

## BPSK 변조 기능을 갖는 W-대역 CMOS UWB 펄스발생기

## W-Band CMOS UWB Pulse Generator with Embedded BPSK Modulator

심 상 훈<sup>1</sup>Sanghoon Sim<sup>1</sup>

## 요 약

본 논문에서는 CMOS 0.13  $\mu\text{m}$  공정을 이용하여 BPSK 변조 기능을 갖는 W 대역 UWB(ultra wide band) 펄스 발생기를 설계하고 제작하였다. 제안된 BPSK 변조 기법은 추가적인 RF 변조기 없이도 발진기의 초기조건을 제어하여 BPSK 변조를 수행할 수 있다. 이 변조 기법은 같은 저자의 이전 논문 에서 K-대역 UWB 펄스 발생기에 적용되었다. 본 논문에서는, 제안된 BPSK 변조 기법을 W-대역 CMOS UWB 펄스발생기 설계에 적용하였으며, 제작 및 측정하였다. 제작된 W-대역 CMOS 펄스 발생기는 0.08  $\text{mm}^2$ 의 코어 사이즈를 가지며,  $-10$  dB 대역폭은 2.8 GHz(75.1~77.9 GHz), 에너지 소모는 45 pJ/pulse, 피크 파워는  $-2.6$  dBm으로 측정 되었다.

## Abstract

This study entailed the development of a complementary metal - oxide - semiconductor (CMOS) ultra-wideband (UWB) pulse generator with an inherent binary phase-shift keying (BPSK) modulation technique. The BPSK modulation technique in a pulsed oscillator has been proposed by the author in previous studies on K-band application. In this study, a W-band CMOS UWB pulse generator was developed using this technique. The W-band UWB pulse generator was implemented on a 0.13- $\mu\text{m}$  CMOS chip with an active area of 0.08  $\text{mm}^2$ . The output spectrum exhibited a  $-10$  dB bandwidth of 2.8 GHz, ranging from 75.1 to 77.9 GHz. The energy consumption was 45 pJ per pulse with a peak output power of  $-2.6$  dBm.

Key words: W-band, CMOS, UWB, Pulse Generator, BPSK

## I. 서 론

UWB 기술은 차량용 근거리 레이더 분야에서 많은 관심을 받고 있다. UWB 펄스의 PSD(power spectral density)는 다른 레이더 시스템 또는 기존의 무선 시스템을 방해하지 않도록 제한되어야 한다<sup>[3]</sup>. 송신 펄스의 PSD는 변조

방식과 직접적으로 관련이 있는데, PPM(pulse position modulation)과 OOK(on-off keying)는 별도의 RF 모듈레이터 없이도 쉽게 구현할 수 있지만 주기적인 펄스로 인하여 spectral line이 적절히 제거되지 않아 다른 시스템에 강력한 간섭 요인이 되거나 PSD 규정을 만족시키기 어려운 문제가 있다. 반면 BPSK 변조는 spectral line을 제거하기

「이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022-0-000041).」

충북대학교 전자공학과(School of Electronics Engineering, Chungbuk National University)

1: 조교수(<https://orcid.org/0009-0007-2431-4687>)

· Manuscript received February 26, 2024 ; Revised March 1, 2024 ; Accepted March 2, 2024. (ID No. 20240226-020)

· Corresponding Author: Sanghoon Sim (e-mail: shsim@cnu.ac.kr)

에 효과적인 방법이지만 별도의 RF modulator가 필요하다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는, 참고문헌 [1]에서 제안된 BPSK 변조 기법의 동작 원리에 대해 발진기의 초기조건을 이용한 이해하기 쉬운 설명을 제공하고, W-대역 CMOS UWB 펄스 발생기 설계에 적용하여 제작 및 측정 결과를 소개한다.

## II. 펄스 발진기의 초기 상태를 이용한 BPSK 변조 기법

발진기는 그림 1과 같이 트랜스 컨덕턴스 증폭기( $g_m$ )와 공진회로(LC 탱크회로 및 저항  $R$ )로 모델링할 수 있다. 여기서,  $v(t)$ 는 피드백루프의 노드 전압,  $i(t)$ 는 트랜스 컨덕턴스 증폭기의 출력전류,  $i_L(0^-)$ 는 인덕터의 초기 전류를 나타낸다. 커패시터와 저항의 초기 상태는 0으로 가정하였다. 발진이 시작된 직후의  $v(t)$ 와  $i(t)$ 는 그림 1 회로에서 라플라스 분석을 통하여 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$v(t) \approx -i_L(0^-) \frac{R}{Q} e^{\frac{g_m - 1}{2Q} \omega_0 t} \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

$$i(t) \approx -i_L(0^-) \frac{1}{Q} e^{\frac{g_m - 1}{2Q} \omega_0 t} \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

(여기서,  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ,  $Q = R\sqrt{\frac{C}{L}} \gg 1/2$ )

식 (1) 및 식 (2)에 의하면 발진 신호의 극성은 인덕터의 초기전류  $i_L(0^-)$ 에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 따라서, 초기전류  $i_L(0^-)$ 의 극성을 제어할 수 있으면 발진신호의 극성을 제어할 수 있고 별도의 RF 변조기 없이

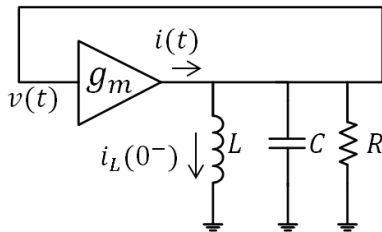
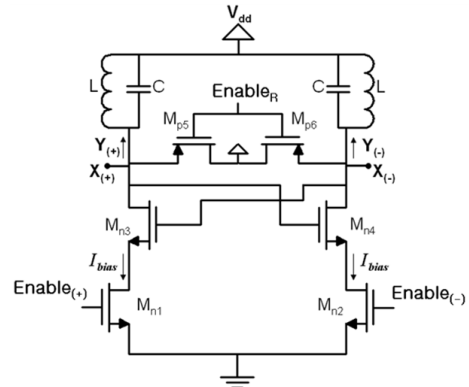


그림 1. 발진기 모델 (인덕터 초기전류 포함)  
Fig. 1. Oscillatory system with inductor initial current.

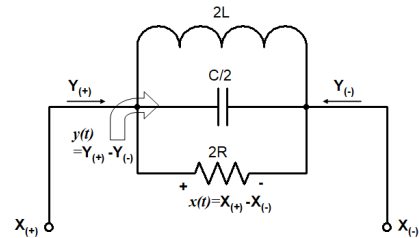
BPSK변조를 수행할 수 있다.

제안된 UWB 펄스발생기는 그림 2(a)와 같이 cross-coupled 발진기( $M_{n3}$ ,  $M_{n4}$ ,  $L$ ,  $C$ )와 on/off 스위치( $M_{n1}$ ,  $M_{n2}$ ,  $M_{p5}$ ,  $M_{p6}$ )로 구성된다. 바이어스전류  $I_{bias}$ 는 제어신호  $Enable_{(+)}$ 와  $Enable_{(-)}$ 에 의해  $M_{n1}$ 과  $M_{n2}$ 가 on 되면 인덕터를 통해  $M_{n3}$ 와  $M_{n4}$ 로 흐르게 된다. 제어신호  $Enable_R$ 에 의해서 제어되는  $M_{p5}$ ,  $M_{p6}$ 는 발진기가 off 됐을 때 발진에 의한 링잉을 줄이기 위해 사용된다. 그림 2(b)는 발진기 LC 공진기의 등가회로이다.  $X_{(+)}$ ,  $X_{(-)}$ 는 공진기 양단의 노드 전압을 나타내고,  $x(t)$ 는 공진기 양단의 전압을 나타낸다.  $Y_{(+)}$ ,  $Y_{(-)}$ 는 공진기 양단에서 공진기로 흘러 들어가는 전류를 나타내고,  $y(t)$ 는 공진기의 net 전류를 나타낸다. 여기서,  $x(t)$ 는 식(1)의  $v(t)$ 에 해당하고,  $y(t)$ 는 식 (2)의  $i(t)$ 에 해당한다.

그림 3(a)는 제어신호  $Enable_{(+)}$ ,  $Enable_{(-)}$ ,  $Enable_R$ 을 생



(a) 제안된 UWB 펄스발생기  
(a) Proposed UWB pulse generator



(b) LC 공진기 등가회로  
(b) Equivalent circuit of LC tank resonator

그림 2. 제안된 펄스발생기 및 공진기 등가회로  
Fig. 2. Proposed UWB pulse generator and equivalent circuit of the resonator.

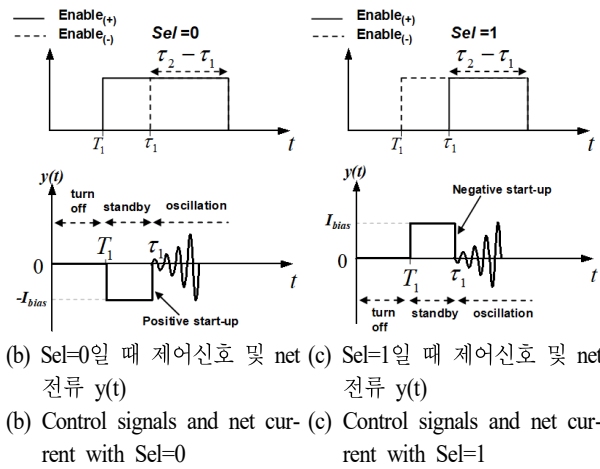
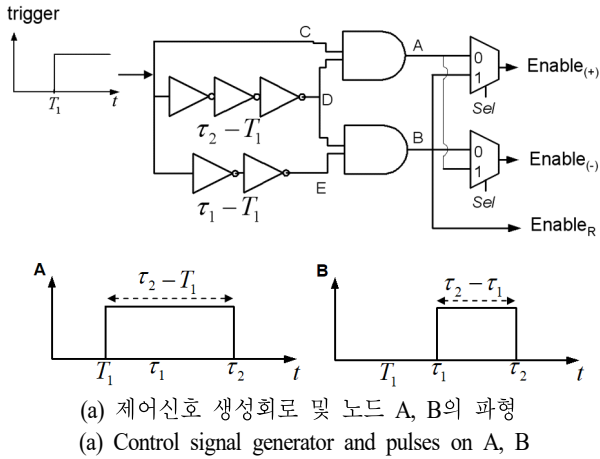


그림 3. 제어신호 생성회로 및 공진기 net 전류  
Fig. 3. Control signal generator and net current of the resonator.

성하기 위한 회로와 trigger 신호에 따른 노드 A, B의 파형을 보여준다. 노드 A, B의 신호는 MUX를 통해 제어신호  $Enable_{(+)}$ ,  $Enable_{(-)}$ 가 되고, 노드 B는 그대로  $Enable_R$ 가 된다. 그림 3(b)는 MUX 제어신호 sel=0일 때 제어신호  $Enable_{(+)}$ ,  $Enable_{(-)}$ 와 net 전류  $y(t)$ 를 보여준다. 회로의 동작은 'turn-off', 'standby', 'oscillation' 세 가지의 상태로 나눌 수 있다.  $t < T_1$  또는  $t > \tau_2$ 의 경우 회로가 'turn-off' 상태이며, 이때  $M_{n1}$ 과  $M_{n2}$ 는 off,  $M_{p5}$ 와  $M_{p6}$ 는 on된다. 이 상태에서는 회로 양측에 바이어스전류가 흐르지 않으므로 발진이 일어나지 않는다. 그림 3(b)에서,  $T_1 \leq t < \tau_1$ 일 때, 회로는 왼쪽 코어( $M_{n1}$ ,  $M_{n3}$ )를 통해 바이어스 전류  $I_{bias}$ 가 흐

르는 'standby' 상태가 된다. 이때, 오른쪽 코어( $M_{n2}$ ,  $M_{n4}$ )는 전류가 흐르지 않으므로 여전히 발진이 일어나지 않는다. 여기서, LC 공진기의 net 전류  $y(t)$ 는 그림 3(b)와 같이  $-I_{bias}$ 인 것을 알 수 있다. 이제,  $\tau_1 \leq t < \tau_2$ 에서  $M_{n1}$ 과  $M_{n2}$ 가 모두 on되고 스위치  $M_{p5}$ 와  $M_{p6}$ 는 off된다. 양측 회로에 모두 바이어스전류가 흐르고 그림 3(b)와 같이  $t = \tau_1$ 에서 발진이 시작된다. 이때 발진 신호는 초기 전류  $-I_{bias}$ 에 해당하는 극성을 갖게 된다. 이 초기 전류는 그림 3(c)처럼 MUX 제어를 통해 sel=1로 제어하면  $I_{bias}$ 로 반전시킬 수 있고, 따라서 발진 신호의 극성 또한 반전시킬 수 있게 된다.

### III. 측정 결과

제안된 UWB 펄스발생기는  $0.13 \mu\text{m}$  CMOS 공정을 이용하여 설계, 제작되었다. 그림 4는 제작된 UWB 펄스발생기를 보여준다. 칩 크기는 I/O 패드와 더미 패턴을 포함하여  $1 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 이고, 액티브 영역의 크기는  $0.08 \text{ mm}^2$ 이다.

출력 버퍼는 동작 주파수를 극대화하기 위하여 그림 5

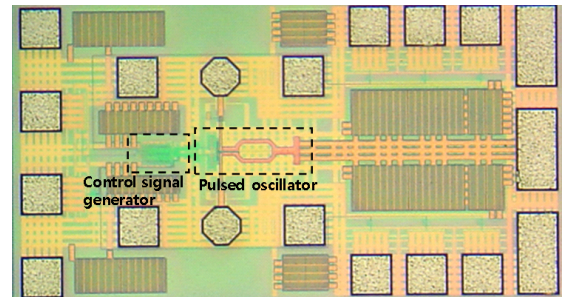


그림 4. 제작된 W 대역 UWB 펄스발생기  
Fig. 4. Fabricated W-band UWB pulse generator.

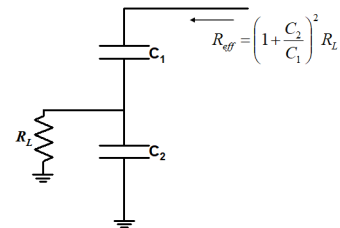
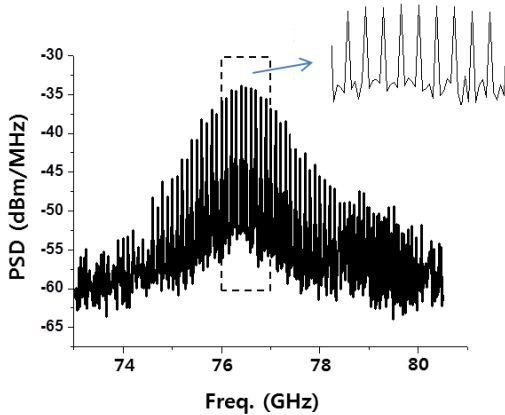


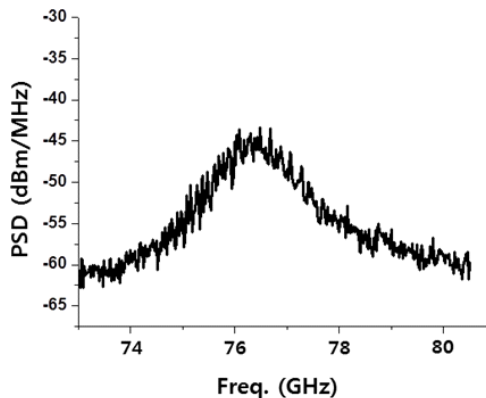
그림 5. 패시브 출력 버퍼  
Fig. 5. Passive output buffer.

와 같이 capacitive 트랜스포머( $C_2/C_1 \approx 1.5$ )를 사용하였다<sup>[1]</sup>. 제작된 칩의 출력은 on-wafer 프루빙하여 하모닉믹서(11,970 w)를 거쳐 스펙트럼분석기로(8565E) 측정하였으며, 다른 쪽 출력은 프루빙 후 50Ω 터미네이션하였다. standby 상태( $\tau_1 - T_1$ )와 oscillation 상태( $\tau_2 - \tau_1$ )는 각각 560 ps와 350 ps로 설정하였다.

그림 6(a)는 100 MHz PRF(pulse repetition frequency)에 대해 변조를 하지 않았을 때 출력 스펙트럼 측정 결과이고 그림 6(b)는 같은 PRF에서 BPSK 변조를 했을 때(sel=1010...) 출력 스펙트럼을 보여 준다. 그림 6(a)를 보면 규칙적인 펄스로 인한 spectral line이 발생하는 것을 알 수



(a) 변조되지않은 출력 스펙트럼 측정결과  
(a) Measured output spectrum without BPSK modulation



(b) BPSK 변조된 출력 스펙트럼 측정결과  
(b) Measured output spectrum with BPSK modulation

그림 6. 출력 스펙트럼 측정결과

Fig. 6. Measured output spectrum.

있다.  $-10$  dB 대역폭은 75.1 GHz에서 77.9 GHz까지 2.8 GHz이다. 평균 전력 소비는 100 MHz의 PRF에 대해 9 mW이고, 차동 동작을 고려하면 45 pJ/pulse(4.5 mW/100 MHz) 에너지 소모에 해당한다. 스펙트럼을 적분하여 구한 펄스의 피크 출력 전력은  $-2.6$  dBm에 해당한다. BPSK 변조를 하면 그림 6(b)처럼 spectral line이 제거되고 보다 낮은 PSD를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서, BPSK 변조는 PSD를 감소시켜 다른 시스템에 간섭신호로 작용할 수 있는 가능성을 줄이거나, PSD가 주어진 경우 PRF를 증가시켜 평균 전송 전력을 향상시킬 수 있게 해준다.

#### IV. 결 론

CMOS 0.13  $\mu\text{m}$  공정을 이용하여, BPSK 변조기능을 갖는 W-대역 UWB 펄스 발생기를 설계, 제작하고, 성능을 측정하였다. 회로의 동작 주파수를 극대화하기 위해서 패시브 버퍼를 사용하였다. 제안된 BPSK 변조 기법을 사용하면 추가적인 RF 변조기 없이도 발진기의 초기 상태를 제어하여 발진 신호 극성을 제어할 수 있다. 제작된 UWB 펄스발생기는 BPSK 변조 기능뿐만 아니라 낮은 에너지 소모와 높은 피크 전력을 보여준다.

#### References

- [1] S. H. Sim, "Signal sources for high resolution radar applications," Ph.D. dissertation, College of Engineering, School of Electrical Engineering, 2009.
- [2] S. Lee, S. Sim, and S. Hong, "A CMOS ultra-wideband radar transmitter with pulsed oscillator," in *2010 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, Anaheim, CA, May 2010.
- [3] *Technical Characteristics for Radiodetermination Equipment for Ground Based Vehicular Applications within the Frequency Range 77 GHz to 81 GHz*, Tech. Rep. ETSI TR 103 593, May 2020.
- [4] Y. P. Nakache, A. F. Molisch, "Spectral shaping of UWB signals for time-hopping impulse radio," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 4, pp. 738-744, Apr. 2006.