

마이크로웨이브 포토닉스 기반 주파수 상향 변환 연구

김재성^{1,2}, 고영채², 송민협¹

한국전자통신연구원 광무선연구본부 광융합부품연구실¹, 고려대학교 전기전자공학과²

koyc@korea.ac.kr², sminhyup@etri.re.kr¹

A Study on Frequency Upconversion Based on Microwave Photonics

Jaeseong Kim^{1,2}, Young-Chai Ko², Minhyup Song¹
ETRI¹, Korea Univ.²

요약

본 논문은 2 개의 파장 가변 레이저와 마흐젠테 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 마흐젠테 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 마흐젠테 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 ω 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. 마흐젠테 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_π 는 변조기의 반파장 전압이다. 마흐젠테 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.

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

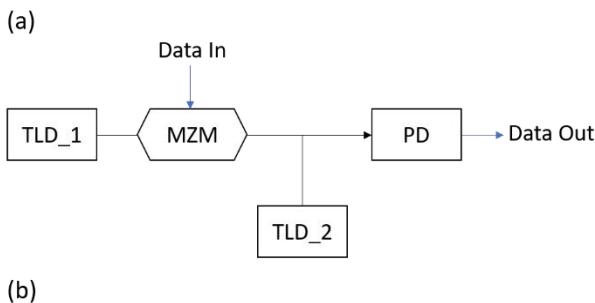


그림. 1 (a) 시스템 구성도, (b) 실제 구현한 셋업

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

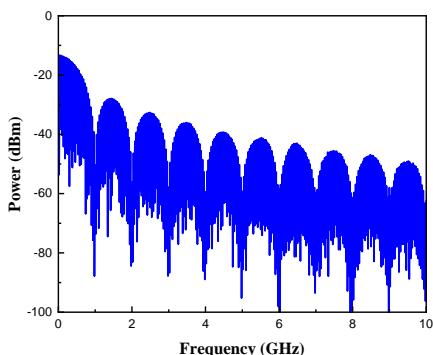


그림. 2 1Gbps NRZ 신호의 RF 스펙트럼

위 신호는 1GHz 까지 기저 대역 신호가 형성되고 이후 영역에서는 고조파 성분을 갖는 특징을 보였다. 상향 변환할 주파수로는 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.

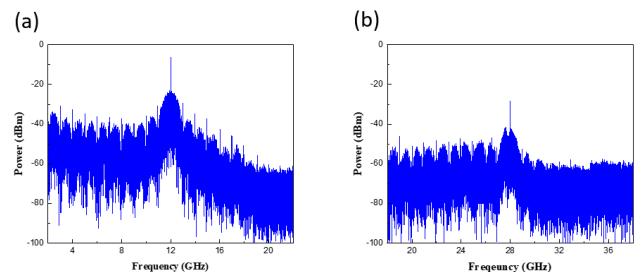


그림. 3 (a) 12GHz 대역, (b) 28GHz 대역 결과

III. 결론

본 논문에서는 2 개의 파장 가변 레이저와 마흐젠티 변조기, 광 검출기를 활용하여 국부 발전기 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.