

---

# 측파대 광 주입 락킹 기법을 이용한 밀리미터파 신호생성 및 실험적 분석

김정태\*

Experimental Analyses and Millimeter Wave Signal Generation  
Using Sideband Injection Locking Method

Jung Tae Kim\*

## 요 약

본 논문에서는 밀리미터파 대역의 신호 발생을 위한 헤테로다인 방식인 **sideband injection locking** 방법을 제안하고 실험적으로 분석하였다. 향후, 무선 이동통신, 초고속 광대역 통신망 등에 사용되어질 밀리미터파 신호는 전기적 요소의 한계로 광학적인 요소에 의해 신호를 생성하는 방법이 많이 연구되고 있으며 광학적 기술에 기초한 소자 기술 등이 발전되고 있다. 따라서 본 논문에서는 향후 밀리미터파 대역에서 사용되어질 **LMDS(Local Multi-point Distribution Service)** 등의 시스템에서 수집기가 헤르츠급의 광원으로 응용 가능한 헤테로다인 방식을 이용한 밀리미터파 대역의 신호생성에 대한 이론적 방법 및 실험적 고찰을 통하여 검증하였다.

## ABSTRACT

In this paper, we have proposed sideband injection locking method, heterodyne technique, to generate millimeter-wave signal. Microwave signals in cellular broadband mobile communication networks and distributed networks can favorably be generated and distributed by optical techniques. In principle, these techniques have already been investigated for optical control of phase-array antennas, characterization of photo-detector and phase locking of millimeter-wave oscillators and now being applied to wireless communications. The generation and transmission of millimeter-wave radio signals by optical means is of interest for future pico-cell broadband mobile communication system, especially for systems operating at frequencies of tens of GHz applicable to LMDS. We experimented and analysed the generation of millimeter wave signal.

## 키워드

헤테로다인, 밀리미터파, 광대역통신

## Key word

Heterodyne, Millimeter-wave, Broadband communication

---

\* Mokwon University (교신저자 : jtkim3050@mokwon.ac.kr)

접수일자 : 2010. 08. 12

심사완료일자 : 2010. 11. 04

## I. 서 론

최근 인터넷 사용의 급격한 확산으로 인해 이제까지 전화망을 위주로 발전되어왔던 통신망 구조에는 많은 변화가 일어나고 있다. 먼저, 날로 증가하는 전송 용량을 감당하기 위해 초고속 전송이 가능한 광통신 기술이 새로운 통신망 구축에 적용되고 있다. 또한, 일반 수요자들에게 양질의 광대역 서비스를 제공할 수 있는 여러 기술들이 속속 개발되고 있다. 광대역 가입자 접속망 구축을 위한 기술로는 기존의 통신망을 이용하는 xDSL (x-Digital Subscriber Line) 과 HFC (Hybrid Fiber Coaxial)를 들 수 있고, 새로운 통신망의 구축을 필요로 하는 고속 데이터 전송 시스템으로 WITL (Wireless In The Loop)과 FITL (Fiber In The Loop)이 있다[1].

이와 같은 차세대 가입자 접속망 기술 중에서 WITL 기술은 그 기반 시설 구축이 비교적 간단하며 멀티미디어 서비스 제공이 가능하다는 면에서 많은 관심의 대상이 되고 있다. WITL의 응용 분야로는 BWLL (Broadband Wireless Local Loop), LMDS (Local Multipoint Distribution System), MBS (Mobile Broadband Systems ) 등이 있다. 최근 우리나라에서도 지식정보사회의 기반이 되는 초고속망의 보편적 접속 및 이용환경을 무선 방식으로 제공할 수 있도록 30 GHz 주변 대역에서 BWLL 용 주파수를 할당하고 이의 사업자를 선정한 바 있다. 또한 실내용 초고속 무선 LAN, 차량 충돌 방지 시스템 등을 비롯한 Intelligent Transportation System, 그리고 국방 기술 등 여러 분야에서 밀리미터파 대역 신호를 사용한 기술 개발이 요구되고 있다. 여러 밀리미터파 사용 응용 분야에서 광 기술은 중요한 역할을 담당할 수 있다. 밀리미터파는 특성상 전파감쇠가 무척 클 뿐만 아니라, 밀리미터파 신호 전송에 필요한 도파로 또는 케이블 등의 부피 및 무게가 무척 크다. 밀리미터파 신호를 광 신호에 실어 주어 광섬유를 통해 전송, 처리할 경우 이와 같은 문제를 해결할 수 있다. 특히, 최근의 광통신 기술의 발전과 더불어 광섬유 네트워크의 구축이 점점 활성화되고 있으므로, 밀리미터파를 이용한 무선 통신 기술과 광섬유 기반의 광통신 기술의 융합적 발전은 더욱 더 큰 의미를 가질 것으로 예측된다.

본 논문에서는 안정적인 광학적 밀리미터파 생성인 가능한 기법들을 살펴보고, 30 GHz 대역의 밀리미터파 신호를 side injection locking 방법을 이용한 방식에 관한 연구를 수행하였다. Side injection locking을 이용하는 방법은 생성하고자하는 밀리미터파 주파수의 전기 신호가 필요 없을 뿐만 아니라, 광 전송 시 광섬유 색 분산 (chromatic dispersion)에 민감하지 않고 phase-noise 가 작은 높은 주파수 신호 생성이 용이하다는 장점이 있다. 본 논문의 구성은 제1장에서는 서론이고 제2장에서는 밀리미터파 신호를 간단히 생성할 수 있는 IM-DD (Intensity Modulation-Direct Detection) 방식의 소개하고, 광 전송시 발생하는 문제점에 대해 살펴본다. 또한, IM-DD 방식이 가지는 문제점들을 극복하기 위한 헤테로다인 방식에 대한 소개를 하고, phase-noise 가 작은 밀리미터파 생성에 적합한 헤테로다인 방식들에 대해 살펴본다. 제3장에서는, 제2장에서 언급한 헤테로다인을 이용한 저잡음 밀리미터파 신호를 생성할 수 있는 sideband injection locking 방법에 대해, 실험적으로 밀리미터파 신호생성의 검증을 수행하였다.

## II. 관련 연구

### 2.1 IM-DD 방식

Fiber-optic 밀리미터파 링크를 구현하는 가장 간단한 방법은 직접변조 즉 IM-DD (Intensity Modulation - Direct Detection) 방식이다. 변조기의 사용여부에 따라 직접/외부 변조 방식으로 구분되며, (그림 1)은 외부 변조 방식의 간단한 블록도이다

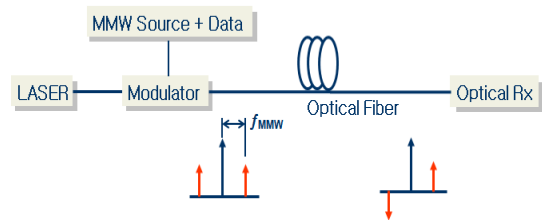


그림 1. 외부 변조에 의한 IM-DD 링크  
Fig. 1 IMDD link by external modulation

외부 변조 IM-DD 링크에서는 광변조기는, 레이저다 이오드로부터 인가되는 CW(continuous wave) 광원을 밀리미터파 대역 주파수인 fMMW 신호로 변조한다. 이 때 변조기 출력 광 신호는, (그림 1)과 같이, DSB-LC (Double Sideband - Large Carrier)의 형태를 갖는 신호이며, 이 신호는 광섬유를 통해 BS에 전달된 후 광검출기 (PD: Photo-Detector)에 입사된다. PD는 fMMW 주파수에 해당되는 전기 신호를 생성하며, 이 신호는 대역통과 여파기와 증폭회로를 거쳐 안테나를 통해 대기 중으로 전파된다. 이 방식은 매우 간단하다는 장점이 있지만, 광섬유의 색분산으로 인해 전달된 신호가 전송 거리에 따라 CNR (carrier-to-noise ratio) 변화를 겪는 문제점이 있다 [2]. 중간에 광 carrier를 기준으로 양 옆의 밀리미터파 주파수만큼 떨어져 있는 광 carrier들이 겪는 위상 변화는 서로 다르다. 따라서 PD(Photo diode)에서 각 주파수 성분들이 혼합(mixing)되어 출력 전류신호로 변환될 때 위상의 차이에 따른 보강간섭, 또는 상쇄 간섭을 일으키게 되고, PD 전류 신호 크기가 전송거리에 따라 변화하는 현상을 일으키게 된다.

## 2.2 헤테로다인 (Heterodyne) 방식

색분산에 의한 CNR(Carrier-to-Noise) 페널티를 해결하는 방법으로 RHD (Remote Heterodyne Detection) 밀리미터파 링크를 구성하는 방법이 있다. 이 방법은 원하는 밀리미터 웨이브 대역의 주파수를 전기적 신호의 변조가 아닌 광학적 방법에 의해 얻어내는 방법이다. 헤테로다인 기법은 원하는 밀리미터파 대역의 주파수에 해당하는 주파수 차이를 가지는 두 개의 광 carrier를 PD에 동시에 입력시켜서 두 광 carrier의 mixing에 의해 원하는 주파수 성분의 전기 신호를 얻는 방법이다. 광 주파수가  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 인 두 독립적인 광원을 가정하자.

$$E_1 = \sqrt{P_1} \cos[\omega_1 t + \Phi_1(t)] \quad (1)$$

$$E_2 = \sqrt{P_2} \cos[\omega_2 t + \Phi_2(t)] \quad (2)$$

두 광원이 PD에 입력되어 생성된 전류는 다음과 같다.

$$I_{PD}(t) \propto P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos[\omega_2 - \omega_1 |t - |\Phi_2(t) - \Phi_1(t)|] \quad (3)$$

식 (3)에서  $I_{PD}$  는 PD의 출력 전류가 되며 이를 비팅 (beating) 신호라 부른다.  $I_{PD}$  에서  $P_1 + P_2$ 는 DC성분이며, 나머지는 원하는 밀리미터파 신호 성분이 된다. 식 (3)에서 볼 수 있듯이, 두 광원의 주파수 차이를 원하는 밀리미터파 주파수 차이가 되도록 조절함으로써, 쉽게 PD 출력 신호에서 원하는 밀리미터파 신호 성분을 얻을 수 있다. 두 개의 독립적인 레이저를 이용하여 63 GHz 신호를 생성하여 140 Mbit/s을 전송 실험이 보고되고 있다[3]. 그러나 독립적인 두 광원의 위상 성분들은 서로 난수적(random)하기 때문에, 두 광원이 비팅 (beating)하여 생성되는 신호의 선폭은 두 광원 선폭의 합으로 나타나며, 보통 수 MHz 정도의 큰 값을 갖는다. 넓은 선폭을 갖는 신호는 데이터를 전송할 때, 선폭의 효율성(spectral efficiency)가 작아 실제 응용분야에서는 제약이 따른다. 이러한 제약을 극복하기 위해, 페이즈 잡음(phase-noise)이 작은 밀리미터파 신호원을 구현하는 방법으로 연구되고 있다. 대표적으로 다음과 같은 방법들이 제안되고 있다.

- a. Single Sideband (SSB) modulation
- b. 2-side band modulation
- c. Mode-locking
- d. Optical phase-lock loop
- e. Sideband injection locking

## III. 이론적 배경 및 실험 결과 해석

### 3.1 밀리미터파 생성

Master 레이저 (ML)를 원하는 밀리미터파 주파수의 sub-harmonic 주파수로 변조하면, (그림 2)에서처럼 ML의 광 스펙트럼에서 변조 주파수의 간격을 갖는 여러 sideband들이 발생함을 볼 수 있다. 이들 중 원하는 밀리미터파 주파수 차이를 갖는 두 개의 sideband를 두 개의 슬레이브 레이저 (SL)에 입력시켜 injection-locking을 일으키게 하면, 두 SL는 원하는 밀리미터파 주파수 차이를 가질 뿐만 아니라, 같은 ML에 동기되어 있으므로 동시에 phase-locking을 얻게 된다. 물론, 두 SL를 원하는 ML sideband에 동기시키기 위해서는 SL의 발진 파장을 원하는 sideband가 갖는 locking-range 안에 들어가

도록 SL 동작 진류와 온도 조절을 통하여 발진 주파수를 조절해주어야 한다. 따라서, 두 독립적인 SL이 ML의 sideband 들에 의해 동기됨으로써, 두 레이저간의 위상은 서로 간섭(correlation)을 갖게 되어서, PD에서 비팅 신호의 선폭이 작게 되며, 광섬유 색분산의 영향을 받지 않는다.

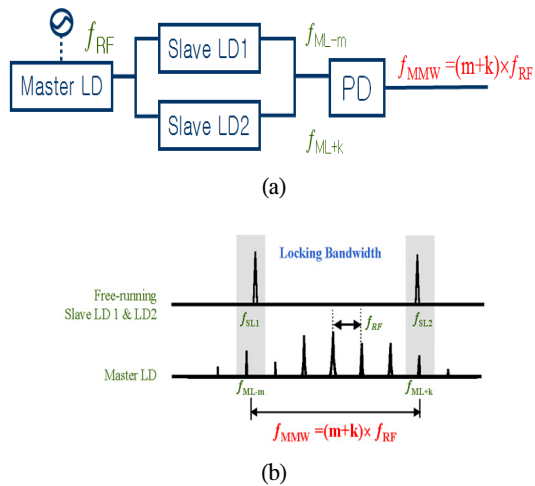


그림 2. Sideband injection locking 방식을 이용한 밀리미터파 생성 (a) 구성도 (b) 비팅 신호  
Fig. 2 Millimeter wave generation using sideband injection locking method  
(a) Configuration (b) Beating signal

본 논문에서는 (그림 2)의 sideband injection locking 방식을 이용하여 30 GHz 대역의 신호 생성에 관한 연구가 수행되었다[4]. 수행된 실험결과에서 ML sideband 중 SL을 injection-locking에 관여하지 않는 주변의 sideband들이 beat signal 스펙트럼 특성에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 이러한 원하지 않는 beat signal들이 존재함으로써 전반적인 시스템 특성에 영향을 줄 수 있기 때문에, 이에 대한 분석이 중요하다.

이를 위해, 원하지 않는 beat 신호들에 대한 특성을 수치적인 모델링을 통하여 분석을 수행하였으며, 이에 대한 실험적 검증을 본 연구를 통하여 수행하였다. 수치적인 모델링에서는, RF변조시 생성되는 ML sideband들은 Bessel 함수로 모델링된다. 이론적으로 얻은 ML sideband 들을 고려하기 위해 Lang의 비율방정식을 바탕으로 하는 SL 수치적 모델로 구성될 수 있다. 이 비율 방

정식을 통해 SL 출력의 광 스펙트럼 및 RF 스펙트럼을 분석하였다[5].

#### IV. 실험 결과 및 토의

(그림 3)는 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 수행된 실험 구성도이다[6]. 1550.2 nm 파장 대역의 상용화된 3개 DFB-레이저를 이용하였다. ML로 사용된 isolator가 있는 DFB-LD는 threshold 1.43배로 bias시켰고, SL로 사용된 isolator가 없는 두 DFB-LD를 threshold 8.1 배 bias시켜 약 4 mW 출력이 되도록 하였다. 여러 개의 sideband를 만들기 위해 ML을 8 GHz로 변조시켰다. ML의 다른 sideband peak들보다 양쪽 두 번째 sideband peak가 더 크게 하기 위해서, RF-source에서 19 dBm의 변조 power를 인가하였다. 사용된 레이저 패키지가 8 GHz 변조에 최적화되어 있지 않아서, 상당량의 RF 손실이 존재한다. 여러 개의 sideband를 갖는 ML 출력은 in-line isolator와 3-dB coupler를 거쳐, 두 개의 SL로 인가된다. 두 SL 출력은 fiber-coupler에서 다시 합쳐져서, 두 갈래로 나뉜다. 하나는, Fabry-Perot interferometer (FSR = 75 GHz)로 연결되고, 다른 하나는 PD로 들어가 생성된 비팅 신호를 RF spectrum analyzer를 통해 측정하였다. (그림 3)에는 나와 있지 않지만, ML과 SL간의 coupling 효율을 높이기 위해 각 SL 앞단에 극성 제어기(polarization controller)를 사용하였다.

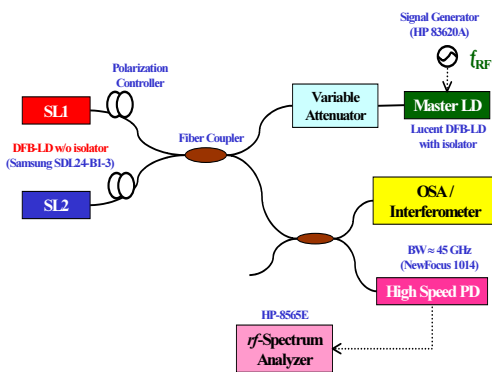


그림 3. 실험 구성도  
Fig. 3 Experimental setup

Fiber 결합기(coupler) 앞단에 가변 광 감쇄기(attenuator)를 사용하여, SL로 인가되는 전체 파워를 조절하였다. IM/FM 지수들에 영향을 줄 수 있는 ML bias level이나 RF 변조 출력을 조절하지 않고 인가 파워를 쉽게 조절 가능하다. 이 조건에서, ML의 +2와 -2 번째 sideband에 두 SL이 각각 lock이 된다.

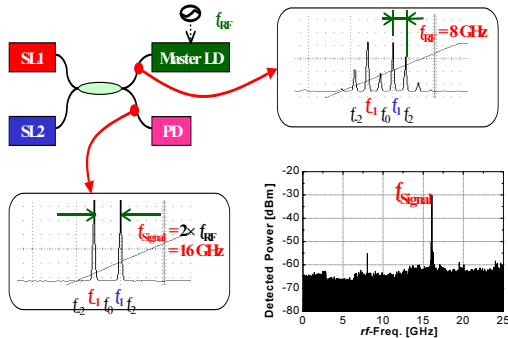


그림 4. 16 GHz 신호 생성 시 RF 스펙트럼 측정 결과  
Fig. 4 Result of RF spectrum measurement for 16 GHz signal generation

(그림 4)는 16 GHz 떨어진 +2와 -2 번째 sideband 들에 두 SL이 각각 lock되었을 때, 두 SL이 beating을 측정할 RF 스펙트럼이다. 여기의 R은 약 -16 dB이다 SL을 원하는 sideband에 stable-lock시키기 위해, 레이저 온도와 bias 전류를 바꿔가면서 SL 발진 주파수를 조금씩 조절하였다.

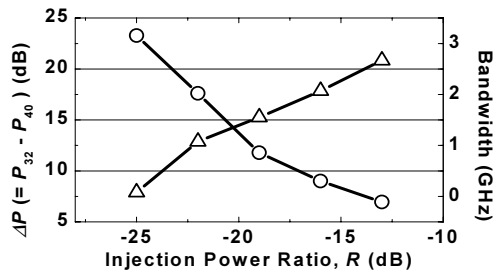


그림 5. R에 대한 ΔP (circles)와 stable-locking 폭 (triangle) 측정 결과  
Fig. 5 ΔP corresponding to R and result of measurement of stable-locking width

(그림 5)은 R에 대해 원하는 RF 신호와 원하지 않는 RF 신호간의 차이와 stable-locking 폭을 보여준다. stable-locking bandwidth는 SL의 bias 전류를 바꿔가면서 locking 조건을 만족시키는 허용폭을 측정함으로써 결정하였다.(그림 5)의 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 정성적으로 잘 일치함을 보이고 있다[5].

### V. 결론

본 논문에서는 헤테로다인 기법을 이용하여 밀리미터파 주파수를 생성하는 방법에 대해 분석하였다. 직접 변조에 의해 밀리미터파를 생성할 경우 광섬유의 색분산에 의한 CNR penalty를 주기적으로 겪게 된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 헤테로다인 방식이 제안되어 오고 있는데, 이 방식은 원하는 주파수의 차이를 가지는 두 개의 광 신호를 PD에 입력하여 beat 신호가 원하는 밀리미터파 주파수 성분을 갖게 한다. 무선 통신에 사용할 수 있는 깨끗한 beating 신호를 얻기 위해서 phase-locking이 된 두 개의 광 신호가 필요하다.

이를 위해 SSB 변조, 2-side band 변조, mode-locking, OPLL 및 sideband injection locking 기법들이 사용될 수 있다. 이와 같이 헤테로다인 기법은 광섬유 색분산의 영향을 받지 않을 뿐 아니라, 생성 시킬 수 있는 주파수 대역의 제한을 크게 받지 않는다는 점에서 많은 관심의 대상이 된다. 특히, sideband injection locking을 이용한 방법은 생성하고자 하는 밀리미터파 주파수의 전기 신호가 필요없을 뿐만 아니라, 광 전송시 광섬유 색분산(chromatic dispersion)에 민감하지 않고 phase-noise가 작은 높은 주파수 신호 생성이 용이하다는 특징이 있다. 따라서, 본 연구에서는 sideband optical injection locking 방식을 이용하여 16, 32 GHz 대역의 신호를 광학적으로 생성하였으며, 생성된 신호가 매우 안정적인임을 알 수 있었다.

따라서 본 실험 결과는 다양한 fiber-radio 응용분야에서 sideband injection locking을 이용하여 고품질 millimeter-wave 신호를 생성할 때 주요한 요소가 될 수 있다.

### 참고문헌

- [1] M. Gagnaire, "An overview of broad-band access technologies," *Proc. of IEEE*, vol. 85, no. 12, pp. 1958-1972, 1997.
- [2] U. Gliese, S. Nørskov, and N. Nielsen, "Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1716-1724, 1996.
- [3] R.-P. Braun, "Fibre Raio Systems, Applications and Devices," in Tutorial *European Conferenece on Optical Communication (ECOC'08)*, vol. 2, pp. 87-119, 1998
- [4] G. H. Smith, D. Novak, and Z. Ahmed, "Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 8, pp. 1410-1415, 1997.
- [6] Y.-K. Seo, W.-Y. Choi, and A.-J. Kim, Optical generation of 32 GHz millimeter-waves using side-mode injection-locking of semiconductor lasers, in *Dig. Conference on Optoelectronics and Optical Communications ThC2-5*, pp. 239-240, 2000.

### 저자소개



김정태 (Jung-Tae Kim)

2001년 8월 : 연세대학교 대학원  
전자공학과 박사

1991년 8월 ~ 1996년 2월 : 한국전자  
통신연구원(ETRI)  
선임연구원

2002년 10월 ~ 현재 : 목원대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야: Microwave photonics, Optically fed wireless communication system design, Information security system design, Network Security, ASIC Design.