

## 마이크로웨이브 포토닉스 기반 주파수 상향 변환 연구

김재성<sup>1,2</sup>, 고영채<sup>2</sup>, 송민협<sup>1</sup>한국전자통신연구원 광무선연구본부 광융합부품연구실<sup>1</sup>, 고려대학교 전기전자공학과<sup>2</sup>koyc@korea.ac.kr<sup>2</sup>, sminhyup@etri.re.kr<sup>1</sup>

## A Study on Frequency Upconversion Based on Microwave Photonics

Jaeseong Kim<sup>1,2</sup>, Young-Chai Ko<sup>2</sup>, Minhyup Song<sup>1</sup>  
ETRI<sup>1</sup>, Korea Univ.<sup>2</sup>

## 요 약

본 논문은 2 개의 파장 가변 레이저와 마흐젠더 변조기, 광 검출기로 마이크로웨이브 포토닉 주파수 상향 변환 시스템을 구현했다. 1Gbps 의 NRZ 신호를 생성하고 12 GHz 와 28 GHz 대역으로 상향 변환한 결과를 RF 스펙트럼 상에서 분석한다.

## I. 서 론

AI 수요 증가 및 다양한 기술적인 서비스 제공으로 인해 데이터 수요는 폭발적으로 늘어났고 앞으로도 늘어날 예정이다 [1]. 5G 실패로 인한 mmWave 의 시장 투자는 줄었지만 고주파수 대역의 사용이 여전히 기술, 산업적 가치가 존재한다[2]. 기존 RF 소자의 경우, mmWave 나 THz 영역으로 갈 수록 RF mixer 와 국부 발진기(Local Oscillator, LO)의 구현에 어려움이 존재한다.

특히 주파수 안정성, 잡음, 손실 측면에서 어려움이 존재하고 회로의 복잡성과 소형화의 어려움이 있다. 고주파수로 갈 수록 대역폭의 한계가 존재하고 전자기 간섭(EMI) 문제가 발생한다 [3]. 이와 달리 Microwave Photonic 기술은 고주파수 광대역을 활용할 수 있고, 광섬유를 이용하기에 저손실 이점을 갖고 고주파 신호를 광섬유 링크를 통해 원격 전송이 가능하다. 2 개의 레이저 주파수 차이를 활용한 beating 기술로 유연한 주파수 관리가 가능하고 실리콘 포토닉스 및 집적화 기술의 발달로 소형화에 용이하다는 장점을 갖고 있다 [4].

본 논문에서는 RF 소자 한계에 대응하기 위한 해결책을 제시하고자, 2 개의 파장 가변 레이저(Tunable Laser Diode, TLD)와 마흐젠더 변조기(Mach-Zehnder Modulator, MZM), 광 검출기(Photo detector, PD)를 활용하여 RF mixer 와 국부 발진기 없이 주파수 상향 변환(Upconversion)이 가능한 Microwave Photonic Upconversion system 을 구현하고 12GHz 대역과 28GHz 대역으로 1Gbps 의 NRZ 신호를 상향 변환시킨 결과에 대해 분석하고자 한다.

## II. 본론

본 시스템은 첫번째 레이저가 마흐젠더 변조기(MZM)를 통과하며, 기저 대역에 있는 데이터

신호가 세기 변조(Intensity Modulation)된다. 두번째 레이저가 광 커플러를 통해 합쳐지고 광 검출기를 통해 두 레이저의 주파수 차이 만큼 주파수 상향 변환이 이루어진다. 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

두 개의 주파수가 다른 레이저로 생성되는 광 필드는 다음과 같다.

$$E_1 \cos(\omega_1 t), E_2 \cos(\omega_2 t) \\ \omega = 2\pi f$$

$E_1, E_2$  는 각 레이저의 전기장의 세기이며  $\omega$  는 광 각주파수이다. 주파수가 다른 두 레이저가 광 검출기에 입력되면 광 세기의 제곱에 비례하는 광전류를 생성하는데 이 때 두 레이저의 주파수 차이에 해당하는 RF 성분이 RF 대역에서 검출된다.

$$f_{beat} = |f_1 - f_2|$$

이런 원리로 레이저의 주파수 조절만으로 원하는 RF 주파수 대역으로 변환이 가능하다. 마흐젠더 변조기를 통해 기저 대역 데이터 신호  $m(t)$ 를 변조기의 quadrature 포인트에서 동작시키면 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$E_{MZM}(t) = E_1 \cos(\omega_1 t) \times \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{m(t)}{V_\pi} + \frac{\pi}{4}\right)$$

이 때  $V_\pi$  는 변조기의 반파장 전압이다. 마흐젠더 변조기를 통과한 광신호와 두번째 레이저 신호와 합성되어 광 검출기에 입력되면 입력된 광 필드의 크기의 제곱에 비례하는 광 전류를 생성한다.

$$I_{PD}(t) \propto |E_{MZM}(t) + E_2(t)|^2$$

위 수식을 전개하면 두 광 신호 간 비팅에 의해 RF 성분이 생성되고 비팅 주파수( $f_1 - f_2$ )와 결합된  $m(t)$  신호도 함께 검출된다.

$$I_{RF}(t) \propto E_1 E_2 \cos(2\pi(f_1 - f_2)t) \times \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{m(t)}{V_\pi} + \frac{\pi}{4}\right)$$

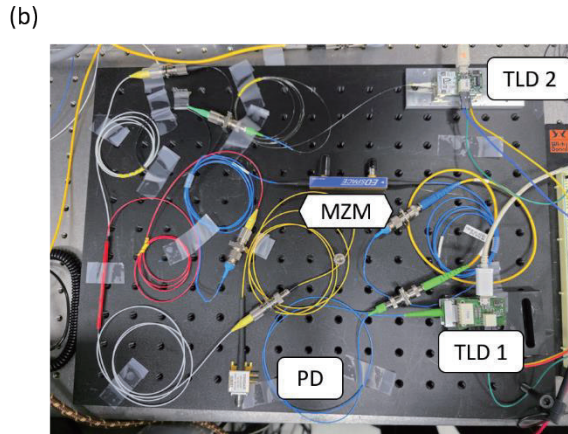
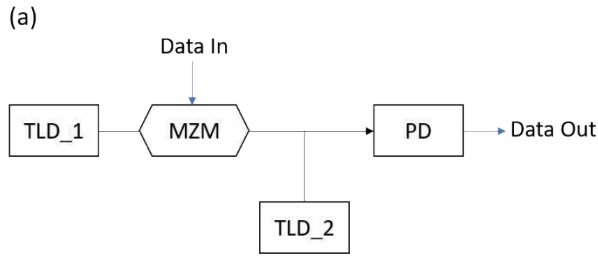


그림. 1 (a) 시스템 구성도, (b) 실제 구현한 셋업

그림.1 (b)에서 구현한 실험 셋업을 검증하기 위해 BER Tester 로 1Gbps 의 NRZ 신호를 생성하고 RF 스펙트럼 분석기를 통하여 RF 스펙트럼을 측정했다. 그림.2는 스펙트럼 측정 결과이다.

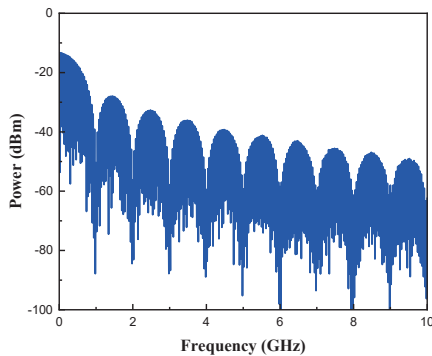


그림. 2 1Gbps NRZ 신호의 RF 스펙트럼

위 신호는 1GHz 까지 기저 대역 신호가 형성되고 이후 영역에서는 고조파 성분을 갖는 특징을 보였다. 상향 변환할 주파수로써는 현재 6G 주파수로 거론되는 12GHz 와 5G 주파수 대역인 28GHz 를 선정하였다. TLD\_1 의 레이저 주파수는 193.411 THz 로 설정하고 TLD\_2 의 주파수는 12GHz 차이가 나는 193.398 THz 와 28GHz 차이가 나는 193.382 THz 로 설정하였다.

그림. 3 (a)는 12 GHz 대역으로 상향 변환한 결과이다. 12 GHz 캐리어에 NRZ 신호가 상향 변환된 것을 RF 스펙트럼 상으로 확인했다. 신호의 peak power 가 약 10 dBm 정도 감소하였다. 그림. 3 (b)는 28 GHz 대역으로 상향 변환한 결과이다. 신호의 peak power 가 30dBm 정도로 감소한 결과를 보였다. 두 결과 공통적으로 NRZ 신호의 고조파 성분들이 동일하게 스펙트럼 도메인 상에서 관측되었다.

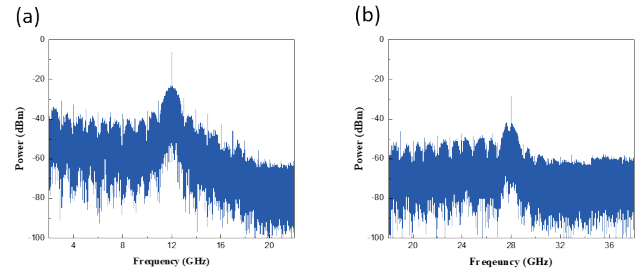


그림. 3 (a) 12GHz 대역, (b) 28GHz 대역 결과

### III. 결론

본 논문에서는 2 개의 파장 가변 레이저와 마흐젠더 변조기, 광 검출기를 활용하여 국부 발진기 없이 기저 대역 신호를 상향 변환할 수 있는 마이크로파 포토닉스 시스템을 구현하고 실험적으로 RF 스펙트럼 상에서 기저 대역 신호가 원하는 주파수 대역으로 상향 변환됨을 확인하였다.

높은 주파수 대역으로 갈수록 광 검출기의 출력 파워가 낮아지는 현상을 관찰했고 시스템 상에 RF 증폭기의 필요성을 확인했다. 하지만 광 검출기의 최적 설계가 이루어진다면 고품질의 상향 변환이 가능할 것으로 예측된다. 간단한 광소자로 구성된 시스템으로 다양한 주파수 대역으로 상향 변환이 가능한 것을 실험적으로 확인했고 향후 차세대 통신 기술로의 발전 가능성을 제시한다.

### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Institute for Information and Communication Technology Promotion (IITP) grant funded by the Ministry of Science and ICT, South Korea (2019-0-00008).

### 참 고 문 헌

- [1] Bhide, Pranita, Dhanush Shetty, and Suresh Mikkili. "Review on 6G communication and its architecture, technologies included, challenges, security challenges and requirements, applications, with respect to AI domain." IET Quantum Communication 6.1 (2025): e12114.
- [2] I. F. Akyildiz, A. Kak and S. Nie, "6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems," in IEEE Access, vol. 8, pp. 133995-134030, 2020
- [3] Tang, Zhenzhou, et al. "Photonics-based microwave frequency mixing: methodology and applications." Laser & Photonics Reviews 14.1 (2020): 1800350.
- [4] Yao, Jianping. "A tutorial on microwave photonics." IEEE Photonics society newsletter 26.2 (2012): 4-12.