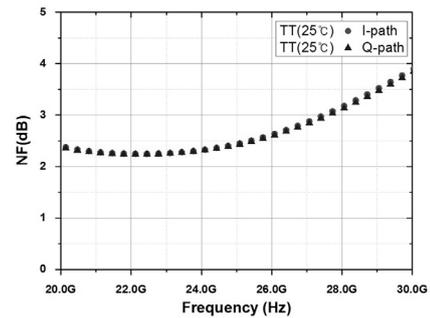
수식 (5)와 (6)을 이용하여 24.05 GHz에서부터 24.25 GHz의 주파수 대역에서 위상 차이가 90°가 되도록  $L_2 = L_3 = 137.3 \text{ pH}$ ,  $L_4 = 468.9 \text{ pH}$ ,  $C_2 = 93.4 \text{ fF}$ ,  $C_3 = C_4 = 320 \text{ fF}$ 로 선택하여 I/Q 발생회로를 설계하였다.

### III. 시뮬레이션 결과

제안한 LO 발생기는 65 nm CMOS 공정을 사용하여 설계하였다. 그림 5는 제안하는 24 GHz I/Q LO 발생기의 레이아웃도를 보여주고 있다. 면적은  $650 \mu\text{m} \times 390 \mu\text{m}$ 이다. 전원 전압 1V에서 전류 8 mA를 소모한다. 모

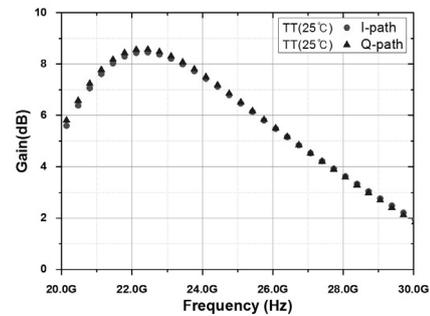


(a)

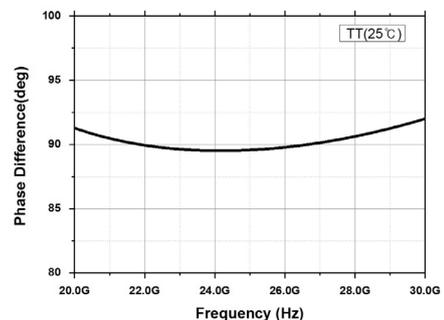


(b)

그림 6. (a) 24 GHz I/Q LO 발생기의 입력 매칭 특성, (b) 24 GHz I/Q LO 발생기의 잡음 특성  
Fig. 6. (a) Simulated S11 of 24 GHz I/Q LO generator, (b) simulated NF of 24 GHz I/Q LO generator.



(a)



(b)

그림 7. (a) 24 GHz I/Q 발생기의 이득 특성, (b) 24 GHz I/Q 발생기의 위상 차이 특성  
Fig. 7. (a) Simulated gain and (b) simulated phase difference of 24 GHz I/Q generator.

든 인덕터, 캐패시터, 연결선은 EM 시뮬레이션을 하였고, 사용한 저항과 트랜지스터는 레이아웃 후 기생성분을 추출하여 시뮬레이션을 하였다. 설계한 LO 발생기의 입력 매칭 특성인 S11은 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 -10 dB 이하의 값을 갖는다. 그림 6(b)는 I-path의 LO 신호와 Q-path의 LO 신호의 잡음지수(NF) 특성을 보여주고 있다. 동작 주파수에서 약 2.3dB의 NF 특성을 갖는다. 그림 7(a)는 이득 특성을 보여주고 있다. I-path의 LO 신호의 이득은 7.5 dB, Q-path의 LO 신호의 이득은 7.6 dB로 크기 부정합 특성은 0.1 dB 이하이다. 그림 7(b)는 위상 차이 특성을 보여주고 있다. 동작주파수에서 I-path와 Q-path간의 LO 신호의 위상은 89.5도로 약 0.5도 차이가 난다.

표 1. 설계된 24 GHz I/Q LO 발생기의 성능 요약  
Table1. Performance summary of the designed 24 GHz I/Q LO generator.

Condition	TT, 25도
Operating frequency	24.05 - 24.25 GHz
Gain (dB)	7.5
S11 (dB)	-18.9 < -10
Gain (dB)	7.5 (I-path) / 7.6 (Q-path)
NF (dB)	2.3 (I-path) / 2.3 (Q-path)
Gain/Phase mismatch	0.1 dB (Gain mismatch) / 0.5도 (Phase mismatch)
Current consumption (mA) @ 1 V	8
Technology	65 nm CMOS

표 2. 공정 및 온도 변화에 따른 24 GHz I/Q LO 발생기의 성능 요약  
Table2. Performance summary of the 24 GHz I/Q LO generator against process and temperature variations.

	S11	Gain	NF	Gain/Phase mismatch
TT, -40도	-19.0	8.0	1.8	0.1/0.5
TT, 25도	-18.9	7.5	2.3	0.1/0.5
TT, 90도	-18.6	7.0	2.8	0.02/0.5
SS, -40도	-17.9	7.9	1.9	0.02/4.0
SS, 25도	-18.4	7.3	2.4	0.1/3.9
SS, 90도	-18.6	6.7	3.0	0.1/3.9
FF, -40도	-19.7	7.8	1.8	0.1/4.3
FF, 25도	-18.7	7.5	2.3	0.1/4.3
FF, 90도	-17.8	7.0	2.8	0.1/4.2

## IV. 결 론

본 논문에서는 LPF와 HPF를 이용한 24 GHz I/Q LO 발생기를 제안하였다. 제안한 LO 발생기는 65 nm CMOS 공정을 사용하여 설계하였고, 전원 전압 1V에서 전류 8 mA를 소모한다. 24 GHz 대역에서 7.5 dB의 이득, 2.3 dB의 잡음 지수, 모든 공정 및 온도 변화에 대해 I와 Q의 LO 신호간의 위상 차이가 4.3도 이내, 크기 차이는 0.1 dB 이내의 성능을 보여주어 협대역 통신을 하는 24 GHz 대역 심장 박동 측정 레이더 시스템에 적합하다.

## REFERENCES

- [1] A. Lazaro, D. Girbau, and R. Villarino, "Analysis of vital signs monitoring using an IR-UWB radar," Progress In Electromagnetics Research, PIER 100, pp. 265-284, 2010.
- [2] M. C. Park, W. I. Chang, J. O. Ha, and Y. S. Eo, "A non-coherent IR-UWB RF transceiver for WBAN applications in 0.18  $\mu$ m CMOS," Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 53, no. 2, pp. 36-167, Feb. 2016.
- [3] M. K. Jung, T. H. Kim, and S. W. Nah, "Study on the brightness temperature measurement in the human body using millimeter-wave radiometer," Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 53, no. 5, pp. 163-167, May. 2016.
- [4] P. Andreani and H. Sjoland, "Noise optimization of an inductively degenerated CMOS low noise amplifier," IEEE Trans. Circuits Syst. II., Analog Digit. Signal Process, vol. 48, no. 9, pp. 835-841, Sep. 2001.
- [5] K. Hettak, G. A. Morin, and M. G. Stubbs, "A novel miniature CPW topology of a high-pass/low-pass T-network phase shifter at 30 GHz," Proceedings of the 39th European Microwave Conference, pp. 1140-1143, Sep. 2009.

저 자 소 개



양 희 성(학생회원)  
 2015년 인제대학교 나노공학부 학사 졸업.  
 2015년 3월~현재 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사과정.  
 <주관심분야: RF/mmWave 집적 회로 및 시스템>



이 옥 구(평생회원)  
 2001년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 학사 졸업.  
 2005년 한국과학기술원 전기 및 전자 석사 졸업.

2009년 Georgia Institute of Technology 전기 및 전자박사 졸업.

2010년~2012년 8월 Qualcomm, Inc., Qualcomm CDMA Technologies, Senior Engineer

2012년 9월~현재 부산대학교 전기컴퓨터공학부 부교수

<주관심분야: CMOS 송수신단 집적회로, 전력증폭기, 바이오메디컬 회로 및 시스템>



남 일 구(평생회원)  
 1999년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.  
 2001년 한국과학기술원 전기 및 전자 석사 졸업.  
 2005년 한국과학기술원 전기 및 전자 박사 졸업.

2005년~2007년 2월 삼성전자 시스템 LSI RF 개발팀 책임연구원

2007년 3월~현재 부산대학교 전기컴퓨터공학부 교수  
 <주관심분야: RF/아날로그/밀리미터웨이브 집적회로 및 시스템>